Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

YATAY YÜK ETKİSİNDE TEK KAZIK DAVRANIŞI: 2D VE 3D ANALİZLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

BEHAVIOR OF A SINGLE PILE UNDER LATERAL LOAD: COMPARISON OF 2D AND 3D ANALYSES

Duygu FİDAN[1], Erol ŞADOĞLU[2]

ÖZET

Açık deniz yapıları gibi özel mühendislik uygulamalarında tek kazık kullanımı oldukça yaygındır. Kazıklar düşey ve eğik yüklere maruz kaldıkları gibi sadece yatay yüklere de maruz kalabilen temel elemanlarıdır. Yatay yükler altında kazık davranışının doğru şekilde belirlenmesi, güvenli ve ekonomik tasarım açısından oldukça önemlidir. Hesaplama kolaylığı ve düşük maliyet avantajı açısından iki boyutlu sayısal analizler tercih edilmesine rağmen, zemin-kazık etkileşimi üç boyutlu olduğundan iki boyutlu analizler davranışı yeterli düzeyde temsil edemeyebilir. Bu çalışmada, yatay yüke maruz kısa ve uzun tek kazıkların davranışının incelenmesi amaçlanmaktadır. Analizler, Plaxis 2D ve Plaxis 3D programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kısa ve uzun kazık davranışı karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Yatay yükleme altında kazık başı deplasmanlarının belirlenmesine yönelik nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca iki boyutlu ve üç boyutlu modellemenin kazık davranışına etkisi incelenmiştir.
Anahtar Kelimeler: *Yatay yük, tek kazık, Plaxis 2D, Plaxis 3D*

ABSTRACT

The use of single piles is quite common in specialized engineering applications, such as offshore structures. Piles are foundation elements that can be subjected to vertical and oblique loads and lateral loads. Accurately determining the behavior of piles under lateral loads is crucial for safe and economical design. Although two-dimensional numerical analyses are preferred due to their computational convenience and lower cost, they may not adequately represent the behavior of soil-pile interaction, which is inherently three-dimensional. This study aims to investigate the behavior of short and long single piles subjected to lateral loads. Analyses were performed using Plaxis 2D and Plaxis 3D. The behavior of short and long piles was compared. Numerical analyses were conducted to determine pile head displacements under lateral loading. Furthermore, the effect of two-dimensional and three-dimensional modeling on pile behavior was investigated.
Keywords: *Lateral load, single pile, Plaxis 2D, Plaxis 3D*

[1] Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, duygu_61-ts@hotmail.com (sorumlu yazar){Yazışma yapılacak yazar.}
[2] Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, esadoglu@ktu.edu.tr

1. GİRİŞ

Kazıklar ve kazıklı temeller, yapısal yükleri daha derin zemin katmanlarına aktarmak için yaygın olarak kullanılır. Kazıklar, dikey ve eğik yüklerin yanı sıra deformasyon davranışlarını ve yük taşıma performanslarını önemli ölçüde etkileyebilecek yatay yüklere de maruz kalmaktadır. Yatay kuvvetler; deprem etkileri, toprak basınçları, rüzgar yükleri, gemi çarpışmaları ve demirleme kuvvetleri, dalga etkileri, eksantrik kolon yükleri, elektrik direklerine etki eden kablo kuvvetleri ve nehir akıntıları tarafından köprü ayaklarına uygulanan hidrolik kuvvetlerden kaynaklanabilmektedir. Köprü ayakları ve demirleme veya ankraj yapıları gibi temellerde tipik olarak tek kazıklar kullanılırken, uygulanan yüklere karşı daha fazla direnç sağlamak için genellikle kazık grupları kullanılır (Whitaker, 1976). Dikey olarak yerleştirilmiş kazıkların yatay yükleme altındaki davranışı, öncelikle kazığın kısa (rijit) veya uzun (esnek) olarak davranmasına bağlıdır. Kazık başlığının serbest başlı veya ankastre başlı olması kazık davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Broms (1964) yöntemi, göçme anındaki yanal zemin basınçlarının pasif Rankine zemin basıncının üç katına eşit olduğunu kabul etmiştir. hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminlerde uygulanan bu yöntem, kısa ve uzun kazıklar için kullanılmaktadır. Serbest ve ankastre başlı kazıkların analizleri de ayrı ayrı ele alınmaktadır. Bir kazığın kısa veya uzun olduğu göreli rijitlik boylarına göre, kohezyonsuz zeminler ve normal konsolide killi zeminler için;

