4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

YANAL YÜKLERE MARUZ KALAN RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ZEMİN REAKSİYONLARININ P-Y EĞRİLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF SOIL RESPONSES WITH P-Y CURVES FOR LATERALLY LOADED WIND TURBINES

Alp Çağrı HASİPEK[1], Kaan YÜNKÜL[2],Abdullah Kürşat DEMİR[3]

ÖZET

Kohezyonsuz zeminlere gömülü yanal yüklere maruz kalan tekil kazıkların tasarımında ampirik olarak elde edilmiş geleneksel olarak p-y eğrileri kullanılmaktadır. Fakat önerilen bu eğriler uzun ve narin kazıklar için geliştirildiği için günümüzde yüksek çaplara sahip açık deniz rüzgâr türbinleri için kullanılan tekil kazıkların yanal tepkisini tahmin etmekteki yeterliliği tam olarak bilinmemektedir. Bu nedenle yapılan çalışma kapsamında PLAXIS Monopile yazılımı kullanılarak bir dizi 1D sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde; 4 m ile 10 m arasında değişen kazık çapları (D) ve 3 ile 10 arasında değişen narinlik oranları (L/D) kullanılmıştır. Kohezyonsuz zemin olarak ise PISA testleri ile kalibrasyonu yapılmış olan %45-90 rölatif sıkılığı aralığındaki Dunkirk kumu tercih edilmiştir. Elde edilen analizler sonucunda; genel olarak Amerikan Petrol Enstitüsü (API) tarafından önerilen p-y eğrilerinin düşük deplasman değerlerinden yüksek rijitlikler tahmin etmesinin yanı sıra; nihai kapasiteyi tahmin etme potansiyelinin de oldukça düşük olduğu görülmüştür. Dolayısıyla gelecekte ülkemizde yapılması planlanan deniz üzeri rüzgâr türbinlerinin temel tasarımında geleneksel p-y eğrilerinin yerine PISA saha deneyleri ile kalibre edilen 1D sonlu elemanlar analizinin kullanılması önerilmektedir

***Anahtar Kelime**: Yanal yüklü tekil kazık, rüzgâr türbini, p-y eğrileri, PLAXIS, PISA saha deneyleri*

ABSTRACT

In the design of single piles embedded in cohesionless soils and subjected to lateral loads, empirically derived conventional p–y curves are commonly utilized. However, since these curves were originally developed for long and slender piles, their adequacy in representing the lateral response of large-diameter monopiles used in open-pit offshore wind turbines is not fully known. Therefore, in this study, a series of 1D finite element (FE) analyses were carried out using PLAXIS Monopile software. The analyses were performed considering pile diameters (D) ranging from 4 m to 10 m and slenderness ratios (L/D) varying between 3 and 10. Dunkirk sand with a relative density range of 45-90%, calibrated by PISA tests, was chosen as the cohesionless soil. The analysis results indicate that, the p-y curves recommended by the American Petroleum Institute (API) generally predict higher stiffnesses at low displacement levels, while also demonstrating a relatively low capability in estimating the ultimate lateral capacity. Consequently, for the foundation design of offshore wind turbines planned to be constructed in Türkiye in the future, it is recommended that 1D finite element analyses calibrated with PISA field tests be used instead of the conventional p–y curves.

***Keywords:** Laterally loaded monopile, wind turbine, p-y curves, PLAXIS, PISA field tests*

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, alphasipek@gmail.com
[2] Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, kaan.yunkul@gop.edu.tr (Sorumlu Yazar)
[3] Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, abdullahkursat.demir@gop.edu.tr

