



**AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİN TEMELİ
UYGULAMALARINDA KULLANILAN ÇELİK PROFİL
KAZIKLARIN DİNAMİK DAVRANIŞININ SONLU
FARKLAR METODU İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FAIZAN SHAFİ BHAT

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
HAZİRAN – 2025**

**AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİN TEMELİ
UYGULAMALARINDA KULLANILAN ÇELİK PROFİL
KAZIKLARIN DİNAMİK DAVRANIŞININ SONLU
FARKLAR METODU İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FAIZAN SHAFİ BHAT

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

DANIŞMAN VE JÜRİ ÜYELERİ

**DANIŞMAN : PROF. DR. ÖZGÜR LÜTFİ ERTUĞRUL
JÜRİ ÜYESİ : PROF. DR. CAHİT BİLİM
JÜRİ ÜYESİ : DOÇ. DR. YEŞİM SEMA ÜNSEVER GÜLER**

**MERSİN
HAZİRAN - 2025**

ÖZET

AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİN TEMELİ UYGULAMALARINDA KULLANILAN ÇELİK PROFİL KAZIKLARIN DİNAMİK DAVRANIŞININ SONLU FARKLAR METODU İLE MODELLENMESİ

Açık deniz rüzgar enerjisi, özellikle Türkiye gibi geniş deniz kaynaklarına sahip ülkeler için, küresel yenilenebilir enerji geçişinde önemli bir potansiyele sahiptir. Çeşitli temel türleri arasında kazık tipi türbin temelleri, sığ ila orta derinlikteki sularda yapısal basitlikleri ve maliyet etkinlikleri nedeniyle açık deniz rüzgar türbinlerini desteklemede önemli bir rol oynar. Bu çalışma kapsamında, sonlu farklar yöntemini uygulayan FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) kullanılarak kohezyonsuz deniz tabanına gömülü kazık tipi türbin temellerinin statik ve dinamik davranışı incelenmektedir. Dinamik yükleme koşulları, A.B.D. National Renewable Energy Laboratory (NREL) tarafından geliştirilen OpenFAST yazılımı aracılığıyla elde edilen rüzgar ve dalga kaynaklı yüklerden üretilerek serviste olan deniz rüzgar türbininin operasyonel kuvvetlerinin gerçekçi bir şekilde temsili gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma, kazık tipi türbin temellerinin statik ve tekrarlı yükler altında tepkilerini anlamak için gerçekleştirilen üç boyutlu simülasyonları içermektedir. Statik yükleme sonuçları, American Petroleum Institute (API) yöntemi ve Winkler modeline dayalı elastik çözümlerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Değerlendirilen temel tepki parametreleri arasında yanal yer değiştirme profilleri, çamur hattı (mudline) yer değiştirmesi, kazık başı eğimi, dönme noktası derinliği, bükülme momenti dağılımı, kesme kuvvetleri ve zemin reaksiyonları yer almaktadır. Kazık tipi türbin temel sistemlerinin zemin-kazık etkileşimi ve genel performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için, yapısal özellikler (örneğin, kazık çapı ve soket boyu) ile zemin özellikleri (örneğin, içsel sürtünme açısı ve modül değerleri) gibi değişkenlerin etkisi üzerine kapsamlı bir parametrik çalışma yürütülmüştür.

Dinamik analizde, 30 saniyelik bir rüzgar ve dalga yükü etkisi altında gerçek ebatlarda kazık tipi türbin temelinin tepkisi incelenmiş ve yatay deplasmana bağlı zemin davranışını ortaya koyan p-y eğrileri hem statik hem de dinamik yükler için elde edilmiştir. Bu çalışma, kazık tipi türbin temellerinin dinamik yükler altında rijitlik kaybı ve diğer parametrelere bağlı tepki özelliklerine dair önemli veriler sunarak, bu yapıların gerçekçi açık deniz rüzgar ve dalga koşulları altındaki performanslarına ilişkin önemli sonuçlara ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kazık tipi türbin temeli, Açık Deniz Rüzgar Türbini, Sonlu Farklar Yöntemi, FLAC3D, OpenFAST.

Danışman: Prof. Dr. Özgür Lütfi ERTUĞRUL, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mersin Üniversitesi.

ABSTRACT

MODELING THE DYNAMIC BEHAVIOR OF MONOPILES USED IN OFFSHORE WIND TURBINES USING FINITE DIFFERENCE METHOD

Offshore wind energy holds significant potential in the global transition to renewable energy, particularly for countries like Türkiye with vast maritime resources. Among various foundation types, monopiles play a central role in supporting offshore wind turbines due to their structural simplicity and cost-effectiveness in shallow to intermediate water depths. In this study, the static and dynamic behavior of pile type turbine foundations embedded in cohesionless seabed is investigated using FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) which applies the finite difference method. Dynamic loading conditions are generated from wind and wave-induced loads obtained by OpenFAST software developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) of the USA, and a realistic representation of the operational forces of the offshore wind turbine in service is achieved.

