Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNİ ANKRAJLARINDA HELİS GEOMETRİSİNİN ÇEKME KAPASİTESİNE ETKİSİ

THE EFFECT OF HELIX GEOMETRY ON THE UPLIFT CAPACITY OF THE HELICAL ANCHORS OF OFFSHORE WIND TURBINES

Yusuf KAYAN[1], Mehmet Barış Can ÜLKER[2]

ÖZET

Yüzer tip açık deniz rüzgar türbinlerinde kullanılan helisel ankrajlar, yüksek çekme kapasiteleri ve inşaat kolaylığı gibi avantajları sebebiyle alternatif derin temel sistemleridir. Deniz tabanına yerleştirilen helisel ankrajların etrafındaki zeminler, ankrajların hem inşaatı hem de yüklenmeleri sırasında büyük deformasyona maruz kalmaktadır. Helisel kazık davranışını inceleyen çalışmaların önemli bir bölümü süreklilik esaslı sayısal yaklaşımlara dayanmakta olup, zeminle birlikte göçme mekanizmaları basitleştirilmiş varsayımlar üzerinden değerlendirilmektedir. Ayrıca, çoklu helis konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi henüz tam olarak ortaya konulamamıştır. Bu çalışmada, orta sıkı kum zemin içerisine yerleştirilen helisel kazıkların çekme yükü altındaki davranışı, Malzeme Noktası Yöntemi (MNY) kullanılarak modellenmiştir. Geliştirilen sayısal model, mevcut santrifüj deney verileri ile doğrulanmış, deneylerde kullanılan zemine ait doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışı, çoklu pekleşme kuralları içeren bir elasto-plastik model ile temsil edilmiştir. Bu bünye modeli sonuçları, orta sıkı kum koşulları için deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Ayrıca, helis sayısı, helisler arası mesafe ve helis çapı gibi geometrik parametrelerin, ankraj kazığının çekme kapasitesi ve yük-deplasman davranışı üzerindeki etkileri parametrik bir çalışma ile hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, helisel ankrajların açık deniz rüzgar türbinlerinin çalışma koşullarındaki temel performansının daha iyi anlaşılmasına önemli katkı sağlamakta ve yüzer tip türbinlerin tasarımına yönelik önemli çıkarımlar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Açık deniz rüzgar türbinleri, çekme kapasitesi, helisel ankraj, malzeme noktası yöntemi, orta sıkı kumlar*

ABSTRACT

Helical anchors used in floating offshore wind turbines are alternative deep foundation systems due to their advantages such as high uplift capacity and ease of installation. The soils surrounding helical anchors installed in the seabed are subjected to large deformations during both installation and loading. A significant portion of the studies investigating helical pile behavior relies on continuum-based numerical approaches, in which failure mechanisms together with the surrounding soil are evaluated through simplified assumptions. In addition, the effect of multiple-helix configurations on uplift capacity has not yet been fully clarified. In this study, the behavior of helical piles installed in medium-dense sand under uplift loading is modeled using the Material Point Method. The developed numerical model is validated against available centrifuge test data, and the nonlinear stress–strain behavior of the soil used in the experiments is represented by an elastoplastic constitutive model incorporating multiple hardening rules. The results of this constitutive model are also validated by experimental data for medium-dense sand. Furthermore, the effects of geometric parameters such as the number of helices, helix spacing, and helix diameter on the uplift capacity and load–displacement behavior of the helical anchors are evaluated through a parametric study. The findings provide important

[1] Doktora Öğr., Politecnico di Milano, İtalya, yusuf.kayan@polimi.it
[2] Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, mbulker@itu.edu.tr (Sorumlu yazar)

insight into the foundation performance of helical anchors under the operating conditions of floating offshore wind turbines and offer valuable implications for the design of floating wind systems.
Keywords: *Floating offshore wind turbines, helical anchors, Material Point Method, medium dense sand, uplift capacity*

1. GİRİŞ

Yüzer tip açık deniz rüzgar türbinleri, sabit tabanlı temel sistemlerinin uygulanmasının zor olduğu derin denizlerde rüzgar enerjisinden yararlanmak için önemli bir alternatif haline gelmiştir. Bu sistemlerin güvenli ve ekonomik şekilde kullanılabilmesi, ankraj sistemlerinin taşıma kapasitesinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Helisel ankrajlar, yüksek çekme kapasitesi, kolay kurulumu ve düşük çevresel etkileri nedeniyle yüzer rüzgar türbinleri için uygun bir temel seçeneği olarak öne çıkmaktadır (Stanier vd., 2014; Byrne ve Houlsby, 2015). Bu ankrajların çekme kapasitesi temel olarak gömülme derinliği, helis geometrisi, helis sayısı ve zemin özelliklerinden etkilenmektedir (Spagnoli ve Gavin, 2015; Davidson vd., 2022). Bununla birlikte, özellikle birden fazla helise sahip ankrajlarda, helisler arası etkileşim ve yük paylaşımı nedeniyle çekme davranışı tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Geleneksel küçük şekil değiştirme esaslı sayısal yöntemler, zeminde büyük deformasyonların ve karmaşık göçme mekanizmalarının geliştiği bu tür problemlerde yetersiz kalabilmektedir. Sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemlerinde ağ bozulması önemli bir sınırlama oluştururken, Malzeme Noktası Yöntemi (MNY) büyük deformasyon problemlerinin modellenmesinde daha uygun bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışmada, orta-sıkı kumlarda tek, çift ve üç helisli kazıkların çekme davranışı eksenel simetrik MNY analizleri ile incelenmiştir. Zemin davranışı gerilme durumuna bağımlı elasto-plastik bir bünye modeli ile temsil edilmiş, kazığın yerleşim etkisi ise Wang vd. (2020) tarafından önerilen basitleştirilmiş yaklaşım kullanılarak dikkate alınmıştır. Sayısal sonuçlar Davidson vd. (2022) tarafından sunulan santrifüj deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Ardından helis sayısı, helis aralığı ve helis çapının çekme kapasitesine etkileri araştırılmış, farklı kazık geometrileri için oluşan göçme yüzeyleri ve yük aktarım mekanizmaları değerlendirilmiştir.

