



Araştırma Makalesi

HELİSEL KAZIKLARDA NİHAİ BASINÇ TAŞIMA GÜCÜNÜN ÇARPAN ELASTOPLASTİK ANALİZ İLE BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF ULTIMATE COMPRESSIVE BEARING CAPACITY OF HELICAL PILES BY MULTIPLIER ELASTOPLASTIC ANALYSIS

Betül KESEROĞLU^{1*}  0000-0001-9121-0510, Murat ÖRNEK²  0000-0002-0809-2531, Yakup TÜREDİ³  0000-0001-9197-5214, Muhammet DİNGİL⁴  0000-0002-8681-478X

Makale Bilgileri	Özet
Anahtar Kelimeler: helisel kazık, kohezyonsuz zemin, gevşek kum, eksenel yükleme, sayısal analiz, çarpan elastoplastik	Eksenel basınç yüküne maruz helisel kazıklarda nihai taşıma gücü; silindirik kayma ve ayrık taşıma gücü yöntemleri denklemlerinden, kurulum torku değeri üzerinden ve helisel kazıklara ait yük-deplasman eğrilerinden belirlenebilmektedir. Bu çalışmada, eksenel basınç yükü etkisi altında kohezyonsuz gevşek zemine gömülü helisel kazıklar; sayısal olarak modellenerek sonlu elemanlar yöntemi çarpan elastoplastik analiz (MEPA) ile çözümlenmiştir. Farklı helis çapına (D), aralığına (s) ve sayısına (N) sahip helisel kazıklar, iki boyutlu eksenel simetri yaklaşımıyla OPTUMG2 geoteknik tasarım programında modellenmiştir. Her bir deney senaryosunda, yük artımsal olarak eksenel basınç uygulanan helisel kazıklar için yük-deplasman eğrileri elde edilmiş ve %5D sınır deplasman ölçütüne göre helisel kazıkların nihai basınç taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Sayısal çözümlemelerde, helis geometrisindeki değişimlerin taşıma gücüne etkisi; deneysel sonuçlarla benzer bir eğilim sergilemiş; ancak deneylerde gözlemlenen daha yüksek kapasite artışlarının, gevşek zemindeki kurulum kaynaklı yerel sıkılaşma etkisinden ileri geldiği değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, gevşek kum zemin için yapılan analizlerde sayısal modelin, deneysel verilerle ($R^2=0.81$) ve analitik sonuçlarla ($R^2=0.89$) yüksek düzeyde bir korelasyon gösterdiği belirlenmiştir.
Article Info	Abstract
Keywords: helical pile, cohesionless soil, loose sand,	The ultimate bearing capacity of helical piles subjected to axial compression load can be determined from cylindrical shear and individual bearing capacity methods equations, the installation torque value, and the load-displacement curves of the piles. In this study, the helical piles

^{1*} İskenderun Teknik Üniversitesi, betulkeseroglu.lee21@iste.edu.tr

² İskenderun Teknik Üniversitesi, murat.ornek@iste.edu.tr

³ İskenderun Teknik Üniversitesi, yakup.turedi@iste.edu.tr

⁴ İskenderun Teknik Üniversitesi muhammetdingil.mfbl9@iste.edu.tr

Sorumlu Yazar: betulkeseroglu.lee21@iste.edu.tr

Başvuru tarihi:15.09.2025; Düzeltme Tarihi 08.10.2025; Kabul Tarihi 21.10.2025

axial loading, numerical analysis, multiplier elastoplastic embedded in cohesionless loose soil under the effect of axial compression load were numerically modeled and analyzed using finite element method multiplier elastoplastic analysis (MEPA). The helical piles with different helix diameters (D), spacings (s), and numbers (N) were modeled in OPTUM G2 geotechnical design program using a two-dimensional axisymmetric approach. For each test scenario, the load-displacement curves were obtained for the helical piles subjected to incrementally applied axial compression loads, and the ultimate bearing capacities were calculated based on 5%D limit displacement criterion. In the numerical analyses, the effect of changes in helix geometry on bearing capacity exhibited a similar trend to experimental results; however, the higher capacity increases observed in experiments were attributed to the installation-induced local densification effect in the loose soil. Consequently, the analyses performed for loose sand demonstrated that the numerical model exhibits a high level of correlation with both experimental data ($R^2=0.81$) and analytical results ($R^2=0.89$).

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan helisel kazıklar; merkezinde bir çelik şaft ile şafta belirli aralıklarla kaynaklanmış bir veya daha fazla sarmal taşıma plakasından oluşan, zeminlere kuvvet momenti uygulanarak döndürülmek suretiyle yerleştirilen ve yapısal yükleri, zayıf zeminlerinden daha mukavim derin tabakalara aktarma görevi üstlenen temel sistemleridir. Helisel kazık, vidalı kazık veya helisel ankraj olarak da bilinen helisel kazık temel sistemleri; şişen zeminler, zayıf zeminler, yamaçlar, kıyı alüvyonları, dere kenarları ve yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu projeler için kullanımı son derece uygun temel elemanlarıdır (İbrahim ve Karkush, 2025). Tork kaynağı olarak hidrolik motorlar vasıtasıyla döndürülerek zeminlere kurulan helisel kazıkların montajı, oldukça düşük seviyede gürültü ve titreşim üretmesiyle dikkat çekmektedir (Akbari Zare ve ark., 2025).

Helisel kazıklar; kısa inşaat süresi, daha az araç-gereç gereksinimi, çevre ve ekosistem üzerindeki asgari etkisi, uzun vadeli yük taşıma kapasiteleri, doğa dostu ve geri dönüştürülebilir nitelikte olabilme gibi öne çıkan özelliklere sahiptir (Zhang ve ark., 2024a). Son yıllarda helisel kazıklar; enerji iletim kuleleri, köprüler, güneş enerjisi santralleri ve konut-ticari binalar gibi çeşitli temel uygulamalarında, önemli ölçüde ün kazanmıştır (Türedi ve Örnek, 2020; Hao ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2024b). Bunun en temel gerekçesi ise helisel kazıkların; basınç, çekme, yanal gibi farklı yükleme koşullarında, kil, kum, buzul gibi çok çeşitli zemin türlerinde yapısal destek olarak kullanılabilmesidir (Türedi, 2023). Literatürde, basınç yükü altındaki davranışları; deneysel, analitik ve sayısal yöntemlerle irdelendiği görülen helisel kazıkların, bu işlevinin yanı sıra çekme ve yanal yüklere karşı da mukavemet sağlayan çok yönlü bir temel elemanı olarak görev yapabilmektedir (Türedi ve ark., 2023).