$$T = \left(\frac{EI}{n_h}\right)^{1/5} \tag{1}$$

belirlenmektedir. T göreli rijitlik boyu, E kazığın elastisite modülü, I kazık kesitinin atalet momenti, n_h yatay yatak katsayısı sabitidir. Kısa kazıklar, $L/T \leq 2$ koşulunu, uzun kazıklar da $L/T \geq 4$ koşulu sağlanmalıdır. L, kazığın gömülü uzunluğudur (Prakash ve Sharma, 1990).

Sonlu eleman analizi, hızla gelişen bir yöntem olarak kazık temellerin analizinde kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Literatürde yatay yüke maruz tek kazığın nümerik olarak incelendiği bazı çalışma bulunmaktadır. Farklı zemin koşulları, kazık özellikleri ve sayısal modelleme yaklaşımları dikkate alınarak çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Mısır (2015), yatay yüke maruz kalan kısa kazığın, homojen ve tabakalı kum zeminler içerisinde düşey ve eğik olarak yerleştirilerek laboratuvar model deneyleri yapmıştır. Ayrıca; model deney sonuçları, Plaxis 2D ve Plaxis 3D analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları ile karşılaştırılan üç boyutlu analizlerle modellemede başarılı sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. İki boyutlu sayısal analizlerden elde edilen yaklaşık sonuçların, farklı kazık yerleşim açısı ve zemin durumuna göre, kısa kazığın yatay yük taşıma kapasitesinin belirlenmesinde yeterli uyum gösterdiği görülmüştür. İki ve üç boyutlu sayısal analiz yaklaşımlarının karşılaştırılması, yatay yük altındaki kazık davranışının modellenmesinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılmasına katkı sağlamıştır. Rafa ve ark. (2016), yatay çevrimsel yük etkisindeki mono kazıkların davranışını Plaxis 2D, Plaxis 3D ve ABAQUS 3D kullanarak karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bu çalışmada, kazık davranışını, iki boyutlu sonlu eleman analizlerinin yeterli düzeyde modelleyebildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte nihai yük kapasitesinin üç boyutlu analizlere göre daha düşük sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Abbas ve ark. (2018), yatay yüke maruz kalan tekil bir kazığın davranışını üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanarak araştırmıştır. Kazığın, narinlik oranının (L/D) yatay davranış üzerindeki etkisi göz önüne alınarak; kazık başı yatay deplasmanları ile yatay zemin direnci analiz edilmiştir. Mısır (2020), yatay yüke maruz tek bir çelik boru kazığın davranışını tam ölçekli arazi yükleme deneyi ve sayısal analiz yöntemiyle incelemiştir.

Mersin Uluslararası Limanı sahasında gerçekleştirilen tam ölçekli yatay kazık yükleme deneyi sonuçları, Plaxis 3D sonlu eleman yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Sayısal analiz sonuçlarının deneysel yük–yatay deplasman davranışıyla uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmalar, yatay yüke maruz kalan kazıkların analizinde sonlu eleman yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığını ve farklı modelleme yaklaşımlarının karşılaştırılmasının önemini göstermektedir.

Plaxis 2D ve Plaxis 3D kullanılarak çok sayıda çalışma gerçekleştirilmesine rağmen iki modelleme yaklaşımının karşılaştırıldığı çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı Plaxis 2D ve Plaxis 3D kullanılarak yatay yüklü tek kazığın davranışını karşılaştırmalı olarak incelemektir.