This study includes three-dimensional simulations to understand the response of monopile type wind turbine foundations under static and cyclic loading. The static loading results are validated by comparing them with elastic solutions based on the American Petroleum Institute (API) method and the Winkler model. The main response parameters include lateral displacement profiles, mudline displacement, pile head slope, depth of rotation point, bending moment distribution, shear forces, and lateral soil reactions. A comprehensive parametric study on the effects of variables such as structural properties (e.g. pile diameter and socket length) and soil properties (e.g. internal friction angle and modulus values) was conducted to evaluate their effects on soil-pile interaction and overall performance of monopile-type turbine foundation systems.

In the dynamic analysis, the response of a monopile turbine foundation with real dimensions under a 30-second wind and wave load was investigated and p-y curves, which reveal the soil behavior due to horizontal displacement, were obtained for both static and dynamic loads. This study provides important data on the stiffness loss and response characteristics of monopile wind turbine foundations under static as well as dynamic loads, and important conclusions were reached regarding the performance of these structures under realistic offshore wind and wave conditions.

Keywords: Monopile, Offshore Wind Turbine, Finite Difference Method, FLAC3D, OpenFAST.

Advisor: Prof. Dr. Özgür Lütfi ERTUĞRUL, Department of Civil Engineering, Mersin University.

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, bu çalışma süresince değerli rehberliği, sarsılmaz desteği ve büyük sabrı için danışmanım Prof. Dr. Özgür Lütfi ERTUĞRUL'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin her zaman bana rehberlik etmesi ve uzman görüşleri, bu tezin yönünü ve kalitesini şekillendirmede belirleyici olmuştur.

Ayrıca, bu akademik yolculuk boyunca bana katkı sağlayan, teşvik eden ve bilgi birikimleriyle beni zenginleştiren İnşaat Mühendisliği Bölümü'nün kıymetli öğretim üyelerine ve personeline içten teşekkür ederim. Onların desteği, akademik ve kişisel gelişimimde önemli bir rol oynamıştır.

Mersin'deki arkadaşlarıma da en içten teşekkürlerimi sunarım. Zor zamanlarda yanımda olup moral veren ve motivasyonumu diri tutan dostlarım sayesinde bu süreci daha kolay ve anlamlı bir şekilde geçirebildim.

FLAC3D yazılımı ile ilgili karşılaştığımız zorluklarda bilgi ve deneyimini bizimle cömertçe paylaşan Itasca, Fransa'dan Dr. Manh-Huy TRAN'a da özel teşekkürlerimi iletmek isterim. Kendisi, çalışmanın uygulamalı kısmına değerli katkılarda bulunmuştur.

Bu güzel ülkede, Türkiye'de, yüksek lisans eğitimimi sürdürme imkânı tanıyan burs desteği için Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı'na (YTB) ve İslam Kalkınma Bankası'na (IsDB) müteşekkirim.