Geoteknik mühendisliğinde, yapıların güvenli ve ekonomik tasarımı için kritik olan farklı temel tiplerinin, özellikle şevli veya kohezyonsuz zeminler gibi karmaşık koşullar altındaki statik ve sismik yük taşıma kapasitelerini doğru bir şekilde belirleyebilmek için zaman içerisinde çok sayıda yöntem geliştirilmiştir (Mousavi ve Ashtiani, 2025). Helisel kazıklar için ise eksenel basınç yükü etkisi altında nihai taşıma kapasiteleri; teoride silindirik ve ayrıık taşıma gücü denklemlerinden, arazide yerinde kurulum torku değerinden ve kazıklara ait deneysel veya sayısal yollarla elde edilmiş yük-deplasman eğrilerinden olmak üzere çok farklı yöntemlerle tespit edilebilmektedir. Helisel kazıklarda analitik eksenel basınç kapasitesi hesabı, temel olarak silindirik kayma yöntemi ve ayrıık taşıma gücü yöntemi olarak iki şekilde incelenmektedir (Adams ve Klym, 1972; Mitsch ve Clemence, 1985; Perko, 2009).

Zemin mekaniği ilkelerini esas alan bu ayırım, şafta tutturulmuş helisel plakaların aralarındaki mesafeye bağlı olarak helis bazında tekil veya grup davranışı sergilemesi esasına dayanmaktadır (Türedi, 2021). Helisel kazıkların eksenel taşıma gücü, kurulum torku (T) ile ampirik bir katsayı olan tork faktörünün (K_T) çarpılmasıyla da belirlenebilmektedir. Hoyt ve Clemence (1989) tarafından ilk kez ortaya koyulan ve eksenel taşıma gücü-zemine kurulum torku ilişkisini ifade eden tork faktörü (K_T); daha sonrasında Perko (2009) tarafından şaft çapına bağlı değişen bir üstel denklem ile temsil edilmiştir. Helisel kazıklarda nihai basınç kapasitesi; son olarak, basınç yüküne maruz kazıklardan elde edilmiş yük-deplasman eğrilerinden yapılan okumalarla tespit edilebilmektedir. Helisel kazıkların eksenel basınç kapasitesinin tayininde, sadece helis çapına (D) bağlı sınır deplasmanlar dikkate alınarak

Kerseroğlu ve ark.¹

yük-deplasman eğrilerinden hesaplanan %5 (FHWA) ve %10 (ISSMFE) limit deplasman kriterleri yer almaktadır. Buna ek olarak, helisel kazık nihai basınç taşıma güçleri; helis çapına (D) ve elastik deformasyona (PL/EA) bağlı olarak yük-deplasman ilişkisinden (Livneh & El Naggar, 2008) ve (Davisson, 1972) göçme kriterleriyle de belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada, değişen helis çapı (D), aralığı (s) ve sayısı (N) değerleri olan, kohezyonsuz gevşek zemine gömülü model helisel kazıkların aksel basınç yükü altındaki davranışı; OPTUMG2 geoteknik tasarım programında iki boyutlu aksel simetri geometrik indirgeme yaklaşımıyla sayısal olarak modellenmiştir. Aksel basınç yüküne maruz helisel kazıkların nihai taşıma kapasiteleri; sonlu elemanlar yöntemi çarpan elastoplastik analiz ile elde edilen yük-deplasman eğrilerinde, %5D limit deplasman kriteri esas alınarak yapılan okumalara göre tespit edilmiştir.

2. MODEL

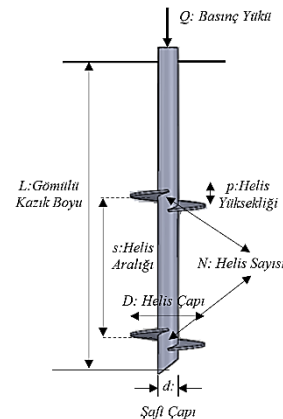
(Türedi, 2021) tarafından paylaşılan gevşek kum zemine gömülü ve basınç yüküne maruz model helisel kazıkların yapısal parametreleri ve laboratuvar deneyi sonuçları; bu çalışma içerisinde, sayısal modellemede kaynak olarak esas alınmıştır. Gevşek kum zeminlerde basınç yükü etkisi altında, on bir farklı nitelikteki laboratuvar deneyi; doğrulama amacıyla OPTUM G2 (2025) geoteknik tasarım programı içerisinde kurgulanmıştır. Türedi (2021) tarafından sunulan laboratuvar deneyleri, İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Gevşek kum zemini elde etmek için yağmurlama tekniği kullanılarak deney kasası içerisinde yukarı aşağı rahatlıkla hareket edebilen 5x5mm göz açıklığına sahip bir elek vasıtasıyla kum zemin 5 cm yükseklikten serbest bırakılarak %30 rölatif sıklık elde edilmiştir (Türedi, 2021). Bu deneylerde yüklenen model helisel kazıklar ile laboratuvar deney düzeneği görüntüleri Şekil 1'de; değişen helis çapı (D), aralığı (s) ve sayısı (N) değerlerine sahip helisel kazıkların deney planı ise Tablo 1'de paylaşılmıştır.



Şekil 1. Bu çalışmada referans alınan laboratuvar deneylerinden örnek görseller (Türedi, 2021)

Tablo 1. Deneylere özgü helisel kazıkların tasarım nitelikleri

Deney No	D (mm)	N	s/D
2	60	1	-
3	80	1	-
4	100	1	-
5	120	1	-
6	100	2	1
7	100	2	1.5
8	100	2	2
9	100	2	2.5
10	100	2	3
11	100	3	1.5
12	100	3	2



NOT: Deney No: 1 (düz şaft) bu çalışmaya eklenmemiştir ve tüm deneyler için $L=600$ mm, $d=22$ mm ve $p=0.3D$ mm

OPTUM G2 yazılımı; sonlu elemanlar yöntemini esas alan, iki boyutlu düzlem gerilme ve aksel simetri geometrik idealizasyonlarını destekleyen, geniş bir zemin malzeme bünye modeli kütüphanesi sunan ve başta limit analiz olmak üzere çarpan elastoplastik, zemin su akışı, konsolidasyon ile kohezyon-içsel sürtünme açısı azaltma gibi çözümlmeleri bütünleşik olarak gerçekleştirebilen ileri seviye bir geoteknik tasarım programıdır. OPTUM