2. HELİSEL ANKRAJLARDA ÇEKME KAPASİTESİ

Helisel ankrajların çekme kapasitesi temel olarak gömülme oranına bağlıdır. Bu oran genellikle helisin gömülme derinliğinin helis çapına oranı olarak tanımlanır (H/D_h). Burada H, en alttaki helisin zemin yüzeyinden olan derinliğini, D_h ise helis çapını ifade etmektedir. Bu boyutsuz ifade ankrajın hem taşıma kapasitesini hem de çekme yükü altında gelişen göçme mekanizmasını önemli ölçüde etkiler (Das ve Shukla, 2013). Sığ gömülme durumlarında, göçme yüzeyi zemin yüzeyine kadar ulaşabilir ve genellikle kesik koni biçiminde bir göçme bölgesi oluşur. Derin gömülmüş ankrajlarda ise göçme yüzeyi zemin yüzeyine ulaşmaz, deformasyonlar daha çok helis çevresinde sınırlı kalır. Kohezyonsuz zeminlerde tek helisli ankrajların çekme kapasitesi genellikle boyutsuz taşıma kapasitesi katsayısı ($N\gamma$) ile ifade edilir. Nihai çekme kapasitesi (F_y) için bu katsayı, efektif birim hacim ağırlığı (γ'), helis alanı (A) ve en üstteki helisin gömülme derinliğini (H_1) bağlı olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$N_\gamma = \frac{F_y}{\gamma' H_1 A} \tag{1}$$

2.1 Model Santrifuj Deneyi

Bu çalışmada kullanılan sayısal model, Davidson vd. (2022) tarafından 48g santrifüj koşullarında gerçekleştirilen deney esas alınarak oluşturulmuştur. Deneyde orta sıkı kumda (D_r=%57) helisel ankrajın çekme kapasitesi incelenmiştir. Deneyde tek helisli model kazık kullanılmış olup prototip ölçekte helis çapı 3,36 m'dir. Deney kuru kumda ve düşük yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Kazık inşasından sonra sabit hızda monoton çekme yüklemesi uygulanmıştır. Deneyde kullanılan helisel kazığa ait geometrik bilgiler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Santrifüj deneyinde kullanılan helisel kazık geometrisi

Parametre	Değer
Helis çapı, D_h	3,36 m
Kazık şaft çapı, D_s	0,88 m
Helis gömülme derinliği, H	15,2 m
Helisel kazık uzunluğu	16 m
Helis derinlik/çap oranı, H/D_h	4.5

3. SAYISAL YÖNTEM

Sayısal analizlerde deney koşullarının kuru kumda olması ve düşük hızda yüklenmesi nedeniyle tek fazlı bir zemin modeli seçilmiş ve sayısal yöntem olarak MNY kullanılmıştır. MNY'de sürekli ortam malzeme noktaları ile temsil edilir; kütle, gerilme, şekil değiştirme ve hız gibi değişkenler bu noktalarda saklanır. Malzeme noktaları sabit bir arka plan ağı içerisinde hareket eder ve her zaman adımında bilinmeyen serbestlik dereceleri malzeme noktalarından ağa aktarılır. Denge denklemleri ağ üzerinde çözülür ve güncellenen durum değişkenleri tekrar malzeme noktalarına taşınır (Sulsky vd., 1994).

Bu çalışmada Galavi vd. (2018) tarafından önerilen iki boyutlu eksenel simetrik MNY formülasyonu kullanılmıştır. Sayısal ortam dört düğüm noktalı dörtgen (Q4) elemanlar ile ayrıklaştırılmıştır. Sonlu eleman ağında hacimsel kilitlenme etkisini azaltmak amacıyla Hughes (1987) tarafından önerilen B-bar yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşımda şekil değiştirme matrisi (B), hacimsel ve deviatorik olmak üzere iki bağımsız bileşene ayrılır. Analizlerde açık zaman integrasyonu tercih edilmiştir. Bu yöntem, doğrusal olmayan büyük deformasyon problemlerinde iteratif çözüm gerektirmemesi nedeniyle avantajlıdır, ancak kararlılık için sayısal analizde zaman adımının kritik değerin altında kalması gerekir:

$$\Delta t = C_{NB} \Delta t_{cr} \tag{2}$$

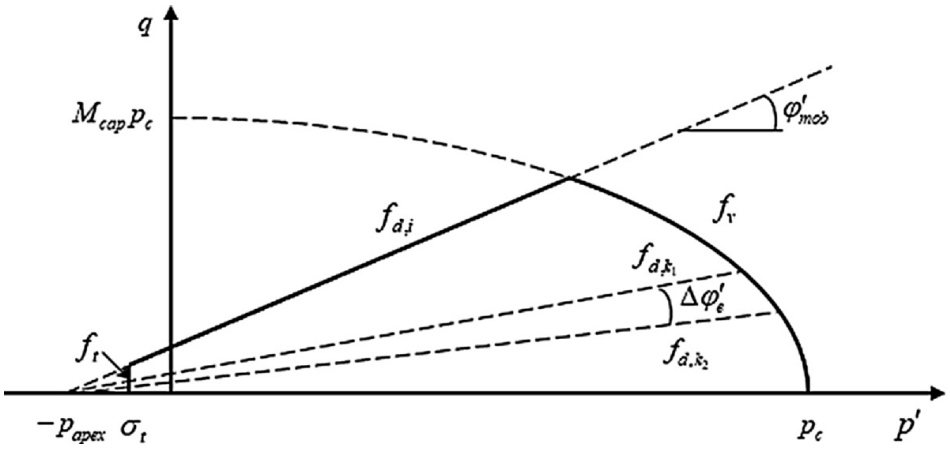
Yukarıdaki açık zaman integrasyonu yöntemi için kritik zaman adımı ifadesinde C_{NB} değeri Courant sayısıdır. Çalışmada yüksek hesaplama maliyetini düşürmek amacıyla, eylemsizlik etkilerinin ihmal edilebileceği yarı-statik analizlerde kullanılabilen '*kütle ölçeklendirmesi yöntemi*' uygulanmıştır. Fern vd. (2019) tarafından tanımlanan kütle ölçeklendirme yaklaşımına göre, yoğunluk β katsayısı kadar artırılırken, kritik zaman adımı kök β oranında artırılmaktadır. Buna göre:

$$\Delta t_{\text{crit}}^{\beta} = \frac{l_e}{\sqrt{E_c/\beta\rho}} = \sqrt{\beta}\,\Delta t_{\text{crit}}^{1} \tag{3}$$

Sayısal doğruluğu korumak amacıyla β için duyarlılık analizleri yapılmış ve en uygun değer β=625 olarak belirlenmiştir. Bu değer MNY analizlerinde doğruluk ile hesaplama hızı arasında uygun bir denge sağlanarak seçilmiştir.