Son olarak, her zaman doğruların peşinden gitmem için bana ilham veren Keşmir halkına en derin saygı ve sevgilerimi sunarım. Ve nihayet, burada olmamı mümkün kılan ailem başta olmak üzere, ailem bildiğim herkese sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Sizlere daima minnettar kalacağım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLOLAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Açık Deniz Rüzgar Enerjisi	1
1.2. Açık Deniz Rüzgar Türbininin Bileşenleri	4
1.2.1. Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için Temel Sistemleri	5
1.2.2. Kazık Tipi Türbin Temelleri (Monopiles)	7
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	9
2.1. Yanal Yük Altındaki Kazıklar	9
2.1.1. Brom Yaklaşımı	10
2.1.2. Elastik Çözüm ve Winkler Modeli	12
2.2. Sonlu Fark Yöntemi ve FLAC3D	15
2.2.1. Sonlu Fark Yöntemi	15
2.2.2. FLAC3D Yazılımı	16
2.2.3. FLAC3D Terim Tanımları	17
2.2.4. Üç Boyutlu Sonlu Fark Modelinin Formülasyonu	20
2.2.5. FLAC3D'de Temas Arayüzleri	24
2.2.6. Davranış Modelleri	25
2.3. Önceki Çalışmalar	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1. Modellemede Kullanılan Malzeme Özellikleri	33
3.1.1. Kohezyonsuz Malzeme Özellikleri	33
3.1.2. Kazık Tipi Türbin Temeli	34
3.2. Sayısal Modelleme	35
3.2.1. Geometriye İlişkin Hususlar	35
3.2.2. Temas Arayüz Uygulaması	37
3.2.3. Davranış Modelleri	38
3.2.4. Statik Analiz Yöntemi	39
3.2.5. Sayısal Modelin Doğrulanması	40
3.3. Dinamik Analiz	43
3.3.1. Dinamik Girdi Parametreleri: OpenFAST	43
3.3.2. Dinamik Model için Dikkate Alınan Önemli Hususlar	45
3.3.3. Sönümleyici Sınır Koşulları	46
3.3.4. Sönümleme	46
3.3.5. Taban Çizgisi Düzeltmesi (Baseline Correction)	47
3.3.6. Python ile Dinamik Veri Son-İşleme	47
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	49
4.1. Tekil Kazıklı rüzgar Türbin Temellerinin Statik Yükler Altındaki Davranışı	49
4.1.1. Sayısal Modellemede Elde edilen Bulguların Analitik Yöntemlerle Karşılaştırması	57
4.1.2. Yük Uygulama Yüksekliğinin Etkisi	68
4.2. Parametrik Analiz Bulguları	69
4.2.1. Yanal Yer Değiştirme Profillerinin Değerlendirilmesi	69
4.2.2. Çamur Hattı Yer Değiştirmelerinin Değerlendirilmesi	75
4.2.3. Kazık Dönme Noktası ile İlgili Değerlendirmeler	80
4.2.4. Kazık Başı Eğimi	84
4.2.5. Eğilme Momenti	88

	Sayfa
4.2.6. Kesme Kuvveti	92
4.3. Zemin Reaksiyonu (p-y) Davranışı ile İlgili Değerlendirmeler	95
4.4. Dinamik Analiz Bulguları	108
4.4.1. Çamur Çizgisi Yer Değiştirme	110
4.4.2. Dinamik Zemin Reaksiyonu ve Yatay Yer Değiştirme (p-y) Davranışı	110
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR	115
EKLER	118



TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. FLAC3D'de mevcut olan davranış modelleri.	25
Tablo 3.1. Parametrik analizler için zemin parametreleri.	34
Tablo 3.2. Çeliğin malzeme özellikleri.	34
Tablo 3.3. Parametrik analizler için Kazık tipi türbin temeli yapısal özellikleri.	34
Tablo 4.1. Dört farklı durumun yapısal özellikleri.	58
Tablo 4.2. Farklı kazık konfigürasyonları için H/H_r oranları.	76
Tablo 4.3. Moment normalizasyon parametreleri.	89