Kerseroğlu ve ark.¹

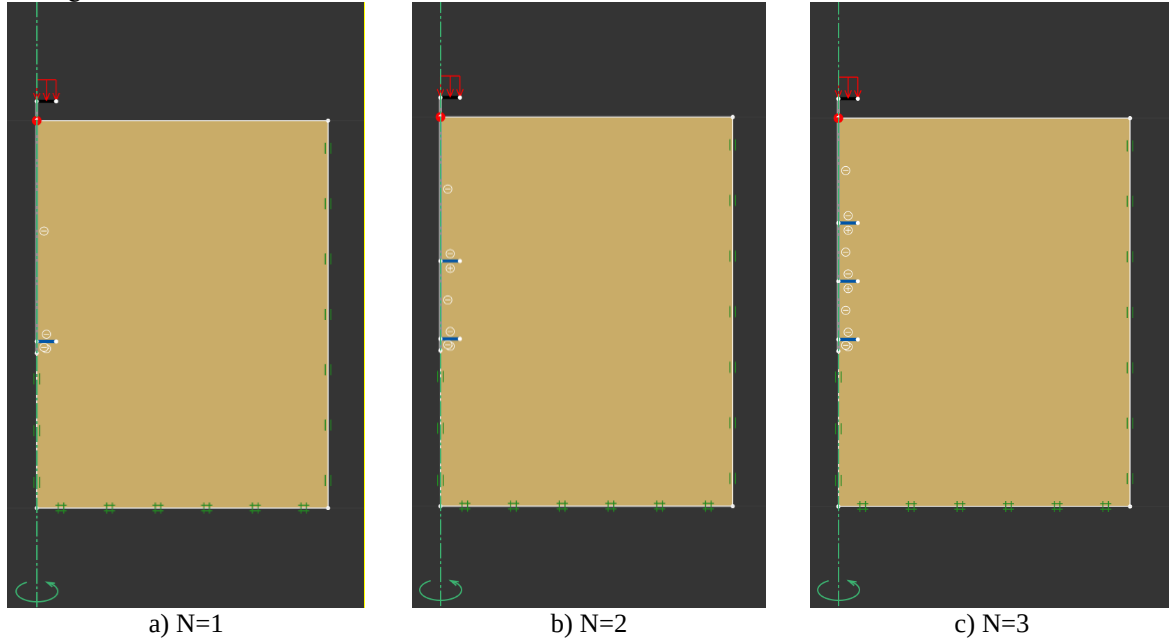
G2’de bulunan doğrusal olmayan çözümleme biçimlerinden biri de sonlu elemanlar yöntemi çarpan elastoplastik analizidir (Krabbenhøft ve ark., 2016). Geoteknik mühendisliğinde, basit ve karmaşık problemlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar çözümlemesi için sonlu eleman boyutu, bünye modeli, yükleme türü ve sınır koşulları gibi hususlar hayati bir rol oynamaktadır (Chavan, 2024). Sonlu elemanlar limit analizinde ise bu yöntemin esasında yer alan üst-alt sınır yaklaşımındaki temel sonlu eleman denklemleri, gelişigüzel akma ölçütlerine adapte edilebilir bütünsel bir denklemi temsil etmektedir (Krabbenhøft, 2023). Sonlu elemanlar limit çözümlemesi ile doğrusal olmayan elastoplastik çözümlemenin birleşimi olan çarpan elastoplastik analiz; sonlu elemanlar modelindeki artımlı yüklerin göçme anına dek büyütüldüğü ve her elastoplastik adım için yüklere karşılık gelen deformasyonların hesaplandığı özel bir tekniktir. OPTUM G2 içerisinde, çarpan elastoplastik analiz; ağ dağılımı algoritması ile entegre bir çözümleme yöntemi olarak yer almaktadır (Stathas ve ark., 2023).

Bu çalışmada, Tablo 1’de yer alan deney planı; sırasıyla OPTUM G2’de çarpan elastoplastik analiz modunda modellenmiştir. Sayısal modellerde ortak girdiler olan ve Türedi (2021) tarafından paylaşılan kohezyonsuz gevşek zemin ve model helisel kazık geoteknik tasarım verileri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Çarpan elastoplastik analizler için girilen geoteknik tasarım verileri

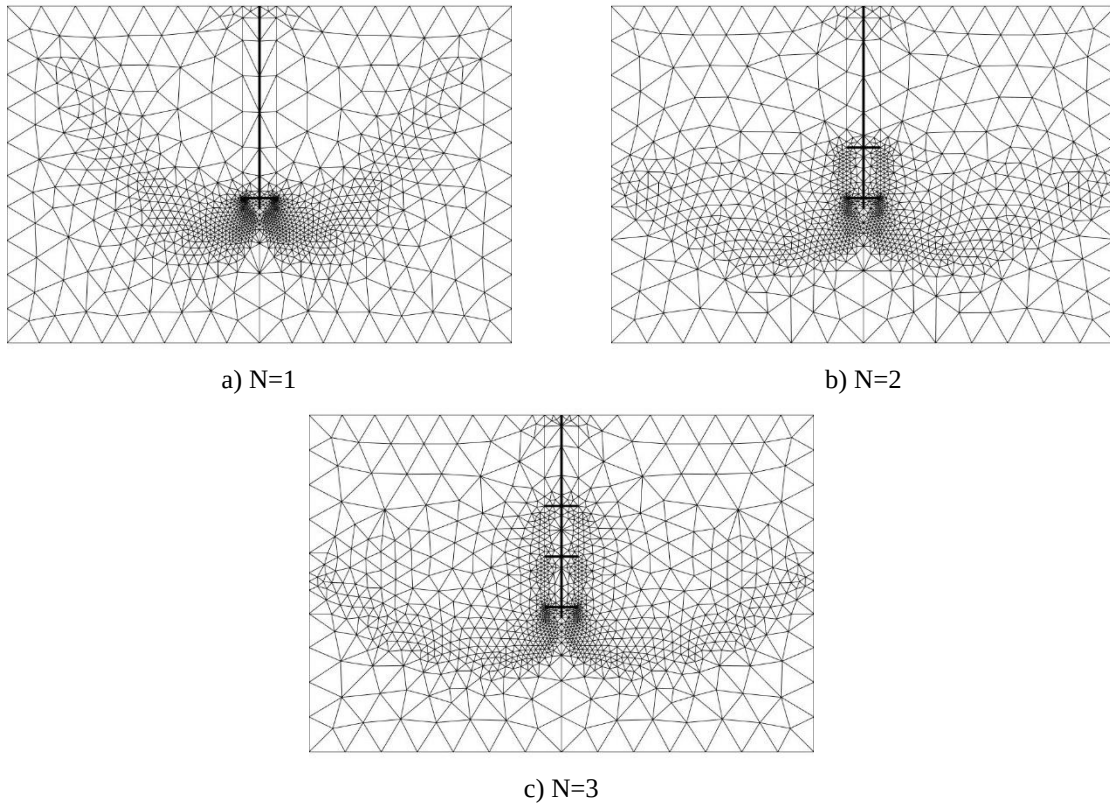
Değişken	Değer
Zemin malzeme türü	Gevşek kum
Zemin malzeme modeli	HMC (Elasto-Plastik)
Kohezyon katsayısı (c), kPa	0
İçsel sürtünme açısı (ϕ), °	30
Referans gerilme düzeyi drenajlı üç eksenli sekant rijitlik modülü (E_{50}^{ref}), MPa	9
Referans gerilme düzeyi boşaltma-tekrar yükleme rijitlik modülü (E_u^{ref}), MPa	27
Referans gerilmesi (p^{ref}), kPa	100
Gerilme bağımlılığı üssü – uyum parametresi (m)	0.68
Poisson oranı (ν)	0.3
Kuru birim hacim ağırlık (γ_k), kN/m ³	15.23
Doygun birim hacim ağırlık (γ_d), kN/m ³	18.00
Kazık malzeme türü	Çelik
Kazık malzeme modeli	EBK (Elasto-Plastik)
Kazık Young modülü (E_p), MPa	2E+05
Kazık akma gerilmesi (σ_0), MPa	180

