

DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNİ TEKİL KAZIK TEMELLERİNİN YANAL YÜKLEME ALTINDA DAVRANIŞI

BEHAVIOR OF MONOPILE FOUNDATIONS OF OFFSHORE WIND TURBINES UNDER LATERAL LOADING

Atasev Dođukan TAŞBAŞI¹, Nejan HUVAJ²

ÖZET

Dünyadaki mevcut deniz üstü rüzgâr türbinleri için 60 m'ye kadar olan su derinliklerinde en yaygın olarak kullanılmış olan temel tipi tekil kazık (monopile) temel tipidir. Dalga ve rüzgâr yükleri gibi yanall yükler altında tekil kazıkların davranışı son yıllarda 3-boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmekle birlikte, çoğunlukla endüstri tasarımlarında 1-boyutlu sonlu farklar yöntemi ile, "yanall yük-deplasman (p-y)" eğrileri ve Amerikan Petrol Enstitüsü (API) ve Norveç DNV (Det Norske Veritas) şartnameleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, geleneksel API-DNV p-y yöntemlerine göre daha gelişmiş ve güncel bir çalışma olan, PISA (Pile Soil Analysis) projesi kapsamında geliştirilen tasarım metodolojisi (Byrne vd., 2020) ile yanall yüklemeye maruz kalan deniz tabanına gömülü bir tekil kazığın davranışı incelenmiştir. Bu amaçla geliştirilen PLAXIS MoDeTo (Monopile Designer Tool) kullanılarak tekil kazık Timoshenko kiriş teorisi ile modellenirken, zemin, 3-boyutlu sonlu elemanlar analizi ile kalibre edilen veya kullanıcı tarafından tanımlanabilen zemin reaksiyon eğrileri ile temsil edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, detaylı özellikleri bilinen, referans deniz üstü rüzgâr türbini (IEA 22 MW) değerlendirilerek yük koşulları belirlenmiştir. Seçilen referans rüzgâr türbini için orta-katı kil zemin koşuluna göre tekil kazığın tasarımı ve optimizasyonuna yönelik hesaplamalar PLAXIS MoDeTo ile yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi, Tekil Kazık Tasarımı, PISA Projesi, PLAXIS

ABSTRACT

The most commonly used foundation type for existing offshore wind turbines in the world in water depths up to 60 m is the monopile foundation type. Although the behavior of monopiles under lateral loads such as wave and wind loads has been modeled with the 3-dimensional finite element method in recent years, 1-dimensional finite difference method is commonly used in industrial designs utilizing "lateral load-displacement (p-y)" curves, the American Petroleum Institute (API), and Norwegian DNV (Det Norske Veritas) specifications. In this study, the behavior of a monopile buried in the seabed subjected to lateral loading was examined with the design methodology developed within the scope of

¹ Arş. Gör., Orta Dođu Teknik Üniversitesi, atasevt@metu.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Doç. Dr., Orta Dođu Teknik Üniversitesi, nejan@metu.edu.tr

the PISA (Pile Soil Analysis) project (Byrne et al., 2020), which is a more advanced and updated study than the traditional API-DNV p-y methods. PLAXIS MoDeTo (Monopile Designer Tool), developed for this purpose, models the monopile with Timoshenko beam theory, while the soil is represented by soil reaction curves that are calibrated by 3-dimensional finite element analysis or can be defined by the user. Within the scope of this study, reference offshore wind turbine (IEA 22 MW) with known detailed features was evaluated and load conditions were determined. Calculations for the design and optimization of monopile according to medium-stiff clay soil conditions for the selected reference wind turbine were carried out with PLAXIS MoDeTo.

Keywords: *Offshore Wind Energy, Monopile Design, PISA Project, PLAXIS*

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Açık deniz rüzgâr enerjisi son yıllarda giderek önem kazanan bir yenilenebilir enerji teknolojisi olup, Uluslararası Enerji Ajansı'nın tahminine göre (2019), 2040 yılında küresel açık deniz rüzgâr enerjisinin yıllık kapasitesi 40 GW'a, kümülatif kapasitesi ise 560 GW'a ulaşacaktır. Açık denizde yer alan bir rüzgâr türbini, deniz tabanına sabit temeli olan veya yüzer bir platform üzerinde yer alan ve karmaşık/değişken okyanus koşullarına, rüzgâr, dalga ve akıntılardan kaynaklanan yanal yüklere maruz kalan uzun ve esnek bir yapıdır. Wind Europe (2021)'e göre deniz üstü rüzgâr türbinleri için tasarlanan temel çeşitleri arasında büyük çaplı, çelik ve açık uçlu tekil kazıklar en çok tercih edilen temel tipidir. 2019 yılı sonu itibarıyla Avrupa'da 4258 adet tekil kazık temelli açık deniz rüzgâr türbini bulunmakta olup, tekil kazık temelli bu türbinler toplam kurulu türbinlerin %81'ini oluşturmaktadır (Gupta & Basu, 2020; Ramirez vd., 2020). Tekil kazık temellerin yanal yüklere karşı taşıma kapasitesinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve farklı yük koşulları altında kazıkta oluşması beklenebilecek deplasman/tilt gibi kriterlerin titizlikle kontrol edilmesi önem arz etmektedir. Bu bildiri kapsamında, geleneksel olarak kullanılmakta olan "yanal yük-deplasman (p-y)" eğrileri, Amerikan Petrol Enstitüsü (API) ve Norveç DNV (Det Norske Veritas) yöntemlerine göre daha gelişmiş ve güncel bir çalışma olan, PISA (Pile Soil Analysis) projesi kapsamında geliştirilen tasarım metodolojisi (Byrne vd., 2020) ile yanal yüklemeye maruz kalan deniz tabanına gömülü bir tekil kazığın davranışı incelenmiştir. Rüzgâr ve dalgaların etkisiyle oluşan yanal yük ve momentlerin belirlenmesi için literatürde detaylı özellikleri paylaşılan IEA 22 MW deniz üstü rüzgâr türbini kullanılmış ve orta-katı kil zemin koşuluna göre tekil kazığın optimum boyutlarının belirlenmesi için PLAXIS MoDeTo (Monopile Designer Tool)'da analizler yapılarak, ön tasarım olarak değerlendirilebilecek olan sonuçlar bu bildiride sunulmuştur.