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Yeni açık deniz rüzgar tesisleri (MW) (GWEC Raporu, 2024).	2
Şekil 1.2. Ülke bazında toplam açık deniz rüzgar kurulumları (GWEC Raporu, 2024).	2
Şekil 1.3. Avrupa için rüzgar enerjisi kapasite projeksiyonu (WindEurope Raporu, 2024).	3
Şekil 1.4. Avrupa'da açık deniz rüzgar enerjisinin artan payı.	3
Şekil 1.5. Avrupa'da rüzgar enerjisinin toplam enerji üretimine tahmini katkısı (WindEurope Raporu, 2024).	4
Şekil 1.6. Açık deniz rüzgar türbininin (OWT) bileşenleri.	5
Şekil 1.7. Açık deniz rüzgar türbinlerinin temelleri ve üst yapıları (Kallehave vd., 2015).	6
Şekil 1.8. Borkum Riffgrund-3 açık deniz rüzgar santrali için kazık tipi türbin temelleri.	7
Şekil 1.9. Altyapı türüne göre kurulmuş temellerin kümülatif sayısı (Wind Europe, 2021).	8
Şekil 2.1. Kısa kazık için kazık uzunluğu boyunca sapma, kesme ve moment dağılımı (Das, 2014).	9
Şekil 2.2. Brom'un kohezyonsuz zemin içine gömülü kısa kazıklar için nihai yanal direnç çözümü (Das, 2014).	10
Şekil 2.3. Brom'un kohezyonsuz zemine gömülü uzun kazıklar için nihai yanal direnç çözümü (Das, 2014).	11
Şekil 2.4. Brom'un kohezyonsuz zemine gömülü kazıklarda başlık deplasmanını tahmin etme çözümü (Das, 2014).	11
Şekil 2.5. Kumdaki kazıklar için yer değiştirme katsayıları (Das, 2014).	14
Şekil 2.6. Kumdaki kazıklar için moment katsayıları (Das, 2014).	14
Şekil 2.7. Kumdaki kazıklar için kesme katsayıları (Matlock & Reese, 1960).	14
Şekil 2.8. Kumdaki kazıklar için zemin reaksiyon katsayıları (Matlock & Reese, 1960).	15
Şekil 2.9. FLAC3D modeline bir örnek.	18
Şekil 2.10. Tetrahedron (dört yüzlü) (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).	22
Şekil 2.11. Genel FLAC3D çözüm prosedürü.	23
Şekil 2.12. Temsilî alanların temas arayüzü düğümlerine dağılımı (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).	24
Şekil 3.1. 6 metre çapında Kazık tipi türbin temeli içeren modelin izometrik görünümü.	36
Şekil 3.2. Kazık tipi türbin temeli üstüne eksenel yük uygulanması.	37
Şekil 3.3. FLAC3D'de yapısal bağlantılar kullanılarak temas arayüz uygulaması.	38
Şekil 3.4. Kazığın başlangıç gerilme durumundaki düşey gerilmenin konturları.	40
Şekil 3.5. Doğrulama çalışmaları sırasında kullanılan modelin izometrik görünümü.	41
Şekil 3.6. API, FEM ve FLAC3D yöntemleri için yük-yer değiştirme ilişkisi.	42
Şekil 3.7. API, FEM ve FLAC3D yöntemleri için yük-yer değiştirme ilişkisi.	42
Şekil 3.8. Yatay yönlerdeki rüzgar hızının (u-bileşeni) zaman serisi.	43
Şekil 3.9. Dalga yüksekliği zaman serisi.	44
Şekil 3.10. OpenFAST'ten türetilen çamur hattındaki kesme kuvveti.	44
Şekil 3.11. Sönümleyici sınır koşullarıyla modellenen sistemin izometrik perspektifi.	45
Şekil 3.12. Maxwell sönümleme parametrelerinin tahmini.	47
Şekil 3.13. Dinamik analizde girdi olarak kullanılan kuvvet-zaman kaydı.	47
Şekil 4.1. Statik yüklemde kazık çevresinde gözlenen gerilme birikimi.	50
Şekil 4.2. Kazığın yerleştirilme dengesinde x-yer değiştirme konturu ve zemin göçme zonu durumu.	51
Şekil 4.3. 2 MN'lik yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.	52
Şekil 4.4. 4 MN'lik yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.	53
Şekil 4.5. 6 MN'lik yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.	54
Şekil 4.6. 8 MN'lik yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.	55