Bu çalışma içerisinde kurulan tüm sonlu elemanlar modellerinde, Tablo 2’de paylaşılan geoteknik tasarım verileri ortak olarak girilmiştir. Helisel kazık-kohezyonsuz zemin etkileşimini dikkate alacak şekilde, kazık ile zemin arasındaki tüm etkin temas yüzeyleri için bir etkileşim arayüzü tanımlanarak, her modelde, uygun bir mukavemet azaltma faktörü atanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi çarpan elastoplastik analiz modunda, geometrik idealizasyon yaklaşımı olarak iki boyutlu eksenel simetri tercih edilmiştir. Sınır koşulları kapsamında, her modelin tabanı her yönde sabitlenirken, yan yüzeylerde yatay hareketler kısıtlanarak yalnızca düşey yer değiştirmeye olanak tanınmış ve zemin yüzeyi de tamamen serbest bırakılmıştır. Şekil 2’de farklı helis sayısı (N) için oluşturulan modeller, örnek olarak gösterilmiştir.



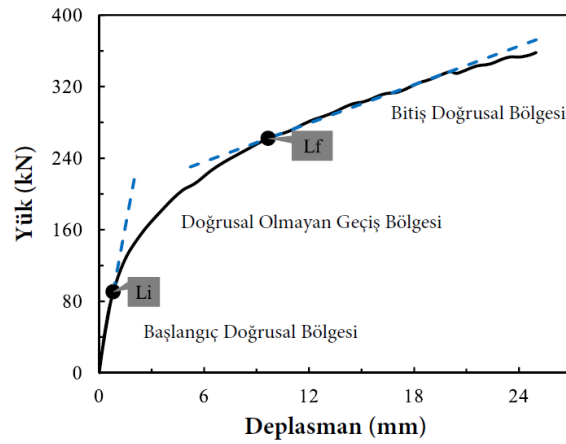
Şekil 2. Tek, çift ve üç helisli kazıkların sayısal modelleri

Çarpan elastoplastik analizlerde, ağ dağılımı algoritması olarak otomatik ağ uyarlaması seçilmiştir. Ağ uyarlaması; sayısal çözümlemelerde hesaplama hatasını en aza indirgeyerek çözüm doğruluğunu artırmak amacıyla kullanılan, çözüm sonuçlarına göre sonlu elemanlar ağının yerel olarak sıklaştırıldığı ya da seyrekleştirildiği dinamik bir en iyileştirme tekniğidir. Ağ uyarlaması, diğer bir ifadeyle, sonuçların doğruluğunu güvence altına almak amacıyla, çözüme bağlı olarak ağ yapısını otomatik olarak sıkılaştıran ya da seyrekleştiren ve bu sayede hesaplama süresini düşüren bir yöntemdir (Shamsuddin ve ark., 2023). OPTUM G2 yazılımında, tipik olarak üst sınır-alt sınır çözümleri için entegre bir şekilde ağ uyarlaması tekniği yer almaktadır (Dalal ve ark., 2025). Tek, çift ve üç helisli kazıklar için basınç yüklemesi durumunda otomatik ağ uyarlaması sonuçları Şekil 3'te paylaşılmıştır.



Şekil 3. Helis sayısına göre değişen otomatik ağ uyarlaması sonuçları

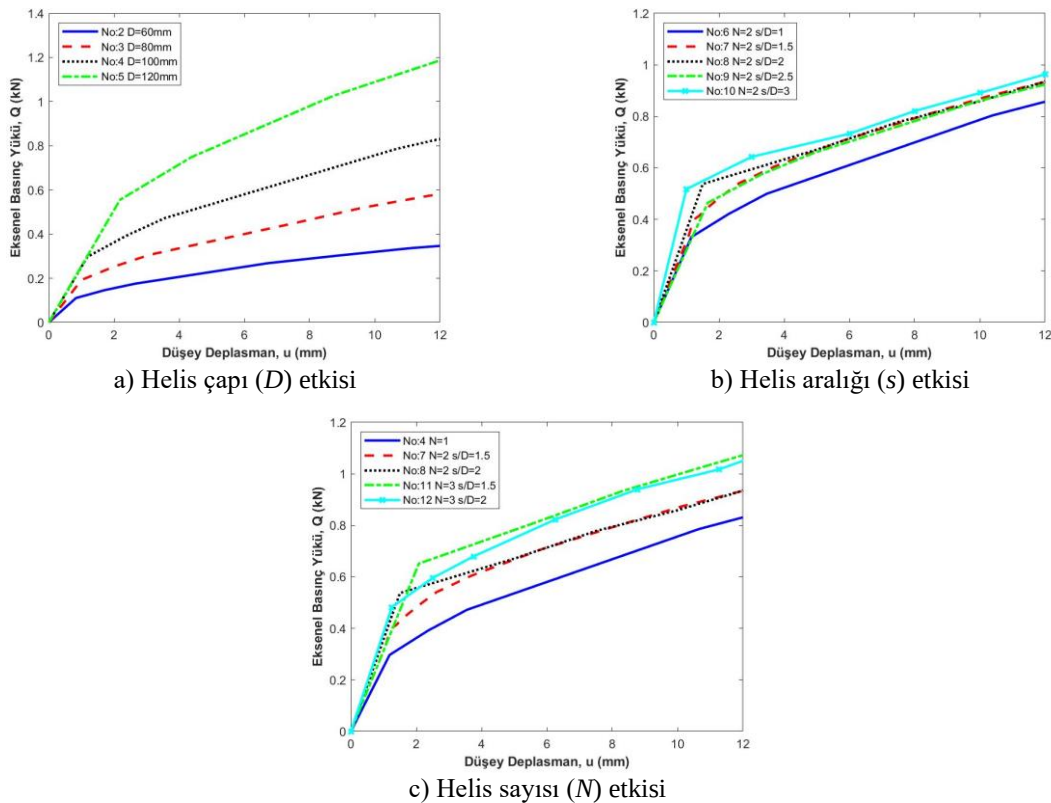
Bu çalışma içerisinde oluşturulan sonlu elemanlar modelleri için yapılan çözümlemeler sonucunda, eksenel basınç yükü etkisi altındaki helisel kazıkların klasik yük-deplasman karakteristiğine ulaşılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Eksenel basınca maruz helisel kazıkların klasik yük-deplasman davranışı (Gil-Hernandez ve ark., 2025)