1. GİRİŞ

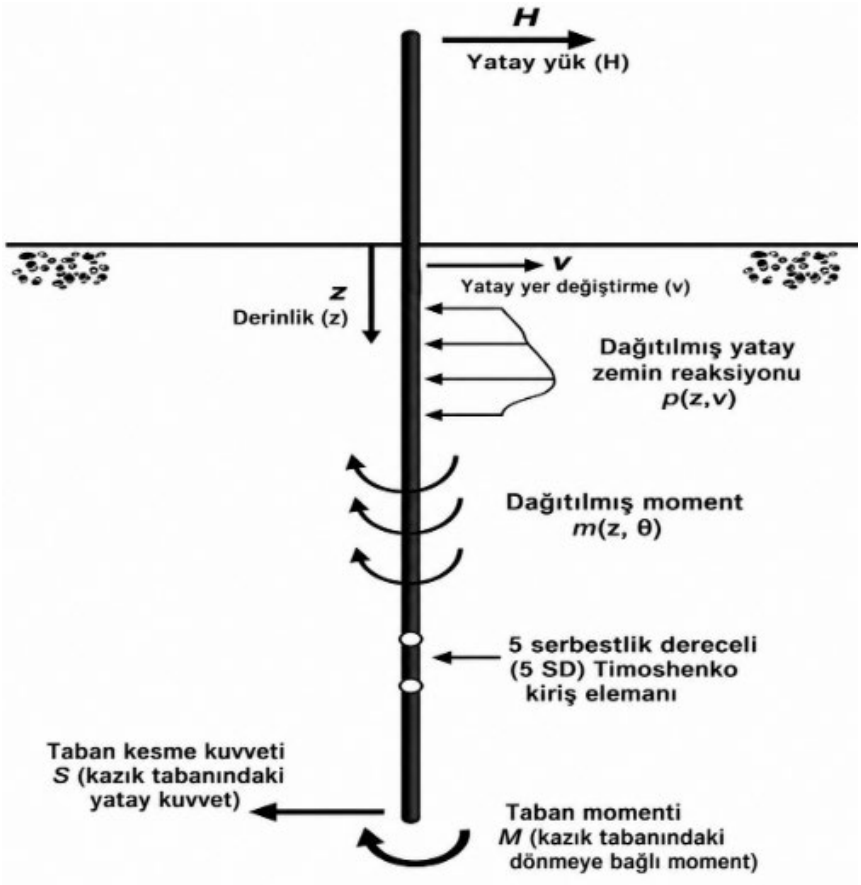
Kara ve denizlerdeki rüzgâr türbini temellerinde, açık uçlu, çelik boru tipi tekil kazıklar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Gürbüz, 2011). Son yıllarda açık deniz rüzgâr türbini uygulamalarının artmasıyla beraber tekil kazıkların kullanıldığı temel sistemleri, büyük boyutlu rüzgâr türbinleri için önemli bir seçenek haline gelmiştir (Arany vd. 2017; Demir ve Balas, 2025). Rüzgâr türbinlerinin boyutlarının zamanla giderek büyümesi, kohezyonsuz zeminin rölatif sıkılıklarında farklılıkların oluşması ve santrallerinin kıyıdan daha uzak ve daha derin deniz bölgelerine kurulması ile birlikte oluşan şiddetli çevresel yüklemelere maruz kalmaları, tekil kazıkların servis tasarımını daha kritik bir hale getirmiştir. Bu nedenle, tekil kazığın zemin yüzeyindeki yatay deplasmanını sınırlandırmak (h_m), yanal dayanımını ve dönme rijitliğini artırmak amacı ile çapı (D) 9 m'den büyük tekil kazıkların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Haiderali vd. 2023).

Yanal yükler altında tekil kazıkların analizleri, kazığın herhangi bir derinliğinde oluşan zemin direncinin kazık deplasmanı ile ilişkili olduğundan oldukça karmaşıktır. Literatürdeki ilk çalışmalarda kazığın elastik bir kirişten meydana geldiği ve zeminin birbirinden bağımsız Winkler yaylarından oluştuğu kabul edilmiştir (Matlock ve Reese, 1960). Broms (1964) kohezyonsuz zeminlere gömülü yanal yüklü kazıkların tasarımına yönelik limit denge yöntemine dayalı bir yöntem önermiştir. Araştırmacı, kazık boyunca gelişen yanal zemin direncinin büyüklüğünün ve dağılımının zeminin rölatif sıkılığına, kazığın uzunluğuna, rijitliğine ve yeraltı su seviyesine göre konumuna bağlı olduğunu ortaya koymuş; bu doğrultuda kazıkları davranışlarına göre kısa ve uzun kazık olarak sınıflandırmıştır. Literatürdeki mevcut yöntemler yanal yükler altında kazığın yük-deplasman ilişkisini gerçekçi yansıtamadığından Reese vd. (1974) gerçek kazıklar üzerindeki deneylere dayanarak kum zeminler için lineer p-y eğrilerini ampirik yöntemlerle elde etmiştir. Bu yöntemde kazık bir boyutlu (1D) modellenir ve zemin kazığa bağlı lineer olmayan yaylar ile basitleştirilerek, kazık üzerindeki yanal deplasmanlara bağlı zemin dirençleri oluşturur.