Şekil 4.7. 10 MN'lik yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.	56
Şekil 4.8. 12 MN'lik yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.	57
Şekil 4.9. A durumunda kazık boyunca ölçülen yer değiştirme profili.	59
Şekil 4.10. B durumunda kazık boyunca ölçülen yer değiştirme profili.	59
Şekil 4.11. C durumunda kazık boyunca ölçülen yer değiştirme profili.	60
Şekil 4.12. D durumunda kazık boyunca ölçülen yer değiştirme profili.	60
Şekil 4.13. A durumu için kazık boyunca eğilme momenti profili.	61
Şekil 4.14. B durumu için kazık boyunca eğilme momenti profili.	62
Şekil 4.15. C durumu için kazık boyunca eğilme momenti profili.	62
Şekil 4.16. D durumu için kazık boyunca eğilme momenti profili.	63
Şekil 4.17. A durumu için kazık boyunca kesme kuvveti profili.	64
Şekil 4.18. B durumu için kazık boyunca kesme kuvveti profili.	64
Şekil 4.19. C durumu için kazık boyunca kesme kuvveti profili.	65
Şekil 4.20. D durumu için kazık boyunca kesme kuvveti profili.	65
Şekil 4.21. A durumunda 1 m, 2 m ve 3 m derinliklerdeki (p-y) zemin reaksiyonları.	66
Şekil 4.22. B durumunda 1 m, 2 m ve 3 m derinliklerdeki (p-y) zemin reaksiyonları.	67
Şekil 4.23. C durumunda 1 m, 2 m ve 3 m derinliklerdeki (p-y) zemin reaksiyonları.	67
Şekil 4.24. D durumunda 1 m, 2 m ve 3 m derinliklerdeki (p-y) zemin reaksiyonları.	68
Şekil 4.25. Kademeli yanal yük altında kazık yer değiştirme profilleri.	69
Şekil 4.26. Kademeli yanal yük altında kazık yer değiştirme profilleri.	70
Şekil 4.27. Kademeli yanal yük altında kazık yer değiştirme profilleri.	70
Şekil 4.28. Kademeli yanal yük altında kazık yer değiştirme profilleri.	71
Şekil 4.29. 20m soket boyu ve 6m/10m çaplı kazık tipi türbin temelleri için yanal yer değiştirme profilleri.	73
Şekil 4.30. 40m soket boyu ve 6m/10m çaplı kazık tipi türbin temelleri için yanal yer değiştirme profilleri.	75
Şekil 4.31. 20m soket boyu ve 6m/10 m çaplara sahip kazıklarda çamur hattı yer değiştirmesi.	78
Şekil 4.32. 40m soket boyu ve 6m/10 m çaplara sahip kazıklarda çamur hattı yer değiştirmesi.	80
Şekil 4.33. 20 m soket boyu ve 6m/10 m çaplardaki kazıklarda dönme noktası.	82
Şekil 4.34. 40m soket boyu ve 6m/10m çaplarda kazıklar için dönme noktası.	84
Şekil 4.35. 20m soket boyu ve 6m/10m çapa sahip kazıklarda kazık başı eğimi.	86
Şekil 4.36. 40m soket boyu ve 6m/10m çapa sahip kazıklarda kazık başı eğimi.	87
Şekil 4.37. Kademeli yanal yük altında 20m uzunluğunda kazıklar için eğilme momenti profilleri.	88
Şekil 4.38. Kademeli yanal yük altında 40m uzunluğunda kazıklar için eğilme momenti profilleri.	89
Şekil 4.39. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık boyunca eğilme momenti dağılımları ($\varphi = 30^\circ$).	90
Şekil 4.40. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık boyunca eğilme momenti dağılımları ($\varphi = 36^\circ$).	91
Şekil 4.41. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık boyunca eğilme momenti dağılımları ($\varphi = 42^\circ$).	91
Şekil 4.42. Kademeli yanal yük altında 20m boyundaki kazıklar için kesme kuvveti profilleri.	92
Şekil 4.43. Kademeli yanal yük altında 40m boyundaki kazıklar için kesme kuvveti profilleri.	93
Şekil 4.44. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık tipi türbin temeli boyunca kesme kuvveti dağılımları ($\varphi = 30^\circ$).	94
Şekil 4.45. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık tipi türbin temeli boyunca kesme kuvveti dağılımları ($\varphi = 36^\circ$).	94
Şekil 4.46. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık tipi türbin temeli boyunca kesme kuvveti dağılımları ($\varphi = 42^\circ$).	95
Şekil 4.47. 20m soket boyu ve 6m çapa sahip kazık tipi türbin temelleri için p-y eğrileri.	97
Şekil 4.48. 20m soket boyu ve 10m çapa sahip kazık tipi türbin temelleri için p-y eğrileri.	98

	Sayfa
Şekil 4.49. 40m soket boyu ve 6m çapa sahip kazık tipi türbin temelleri için p-y eğrileri.	99
Şekil 4.50. 40m soket boyu ve 10m çapa sahip kazık tipi türbin temelleri için p-y eğrileri.	99
Şekil 4.51. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20$ m, $D = 6$ m, $E_s = 40$ MPa, $\lambda = 26.24$).	100
Şekil 4.52. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20$ m, $D = 6$ m, $E_s = 80$ MPa, $\lambda = 13.21$).	101
Şekil 4.53. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20$ m, $D = 6$ m, $E_s = 120$ MPa, $\lambda = 8.81$).	101
Şekil 4.54. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20$ m, $D = 10$ m, $E_s = 40$ MPa, $\lambda = 23.88$).	102
Şekil 4.55. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20$ m, $D = 10$ m, $E_s = 80$ MPa, $\lambda = 11.94$).	103
Şekil 4.56. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20$ m, $D = 10$ m, $E_s = 120$ MPa, $\lambda = 7.96$).	103
Şekil 4.57. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40$ m, $D = 6$ m, $E_s = 40$ MPa, $\lambda = 26.24$).	104
Şekil 4.58. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40$ m, $D = 6$ m, $E_s = 80$ MPa, $\lambda = 13.21$).	105
Şekil 4.59. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40$ m, $D = 6$ m, $E_s = 120$ MPa, $\lambda = 8.81$).	105
Şekil 4.60. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40$ m, $D = 10$ m, $E_s = 40$ MPa, $\lambda = 23.88$).	106
Şekil 4.61. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40$ m, $D = 10$ m, $E_s = 80$ MPa, $\lambda = 11.94$).	107
Şekil 4.62. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40$ m, $D = 10$ m, $E_s = 120$ MPa, $\lambda = 7.96$).	107
Şekil 4.63. Dinamik simülasyonun 15. saniyesine ait yatay yer değiştirme konturu.	109
Şekil 4.64. 30 saniyelik simülasyonda çamur çizgisi yer değiştirme-zaman ilişkisi.	110
Şekil 4.65. Dinamik analizler sonucu 1m derinlikte gözlenen histerez ilmeği tarzı p-y tepkisi.	111
Şekil 4.66. Dinamik analizler sonucu 2m derinlikte gözlenen histerez ilmeği tarzı p-y tepkisi.	111
Şekil 4.67. Dinamik analizler sonucu 3m derinlikte gözlenen histerez ilmeği tarzı p-y tepkisi.	111
Şekil 4.68. Dinamik analizler sonucu 4m derinlikte gözlenen histerez ilmeği tarzı p-y tepkisi.	112
Şekil 4.69. Dinamik analizler sonucu 5m derinlikte gözlenen histerez ilmeği tarzı p-y tepkisi.	112