3.1. Zemin Bünye Modeli

Kum zeminin mekanik davranışı gerilme durum bağımlı elasto-plastik DeltaSand modeli ile temsil edilmiştir (Galavi, 2021). Model kum zemin davranışını tek bir malzeme parametre seti ile tanımlar ve çift pekleşme yaklaşımıyla formüle eder (Vermeer, 1978). Farklı yükleme koşulları altında zemin davranışı ayrı akma yüzeyleriyle kontrol edilmektedir. Model efektif asal gerilme uzayında üç bileşenden oluşur: deviatorik, hacimsel ve çekme sınırı yüzeyi (Şekil 1). Orijinal formülasyonda deviatorik akma yüzeyi tamamen konveks Matsuoka–Nakai kriterine dayanır. Ancak bu çalışmada, orijinal DeltaSand formülasyonunun genel yapısı korunmuş, kayma göçmesi zarfını tanımlamak için Mohr–Coulomb kriteri kullanılmıştır.



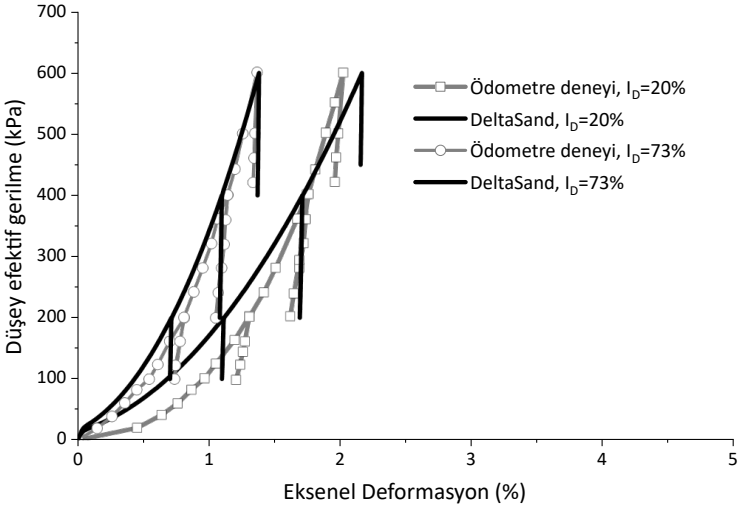
Şekil 1. Meridyenel düzlemde DeltaSand modelin akma yüzeyleri (Galavi, 2021)

Bu modelde kum zeminin gerilme–şekil değiştirme davranışını temsil etmek için 14 adet parametre gerekir. Bu parametreler zeminin mekanik özelliklerini tanımlamakta ve doğrusal olmayan gerilme–şekil değiştirme davranışının modellenmesine olanak sağlar. Kullanılan bünye modeli parametreleri Tablo 2'dedir. Al-Defae vd. (2013)'ün sunduğu direkt kesme ve ödometre deney verileri ile malzeme parametrelerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Şekil 2'de DeltaSand sonuçları ile ödometre sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tablo 2. DeltaSand modeli malzeme parametreleri

Parametre	Birim	Açıklama	Değer
$D_{r,0}$	[%]	Başlangıç relatif sıkılık [a]	57
f_G^{ref}	[-]	Referans elastic rijitlik parametresi	1500
n	[-]	Rijitlik güç parametresi	0.52
h_s	[MPa]	Pekleşme parametresi	200
C_{oed}	[-]	Sıkışma parametresi	1.0
Φ_{cv}	[°]	Kritik durum sürtünme açısı [b]	32
$e_{min,0}$	[-]	Minimum boşluk oranı [b]	0.467
$e_{cr,0}$	[-]	Kritik durum boşluk oranı [b]	0.717
$e_{max,0}$	[-]	Maksimum boşluk oranı [b]	0.769
a	[-]	İçsel sürt. açısı kontrol parametresi	1.8
b	[-]	Dilatasyon açısı kontrol parametresi	1.5
A_{mat}	[-]	Plastik rijitlik parametresi	0.015
G_{ratio}	[-]	Kayma rijitliği oranı [c]	5
g_r	[-]	Referans kayma deformasyonu [c]	1.6×10^{-4}

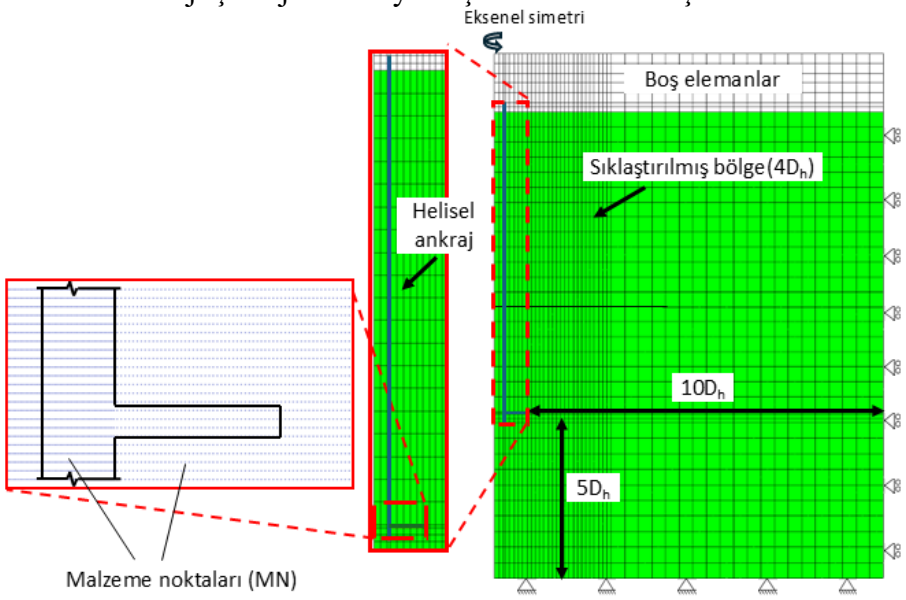
[a] Santrifuj deneyinde kullanılan kuma ait relatif sıkılık değeri
[b] Kesme kutusu ve ödometre deneylerinden elde edilmiştir (Lauder vd., 2013; Al-Defae vd., 2013)
[c] Al-Baghdadi vd. (2017) korelasyonu kullanılmıştır