3. ÇÖZÜMLEME

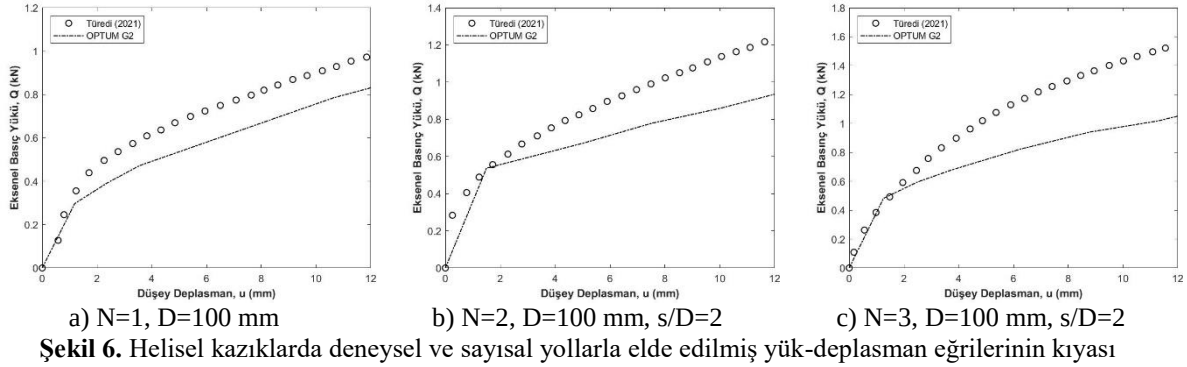
Tablo 1’de yapısal nitelikleri sunulan, farklı helis çapı (D), aralığı (s) ve sayısı (N) değerlerine sahip on bir adet model helisel kazık, Tablo 2’deki geoteknik parametreler kullanılarak, sonlu elemanlar yöntemi çarpan elastoplastik analizi ile çözümlenmiştir. OPTUM G2 geoteknik tasarım programında, modellenen her bir helisel kazık için eksenel basınç yükü artımsal olarak uygulanmıştır ve her analiz için helisel kazıklara ait yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Helisel kazıkların farklı yapısal değişkenleri için yük-deplasman eğrileri

Kerseroğlu ve ark.¹

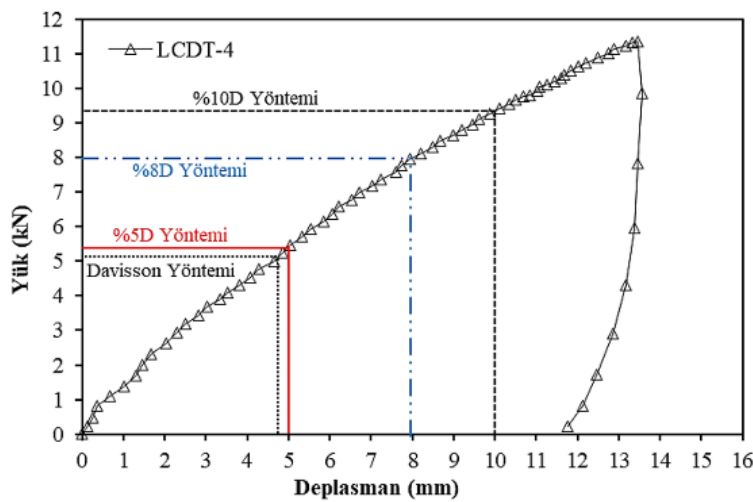
Tablo 1’deki on bir adet farklı kazık tasarımı için elde edilen ve Şekil 5’te parametre etkisi esaslı olarak sunulan sayısal yük-deplasman eğrileri; Türedi (2021) tarafından gerçekleştirilmiş deneysel yük-deplasman eğrileriyle ayrıca karşılaştırılmış ve her bir deney senaryosu için sayısal-deneysel yük-deplasman davranışları arasında kabul edilebilir bir tutarlılık görülmüştür. Buna örnek olarak, helis sayısı değişimini esas alan analizler için sayısal ve deneysel yük-deplasman eğrileri kıyaslaması Şekil 6’da verilmiştir.



4. BULGULAR

Helisel kazıkların nihai eksenel basınç taşıma gücünün tespitinde, yük-deplasman eğrileri üzerinden gerçekleştirilen farklı okuma yöntemleri kullanılmaktadır. %5 (FHWA) ve %10 (ISSMFE) limit deplasman kriterleri; yalnızca helis çapına (D) bağlı sınır deplasmanları esas almaktadır. Livneh & El Naggar (2008) ve Davisson (1972) göçme kriterleri ise helis çapına (D) ve elastik deformasyona (PL/EA) bağlı olarak hesap edilen nihai yük belirleme yöntemleridir. Helisel kazıklarda; bu yöntemler haricinde, modifiye Davisson, Brinch-Hansen, Chin-Kondner, Eğrinin Teğetleri, %20D, Decourt, De Beer gibi farklı nihai yük tespit etme yolları da kullanılmaktadır (Brinch-Hansen, 1963; Kondner, 1963; De Beer, 1968; Chin, 1970; Kulhawy ve Hirany, 1989; Decourt, 1999; Zhang, 1999; Lutenege, 2009; Salhi ve ark., 2013; Mohajerani ve ark., 2016; Birid, 2017; Debnath ve Singh, 2022; Shuman ve ark., 2024; Feng ve ark., 2025).

%5D ve %10D limit deplasman kriterleri ile Livneh & El Naggar (2008) ve Davisson (1972) göçme kriterlerinin bir helisel kazık yük-deplasman eğrisinde uygulanışı örnek olarak Şekil 7’de gösterilmiştir.