2. PISA YÖNTEMİ

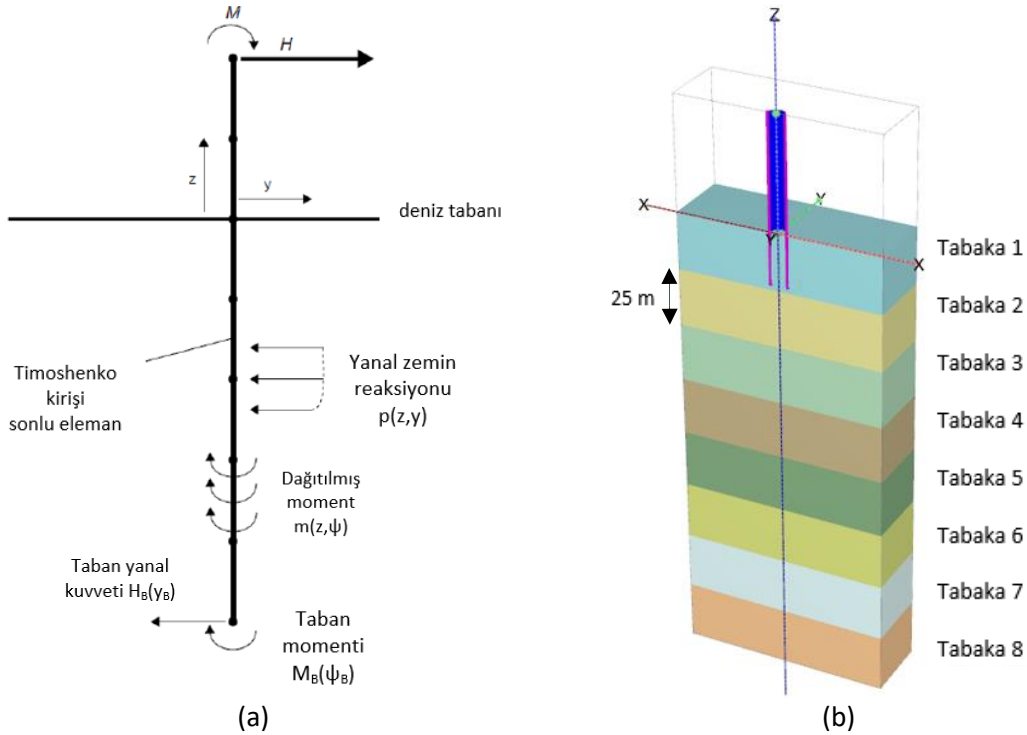
Günümüzde kullanılmakta olan şartnameler genellikle tekil kazığın gömülü bir kiriş olarak modellendiği ve yanal zemin davranışının p-y eğrileriyle temsil edildiği basitleştirilmiş 1-boyutlu analiz yöntemini (p-y yöntemini) esas almaktadır. P-y eğrileri tekil kazığa etki eden dağıtılmış yanal yükler ile tekil kazığın yanal deplasmanı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi ortaya koymaktadır. P-y yöntemi başlangıçta açık deniz petrol ve doğal gaz endüstrisinde

kullanılan nispeten küçük çaplı kazıklar için geliştirilmiştir (Matlock, 1970; Reese vd., 1975; Reese & Matlock, 1956). Fakat, API (2010) ve DNV-GL (2016)'da belirtildiği gibi p-y yönteminin standart biçimleri genellikle açık deniz rüzgâr türbini uygulamaları için kullanılan nispeten düşük "gömülü kazık uzunluğu / kazık dış çapı", L/D, oranına (yaklaşık 6 veya daha az) sahip kazıklara uygulandığında önemli sınırlamalara sahiptir (Doherty & Gavin, 2011; Byrne vd., 2017). Bu sınırlamalar şu şekildedir:

- p-y yaklaşımına dayalı tasarım tahminleri ile gerçek açık deniz rüzgâr türbini yapılarının ölçülen performansı arasındaki tutarsızlıklara dair kanıtlar (Kallehave vd., 2012)
- rutin saha incelemesi sırasında elde edilen zemin verileriyle p-y eğrilerini tanımlamak için gereken parametrelerin ilişkilendirilmesi konusunda netlik eksikliği (Jeanjean vd., 2017)
- p-y yönteminin döngüsel yükleme etkilerini ele almada eksikliği (Byrne vd., 2020).

Bu sebeplerden ötürü bu çalışma, açık deniz kazık temellerinin hızlı ve yüksek doğrulukta tasarım hesaplamaları için PISA tasarım modeli olarak adlandırılan yeni bir modelleme yaklaşımını açıklamaktadır. PISA modeli geleneksel p-y yönteminden yararlanmaktadır fakat bunu nispeten düşük L/D değerlerine sahip kazıklar için zemin-reaksiyon bileşenlerini de içerecek şekilde genişletmektedir (Byrne vd., 2015, 2017, 2019a; Schroeder vd., 2015). Model bir dizi özel 3-boyutlu sonlu eleman analizine dayanarak kalibre edilmektedir. Model kalibre edildikten sonra, daha ayrıntılı, ancak hesaplama açısından maliyetli 3-boyutlu sonlu eleman yöntemleri kullanılarak elde edilenlerle yakından eşleşen sonuçlarla hızlı hesaplamalar yapmak için kullanılabilir. PISA tasarım modeli, tekil kazık temellere uygulandığında geleneksel p-y yönteminin bazı sınırlamalarını ele almaktadır fakat mevcut model, geleneksel p-y yöntemi gibi döngüsel yükler altındaki tekil kazığın davranışını içermemektedir. Fakat, nispeten düşük L/D değerlerine sahip kazıklar için doğru tahminleri kolaylaştırmaktadır. Byrne (2020)'ye göre gelecekteki araştırmalarda PISA yöntemi ile tekil kazığın döngüsel yükler altındaki davranışı da incelenebilecektir fakat döngüsel yükler altındaki davranış bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