Reese vd. (1974) tarafından önerilen p-y eğrilerine dayanan Amerikan Petrol Enstitüsü (API, 2014) standardı; kum zemine gömülü açık deniz rüzgâr türbini tekil kazıklarının tasarımlarında halen en çok sıklık ile tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Bu yöntem kullanılarak kohezyonsuz zeminin içsel sürtünme açısı, efektif birim hacim ağırlığı, kazık çapı ve yanal deplasmana bağlı olarak kazık üzerine etki eden yanal zemin dirençleri, kazık kapasitesi, kazık üzerine etkinde moment, dönme, kesme kuvveti dağılımları ve değerleri hesaplanabilmektedir. Buna karşın, çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen saha deneyleri (Han vd., 2015, 2017), santrifüj model deneyleri (Klinkvort ve Hededal, 2013) ve üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar (FE) analizleri (Hearn ve Edgers, 2010; Hu vd., 2022), API (2014) tarafından önerilen p-y eğrilerinin yanal yüklü kazıkların yük-deplasman davranışını gerçekçi bir şekilde yansıtamadığını göstermiştir.

p-y eğrilerinin yanal yükler altındaki kazık davranışının tahminindeki yetersizlikleri ve bu yöntemin uzun ve narin kazıklar esas alınarak geliştirilmiş olması göz önünde bulundurulduğunda, açık deniz rüzgâr türbinlerinin temellerinde kullanılan büyük çaplı rijit tekil kazıkların yanal yükler altındaki davranışı son yıllarda birçok araştırmacı tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Zdravkovic vd. (2015) geleneksel p-y eğrileri tarafından

dikkate alınmayan kısa rijit kazıkların tabanında meydana gelen yer değiştirmeden kaynaklı oluşan zemin reaksiyonlarının tasarımcılar tarafından dikkate alınması gerektiğini raporlamıştır. Ahmed ve Hawlader (2016), yanal kazık direncinin hesaplanabilmesi için basitleştirilmiş eşitlikler önermiştir. Li vd. (2017), aşırı konsolide sıkı kumdaki tekil kazıklarda uyguladıkları yükleme testlerine dayanarak modifiye edilmiş p-y eğrilerini önermiştir. PISA araştırma projesi kapsamında yapılan saha deneyleri sonucunda; geleneksel p-y eğrileri üç boyutlu olarak modifiye edilmesinin yanı sıra; kazık ucu kesme kuvvetinin, momentinin ve yer değiştirmesi de hesaplamalara dahil edilmiştir (Byrne vd., 2015, 2017). Ayrıca, Byrne vd. (2015, 2017) önermiş oldukları 1D FE modelleri ile 3D FE analizinden tahmin edilen yanal kazık kapasitesi-deplasman ilişkileri arası farkın ihmal edilebilir bir seviyede olduğunu raporlamıştır. Byrne vd. (2015, 2017) tarafından önerilen 1D yöntem sayesinde, 3D analizlerin yüksek hesaplama süresi ve karmaşık modelleme gereksinimleri önemli ölçüde azaltılmıştır. Araştırmacılar tarafından önerilen 1D yanal kazık modeli ve dikkate aldığı zemin reaksiyon bileşenleri Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Tekil kazık üzerinde etkili olan kuvvetler ve momentler

Yapılan çalışma kapsamında, farklı zemin parametreleri, kazık çapları (D) ve narinlik oranları (L/D) değerleri için açık deniz yapılarındaki rüzgâr türbinlerinin tekil kazıkları 1D olarak PLAXIS Monopile isimli bilgisayar programından modellenmiştir. Zemin yapısı; PISA çalışmaları ile kalibre edilmiş olan homojen yapıdaki Dunkirk kumu olarak seçilmiştir. Analizlerde zeminin rölatif sıkılığı (D_r) %45 ile %90 aralığında, kazık çapı 4 ile 10 m

aralığında ve narinlik oranı 3 ile 10 arasındaki değerler seçilmiştir. 1D FE yöntemiyle elde edilen tekil kazıkların yanal kapasiteleri ve API (2014) tarafından önerilen geleneksel p-y yöntemine dayanan değerler ile karşılaştırılarak, API (2014) yönteminin tekil kazıklarda kullanılabilirliği tartışılmıştır.

2. 1D ANALİZLER

Analizler için zemin olarak homojen yapıdaki PISA metodolojisiyle beraber kalibre edilmiş olan Dunkirk kumu kullanılmıştır. İnce-orta daneli, silisli kötü derecelenmiş (üniform) yapıda olan Dunkirk kumunun rölatif sıkılık değerleri (D_r) %45, %60, %75 ve %90 olarak seçilmiştir. Zeminin başlangıç boşluk oranının (e_0) belirlenmesinde Burd vd. (2020) tarafından önerilen ampirik eşitlik (Eş. 1), zeminin efektif birim hacim ağırlığı (γ') ve içsel sürtünme açısı (ϕ') değerlerinin belirlenmesinde ise Brinkgreve vd. (2010) tarafından sırasıyla önerilen Eş. (2) ve Eş. (3)'te verilen bağıntılar kullanılmıştır. Zeminin sükûnetteki yanal toprak basıncı katsayısı (K_0), içsel sürtünme açısının bir parametresi olduğu bilinmesine rağmen; yapılan çalışmada yapılan çalışma da PLAXIS Monopile yazılımın önerisi doğrultusunda 0.4 sabit sayısı kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan rölatif sıkılığa bağlı sabit zemin parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