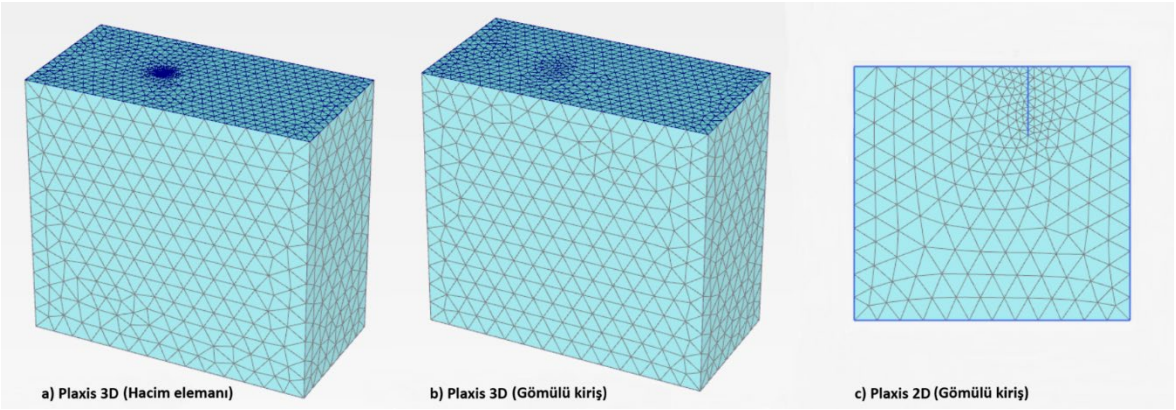
2. NÜMERİK ÇALIŞMALAR

Fidan (2025), deneysel çalışmalardan elde edilen zemin ve kazık parametreleri bu çalışmada yer almıştır. Özellikle, bazı zemin model parametrelerinin tahmininde Brinkgreve vd. (2010) tarafından önerilen ampirik ilişkiler de kullanılmıştır. Analizlerinde kullanılan zemin ve kazık malzeme parametreleri, hem laboratuvar test sonuçlarına hem de literatürde bulunan ampirik ilişkilere dayanarak belirlenmiştir. Deney tankının üç boyutlu sayısal simülasyonu Plaxis 3D programında oluşturulmuş, ayrıca Plaxis 2D analizleri için iki boyutlu sayısal model hazırlanmıştır. Sayısal model Plaxis 3D, 0.995 m × 2.0 m plan boyutları ve 1.84 m toplam zemin yüksekliği ile tanımlanmıştır. Kötü derecelenmiş gevşek çakıllı kum zeminin simülasyonu için Hardening Soil modeli seçilmiştir. Kazık-zemin etkileşiminin sayısal olarak incelenmesi amacıyla farklı kazık uzunluklarına sahip sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Üç boyutlu analizlerde katı (solid) elemanlarla oluşturulan hacimsel kazık modeli ve tek boyutlu kiriş elemandan kazık modellemesi yapılırken, iki boyutlu modellerde sadece tek boyutlu kiriş elemandan kazık modellemesi yapılmıştır. Deneysel çalışmada kazık betonarme olduğundan, Plaxis 3D programının beton (Concrete) modeli seçilmiştir. Deneylerde kullanılan model kazıklar L= 0.50 m ve 1.0 m, D = 0.05 m ve kazıkların donatı oranı %2.86’ tır. L, kazık uzunluğu ve D, kazık çapıdır. Malzeme modeli parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Malzeme modeli parametreleri