Bu çalışmada, helisel kazıkların yük-deplasman eğrisinden nihai basınç yükünün belirlenmesinde, %5 (FHWA) limit deplasman kriteri esas alınmıştır. Helisel kazıklar için %5D limit deplasman kriteri; özellikle kum zeminlerde, çoğu durumda, pratik yer değiştirme seviyelerinde daha makul bir tahmin sunmaktadır (O’Neill ve

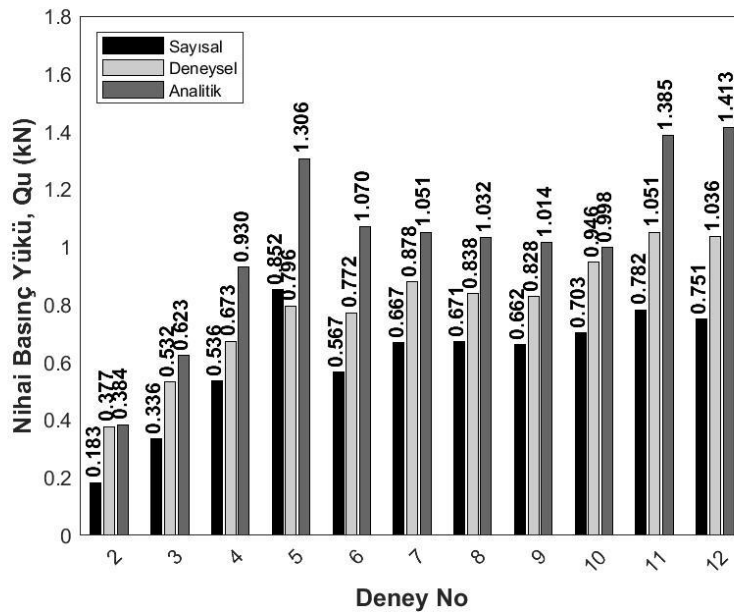
Tablo 3'te, helisel kazıkların sayısal, deneysel ve analitik yollarla %5D esasına göre tespit edilen nihai basınç taşıma güçleri; karşılaştırmalı olarak paylaşılmıştır.

Tablo 3. Helisel kazıkların farklı yollarla hesap edilen nihai basınç kapasiteleri

Deney No	Nihai Basınç Taşıma Kapasitesi, Q_u (kN)			
	Sayısal	Deneysel	Analitik	
	OPTUM G2	Türedi (2021)	Silindirik Kayma Yöntemi	Ayrık Taşıma Gücü Yöntemi
2	0.183	0.377	0.411	0.384
3	0.336	0.532	0.780	0.623
4	0.536	0.673	1.255	0.930
5	0.852	0.796	1.835	1.306
6	0.567	0.772	1.306	1.070
7	0.667	0.878	1.328	1.051
8	0.671	0.838	1.349	1.032
9	0.662	0.828	1.368	1.014
10	0.703	0.946	1.385	0.998
11	0.782	1.051	1.385	1.810
12	0.751	1.036	1.413	1.680

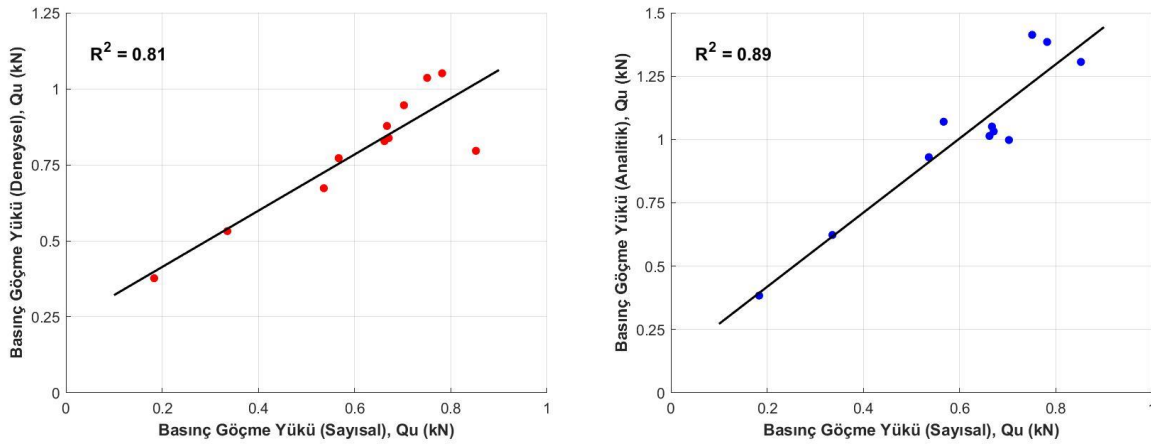
Helisel kazıklar, gevşek zemine kurulumları sırasında zemini bir miktar sıkılaştırarak ilerlemektedir. Genel olarak gevşek durum için zeminin bir miktar sıkılaşmasına rağmen güvenli tarafta kalmak adına hesaplamalarda mukavemet parametrelerinde bir değişiklik yapılmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmadaki sayısal modelleme sırasında helisin ilerlediği bölgedeki mukavemet parametreleri değiştirilmemiştir. Tablo 3 sonuçlarına bakıldığında deneysel verilerin sayısal sonuçlardan bir miktar yüksek çıkması bu durumun sonucu olarak görülmektedir.

Silindirik kayma ve ayrık taşıma gücü yöntemleri gibi analitik yollardan elde edilen sonuçlardan daha düşük olanı seçmek; geoteknik mühendisliği pratiğinde, güvenli tarafta kalma ilkesi gereği yaygın olarak kabul gören bir yaklaşımdır. Buradan hareketle, Tablo 3'te verilen analitik sonuçlardan en düşük olanlar ile Türedi (2021) tarafından deneysel yollarla ve bu çalışmada sayısal olarak elde edilen helisel kazıkların nihai basınç taşıma güçleri; sütun grafik biçiminde Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Helisel kazık nihai basınç kapasitelerinin sayısal, deneysel ve analitik yöntemlerle kıyası

Şekil 9'da sayısal-deneyssel ve sayısal-analitik olarak ayrı ayrı değerlendirilen nihai basınç taşıma güçlerinin doğrusal regresyon analizi yoluyla karşılaştırılması sunulmuştur.