$$e_0 = 0{,}912 - 0{,}00376 D_r \tag{1}$$

$$\gamma' = 8{,}29 + 0{,}022 D_r \tag{2}$$

$$\phi' = 23 + 0{,}208 D_r \tag{3}$$

Tablo 1. Analizde kullanılan zemin parametreleri

D_r (%)	γ' (kPa)	e_0	φ' (°)	K_0
45	9,28	0,7428	32,36	0,4
60	9,61	0,6864	35,48	0,4
75	9,94	0,63	38,60	0,4
90	10,27	0,5736	41,72	0,4

PISA yönteminde, p-y eğrilerinin başlangıç rijitliğini belirleyen ve p-y eğrilerini karakterize eden kayma modülünün (G_0) hesaplanması için, Zdravkovic vd. (2015) tarafından önerilen eşitlik kullanılmıştır (Eş. 4).

$$G_0 = B \frac{(2{,}17 - e_0)^2}{1 + e_0} p'_{ref} \left(\frac{p'}{p'_{ref}} \right)^{0{,}5} \tag{4}$$

Burada B, 916'ya eşit sabit malzeme katsayısını, p'_{ref} 100 kPa' a eşit referans çevre basıncını, p' zemin tabakasının ortasına etki eden efektif gerilmeyi simgelemektedir.

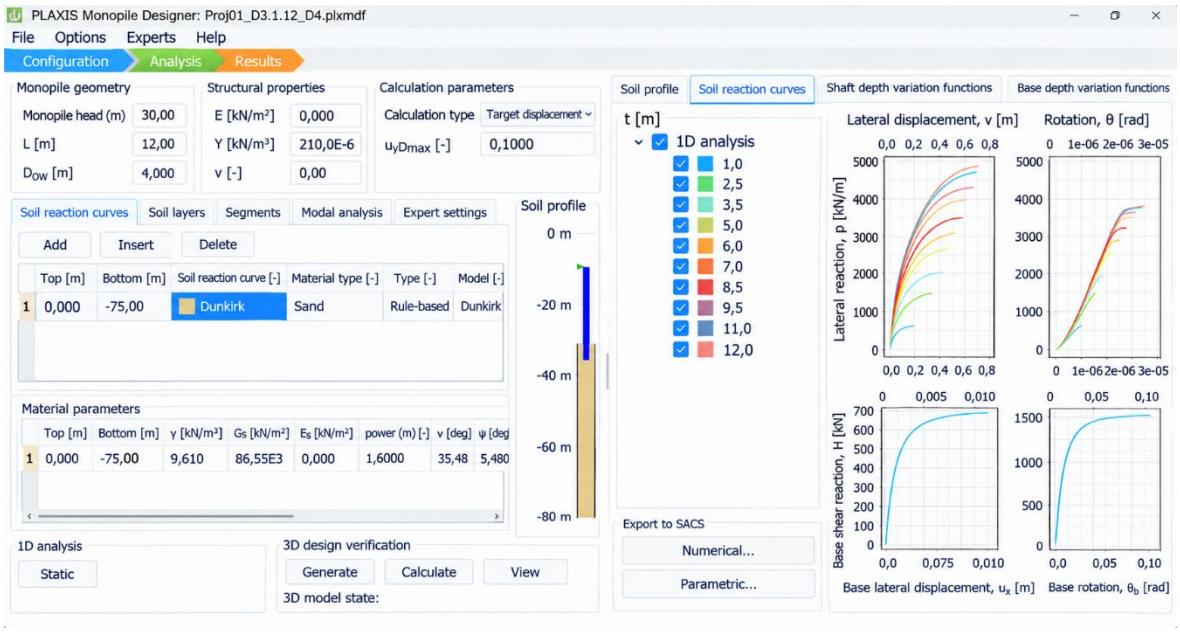
Rüzgâr türbini temellerinde kullanılan içi boş tekil kazığın kazıkların cidar kalınlıkları (t), API (2014) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak elde edilmiştir (Eş. 5). Kazığın elastisite modülü olarak da çelik için önerilen 210 GPa alınmıştır.