	Plaxis 3D (Hacim elemanı)	**Plaxis 3D (Gömülü kiriş)**	**Plaxis 2D (Gömülü kiriş)**
Gevşek çakıllı kum	**Kazık**	**Kazık**	**Kazık**
Pekleşen Zemin (Hardening Soil)	Beton		
Drenajlı	Gözeneksiz	Elastoplastik	Elastoplastik
γ_{unsat} = 15.2 kN/m^3	γ_{unsat} = 24 kN/m^3	γ=24 kN/m^3	γ=24 kN/m^3
E_{50}^{ref} = 14000 kN/m^2	E_{28} = 13×10^6 kN/m^2	E = 13×10^6 kN/m^2	E = 13×10^6 kN/m^2
E_{oed}^{ref} = 14000 kN/m^2	v = 0.15	Önceden tanımlanmış	Önceden tanımlanmış
E_{ur}^{ref} = 42000 kN/m^2	$f_{c,28}$ = 21500 kN/m^2	Masif dairesel kiriş	Masif dairesel kiriş
m=0.8	f_{c0n} = 1	Çap= 0.05 m	Çap = 0.05 m
c'_{ref} = 0.7 kN/m^2	f_{cfn} = 1	σ_y=22360 kN/m^2	$L_{aralığı}$ = 1 m
ϕ = 33°	f_{cun} = 0.9		M_p = 0.2740 kN m
ψ= 3°	$G_{c,28}$ = 13 kN/m^2		N_p = 0.1 kN
v'_{ur} =0.2	ϕ_{max} = 25°		
K_0^{nc} = 0.4554	ψ= 0		
R_f = 0.96	γ_{fc} = 1		
	$f_{t,28}$ = 21500 kN/m^2		
	f_{tun} = 0.8		
	$G_{t,28}$ = 13 kN/m^2		
	γ_{ft} = 1		
	ε_{cp}^{p} = -0.01		

Kazık-zemin sisteminin sonlu eleman ağı Şekil 1'de gösterilmiştir. Plaxis 3D hacim elemanı (Volume) modelinde, zemin ve kazık üç boyutlu 10 düğüm noktalı tetrahedral sonlu elemanlar ile modellenmiştir. Bu modelleme ile kazık, hacimsel (solid) bir yapı olarak tanımlandığından hem kazık hem de zemin sonlu eleman ağına eklenmiştir. Sayısal sonuçlar üzerindeki ağ yoğunluğunun etkisini değerlendirmek için bir ağ duyarlılık analizi yapılmıştır. Plaxis 2D Embedded Beam modelinde, gömülü kiriş elemanı olarak modellenmiştir. Bu nedenle sonlu eleman ağı (mesh) yalnızca zemin ortamında oluşturulmuş, kazığın kendisi için ayrı bir hacimsel mesh üretilmemiştir. Plaxis 3D gömülü kiriş (Embedded Beam) modelinde, kazık hacim elemanı yerine gömülü kiriş elemanı kullanılarak tanımlanmıştır. Bu modellemede zemin hacmi üç boyutlu 10 düğüm noktalı tetrahedral sonlu elemanlarla çözüm ağı oluşturulmuş (meshing), kazığın kendisi için hacimsel sonlu eleman ağı oluşturulmamıştır.