Şekil 2. Zemin elemanı için DeltaSand model ile laboratuvar sıkışma eğrilerinin karşılaştırılması

3.2. MNY Analizleri

MNY analizlerinde kullanılan sayısal model Şekil 3'te verilmiştir. Sınır koşulları deplasman kısıtlarıyla tanımlanmış, zemin–ankraj etkileşimi temas koşulları kullanılarak modellenmiştir. Kazık–zemin etkileşimini temsil etmek amacıyla helisel ankraj yüzeyi boyunca sürtünmeye dayalı arayüz elemanları kullanılmıştır. Arayüz sürtünme açısı önceki çalışmalardan elde edilmiş olup 22° alınmıştır (Lauder vd., 2013; Davidson vd., 2022). Modelin yanal ve alt sınırları, sınır etkilerini azaltacak şekilde yeterince geniş seçilmiştir. Ayrıca helisel ankraj çevresinde yaklaşık $4D_h$ mesafeye kadar ağ ve malzeme noktası sıklaştırması uygulanmıştır. Modelin boyutuna bağlı olarak analizlerde ortalama 6.000 düğüm noktası ve 400.000 malzeme noktası kullanılmıştır. Helisel kazığın çevre zemine göre oldukça rijit olması nedeniyle, sayısal hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla analizlerde helisel ankraj için rijit cisim yaklaşımı benimsenmiştir.

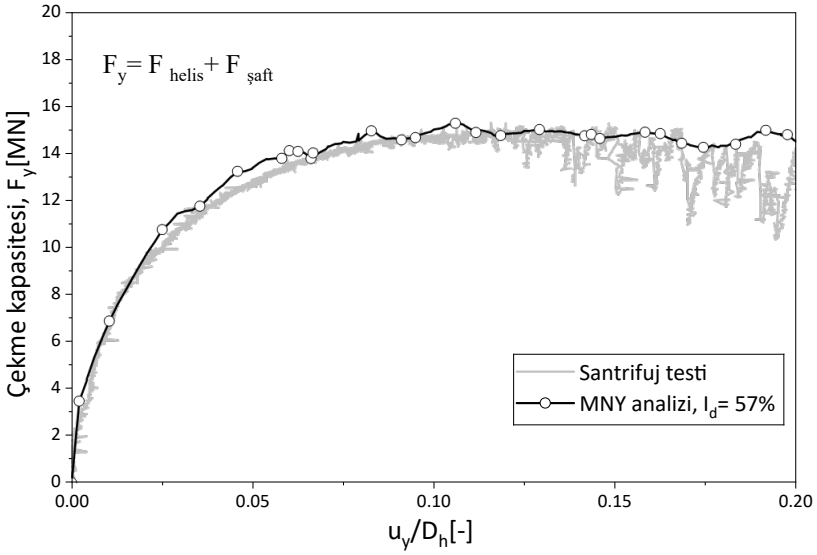


Şekil 3. Malzeme noktası yöntemine ait sayısal model

Bu çalışmada helisel ankrajların inşasından kaynaklanan zemindeki gerilme durumu değişimi, ankrajın doğrudan yerleşimini modellemek yerine efektif gerilme seviyesinin

artırılmasıyla temsil edilmiştir. Bu yaklaşım, kazığın yerleşimi sırasında oluşan yerel zemin örselenmesini ayrıntılı olarak çözmekten ziyade, artan gerilme seviyesinin çekme kapasitesi üzerindeki genel etkisini dikkate almayı amaçlar. Helisel kazıkların kurulumu sırasında uygulanan burulma ve basınç kuvveti, çevre zemindeki yatay gerilmeleri artırmakta ve başlangıç gerilme durumunu değiştirmektedir. Bu gerilme artışı, göçme yüzeyi boyunca mobilize olan kayma direncini yükselterek nihai çekme kapasitesini artırabilir. Wang vd. (2020) bu etkiyi temsil etmek için *m* parametresine dayalı teorik bir yaklaşım önermiştir. Bu parametre, yatay ve düşey gerilmelerdeki artışı kontrol eden bir büyütme katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Deneysel kalibrasyonlara göre *m* değeri kazığın yerleştirilmesine bağlı olarak değişir. Ayrıca Nagai vd. (2018) kumlu zeminlerde kurulumun yanal toprak basıncını yaklaşık 2–4 kat artırabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada *m* değeri, deneysel yük–deplasman eğrileriyle kalibre edilmiş ve 2,5 alınmıştır.

Şekil 4'te çekme kuvveti F_y'nin normalize edilmiş düşey deplasman (u_y/D_h) ile değişimine ilişkin kalibrasyon sonucu verilmiştir. Burada u_y ankrajın düşey deplasmanını, D_h ise helis çapını ifade etmektedir. Eksenel simetrik analizlerde vida ankrajın çekme kapasitesi, helis yüzeyi boyunca mobilize olan direnç ile ankraj şaftı boyunca gelişen sürtünme direncinin toplamı olarak hesaplanmıştır (bkz. Şekil 4). MNY analizlerinden elde edilen tek helisli ankraja ait yük–normalize deplasman davranışı, santrifüj deney sonucu ile karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçların deney verileriyle oiyi uyum gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4. MNY analizi ile santrifüj deneyinden elde edilen çekme kuvveti–normalize deplasman davranışının karşılaştırılması

4. HELİS GEOMETRİSİNİN ÇEKME KUVVETİNE ETKİSİ

Bu bölümde, kalibre edilen sayısal MNY modeli ve bünye modeli parametreleri kullanılarak bir dizi parametrik analiz yapılmıştır. Doğrulanan MNY modeliyle ankraj geometrisinin çekme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiş, özellikle ikinci helisin katkısı ve bunun çekme taşıma kapasitesi katsayılarına etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar yük–deplasman davranışı, nihai çekme kapasitesi ve buna bağlı göçme mekanizmaları üzerinden sunulmuştur. Parametrik çalışmada dikkate alınan helisel ankraj modellerine ait geometrik özellikler Tablo 3'te özetlenmiştir. Seçilen modeller tek, çift ve üç helisli ankrajları içermekte olup, temel geometrik parametrelerin çekme davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Parametrik çalışma ile helis çapı, helis