Şekil 9. Sayısal-deneyssel ve sayısal-analitik sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilmesi

5. SONUÇ

Bu makalede, artımlı eksenel basınçla yüklenen gevşek kum zemine gömülü model helisel kazıklar; sayısal ortamda iki boyutlu olarak analiz edilmiştir. Bu araştırma kapsamında, elde edilen bulgular ve yapılan yorumlar; aşağıda maddeler halinde kısaca özetlenmiştir:

- Bu çalışmada, sayısal modellerin çözümleri, eksenel basınç yüküne maruz durumda çarpan elastoplastik analiz (MEPA) yöntemi kullanılarak yürütülmüştür ve helisel kazıkların nihai basınç taşıma kapasiteleri, yük-deplasman eğrilerinden %5D sınır deplasman ölçütüne göre tayin edilmiştir. Sayısal analiz sonuçları, helis çapı (D) ve helis sayısı (N) ile kazık taşıma kapasitesi arasında pozitif yönlü doğrusal bir korelasyon bulunduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık, helisler arası mesafenin (s) taşıma kapasitesi üzerinde sistematik bir artış ya da azalışa yol açmadığı ve bu parametreye ilişkin yük-deplasman eğrilerinin dar bir bantta kümелendiği gözlemlenmiştir.
- Sayısal çözümler değerlendirildiğinde, helis sayısının iki ve üç katına çıkarılmasıyla taşıma gücünde, sırasıyla yaklaşık 1.25 ve 1.40 katlık bir artışa ulaşılmıştır. Deneyssel verilerde ise çift ve üç helisli kazıklardaki taşıma gücü, tek helisli kazığa göre sırasıyla yaklaşık 1.58 ve 1.95 kat artmıştır. Her iki durumda da helis sayısı arttıkça nihai kapasitede bir artış eğilimi görülmekle birlikte, deneyssel sonuçlardaki artış oranının sayısal modellemeye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, gevşek zemin koşullarında deneyssel ve sayısal yük-deplasman tepkileri karşılaştırıldığında, modelin; elastoplastik davranışa uygun olarak başlangıçta belirli bir eşik değere kadar doğrusal elastisiteyi ve kazığı çevreleyen kum zeminde plastik bölgelerin kademeli olarak gelişmesiyle doğrusal olmayan deformasyonu, deneyssel bulgularla uyumlu bir şekilde yansıtabildiği saptanmıştır.
- Gevşek kum zeminde gerçekleştirilen analizler, sayısal modelin bu şartlar altında tutarlı öngörüler sunduğunu, ancak model performansının deneyssel verilere kıyasla bir miktar farklılaştığını ortaya koymuştur. Deneyssel ve sayısal veriler arasında $R^2=0.81$ gibi güçlü bir korelasyon tespit edilirken, analitik ve sayısal sonuçların karşılaştırılmasında bu uyumun $R^2=0.89$ seviyesine yükseldiği görülmüştür. Bu sonuçlar, sayısal modelin gevşek kumlarda taşıma kapasitesini başarılı bir şekilde tahmin edebildiğini teyit etmekle birlikte, deneyssel verilerle olan uyumunun analitik sonuçlara kıyasla daha sınırlı kaldığına işaret etmektedir. Söz konusu bu farklılığın, helisel kazıkların montajı esnasında gevşek zeminlerde meydana gelen yerel sıkışma etkisinin, deneyssel sonuçlarda daha belirgin bir saçılma yol açmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Eksenel simetri varsayımı altında geliştirilen iki boyutlu sayısal helisel kazık modelleri, her bir analiz senaryosu için başlangıçta, laboratuvar deneyi boyutları ve sınır koşulları esas alınarak standart bir ağ yapısıyla oluşturulmuştur. Sayısal basınç yüklemesi öncesinde, bu temel ağ yapısı; OPTUM G2 yazılımının otomatik ağ uyarlaması tekniği aracılığıyla, tekrarlı adımlarla her analiz problemine özgü olarak optimize edilmiştir. Bu sayede, eksenel basınç yüküne maruz helisel kazıklarda yüksek gerilme ve şekil değiştirme değişim yönlerinin meydana geldiği kritik bölgeler, yazılım tarafından doğrudan tespit edilmiştir. Sayısal modellerde belirlenen bu özel alanlarda ağ yoğunluğunun seçici olarak sıklaştırılmasıyla, çözümlerin hassasiyeti ve verimliliği en üst düzeye çıkarılmıştır. Otomatik ağ uyarlaması, daha hassas sayısal çözümleme gerektiren geoteknik mühendisliği problemleri için özgün ve öne çıkan bir özellik olarak değerlendirilmektedir.
- Üç boyutlu fiziksel model deney sonuçlarının OPTUM G2 yazılımı kullanılarak iki boyutlu sayısal analizlerle belirli bir uyum içerisinde yeniden kurgulanabilmesi nedeniyle bu yazılımın, benzer kazık-zemin etkileşimi problemlerinde uygulanabilir olduğu ve geoteknik mühendisliğindeki farklı birçok çalışmada bu programdan yararlanabileceği öngörülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmada yer alan dördüncü yazar, TÜBİTAK 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Programı ve YÖK 100/2000 Doktora Projesi kapsamında desteklenmektedir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır

KAYNAKÇA

- Adams, J. I., & Klym, T. W. 1972. A study of anchorages for transmission tower foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 9(1), 89-104.
- Akbari Zare, A., Eslami, A., Razmkhah, A., & Vosoughifar, H. 2025. Investigation of the load–displacement behavior of helical piles in sand through novel instrumentation. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-13.
- Birid, K. C. 2017. Evaluation of ultimate pile compression capacity from static pile load test results. *International Congress and Exhibition Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology*, 1-14, Cham: Springer International Publishing.
- Brinch-Hansen, J. 1963. Discussion of hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(4), 241-242.
- Chavan, D. 2024. Spurious accelerations in finite element analysis of geotechnical problems: Cause and remedy. *Archives of Advanced Engineering Science*, 1-15.
- Chin, F. K. 1970. Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure. *Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, Singapore, 81-92.
- Dalal, P., Chavda, J. T., & Solanki, C. H. 2025. FELA evaluation of uplift, lateral and inclined capacity of buried pipeline in layered clays. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 5(1), 100226.
- Davisson, M. T. 1972. High capacity piles. *Proceedings of Lecture Series of Innovations in Foundation Construction*, 81–112. ASCE, Illinois Section, Chicago.
- De Beer, E. E. 1968. Experimental contribution to the study of the ultimate bearing capacity of sand under spread foundations, Parts 2–3. *Annales des Travaux Publics de Belgique*, 69(1), 44–88.
- Debnath, A., & Singh, V. P. 2022. Analysis and design methods of helical piles: a critical review with emphasis on finite element method. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(18), 1496.
- Decourt, L. 1999. Behavior of foundations under working load conditions. *Proceedings of the 11th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4, 453–488, Brasil.
- Elsherbiny, Z. & El Naggar, M. H. 2013a. Axial compressive capacity of helical piles from field tests and numerical study. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(12), 1191-1203.
- Elsherbiny, Z., & El Naggar, M. H. 2013b. The performance of helical pile groups under compressive loads: a numerical investigation. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris.
- Feng, B., Lin, J., Huang, J., Lu, Q., Li, P., & Sun, Z. 2025. Field tests on bearing characteristics of helical pile under uplift and uplift-lateral combined loading in soft clay. *Journal of Physics: IOP Conference Series*, 3006(1), 012042.