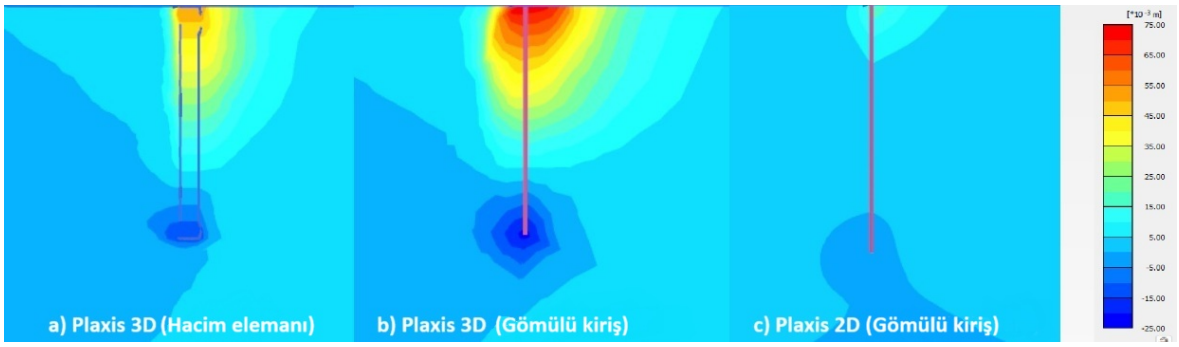


Şekil 1. Zemin-kazık sisteminin sonlu elemanlar ağı

3. PLAXIS 2D ve PLAXIS 3D ANALİZLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

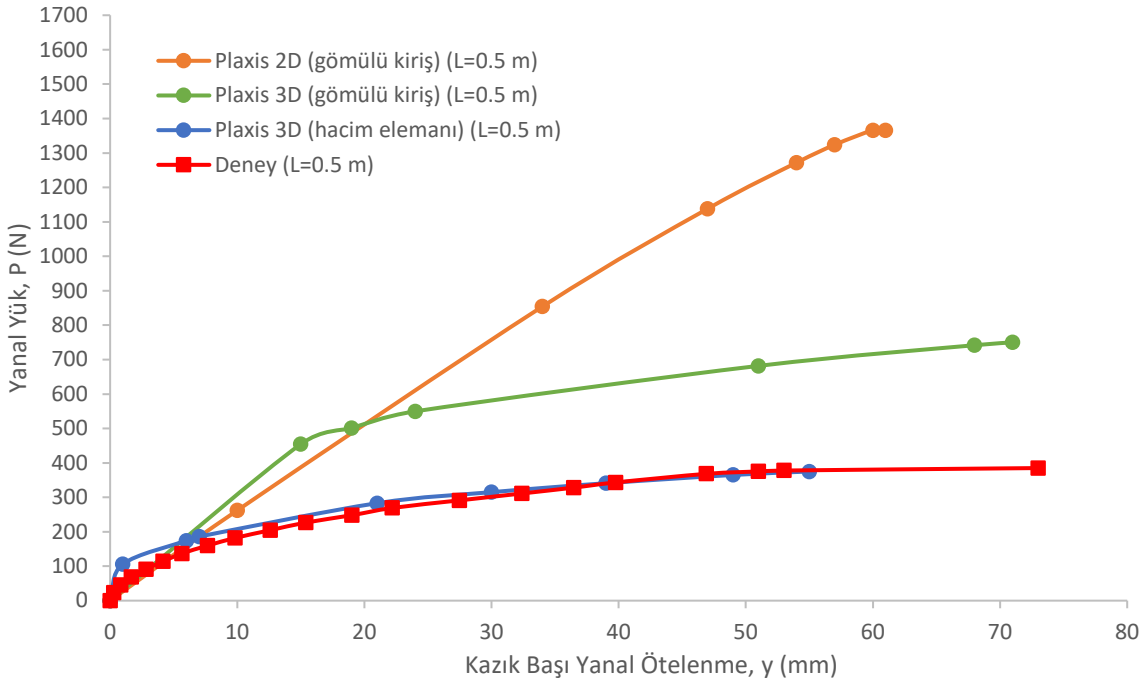
Kazıkların (L=0.5 m ve L=1 m) yatay yük altındaki davranışları nümerik çalışmalar yapılarak araştırılmıştır. Fidan (2025), deneysel çalışmada, kazıklar serbest başlı kazıklardır ve zemin yüzünden yatay yüklenmişlerdir. Kum zeminde, gevşek durumda yatay yüklere maruz kalan kazıklar üzerinde yapılan nümerik çalışmalarla deneysel çalışmalardaki sonuçların hangisinin daha uyumlu olarak temsil edildiği araştırılmıştır.