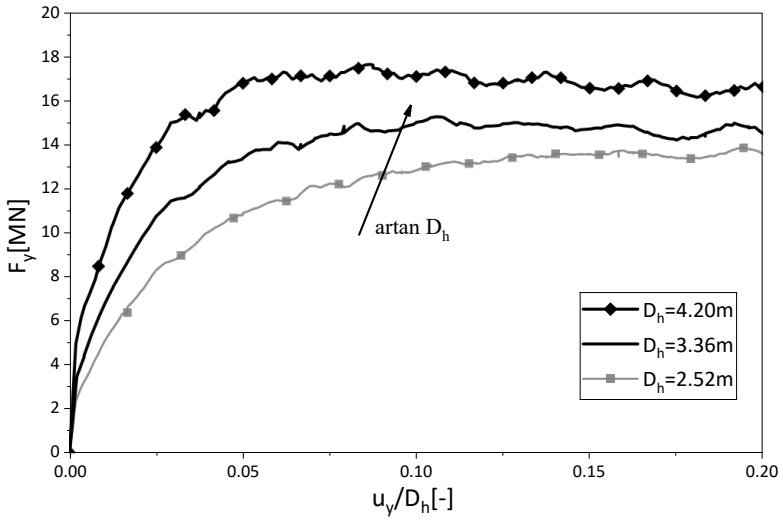
aralığı oranı ve helis sayısı etkilerini ayrı ayrı değerlendirmek ve çekme kapasitesi ile göçme davranışını kontrol eden mekanizmaları yorumlamak mümkün olmuştur.

Tablo 3. Parametrik dikkate alınan tek, çift ve üç helisli ankraj modellerinin geometrik özellikleri

Model ankraj	Helis sayısı	Şaft çapı, D_s (m)	Helis çapı, D_h (m)	Helis derinliği, H (m)	Helis konumu, H/D_h	Helis aralık oranı, S/D_h
SH1-A (U1MD)	1	1.13	3.36	15.2	4.5	-
SH1-A1	1		2.52	15.2	6.03	-
DH1-A1	2		2.52	15.2; 8.40	6.03;3,33	2.7
SH1-A2	1		4.2	15.2	3.62	-
DH1-A2	2		4.2	15.2; 3.86	3.62;0.92	2.7
DH1-A	2		3.36	15.2; 12.15	4.5; 3.6	0.9
DH1-B	2			15.2; 9.10	4.5; 2.7	1.8
DH1-C	2			15.2; 6.05	4.5; 1.8	2.7
TH1	3			15.2; 12.15; 9.10	4.5; 3.6; 2.7	0.9

4.1. Helis Çapının Etkisi

Şekil 5'te farklı helis çaplarına sahip tek helisli ankrajların çekme davranışı gösterilmiştir. Seçilen helis çapları, referans durum (D_h = 3,36 m) esas alınarak yaklaşık %25 azalma ve %25 artışa karşılık gelecek şekilde sırasıyla 2,52 m ve 4,20 m olarak belirlenmiştir. Helis çapının artmasıyla birlikte tüm deplasman aralığında çekme kuvvetinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Deplasmanın helis çapı ile normalize edildiği dikkate alındığında, bu artışın yalnızca geometrik ölçek etkisinden kaynaklanmadığı, aynı zamanda helis çevresinde daha büyük bir zemin kütlesinin mobilize olması ve daha geniş bir göçme bölgesinin gelişmesiyle ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.

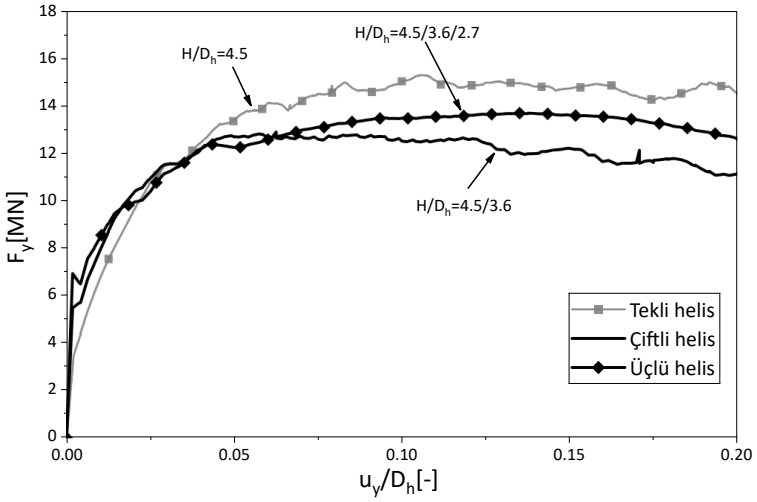


Şekil 5. Farklı helis çaplarının çekme kapasitesine etkisi

4.2. Helis Sayısının Etkisi

Şekil 6'da tek, çift ve üç helisli ankrajların çekme davranışları karşılaştırılmıştır. Burada referans helis H/D_h=4,5 konumunda sabit tutulmuş, ek helisler $0.9D_h$ aralıkla yerleştirilmiştir. Helis sayısının artması ile sanılanın aksine düşük deplasmanlarda kapasite artışı sınırlı kalmıştır. Büyük deplasmanlarda ise tek helisli ankraj daha yüksek nihai kapasite mobilize etmektedir. Bu durum çekme direncinin büyük ölçüde en üstteki aktif

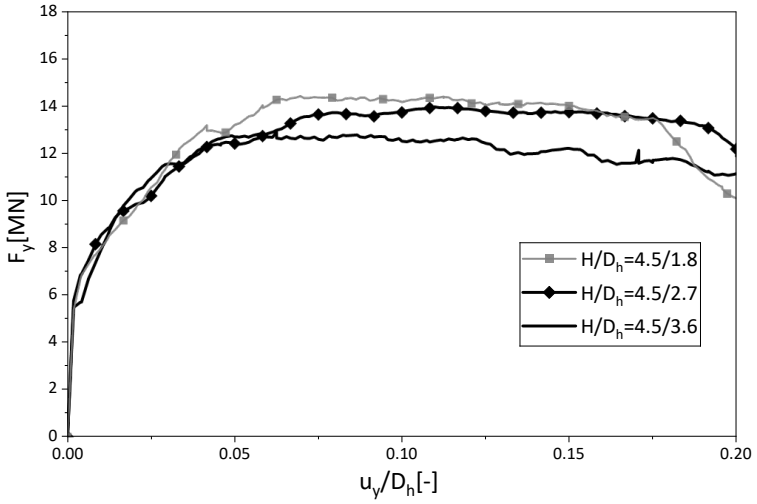
helis tarafından kontrol edilmesiyle açıklanabilir. Helis sayısı arttıkça üst helis yüzeye yaklaşmakta, daha düşük efektif gerilmede çalışmaktadır.