PISA Projesi konsept tekil kazık tasarımı için yeni bir tasarım yöntemi geliştirmiştir (Byrne, 2017). Zemin-reaksiyon eğrileri (m 'nin dağıtılmış moment, ψ 'nin dönme açısı H_B 'nin taban kesme kuvveti, M_B 'nin taban momenti olduğu p-y, m- ψ , H_B -y ve M_B -y) 3-boyutlu sonlu elemanlar analizlerinden çıkarılmış ve tekil kazığı temsil eden 1-boyutlu Timoshenko kiriş modelinde kullanılmıştır (Şekil 1a). Pratik uygulama için PISA tasarım yöntemini kullanarak tekil kazık temel tasarımı için PLAXIS MoDeTo yazılım aracı geliştirilmiştir (Panagoulas vd., 2018). Şekil 1b'de kalibrasyon aşamasında oluşturulan PLAXIS 3D model gösterilmiştir. Modelde 200 m derinliğinde zemin tanımlanmış olup, zemin eşit derinlikte 8 ayrı tabakaya bölünmüştür. Şekil 1b'deki modelin geometrisi x-ekseninde kazık dış çapının 12 katı uzunlukta (kazık merkezinin sağından ve solunda 6 kazık dış çapı kadar mesafe), y ekseninde ise kazık dış çapının 4 katı uzunluktadır. Bu uzunlukların kullanılma sebebi ise analiz sonuçlarının yetersiz uzunluktaki zemin geometrisinden etkilenmesini engellemek, zeminin yeterince uzun olmasını sağlamak içindir. Ayrıca, kazığın yalnızca yarısı simetrik olduğu için modellenmiştir. Dolayısıyla $y = 0$ 'daki düşey düzlem simetri düzlemidir. Kalibrasyon analizlerinde kaba ağ boyutu (coarse-mesh size) kullanılmıştır. Başlangıç koşulu olarak ise suyun x ve y-ekseni boyunca drenajına izin verilirken negatif z-yönünde ise izin verilmemiştir.



Şekil 1. (a) PISA Projesindeki 1-Boyutlu Sonlu Elemanlar Modeli (Panagoulas vd., 2018), (b) Üç boyutlu sonlu elemanlar yazılımında kullanılan zemin profili ve tekil kazık

3. ZEMİN KOŞULLARI

Ülkemizde deniz tabanı zeminlerinin özelliklerine yönelik detaylı bir veri tabanı bulunmadığından, bu çalışmada deniz tabanından 200 m derinliğe kadar, derinlikle üniform olarak tek bir zemin tipi bulunması durumu göz önüne alınmış ve seçilen idealize bir zemin tipi (orta-katı kil) için tekil kazık ön tasarımı yapılmıştır. Deniz tabanında yer alan orta-katı killer için, zemin özelliklerini doğru yansıtacak şekilde zemin parametreleri literatürden ve ülkemizdeki sınırlı sayıdaki deniz tabanı etütlerine dayanarak belirlenmiştir (Oğuz, 2017; Oğuz vd., 2019; Oğuz & Huvaj, 2020; Caceoğlu, 2023). Tablo 1’de seçilen orta-katı kil zeminin özellikleri sunulmuş ve analizlerde NGI-ADP zemin bünye modeli esas alınarak drenajsız kayma mukavemeti kullanılmıştır. Deniz tabanı killerinin drenajsız kayma dayanımlarının derinlikle artışı göz önüne alınmıştır. Zeminin efektif birim hacim ağırlığı (γ') 8.69 kN/m^3 ; sükunetteki yanal zemin basınç katsayısı, K_0 , ise 1.0 olarak kullanılmıştır. Tablo 1’deki üst ve alt tabaka ifadeleri, o tabakanın başladığı ve bittiği derinliği ifade etmektedir.

Tablo 1. Seçilen orta-katı kil zemin özellikleri

Tabaka Numarası	Deniz tabanından derinlik (m)	Küçük gerinim kayma modülü, G_0 (kN/m^2)	Tabaka üst sınırındaki drenajsız kayma dayanımı, $S_{u,\text{üst}}$ (kN/m^2)	Tabaka alt sınırındaki drenajsız kayma dayanımı, $S_{u,\text{alt}}$ (kN/m^2)
1	0-25	76900	17.2	59.7
2	25-50	161900	59.7	102.2
3	50-75	246900	102.2	144.7
4	75-100	331900	144.7	187.2

5	100-125	416900	187.2	229.7
6	125-150	501900	229.7	272.2
7	150-175	586900	272.2	314.7
8	175-200	671900	314.7	357.2

Tablo 1’de detayları paylaşılan 8 tabakadan oluşan zeminin üç boyutlu sonlu elemanlar yazılımındaki (PLAXIS 3D) geometrisi Şekil 1(b)’de gösterilmiştir.