Şekil 2'de L=0.5 m olan tek kazığın yatay yer değiştirmeleri üç farklı sonlu elemanlar modelleme tekniğiyle karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Yatay yükün etkisiyle oluşan maksimum deformasyonlar her üç modelde de zemin yüzeyine yakın, kazığın üst kısmında yoğunlaştığı görülmektedir. Kazığın üç boyutlu katı bir cisim olarak ele alındığı Plaxis 3D (hacim elemanı) modelinde yer değiştirme geçişleri kazık yüzeyi boyunca gerçekçi yayıldığı görülmektedir. Gömülü kiriş kullanılan 3D modelde ise maksimum deformasyon alanı daha geniş olduğu görülmektedir. İki boyutlu Plaxis 2D (gömülü kiriş) modelde yatay deformasyon (yer değiştirme) daha dar bir alanda sınırlı kaldığı görülmüştür. Kazık ve zeminin incelenmesiyle kazığın kısa kazık gibi rijit olarak dönme hareketine sahip olduğu, kazığın üst kısmının hareket ettiği görülmektedir. 3D modeller (hacim elemanı ve gömülü kiriş) rijit dönme hareketini geniş bir hacimde, 2D modelde (gömülü kiriş) ise bu etki daha dar alanda olduğu tespit edilmiştir.



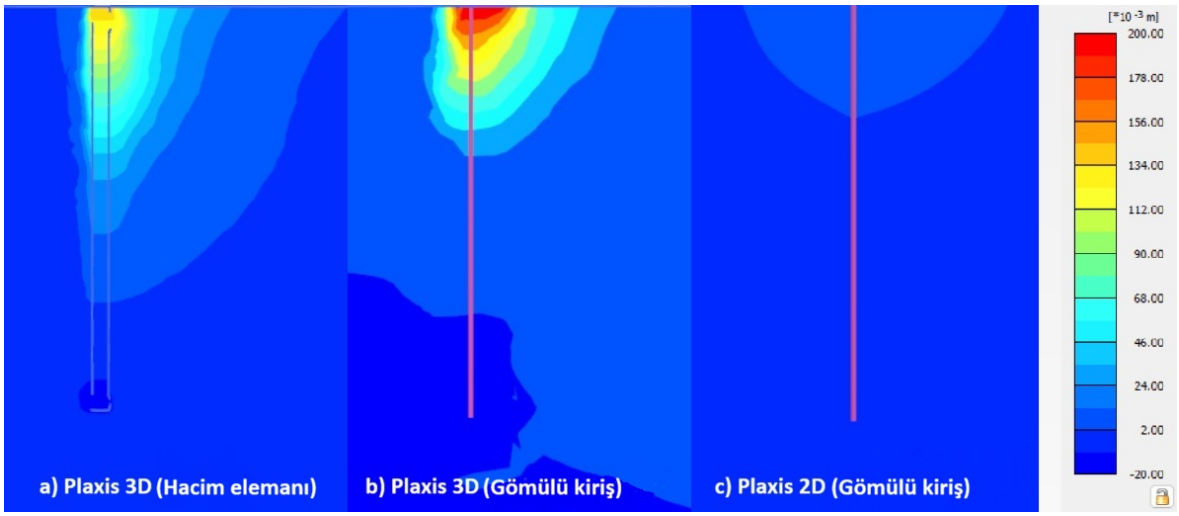
Şekil 2. L=0.5 m olan kazıkların yanal yer değiştirmeleri, a) Plaxis 3D (hacim elemanı) b) Plaxis 3D (gömülü kiriş) c) Plaxis 2D (gömülü kiriş)