Şekil 6. Helis sayısının çekme kapasitesine etkisi

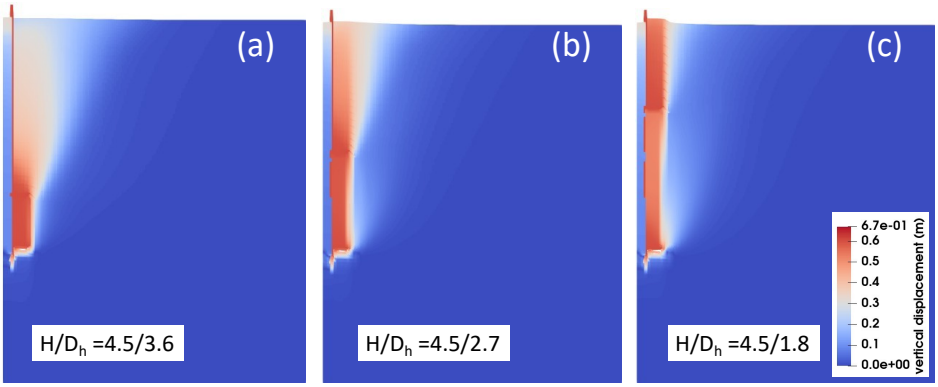
4.3. Helisler Arası Mesafenin Etkisi

Şekil 7'de çift helisli ankrajların çekme davranışı üzerinde helis aralığının etkisi gösterilmiştir. Bu analizlerde alt helis H/D_h=4,5 konumunda sabit tutulmuş, üst helis ise H/D_h=1,8, 2,7 ve 3,6 olacak şekilde farklı gömülme derinliklerine yerleştirilmiştir. Helisler arası mesafenin azalması yüksek deplasman seviyelerinde çekme kapasitesini azaltsa da, genel olarak ikinci helisin gömülme derinliğindeki değişimin toplam çekme kapasitesi üzerinde belirgin bir farklılık oluşturmadığı görülmektedir.



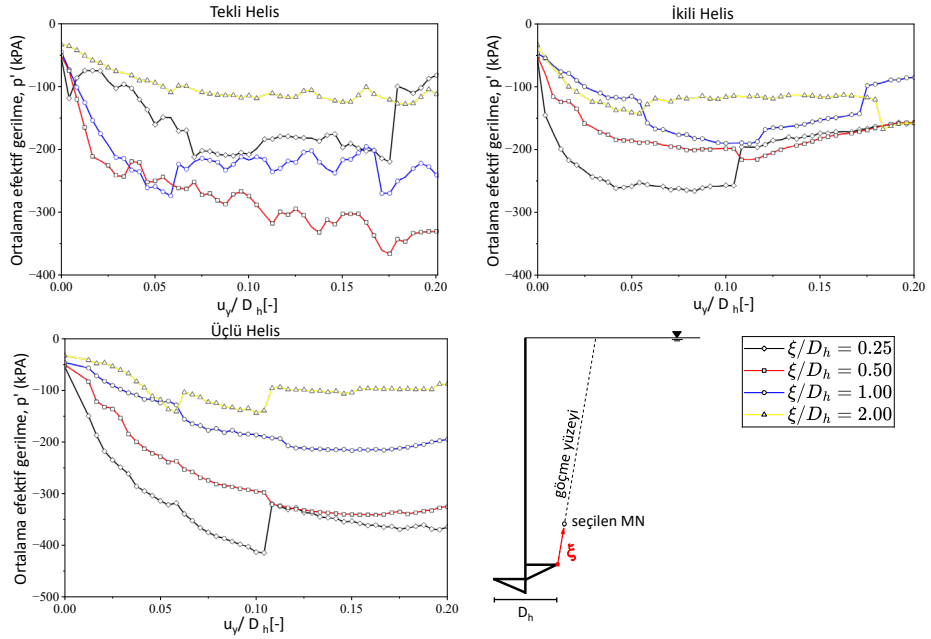
Şekil 7. Helisler arası mesafenin çekme kapasitesine etkisi

Helisler arasındaki mesafenin artması çekme kapasitesinde yaklaşık %12'lik bir artış sağlamaktadır. Kapasitedeki bu sınırlı artış, alt ve üstte helislerin birbirine karşıt etkileriyle açıklanabilir. Üst helisin daha derine yerleştirilmesi helisin çekme direncine olan katkısını artırmaktadır. Ancak helisler arası etkileşim nedeniyle alt helisin katkısı azalmaktadır. Bu nedenle toplam çekme kapasitesindeki net artış sınırlı kalmaktadır. Bu etkileşim Şekil 8'de gösterilen göçme mekanizmaları üzerinden de gözlemlenebilir.



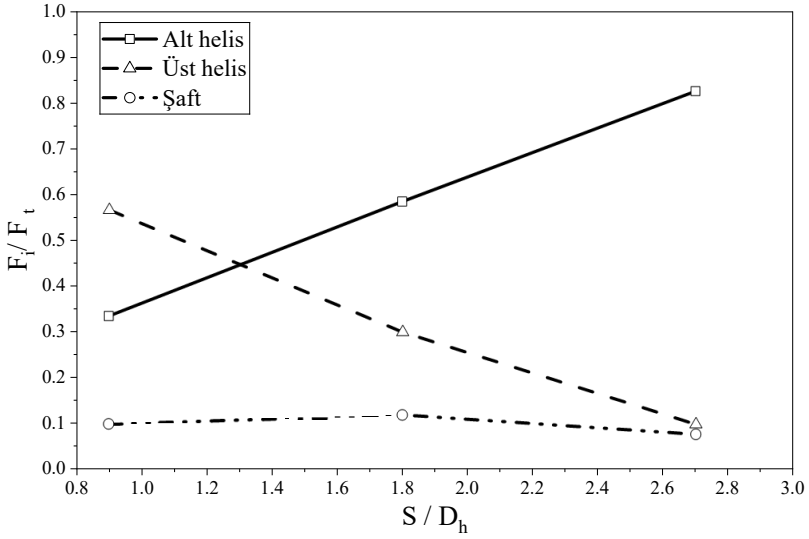
Şekil 8. İkili helis için farklı helis aralıklarında göçme mekanizmasının değişimi