4. HESAPLANAN YÜKLER VE TASARIM KRİTERLERİ

PISA yönteminin bütünleştirildiği PLAXIS MoDeTo yazılımı kullanılarak bu çalışma kapsamında yalnızca “servis yükleri” altında, bir diğer deyişle SLS tasarım kriterlerine göre, gereken minimum kazık uzunluğu bulunmaya çalışılmıştır. Arany vd. (2017) tekil kazıkların geoteknik tasarımı için 5 kritik yük kombinasyonu olduğunu belirtmiştir ve bu kombinasyonlar Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Tekil Kazıkların Geoteknik Tasarımı için Kritik Yük Kombinasyonları (Arany vd., 2017)

Kombinasyon Numarası	Rüzgâr yükü	Dalga yükü	Uygulama Yönü
C1	Anma rüzgâr hızında (rated wind speed) normal türbülans durumu	1-yıllık ekstrem deniz durumu	Aynı doğrultuda*
C2	Anma rüzgâr hızında ekstrem türbülans durumu	50-yıllık ekstrem dalga yüksekliği	Aynı doğrultuda
C3	Anma rüzgâr hızında ekstrem çalışma rüzgârı durumu	1-yıllık ekstrem dalga yüksekliği	Aynı doğrultuda
C4	Devreden çıkma rüzgâr hızında ekstrem çalışma rüzgârı durumu	50-yıllık ekstrem dalga yüksekliği	Aynı doğrultuda
C5	Anma rüzgâr hızında ekstrem türbülans durumu	50-yıllık ekstrem dalga yüksekliği	90° Hizasızlık

* Rüzgâr ve dalga yüklerinin aynı doğrultuda kazığa uygulanması durumu

5 numaralı yük kombinasyonundan gelecek olan yükler diğer dört yük kombinasyonundan daha az olacağı için bu çalışmada sadece ilk dört yük kombinasyonu göz önünde bulundurulmuştur. Seçilen türbin (IEA 22 MW) ve İzmir’de olası bir açık deniz rüzgâr enerjisi sahasına göre (örneğin, Tercan vd. (2020)’ye göre Çeşme Altınkum 3 km açıklarında) bu dört yük kombinasyonu için belirlenen yükler, SLS tasarım kriterleri de göz önünde bulundularak belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. SLS’e göre Belirlenen ve Kazık Başına Etkiyen Yükler

Kombinasyon Numarası	Yanal kuvvet, H (MN)	Moment, M (MN.m)
C1	8.0	437
C2	11.4	402.2
C3	13.9	1051.9
C4	8.8	-5.8*

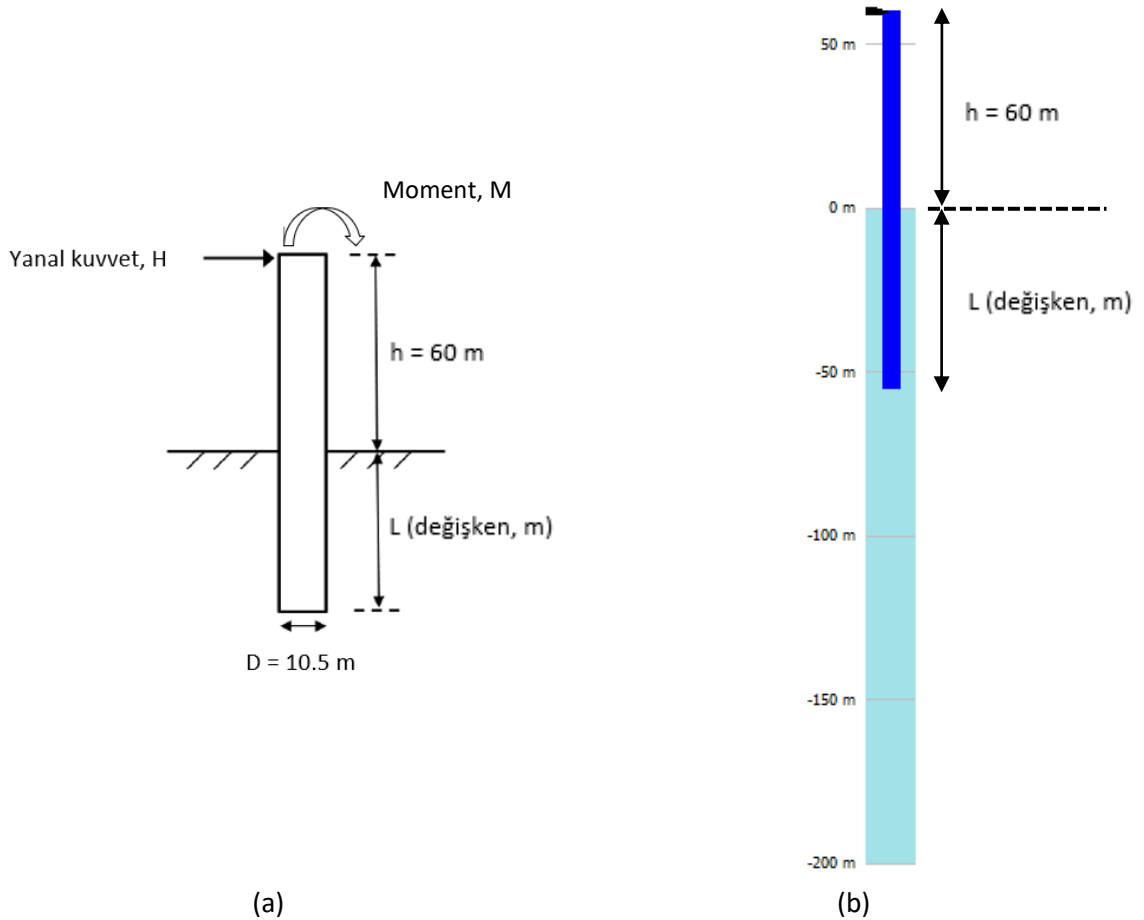
* “-” saat yönünün tersi yönde bir moment uygulandığını ifade etmektedir.