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltma/Simgesi	Tanım
API	Amerikan Petrol Enstitüsü
FDM	Sonlu Farklar Yöntemi
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
OWT	Açık Deniz Rüzgar Türbini
D/D_p	Kazık Dış Çapı
E_s	Zemin Young Modülü
E_p	Kazık Young Modülü
H	Yanal Yük
H_r	Referans Yanal Yük
L/L_p	Kazık Gömülü Derinliği
Z_r	Dönüş Noktası Derinliği
t	Kazık Et Kalınlığı
z	Derinlik
λ	Görelî Rijitlik Oranı
ϕ	İç Sürtünme Açısı
ρ	Kütle Yoğunluğu
ν	Poisson Oranı
y	Yatay Yer Değiştirme
u	Çamur Hattı Yer Değiştirmesi

1. GİRİŞ

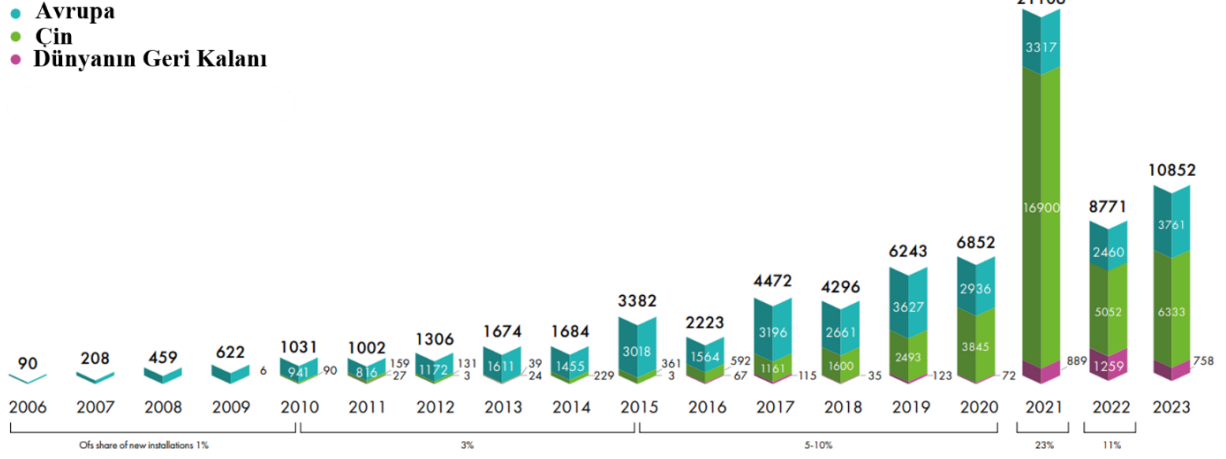
1.1. Açık Deniz Rüzgar Enerjisi

Açık deniz rüzgar enerjisi, genellikle açık denizde veya büyük göllerde inşa edilen rüzgar çiftliklerinde kullanılabilir enerjiye dönüştürülmektedir. Bu yenilenebilir enerji kaynağı, kuleler veya yüzer platformlar gibi yapılar üzerinde bulunan rüzgar türbinlerinin çalışmasıyla rüzgarın kinetik enerjisini elektriğe dönüştürür. Açık deniz rüzgar türbinleri, rüzgarın kuvvetine maruz kaldığında dönen rotor kanatlarıyla donatılmıştır ve bu dönüş, bir jeneratörü çalıştırarak dönme enerjisini elektrik enerjisine çevirir. Ülkeler karbon hedeflerini karşılamaya çalışırken, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi hızla artmaktadır. Açık deniz rüzgar enerjisi, dünya genelindeki ülkelerin büyük yatırımlar yaptığı önemli bir kaynaktır.