$$t = 0{,}00635 + D/100 \quad (5)$$

Gerçekleştirilen 1D FE analizlerinde tekil kazık çapı (D) 4 m ile 10 m aralığında, narinlik oranı (L/D) ise 3 ile 10 arasında seçilmiştir. Rölatif sıkılık ve narinlik oranına bağlı kayma modülü değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Analizler, kazığın zemin yüzeyindeki yatay deplasmanının kazık çapına oranı (v/D) 0,1 değerine ulaşıncaya kadar devam ettirilmiş; bu deplasman seviyesinde zeminde plastikleşmenin büyük ölçüde geliştiği ve nihai yanal taşıma kapasitesinin mobilize edildiği kabul edilmiştir. Analizlerde kullanılan PLAXIS Monopile yazılımının kullanıcı ara yüzü Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Rölatif sıkılık ve L/D oranıyla birlikte değişen G_0 değerleri

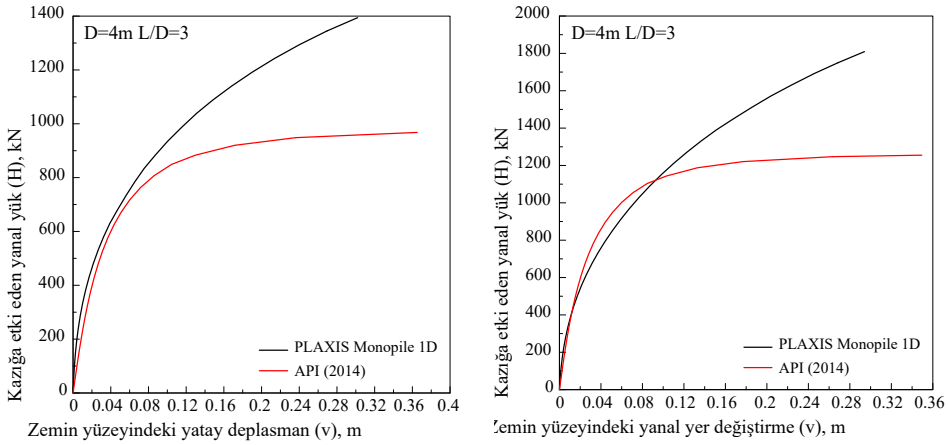
L/D = 3			
D_r (%)	D=4m	D=6m	D=9m
	G_0 (kPa)		
45	77153,09	94492,85	115729,64
60	85546,99	104773,24	128320,48
75	94828,70	116140,97	142243,06
90	105026,91	128631,17	157540,36
L/D = 6			
D_r (%)	D=4m	D=6m	D=9m
	G_0 (kPa)		
45	109110,95	133633,08	163666,43
60	120981,71	148171,73	181472,57
75	134108,04	164248,13	201162,06
90	148530,48	181911,94	222795,72
L/D = 9			
D_r (%)	D=4m	D=6m	D=9m
	G_0 (kPa)		
45	133633,08	163666,43	200449,62
60	148171,73	181472,57	222257,60
75	164248,13	201162,06	246372,20
90	181911,94	222795,72	272867,92



Şekil 2. Çalışmada kullanılan programın ara yüzü

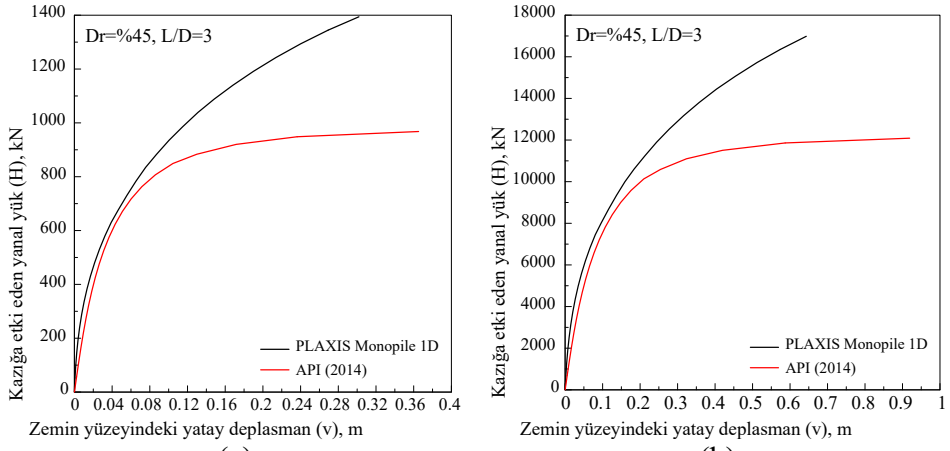
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çapı 4 m ve narinlik oranı 3 olan, %45 ve %60 rölatif sıkılığa sahip zeminlere gömülü kazıklar için zemin rölatif sıkılığının kazığın yanal yük-zemin yüzeyi yatay deplasman (H-v) davranışı üzerindeki etkisi Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'te de görüldüğü gibi rölatif sıkılığın artmasına bağlı olarak kazıkların yanal yük kapasitesi ve H-v eğrilerinin başlangıç rijitlikleri artış eğilimindedir. Bu durumun nedeni rölatif sıkılığın artması ile birlikte zeminlerin içsel sürtünme açısı değerlerinin artması ve bu durum sonucunda kazık önünde daha yüksek mobilize pasif direncin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca sıkılığın artması zeminin kayma modülünün artması da H-v eğrilerinin başlangıç rijitlikleri üzerinde etkilidir. API (2014) yöntemi ile PLAXIS Monopile 1D FE analizinden elde edilen çıktılar karşılaştırıldığında, API (2014) yönteminin program çıktılarından daha düşük yanal yük kapasitesi tahmin ettiği görülmüştür. API (2014) yaklaşımına göre elde edilen H-v eğrileri, daha düşük yatay seviyelerinde plastik davranış sergileyerek asimptotik bir karaktere ulaşmaktadır. Buna karşın, 1D analizlerden elde edilen H-v eğrileri pekleşen bir davranış göstererek kapasiteye ulaştıkları deplasman değerinde ani olarak yenilmişlerdir. Ayrıca, rijit kazıklarda rölatif sıkılığın artmasına bağlı olarak düşük deplasman değerlerinde API (2014) yaklaşımının kısmi olarak 1D FE çıktılarından daha yüksek tahmin etmiştir. Buna rağmen, rölatif sıkılığın artmasının, 1D analiz ve API (2014) yaklaşımı ile tahmin edilen kazık kapasitesi oranları üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu elde edilen bir diğer sonuçtur.