Şekil 3'te yatay yüke maruz L=0.5 m tek kazığın yanal yük-kazık başı yanal ötelenme davranışı deneysel ve sayısal yöntemlerle karşılaştırılmalı olarak verilmektedir. Deney sonuçları ve Plaxis 3D (hacim elemanı) modellemesi, rijitlik ve nihai taşıma kapasitesi açısından uyumlu olduğu belirlenmiştir. Plaxis 2D (gömülü kiriş) ve Plaxis 3D (gömülü kiriş) modellerinde ise yatay yük arttıkça deneysel verilerden belirgin şekilde uzaklaştığı görülmektedir. Plaxis 3D (hacim elemanı) modelin eğri sürekliliğini tam olarak yansıttığını, Plaxis 2D (gömülü kiriş) ve Plaxis 3D (gömülü kiriş) modellerinde ise gerçeğe aykırı olarak grafik çizgisine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3. L=0.5 m olan kazıkların Yanal yük-Kazık başı yanal ötelenme

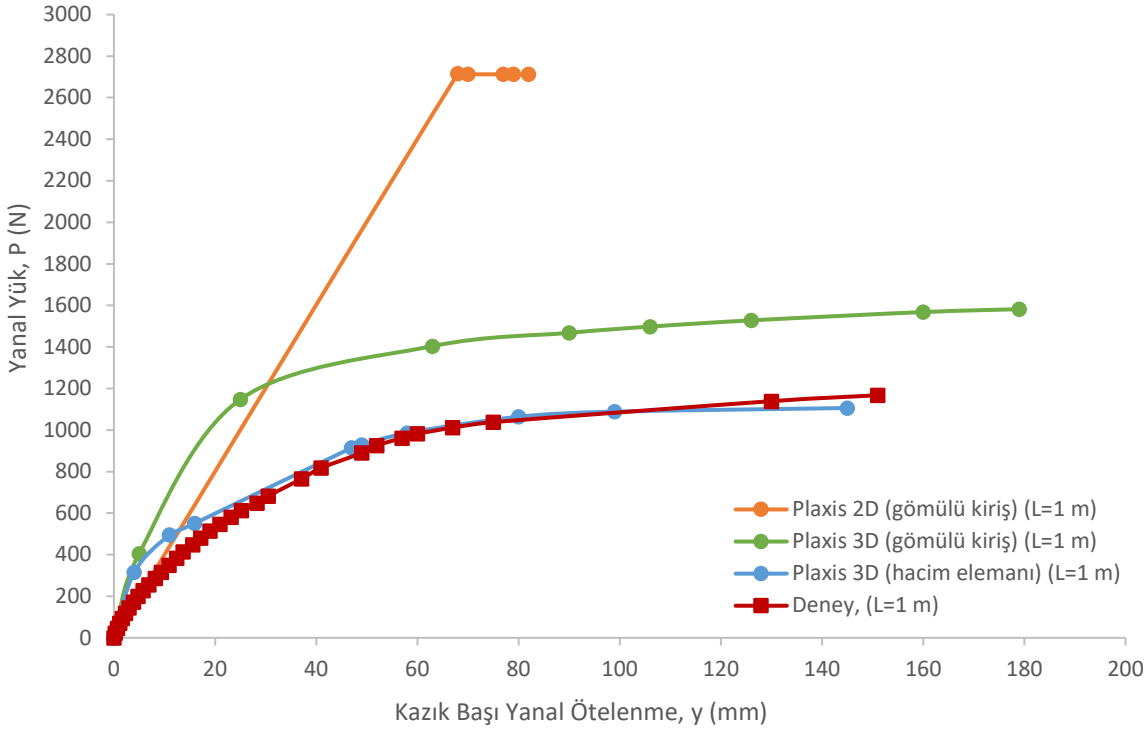
Şekil 4'te L=1 m olan kazıkların yatay yer değiştirmeleri üç farklı sonlu elemanlar modelleme tekniğiyle karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Kazığın deformasyonunun kazık alt uç kısmına ulaşmaması ve kazık alt uç kısmının tamamen hareketsiz kalması uzun kazık gibi kazık davranışına sahip olduğunu göstermektedir. Plaxis 3D (hacim elemanı) ve Plaxis 3D (gömülü kiriş) modellerinde zeminin gerçekçi üç boyutlu davranışını simüle ettiği görülmüştür. İki boyutlu modelde ise deplasman alanı daha dar alanda olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4. L=1 m olan kazıkların yanal yer değiştirmeleri, a) Plaxis 3D (hacim elemanı) b) Plaxis 3D (gömülü kiriş) c) Plaxis 2D (gömülü kiriş)