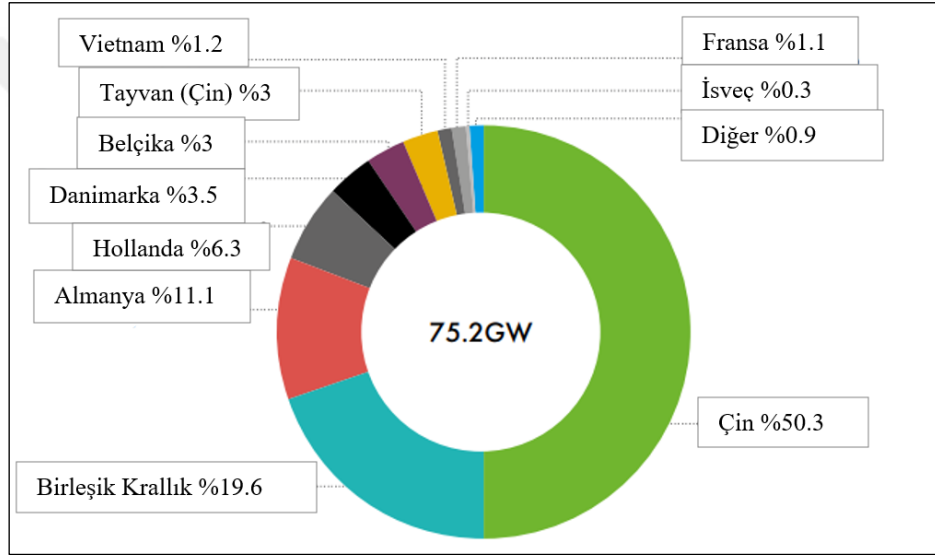
Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi'nin (GWEC) 2024 Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Raporu'na göre, açık deniz rüzgar sektörünün, enerji sistemlerini elektrikleştirme ve karbonsuzlaştırma konusundaki önemli rolünü yerine getirme çabası, eşit ölçüde heyecan verici ve zorlayıcı olarak tanımlanmaktadır. Küresel fırsatlar ve zorluklar çok çeşitlidir, ancak her ikisi de iklim değişikliğiyle mücadelede zaman ve ölçek baskısıyla karşı karşıyadır. Dünyanın önde gelen enerji kurumları olan Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) tarafından ana hatlarıyla belirtilen senaryolara göre, 2050 yılına kadar karbon nötrlüğüne ulaşmak, açık deniz rüzgar kurulu kapasitesinde hızlı ve büyük bir büyüme gerekmektedir. IEA'nın en son yol haritası, açık deniz rüzgar yıllık kurulumlarının 2022'de 8,8 GW'dan 2030'a kadar 80 GW'a, dokuz kat artmasını zorunlu kılmakta; 2031 ile 2050 arasında ise her yıl 70 GW kurulum yapılması öngörülmektedir. IRENA, 2030 yılına kadar yaklaşık 500 GW ve 2050 yılına kadar yaklaşık 2.500 GW kümülatif açık deniz rüzgar kurulu kapasitesi öngörmektedir (GWEC Raporu, 2024).

Şekil 1.1.'den açıkça görüldüğü üzere, 2022'deki yeni imalatlar, 2021 yılında ulaşılan rekora kıyasla %58 daha düşüktü, ancak açık deniz rüzgar enerjisi sektörü, bunun dışında yükselen trendi sürdürmüş ve 2023'te bunu devam ettirmiştir. Çin, küresel açık deniz rüzgar gelişiminde liderliğini sürdürmekte olup, 2023'teki yeni kurulumlar 2022'ye göre %20 daha yüksektir (GWEC Raporu, 2024).

Küresel açık deniz piyasası, son on yılda her yıl ortalama %21 büyüyerek, 2023 sonu itibarıyla toplam kurulumları 75,2 GW'a ulaştırır; bu, küresel rüzgar kapasitesinin %7,1'ini oluşturur. Kümülatif kurulumlar açısından, Çin, 2021 yılında Birleşik Krallık'ı geçerek lider pazar konumuna ulaşmış ve 2022'de pazar payını daha da sağlamlaştırmıştır. Şekil 1.2.'de, 2023 itibarıyla toplam açık deniz rüzgar kurulumları gösterilmektedir (GWEC Raporu, 2024).