Şekil 3. Zeminin rölatif sıkılığının tekil kazığın H-v eğrileri üzerindeki etkisi: (a) D_r=%45, (b) D_r=%60

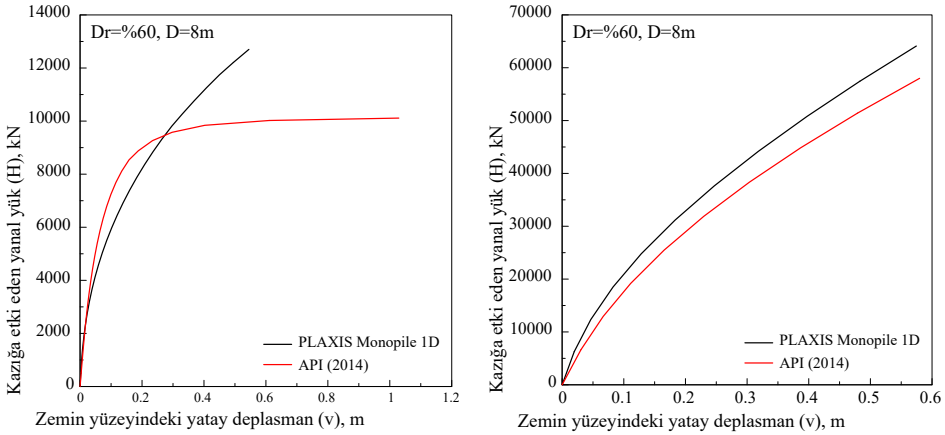
Şekil 4'te çapı (D) 4m ve 9m olan tekil kazıkların 1D FE ve API (2014)'den elde edilen yanal yük-zemin yüzeyi yatay deplasman (H-v) eğrileri sunulmuştur. Bu grafiklerde zeminin rölatif sıkılığı ve narinlik oranı %45 ve 3 olarak sabit alınmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi hem 1D analizlerde hem de API (2014) yönteminde kazıkların H-v eğrilerinin başlangıç rijitlikleri, kapasitesi ve kapasite değerlerine ulaşmaları için gerekli maksimum zemin yanal yer değiştirmesi değerleri artış göstermiştir. Bu durum kazık çapının artmasına bağlı olarak daha büyük zemin hacminin pasif duruma geçmesi ve atalet momentinin artması sonucu kazık rijitliğinin artması ile ilişkilendirilebilir. Her iki yöntem karşılaştırıldığında, kazık çapının aynı zemin yüzeyi yatay deplasmanı seviyelerinde 1D analizlerden elde edilen yanal yükün API (2014) yaklaşımı ile tahmin edilen yanal yüke oranı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Tekil kazık çapının H-v eğrileri üzerindeki etkisi: (a) D=4m, (b) D=9m