Rüzgâr yükleri DNV (2014) ve IEC (2005)’e göre hesaplanmıştır. Rüzgâr yükü hesabında; integral uzunluk ölçeği, referans türbülans değeri, türbinin anma (rated wind speed) ve devreden çıkma (cut-out) rüzgâr hızları, türbinin göbek yüksekliği, rotor çapı, 1P maksimum

frekans, sahanın ortalama rüzgâr hızı, Weibull parametreleri ve su derinliği parametrelerinden yararlanılmıştır. Dalga yükleri için ise Morison's eşitliği kullanılmıştır ve Morison's eşitliğine göre dalga yükü hesabında gerekli olacak dalga parametreleri (belirgin dalga yükseklikleri ve pik dalga periyodu) Copernicus veri tabanında (Korres vd., 2021, Korres vd., 2023) son 30 yılda kayıt altına alınan dalga verilerinden elde edilmiştir.

Tasarımı yapılacak olan tekil kazık Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir. Analizlerde literatürdeki ve sektördeki tipik geometri ve boyutlar incelenerek, kazık çapı (D), 10.5 m ve deniz tabanından yukarıda kalan kazık uzunluğu (h), 60 m olarak kabul edilmiştir. Tasarımı yapılan kazığın bulunduğu yerde deniz derinliğinin ise 50 metre olduğu varsayılmıştır. Kazığın çelik et kalınlığı (t) ise API (2005)'te yayınlanan eşitlik (1) kullanılarak 111.35 mm hesaplanmıştır. DNV (2014)'e göre, SLS tasarım kriterinde deniz tabanındaki kazık dönme açısının 0.5 dereceyi geçmemesi gerekmektedir. Arany vd. (2017)'e göre ise deniz tabanında kazık yanal deplasmanın 0.2 metreyi geçmemesi gerekmektedir. Bu yüzden analizlerde bu kriterler göz önünde bulundurularak optimum gömülü kazık uzunluğu bulunmaya çalışılmıştır.

$$t = 6.35 + D/100 [mm] \quad (1)$$



Şekil 2. Tasarımı Yapılan Tekil Kazığın (a) Şematik Gösterimi, (b) Plaxis MoDeTo'daki Gösterimi

Tekil kazıkların doğal frekansının kuvvetlerin önemli dinamik amplifikasyonuna, yani rezonansa yol açmamasını da sağlamak oldukça önemlidir. Bunun nedeni kazıkların çeşitli dinamik yükler altında olmasıdır. Bu yükler arasında dalgalar, rotor dönüş frekansı (1P) ve tipik üç kanatlı bir türbin için kanat geçiş frekansı (3P) bulunur (Caceoğlu, 2023). IEA 22 MW türbinin 1P ve 3P frekans aralığı sırasıyla 0.1-0.13 ve 0.3-0.39 (Zahle vd., 2024) olduğundan dolayı tasarımda sistemin rezonansa girmesini engellemek için türbin-kazık sisteminin frekansının 1P-3P frekans aralığında kalmasına bu çalışmada dikkat edilmiştir.

5. KALİBRASYON UZAYI, ZEMİN-REAKSİYON EĞRİLERİ VE OPTİMİZASYON

Tasarım geometrik parametrelerini, yani gömülü kazık uzunluğu L , kazık dış çapı D , kazık et kalınlığı t ve yük eksantrikliği h 'yi kapsayacak şekilde, kalibrasyon modelleri olarak adlandırılan bir dizi 3-boyutlu sonlu eleman tekil kazık modeli tanımlanmıştır. Bu geometrik parametreler (Tablo 4), nihai tekil kazık tasarımının belirlenmiş tasarım uzayı içinde kalmasını sağlayacak şekilde seçilmiştir. Aksi takdirde 1-boyutlu modelin güvenilirliği şüpheli olmaktadır. Bu çalışmada elde edilen zemin-reaksiyon eğrilerinin kalibrasyonu için 12 adet 3-boyutlu sonlu eleman modeli kullanılmış ve Tablo 4'te bu kalibrasyon modelleri özetlenmiştir.

Tablo 4. 3-Boyutlu Sonlu Eleman Kalibrasyon Modelleri

Kalibrasyon modeli	h (m)	L (m)	D	t (mm)
1	50	22.5	7.5	81.35
2	50	60	7.5	81.35
3	60	25.5	8.5	91.35
4	60	68	8.5	91.35
5	70	28.5	9.5	101.35
6	70	76	9.5	101.35
7	80	31.5	10.5	111.35
8	80	84	10.5	111.35
9	90	34.5	11.5	121.35
10	90	92	11.5	121.35
11	100	37.5	12.5	131.35
12	100	100	12.5	131.35

3-boyutlu sonlu eleman modellerinin analizi deplasman kontrollüdür. Bu nedenle deniz tabanındaki kazık deplasmanın ön görülen değeri, kalibrasyon sürecine dahil edilen tüm 3-boyutlu modellerde nominal hasarın meydana geldiğinden emin olmak için yeterince büyük olmalıdır. Deniz taban seviyesindeki (mudline) kazık yanar deplasmanlarının " $0.1 \times D$ " yi geçmemesi durumu "nominal hasar" durumu olarak kabul edilmektedir (Zdravković, 2015).

Zemin-reaksiyon eğrileri 3-boyutlu sonlu eleman hesaplamalarından çıkarılmakta ve normalleştirilmektedir ve daha sonra 1-boyutlu modeldeki zemin-reaksiyon eğrilerini çıkaracak matematiksel fonksiyonları kalibre etmek için kullanılmaktadır (Panagoulas, 2018) ve bu fonksiyonlar, kalibrasyon modellerinin geometrik varyasyonlarına bağlıdır.