Şekil 9'da çekme yüklemesi sırasında en alt helisten itibaren analitik olarak tanımlanan göçme çizgisi üzerindeki seçili malzeme noktalarında ortalama efektif gerilme değişimi incelenmiştir. Sonuçlar orta sıkı kumda iki aşamalı bir davranışın geliştiğini göstermektedir. İlk aşamada yaklaşık %10 normalize deplasmana kadar helis çevresindeki zemin kazıkla birlikte yukarı hareket etmekte, bu durum çevre zeminde sıkışmaya ve ortalama efektif gerilmede artışa neden olmaktadır. Daha büyük deplasmanlarda ise helis altındaki zemin kazığa göre aşağı yönde hareket etmekte ve yerel kayma mekanizması gelişmektedir. Bunun sonucunda ankrajdan zemine aktarılan gerilme azalırken ortalama efektif gerilme düşmektedir. Bu süreç, nihai çekme direncinin yerel kayma yüzeyinin oluşumu ve çevresel sıkışmanın mobilizasyonu ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Göçme yüzeyi üzerinde seçilen farklı noktalarda ortalama efektif gerilmenin değişimi

Çift helisli ankrajda, alt helis, üst helis ve şaft arasındaki yük paylaşımı helis aralığına bağlı olarak değişmektedir. S/D$_h$ oranı arttıkça üst helis zemin yüzeyine yaklaşmakta ve efektif gerilme ile mobilize edilebilecek direnç azalmaktadır böylece üst helisin. Bu nedenle alt helis, yük taşıyan baskın bileşen haline gelirken, şaft katkısı helis aralığındaki değişimden görece daha az etkilenir (Şekil 10).



Şekil 10. Çift helisli ankrajda şaftın ve alt-üst helisin toplam çekme kapasitesine katkısı

4.4. Taşıma Gücü Faktörünün Değerlendirilmesi

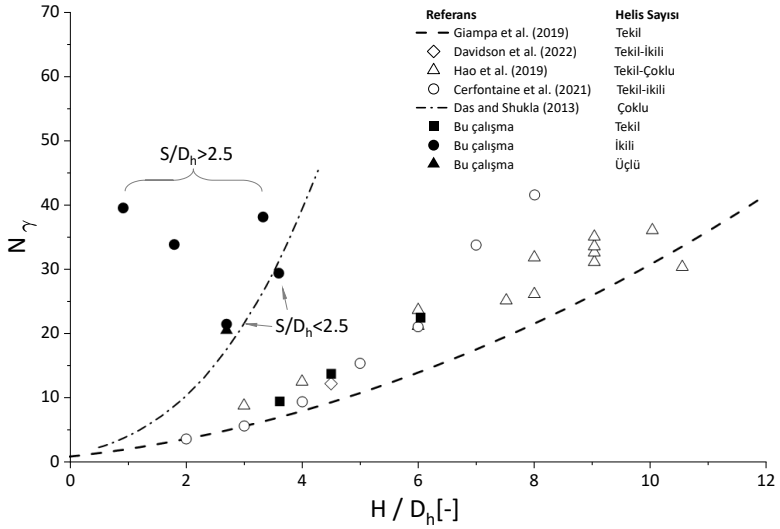
Taşıma gücü faktörü (Nγ) Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar kumdaki helisel ankrajlar için sunulan verilerle karşılaştırılmıştır (Şekil 11). Tek helisli ankrajlarda MNY sonuçları, santrifüj deneyleri ve mevcut analitik çalışmalarla genellikle uyumludur. Bununla birlikte, Giampa vd. (2019)'a göre kısmen yüksek değerler elde edilirken, Das ve Shukla (2013) modeliyle belirgin farklar gözlenmektedir. Çok helisli ankrajlarda ise sonuçlar özellikle düşük ve orta H/D_h değerlerinde bu yöntemlerden farklıdır. Bu durum, mevcut yaklaşımların tek helisli ankrajlar için geliştirilmiş olmasıyla açıklanabilir. Çok helisli sistemlerde çekme davranışı, helisler arası etkileşim, yük paylaşımı ve helis aralığına bağlı olarak değişen göçme mekanizması tarafından kontrol edilmektedir.

Çift helisli ankrajlarda Nγ katsayısının değerlendirilmesi, tek helisli sistemlere göre daha dikkatli yapılmalıdır. Geleneksel yaklaşımlarda bu katsayı genellikle üst helisin gömülme derinliği esas alınarak hesaplanır. Ancak MNY sonuçları, helisler arası mesafe arttıkça alt helisin çekme direncine katkısının arttığını, üst helisin katkısının ise azaldığını göstermektedir. Bu nedenle, özellikle üst helisin sığ konumda olduğu ve yükün önemli bir kısmının alt helis tarafından taşındığı durumda, Nγ'nın yalnızca üst helis derinliğine göre hesaplanması gerçekçi olmayan yüksek değerler verebilir. Bu durum, Das ve Shukla (2013) yaklaşımıyla yapılan karşılaştırmalarda da görülebilir; S/D_h<2,5 için sonuçlar genel eğilime uyarken, daha büyük aralıklarda belirgin farklılıklar gözükmektedir. Taşıma gücü katsayısını normalize etmek amacıyla Şekil 10'da sunulan göreli yük katkılarından alt ve üst helisler için ağırlık katsayıları (η_i) hesaplanmıştır. Her bir helis için η_i şu şekildedir:

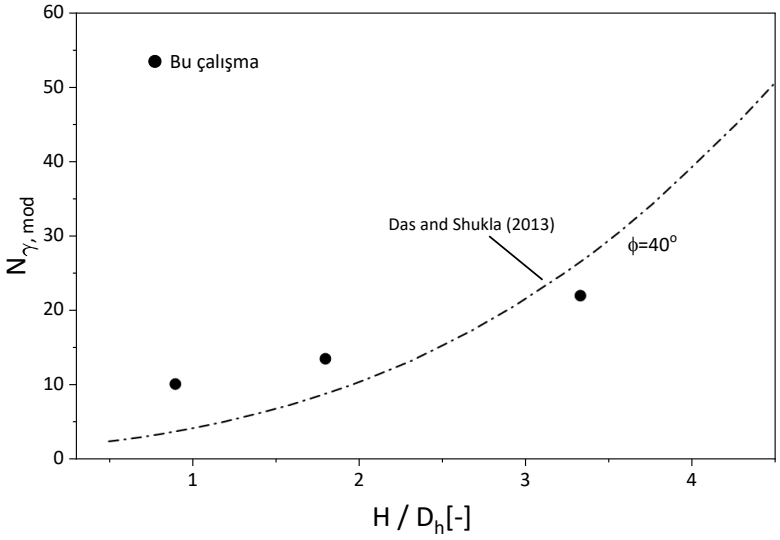
$$\eta_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^{n} F_j} \tag{4}$$

Burada F_i, i. helis tarafından taşınan direnci, n ise dikkate alınan toplam helis sayısını ifade etmektedir. Helisler için efektif derinlik aşağıdaki formülle ifade edilmiştir:

$$H_{eff} = \sum_{i=1}^{n} \eta_i H_i \tag{5}$$



Şekil 11. MNY analizlerinden elde edilen taşıma gücü faktörleri



Şekil 12. Modifiye edilmiş taşıma gücü faktörleri

Katkı ağırlıklı efektif gömülme derinliği kullanılarak hesaplanan modifiye edilmiş taşıma gücü faktörleri Şekil 12'de sunulmuştur. Modifiye değerler özellikle daha büyük helis aralığı oranlarına sahip modellerde, Das ve Shukla (2013)'nın önerdiği analitik çözümlerle uymaktadır. Önerilen normalizasyon, helisler arası yük aktarımını dikkate alırken, çekme direncini kontrol eden gömülme derinliğini daha temsili bir şekilde ifade etmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yüzer açık deniz rüzgar türbinlerinde kullanılan helisel ankrajların çekme kapasitesi, durum değişkeni bağımlı elasto-plastik zemin modeli ile birlikte eksenel simetrik Malzeme Noktası Yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Sayısal model, mevcut santrifüj deneyleri ile doğrulanmış, tek ve çift helisli ankrajların yük–deplasman davranışını yeterli doğrulukla temsil etmiştir. Sonra helis çapı, gömülme derinliği, helis sayısı ve helis aralığının çekme davranışı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, helis çapı ve gömülme derinliğinin artmasının çekme kapasitesini belirgin artırdığını gösterirken, helis sayısının artması her zaman daha yüksek kapasite sağlamamaktadır. Özellikle yakın aralıklı çok helisli sistemlerde helisler arası etkileşim, yük paylaşımını ve

göçme mekanizmasını değiştirerek üst helislerin etkinliğini azaltabilmektedir. Bu nedenle çok helisli ankraj davranışının tek helis sistemlerden elde edilmesi uygun değildir. Ayrıca, geleneksel Nγ yaklaşımının yalnızca üst helis gömülme derinliğine dayandırılması, çift helisli sistemlerde gerçek dışı yüksek değerlere sebep olmaktadır. Bu amaçla, helis ve şaft katkılarına dayalı ağırlıklı efektif gömülme derinliği ile bir taşıma kapasitesi katsayısı önerilmiştir. Bulgular, çok helisli ankrajların değerlendirilmesinde büyük deformasyon, helis etkileşimi ve yük paylaşımının açıkça dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 43689 numaralı uluslararası iş birliği projesi kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi finansal katkısı ile gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

Al-Defae, A. H., Caucis, K., & Knappett, J. A. (2013). Aftershocks and the whole-life seismic performance of granular slopes. *Géotechnique*, *63*(14), 1230–1244.

Byrne, B. W., & Houlsby, G. T. (2015). Helical piles: An innovative foundation design option for offshore wind turbines. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Math., Phys. & Eng. Sci*. *373*(2035), 20140081 https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0081

Das, B. M. & Shukla, S. Kumar. (2013). *Earth anchors*. J. Ross Publishing.

Davidson, C., Brown, M., Cerfontaine, B. vd. (2022). Physical modelling to demonstrate the feasibility of screw piles for offshore jacket-supported wind energy structures. *Géotechnique*, *72*(2), 108–126. https://doi.org/10.1680/jgeot.18.p.311

Fern, J., Rohe, A., Soga, K., & Alonso, E. (2019). *The Material Point Method for Geotechnical Engineering*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780429028090

Galavi, V., Tehrani, F. S., Martinelli, M., Elkadi, A. S., & Luger, D. (2018). Axisymmetric formulation of the material point method for geotechnical engineering applications. *Proc. 9th European Conf. on Num. Mthds in Geotech. Engg. (NUMGE 2018)*, 427.

Galavi, V. 2021. DeltaSand: A state dependent double hardening elasto-plastic model for sand: Formulation and validation. Computers and Geotechnics. 129.

Giampa, J. R., Bradshaw, A. S., & Schneider, J. A. (2017). Influence of dilation angle on drained shallow circular anchor uplift capacity. *Int. J. of Geomechanics*, *17*(2). Lauder, K. D., Brown, M. J., Bransby, M. F., & Boyes, S. (2013). The influence of incorporating a forecutter on the performance of offshore pipeline ploughs. *Applied Ocean Research*, *39*, 121–130. https://doi.org/10.1016/j.apor.2012.11.001

Nagai, H., Tsuchiya, T., & Shimada, M. (2018). Influence of installation method on performance of screwed pile and evaluation of pulling resistance. *Soils and Foundations*, *58*(2), 355–369. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.006

Spagnoli, G., & Gavin, K. (2015). Helical piles as a novel foundation system for offshore piled facilities. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. https://doi.org/10.2118/177604-ms

Stanier, S. A., Black, J. A., & Hird, C. C. (2014). Modelling helical screw piles in soft clay and design implications. *Proc. Inst. Civil Engineers–Geotech. Eng. 167*(5), 447–460.

Vermeer, P. A. (1978). A double hardening model for sand. *Géotechnique*, *28*(4), 413–433. https://doi.org/10.1680/geot.1978.28.4.413.

Wang, L., Zhang, P., Ding, H., Tian, Y., & Qi, X. (2020). The uplift capacity of single-plate helical pile in shallow dense sand including the influence of installation. *Marine Structures*, *71*. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.102697