Narinlik oranı (L/D) 3 ve 8, çapı (D) 8 m olan %60 rölatif sıkılığa sahip Dunkirk kumuna gömülü tekil kazıklar için 1D analizler ve API (2014) yönteminden elde edilen H-v eğrileri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi narinlik oranının ve dolayısıyla kazık boyunun artması ile yanal yük kapasitesi ve H-v eğrilerinin başlangıç rijitlikleri değerleri artış gösterirken, kapasite değerlerine ulaşmaları için gerekli maksimum yatay deplasman

değerleri azalmıştır. Bu durum, kazık boyunun artması sonucu daha büyük zemin hacminin mobilize olması, kazık ucu deplasman miktarının azalması ve deformasyon modunun dönmeden eğilmeye ötelenmesinden kaynaklanmaktadır. Düşük L/D değerlerinde 1D analiz sonuçlarına kıyasla API (2014) yöntemi daha muhafazakâr sonuçlar vermesine rağmen; L/D oranının artmasına bağlı olarak 1D analiz sonuçları ile API (2014) p-y yaklaşımı arasında fark azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum kısa ve rijit kazıklar için mevcut p-y yöntemlerinin yetersiz olduğunu göstermektedir. Düşük L/D yani daha rijit kazık durumlarında API (2014) yöntemi ile tahmin edilen H-v grafikleri kapasite değeri için gerekli deplasman değerine ulaştıktan sonra asimptotik bir davranış sergilemesine rağmen, L/D artmasına bağlı olarak kazığın narinliği artmış H-v eğrileri rijitleşerek ani yenilmiştir.



Şekil 5. Tekil kazık narinlik oranının H-v eğrileri üzerindeki etkisi: (a) L/D=3, (b) L/D=8

4. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada açık deniz rüzgâr türbinlerinin temel sistemlerini oluşturan kum zeminlere gömülü tekil kazıkların yanal yükler altındaki davranışı PLAXIS Monopile yazılımı kullanılarak 1D olarak incelenmiştir. Zeminin rölatif sıkılığının (D_r), kazık çapının (D) ve kazık narinlik oranının (L/D) etkisi sistematik olarak araştırılmıştır. Elde edilen kazığın yanal yük-zemin yüzeyi yatay deplasman (H-v) eğrileri günümüzde halen açık deniz yapılarının tasarımı için önerilen API (2014) p-y eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Rölatif sıkılığın artmasına bağlı olarak kazıkların H-v eğrilerinin rijitlikleri, yanal yük kapasite değerleri artış gösterirken, kapasite değerlerine ulaşmaları için gerekli maksimum yatay deplasman değerleri azalmıştır. API (2014) tarafından önerilen p-y yöntemi 1D analizlerden daha düşük kazık kapasitesi tahmin etmesine karşın; rölatif sıkılığın artması ile düşük deplasman seviyeleri için 1D analizlerden daha yüksek yanal yük öngörmüştür.
- Kazık çapının artmasına bağlı olarak kazıkların H-v eğrilerinin rijitlikleri, yanal yük kapasite değerleri ve kapasite değerlerine ulaşmaları için gerekli maksimum yatay deplasman değerleri artış eğilimdedir. Kazık çapının değişiminin 1D analizlerden elde edilen ve API (2014) tarafından tahmin edilen yüklerin oranına etkisi ihmal edilebilir seviyededir.
- Narinlik oranının artması ile kazıkların H-v eğrilerinin rijitlikleri, yanal yük kapasite değerleri artış gösterirken, kapasite değerlerine ulaşmaları için gerekli maksimum yatay deplasman değerleri azalmıştır. Ayrıca, narinlik oranının artması ile kazık deformasyon davranışı rijit kazıktan esnek kazığa yaklaşmasından kaynaklı olarak

1D analizlerden elde edilen H-v grafikleri ile p-y eğrilerine dayanan API (2014) yöntemi arası fark azalmıştır.

Elde edilen sonuçlara bakıldığında her iki yöntemin de; kazık geometrisinde meydana gelen değişikliklere benzer tepkiler verdiği görülürken, kazık narinlik oranının artmasıyla beraber benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak 1D FE yöntemi, API (2014) yöntemine göre nihai yanal yük kapasitelerini daha yüksek oranda tahmin etmiş ve daha gerçekçi sonuçlar sunmuştur.

KAYNAKLAR

Ahmed, S.S. ve Hawlader, B. (2016), "Numerical Analysis of Large-Diameter Monopiles in Dense Sand Supporting Offshore Wind Turbines", International Journal of Geomechanics, Vol 16 (5), 04016018.

API (2014). Recommended Practice 2A-WSD: Planning, designing and constructing fixed offshore platforms – Working stress design (22nd ed.). American Petroleum Institute.

Arany, L., Bhattacharya, S., Macdonald, J. ve Hogan, S.J. (2017), "Design of Monopiles for Offshore Wind turbines in 10 Steps", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 92, 126-152.

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, Vol 137, 142.

Broms, B.B. (1964), "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol 90 (3), 123-156.