Kerseroğlu ve ark.¹

- George, B. E., Banerjee, S., & Gandhi, S. R. 2019. Helical piles installed in cohesionless soil by displacement method. *International Journal of Geomechanics*, 19(7), 04019074.
- Gil-Hernandez, J. A., Ibarra-Penagos, G., & Triviño-Oviedo, C. A. 2025. Parametric study of helical piles subjected to compression and tension loading through finite element analysis: A case study. *Indian Geotechnical Journal*, 55(1), 443-454.
- Hao, D., Che, J., Chen, R., Zhang, X., Yuan, C., & Chen, X. 2022. Experimental investigation on behavior of single-helix anchor in sand subjected to uplift cyclic loading. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1338.
- Hoyt, R. M., & Clemence, S. P. 1989. Uplift capacity of helical anchors in soil. *Proceedings of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio De Janeiro, 1019-1022.
- Ibrahim, I. W., & Karkush, M. 2025. The axial uplift capacity of screw piles: A review. *Journal of Engineering*, 31(6), 105-128.
- Kondner, R. L. 1963. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 89(1), 115-143.
- Krabbenhoft, K. 2023. Finite element limit analysis: fundamentals and extensions. *Revue Française de Géotechnique*, 175(5).
- Krabbenhoft, K., Lyamin, A., & Krabbenhoft, J. 2016. OPTUM G2. Optum Computational Engineering: Optum CE, Copenhagen, Denmark.
- Kulhawy, F.H. & Hirany, A. 1989. Interpretation of load tests on drilled shafts; Part 2: Axial uplift, *Proceedings of Foundation Engineering: Current Principles and Practices*, ASCE, 2, 1150-1159.
- Livneh, B., & El Naggar, M. H. 2008. Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(8), 1142-1155.
- Lutenegger, A. J. 2009. Cylindrical shear or plate bearing?—Uplift behavior of multi-helix screw anchors in clay. In *Contemporary topics in deep foundations*, 456-463.
- Mitsch, P. M., & Clemence, P. S. 1985. The uplift capacity of helix anchors in sand. Part of Uplift Behavior of Anchor Foundation in Soil – ASCE, 26-47.
- Mohajerani, A., Bosnjak, D., & Bromwich, D. 2016. Analysis and design methods of screw piles: A review. *Soils and Foundations*, 56(1), 115-128.
- Mousavi, S. S., & Ashtiani, M. 2025. Compressive behavior of helical versus pipe pile groups in sandy soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(1), 3.
- O'Neill, M.W., & Reese, L.C. 1999. Drilled shafts: Construction procedures and design methods. Office of Infrastructure, Federal Highway Administration, Washington, D.C. Publication No. FHWAIF-99-025.
- OPTUM G2. 2025. Academic License. 2D Geotechnical Design & Analysis Software, OptumCE.
- Padros, G. & Ibarra, H. 2013. Application of the principal of natural proportionality to the design of screw piles installed in cohesive soils. *Geo-Montreal 2013*, 66th Canadian Geotechnical Conference.
- Paikowsky, S. G. 2004. Load and resistance factors design for deep foundations. 507, Washington, DC: Transportation Research Board.
- Perko, H. A. 2009. Helical piles: A practical guide to design and installation. John Wiley and Sons, Inc.
- Pratama, I. T., Lestari, A. S., & Oktavianus, I. 2024. Numerical study on the shear failure and load transfer mechanism of helical piles in cohesionless soils under axial compressive loading. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 10(2), 173-186.
- Sakr, M. 2009. Performance of helical piles in oil sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(9), 1046-1061.
- Sakr, M. 2011. Installation and performance characteristics of high-capacity helical piles in cohesionless soils. *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, 5(1), 39-57.
- Salhi, L., Nait-Rabah, O., Deyrat, C., & Roos, C. 2013. Numerical modeling of single helical pile behavior under compressive loading in sand. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 4319-4338.
- Shamsuddin, D. S. N. A., Fekeri, A. F. M., Muchtar, A., Khan, F., Khor, B. C., Lim, B. H., ... & Takriff, M. S. 2023. Computational fluid dynamics modelling approaches of gas explosion in the chemical process industry: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 170, 112-138.
- Shuman, N. M., Khan, M. S., & Amini, F. 2024. Efficient machine learning model for settlement prediction of large diameter helical pile in c— Φ soil. *AI in Civil Engineering*, 3(1), 10.
- Stathas, D., Glover, J., Braun-Badertscher, S., & Lifa, I. 2023. Numerical modeling and evaluation of passive grout-anchors in geotextile bags. *Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet*, 658-664, CRC Press.
- Türedi, Y. 2021. Basınç yüküne maruz helisel kazık davranışının laboratuvar ve arazi deneyleri ile araştırılması. Doktora Tezi. İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2021, Hatay.

- Türedi, Y. 2023. Helisel kazıkların tarihsel gelişimi ve günümüzdeki uygulama alanları. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 7(11), 128–132.
- Türedi, Y., & Örnek, M. 2020. Analysis of model helical piles subjected to axial compression. *Gradevinar*, 72(9), 759-769. doi: 10.14256/JCE.2660.2019.
- Türedi, Y., Emirler, B., Örnek, M., & Yıldız, A. 2023. Helisel kazıklarda helis çapının basınç yüküne etkisinin laboratuvar deneyleri ile araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(4), 1013-1022.
- Zhang, D.J.Y., 1999. Predicting capacity of helical screw piles in Alberta soils. University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.
- Zhang, Y., Ji, H., Liu, H., El Naggar, M. H., Jiang, G., & Wu, W. 2024a. Initial horizontal dynamic impedance of single anti-toppling helical pile for offshore wind turbines. *Ocean Engineering*, 306, 118048.
- Zhang, Y., Li, W., Penner, L., & Deng, L. 2024b. SPT-based empirical method for estimating axial capacities of single-helix piles in sand. *Acta Geotechnica*, 19(3), 1581-1595.