Tekil kazığın geometrisi SLS için tasarım kriterlerini karşılamak için optimize edilmiştir ve optimizasyon için sadece kazığın zemine gömülü uzunluğu üzerinde çalışılmıştır. Optimizasyon, 1-boyutlu kazık modelinin zemine gömülü uzunluğunun değiştirildiği (Tablo

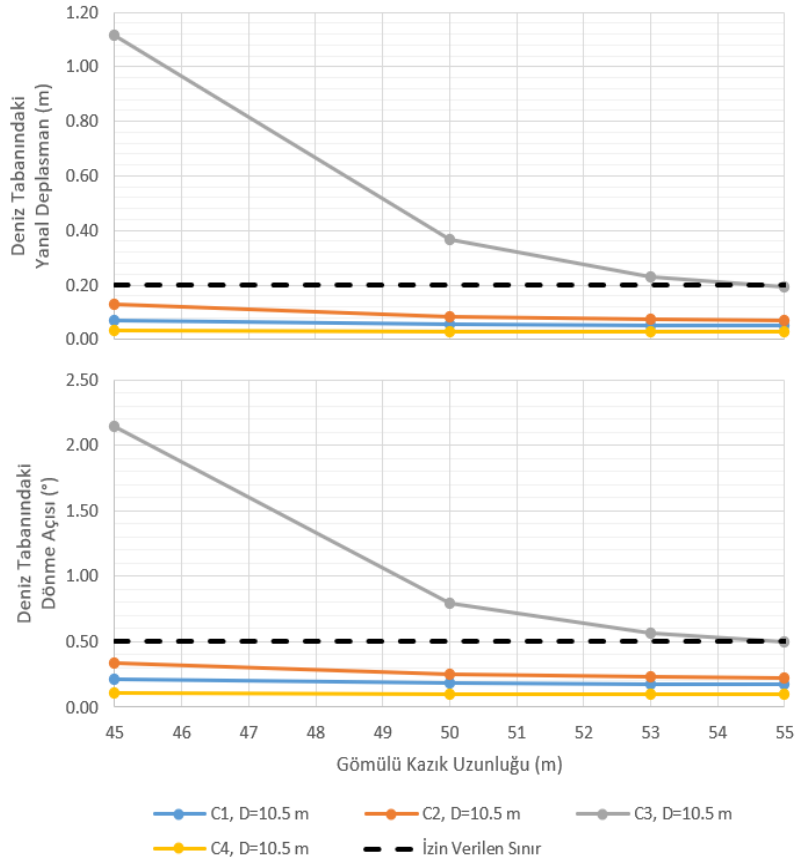
4'te sunulan kalibrasyon parametre uzayı sınırları içinde kalma şartıyla) ve SLS koşulları sağlanana kadar 1-boyutlu modelin çalıştırıldığı yinelemeli ancak hızlı bir prosedürdür.

6. ANALİZ VE SONUÇLAR

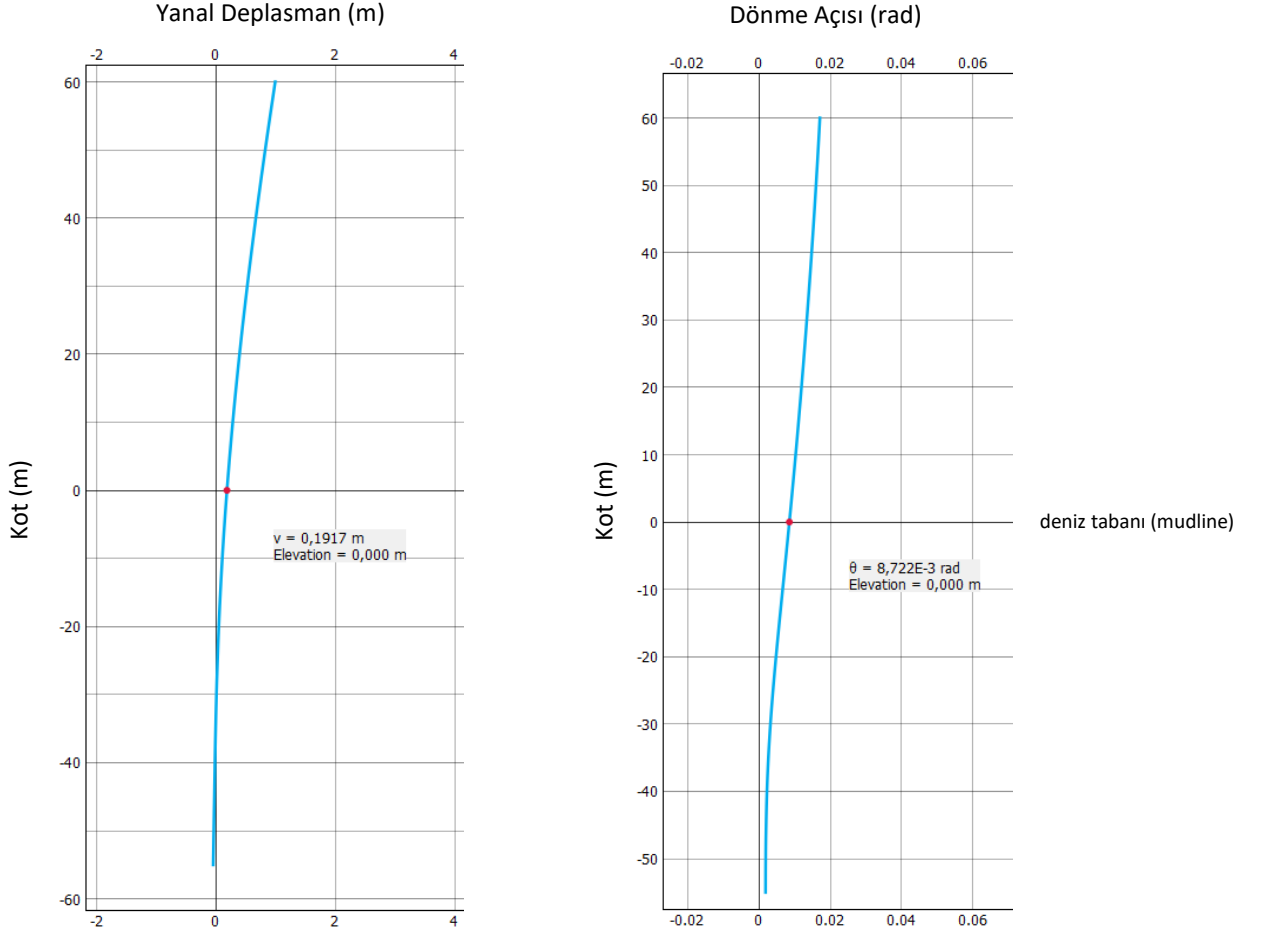
Zemin parametreleri tanımlandıktan ve PLAXIS 3D'de detayları Tablo 4'te paylaşılan modellerde kalibrasyon yapıldıktan sonra analizlere başlamadan önce gereken girdiler:

- h (deniz tabanı ile geçiş parçası (transition piece) arasında kalan kazık uzunluğu): 60 m
- L (deniz tabanına gömülü kazık uzunluğu): Değişken
- D (kazık dış çapı): 10.5 m
- t (çelik kazık et kalınlığı): 111.35 mm
- E (çelik kazık Young Modülü): 210 GPa
- H (kazık kafasına etkiyen yanal kuvvet): Tablo 3'te detayları verilmiştir.
- M (kazık kafasına etkiyen moment): Tablo 3'te detayları verilmiştir.

PLAXIS MoDeTo kullanılarak deniz tabanında kazığın yanal deplasmanı ve kazığın dönme açısı, 45 m ila 55 m arasında, farklı gömülü kazık uzunlukları için Şekil 3'te sunulmuştur. Tekil kazığın gömülü uzunluğunun 55 m'den küçük olması durumunda SLS kriterleri sağlanmamaktadır, fakat 55 metreden daha uzun kazıklar için hem deniz tabanı seviyesindeki (mudline) kazık başında oluşan dönme (tilt) açısı hem de yanal deplasman kriterleri sağlanmıştır. Ayrıca, en kritik yük kombinasyonu (C3) altında deforme olmuş kazık görüntüsü şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Kazığın Deniz Tabanındaki Yanal Deplasmanı ve Dönme Açısı



Şekil 4. C3 Yük Kombinasyonunda Deforme Olmuş Kazığın Görünümü (Deniz tabanı sıfır kottur.)

Şekil 4'te de görüleceği üzere 55 m deniz tabanına gömülü kazığın deniz tabanındaki yanar deplasmanı yaklaşık 0.19 m olarak hesaplanmış olup 0.2 m'den düşük olduğu için kriteri sağlamaktadır. Aynı şekilde kazığın deniz tabanındaki dönme açısı yaklaşık 0.008722 rad (0.5°) hesaplanmış olup SLS kriterini 0.5 dereceye eşit olduğu için sağlamaktadır.

Ayrıca, çalışma sonucunda en yüksek rüzgâr hızının C4 yük kombinasyonunda olmasına rağmen, C3 yük kombinasyonundan elde edilen yükler ile yapılan analizlerin tasarımda daha kritik olduğu ve tasarımda belirleyici olabildiği gözlenmiştir. Bunun sebebi ise anma rüzgâr hızından daha yüksek rüzgâr hızlarında sürüklenme katsayısı da rüzgâr hızıyla beraber artacağı için rüzgâr kuvveti de azalmaya başlayacaktır. Bu sebepten ötürü, C3 kombinasyonundaki yükler ile kazığın optimum gömülü uzunluğu bu çalışma kapsamında belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- API (American Petroleum Institute) (2005), "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—working", Stress Des, 68–71.
- API (American Petroleum Institute) (2010), "RP 2A-WSD – recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms", Washington, DC, USA: American Petroleum Institute.

- Arany, L., Bhattacharya, S., Macdonald, J., & Hogan, S. J. (2017), "Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 126–152. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.09.024>.
- Byrne, B. W., McAdam, R. A., Burd, H. J., Houlsby, G. T., Martin, C. M., Zdravkovic, 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., Kellahave, D. & Skov Gretlund, J. (2015), "New design methods for large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications", In *Frontiers in offshore geotechnics III* (ed. V. Meyer), pp. 705–710. Leiden, the Netherlands: CRC Press/Balkema.
- Byrne, B. W., McAdam, R. A., Burd, H. J., Houlsby, G. T., Martin, C. M., Beuckelaer, W. J. A. P., Zdravkovic, L., Taborda, D. M. G., Potts, D. M. & Jardine, R. J. (2017), "PISA: new design methods for offshore wind turbine monopiles", In *Proceedings of the 8th international conference on offshore site investigation and geotechnics, smarter solutions for offshore developments*, vol. 1, pp. 142–161. London, UK: Society for Underwater Technology.
- Byrne, B. W., Burd, H. J., Zdravkovic, L., Abadie, C. N., Houlsby, G. T., Jardine, R. J., Martin, C. M., McAdam, R. A., Pacheco Andrade, M., Pedro, A. M. G., Potts, D. M. & Taborda, D. M. G. (2019a), "PISA design methods for offshore wind turbine monopiles", *Proceedings of the offshore technology conference*, Houston, TX, USA, paper OTC-29373-MS.
- Byrne, B. W., Houlsby, G. T., Burd, H. J., Gavin, K. G., Igoe, D. J. P., Jardine, R. J., Martin, C. M., McAdam, R. A., Potts, D. M., & More Authors (2020), "PISA design model for monopiles for offshore wind turbines: Application to a stiff glacial clay till", *Geotechnique*, 70(11), 1030-1047. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.255>.
- Caceoğlu, E. (2023), "Offshore Wind Turbines in Marmara Region, Türkiye: Site Selection and Preliminary Geotechnical Design of Monopiles", *ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans tezi*.
- DNV (Det Norske Veritas) (2014), "DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures", www.dnvgl.com.
- DNV-GL (Det Norske Veritas) (2016), "DNVGL-ST-0126 – support structure for wind turbines", Oslo, Norway: Det Norske Veritas.
- Doherty, P. & Gavin, K. (2011), "Laterally loaded monopile design for offshore wind farms", *Proc. Instn Civ. Engrs – Energy* 165, No. 1, 7–17, <https://doi.org/10.1680/ener.11.00003>.
- Gupta, B. K., & Basu, D. (2020), "Offshore wind turbine monopile foundations: Design perspectives", *Ocean Engineering*, 213, 107514.
- International Electrochemical Commission (2005), "IEC 61400-1 Standard".
- IEA (2019), "Offshore Wind Outlook 2019", 15, International Energy Agency (IEA), Paris Cedex.
- Jeanjean, P., Zhang, Y., Zakeri, A., Andersen, K. H., Gilbert, R. & Senanayake, A. I. M. J. (2017), "A framework for monotonic p–y curves in clays", In *Proceedings of the 8th international conference on offshore site investigation and geotechnics, smarter solutions for offshore developments*, vol. 1, pp. 108–141. London, UK: Society for Underwater Technology.
- Kellahave, D., LeBlanc Thilsted, C. & Liingaard, M. A. (2012), "Modification of the API p–y formulation of initial stiffness of sand", In *Offshore site investigation and geotechnics*:

- proceedings of the 7th international conference (ed. P. Allan), pp. 465–472. London, UK: Society for Underwater Technology.
- Korres, G., Ravdas, M., Denaxa, D., & Sotiropoulou, M. (2021), “Mediterranean Sea Waves Reanalysis INTERIM (CMEMS Med-Waves, MedWAM3I system) (Version 1) [Data set]”, Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_WAV_006_012_MEDWAM3I
- Korres, G., Oikonomou, C., Denaxa, D., & Sotiropoulou, M. (2023), “Mediterranean Sea Waves Monthly Climatology (CMS Med-Waves, MedWAM3 system) (Version 1) [Data set]”, Copernicus Marine Service (CMS). https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_WAV_006_012_CLIM
- Matlock, H. (1970), “Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay”, Proceedings of the 2nd annual offshore technology conference, Houston, TX, USA, vol. 1, pp. 577–588.
- Oğuz, E. A. (2017), “Spatial probabilistic evaluation of sea bottom soil properties and its effect on foundation design”, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans tezi.
- Oguz, E. A., Huvaj, N., & Griffiths, D. V. (2019), “Vertical spatial correlation length based on standard penetration tests”, Marine Georesources & Geotechnology, 37(1), 45-56.
- Oguz, E. A., & Huvaj, N. (2020), “Spatial probabilistic evaluation of offshore/nearshore sea bottom soils based on cone penetration tests”, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79(2), 971-983.
- Panagoulas S., Brinkgreve R. B. J. and Zampich L. (2018), “PLAXIS MoDeTo Manual 2018”, Plaxis bv Delft the Netherlands.
- Panagoulas S., Brinkgreve R. B. J., Minga E., Burd H. J. and McAdam R. A. (2018), “Application of the PISA framework to the design of offshore wind turbine monopile foundations”, WindEurope 2018 Conf. at the Global Wind Summit, 25-28 September 2018, Hamburg, Germany.
- Ramírez, L., Fraile, D., & Brindley, G. (2020), “Offshore wind in Europe: Key trends and statistics 2019”.
- Reese, L. C. & Matlock, H. (1956), “Nondimensional solutions for laterally loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth”, Proceedings of the 8th Texas conference on soil mechanics and foundation engineering, Austin, TX, USA.
- Reese, L. C., Cox, W. R. & Koop, F. D. (1975), “Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay”, Proceedings of the offshore technology conference, Houston, TX, USA, paper OTC-2312-MS.
- Schroeder, F. C., Merritt, A. S., Sorensen, K. W., Muir Wood, A., LeBlanc Thilsted, C. & Potts, D. M. (2015), “Predicting monopile behaviour for the Gode wind offshore wind farm”, In Frontiers in offshore geotechnics III (ed. V. Meyer), pp. 735–740. Leiden, the Netherlands: CRC Press/Balkema.
- Tercan, E., Tapkın, S., Latinopoulos, D., Dereli, M. A., Tsiropoulos, A., & Ak, M. F. (2020), “A GIS-based multi-criteria model for offshore wind energy power plants site selection in both sides of the Aegean Sea”, Environmental Monitoring and Assessment, 192(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08603-9>
- Wind Europe. (2021), “Wind Europe Offshore wind in Europe - key trends and statistics 2020”, Wind Europe, Brussels, Belgium.

Zahle, F., Barlas, A., Lønbæk, K., Bortolotti, P., Zalkind, D., Wang, L., Labuschagne, C., Sethuraman, L., & Barter, G. (2024), "Definition of the IEA Wind 22-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine", Technical University of Denmark. <https://doi.org/10.11581/DTU.00000317>.

Zdravković L. (2015), "Numerical modelling of large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications", Proc. of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2015), Vol. 1, Oslo, Norway, pp. 759-764.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
m	Dağıtılmış moment	ψ	Dönme açısı
ψ_B	Taban dönme açısı	γ	Yanal deplasman
γ_B	Taban yanal deplasman	M_B	Taban momenti
H_B	Taban kesme kuvveti	G_o	Küçük gerinim kayma modülü
γ'	Efektif birim ağırlık	$S_{u,alt}$	Alt tabaka drenajsız kesme dayanımı
$S_{u,üst}$	Üst tabaka drenajsız kesme dayanımı	$^\circ$	Derece
K_0	Durgun haldeki yanal zemin basınç katsayısı		