Burd, H.J., Taborda, D.M.G., Zdravković, L., Abadie, C.N., Byrne, B.W., Houlsby, G.T., Gavin, K.G., Igoe, D.J.P., Jardine, R.J., Martin, C.M., McAdam, R.A., Pedro, A.M.G. ve Potts, D.M. (2020), "PISA Design Model for Monopiles for Offshore Wind Turbines: Application to A Marine Sand", Géotechnique, Vol 70 (11), 1048–1066.

Byrne, B.W., McAdam, R., Burd, H.J., Houlsby, G.T., Martin, C.M., Zdravković, L., Taborda, D.M.G., Potts, D.M., Jardine, R.J., Sideri, M., Schroeder, F.C., Gavin, K., Doherty, P., Igoe, D., Muir Wood, A., Kallehave, D., Skov Gretlund, J. (2015), "New Design Methods for Large Diameter Piles Under Lateral Loading for Offshore Wind Applications", 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Oslo, Norway.

Byrne, B.W., McAdam, R.A., Burd, H.J., Houlsby, G.T., Martin, C.M., Beuckelaers, W.J. P., Zdravkovic, L., Taborda, D.M.G., Potts, D.M., Jardine, R.J., Ushev, E., Liu, T., Abadias, D., Gavin, K., Igoe, D., Doherty, P., Gretlund, J.S., Andrade, M.P., Wood, A.M., Schroeder, F.C., Turner, S. ve Plummer, M.A.L. (2017), "PISA: New Design Methods for Offshore Wind Turbine Monopiles", 8th International Conference, 142-161.

Demir, A.K. ve Balas, C.E. (2025), "Dynamic Frequency Behavior of Hybrid Offshore Systems Under Stochastic Variations", Ocean Engineering, Vol 340, 122232.

Gürbüz, A. (2011), "Kohezyonsuz Zeminler İçerisinde Yatay Yüklenmiş Çelik Kazıkların Deplasmanlarının Elastik Eğri Denklemi Yardımı ile Bulunması", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol 26 (1), 205-212.

Haiderali, A.E., Nakashima, M., Madabhushi, G.S., Lau, B.H. ve Haigh, S.K. (2023), "Numerical Modeling of The Monotonic Lateral Behavior of XL and XXL Monopiles In Kaolin", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 149(9), 04023067.

Han, F., Prezzi, M. ve Salgado, R. (2017), "Energy-Based Solutions for Nondisplacement Piles Subjected to Lateral Loads", International Journal of Geomechanics, Vol 17 (11), 04017104.

Han, F., Salgado, R. ve Prezzi, M. (2015), "Nonlinear Analyses of Laterally Loaded Piles– A Semi-Analytical Approach", Computers and Geotechnics, Vol 70, 116-129.

Hearn, E.N., Edgers, L. (2010), "Finite Element Analysis of an Offshore Wind Turbine Monopile". GeoFlorida 2010, 1857-1865.

Hu, Q., Han, F., Prezzi, M., Salgado, R. ve Zhao, M. (2022), "Finite-Element Analysis of The Lateral Load Response of Monopiles in Layered Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 148 (4), 04022001.

Li, W., Zhu, B. ve Yang, M. (2017), "Static Response of Monopile to Lateral Load In Overconsolidated Dense Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 143(7), 04017026.

Klinkvort, R.T. ve Hededal, O. (2013), "Lateral Response of Monopile Supporting an Offshore Wind Turbine", Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, Vol 166 (2), 147-158.

Matlock, H. ve Reese, L.C. (1960), "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol 86 (5), 63-92.

Reese, L.C., Cox, W.R., Koop, F.D. (1974), "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand", Offshore Technology Conference, OTC-2080.

Zdravković, L., Taborda, D. M. G., Potts, D., Jardine, R., Sideri, M., Schroeder, F., Byrne, B. W., McAdam, R., Burd, H., Houlsby, G. T., Martin, C., Gavin, K., Doherty, P., Igoe, D., Wood, A., Kallehave, D., Gretlund, J. (2015), "Numerical Modelling of Large Diameter Piles Under Lateral Loading For Offshore Wind Applications", 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Oslo, Norway.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	**Açıklama**	**Sembol**	**Açıklama**
B	Sabit katsayı	L	Kazık boyu
D	Kazık çapı	L/D	Narinlik oranı
D_r	Rölatif sıkılık	t	Cidar kalınlığı
e_0	Boşluk oranı	v	Kazığın zemin seviyesindeki deplasmanı
G_0	Kayma modülü		
H	Kazığa etki eden yanal kuvvet	ϕ'	İçsel sürtünme açısı
K_0	Sükûnetteki toprak basıncı katsayısı	γ'	Efektif birim hacim ağırlık