Şekil 5'te yatay yüke maruz L=1 m tek kazığın yanal yük-kazık başı yatay ötelenme davranışı deney sonuçları ile üç farklı sayısal modellemelerin karşılaştırıldığı grafik

verilmektedir. Plaxis 3D (hacim elemanı) modelin deneysel verilerle birebir uyum yakaladığı görülürken, Plaxis 2D (gömülü kiriş) ve Plaxis 3D (gömülü kiriş) zemin-kazık etkileşimini tam olarak yansıtamadığını belirlenmiştir.



Şekil 5. L=1 m olan kazıkların Yanal yük-Kazık başı yanal ötelenme

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan yatay yüke maruz serbest başlı tek kazıkların (L=0.5 m ve L=1 m) davranışı deneysel ve sayısal modellemeler ile Plaxis 3D (hacim elemanı), Plaxis 3D (gömülü kiriş), Plaxis 2D (gömülü kiriş) karşılaştırılarak araştırılmıştır. Gevşek çakıllı kum zeminde, kazık boyunun yatay yük taşıma kapasitesine etkileri de incelenmiştir. Yapılan bu çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Yatay yüke maruz kalan farklı uzunluklardaki (L=0.5 m ve L=1 m) tek kazıkların Plaxis 3D (hacim elemanı) modeli ile deneysel yatay yük-kazık başı yatay ötelenme eğrilerini gerçeğe en yakın şekilde simüle eden en başarılı yaklaşım olmuştur.

Nümerik analiz sonuçları, gömülü kiriş modellemesinin hem Plaxis 2D hem de Plaxis 3D zemin-kazık etkileşimini yeterli düzeyde modelleyemediğini, deneysel verilerden belirgin şekilde farklılaştığını göstermektedir.

Kazık uzunluğunun artmasıyla (L=0.5 m'den L=1 m'ye) yatay yük taşıma kapasitesi artmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası FDK-2023-10478.

KAYNAKLAR

Abbas, J. M., Chik, Z., ve Taha, M. R. (2018), "Modelling and Assessment of a Single Pile Subjected to Lateral Load", Studia Geotechnica et Mechanica, Vol 40, No 2, 93–104.

Brinkgreve, R.B.J., Engin, E. ve Engin H.K. (2010), "Validation of Empirical Formulas to Derive Model Parameters for Sands", Numerical Methods in Geotechnical Engineering – NUMGE 2010, 137–142.

Broms, B.B. (1964a), "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol 90, No 2, 27-63.

Broms, B.B. (1964b), "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol 90, No 3, 123-156.

Fidan, D. (2025), "Kum Zeminde Yatay Yüke Maruz Kalan Serbest Başlı Kazıklarda Kazıklar Arası Etkileşim", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Trabzon.

Whitaker, T. (1976), The Design of Piled Foundations, 2nd Edition, Pergamon Press, London.

Mısır, G. (2015), "Yanal Yüklü Kazıkların Farklı Zemin ve Yükleme Koşullarında Analizi", Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Mısır, G., Laman, M. (2020), "Numerical Modelling of Full-Scale Lateral Load Test", European Journal of Science and Technology, No 18, 454–464.

Prakash, S., Sharma, H. D. (1990), "Pile Foundations in Engineering Practice", Wiley.

Rafa, S. A., Rouaz, I., Bouaicha, A., ve Kahlouche, F. (2016), "Comparison Between 2d and 3d Analysis of a Mono-Pile under Lateral Cyclic Load", 5ème Congrès Maghrébin en Ingénierie Géotechnique (5th CMIG'16), Marrakech, Morocco.