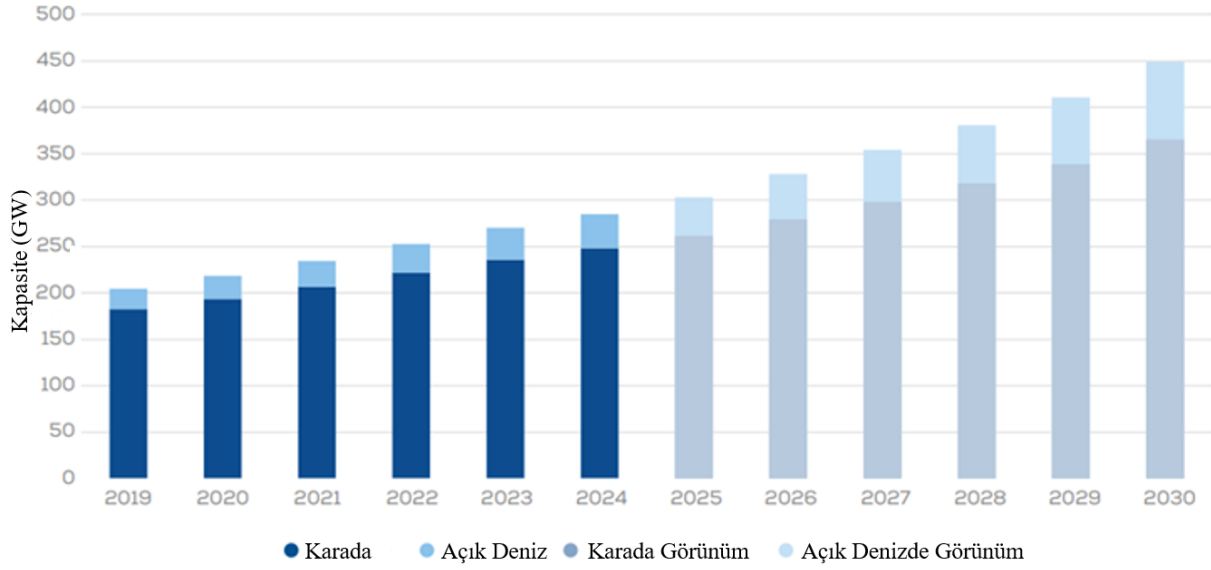


Şekil 1.1. Yeni açık deniz rüzgar tesisleri (MW) (GWEC Raporu, 2024).

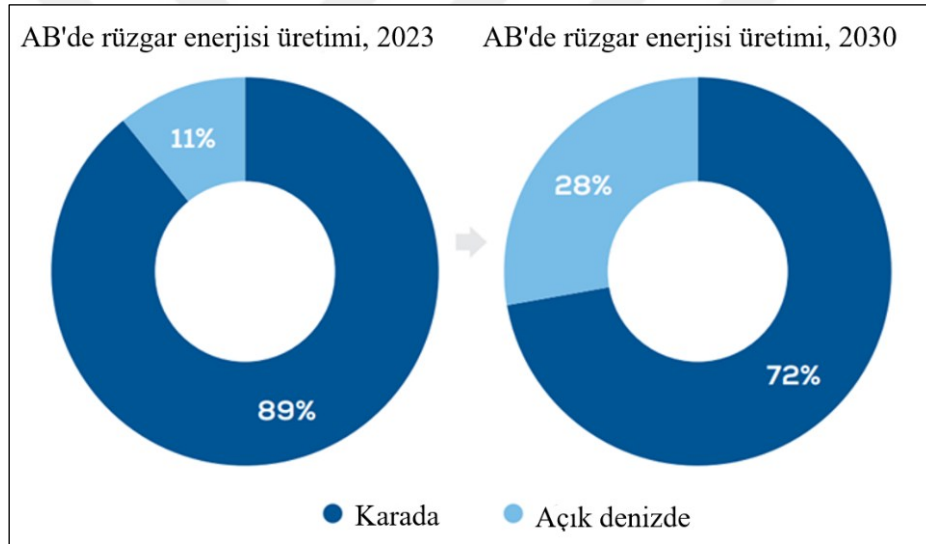


Şekil 1.2. Ülke bazında toplam açık deniz rüzgar kurulumları (GWEC Raporu, 2024).

Şekil 1.3. incelendiğinde, WindEurope'un rüzgar kurulumlarına ilişkin görünümü, Avrupa'da 2030'a kadar rüzgar enerjisi kapasitesinin olası gelişimini inceler. Avrupa Birliği'nde, 2025 ile 2030 arasında, yılda ortalama 23 GW hızla 140 GW kurulum beklenmektedir. Şekil 1.4.'te görüldüğü üzere rüzgar enerjisi sektöründe açık deniz rüzgar enerjisinin payının 2023'te %11'den 2030'da %28'e yükselmesi öngörülmektedir (WindEurope Raporu, 2024).



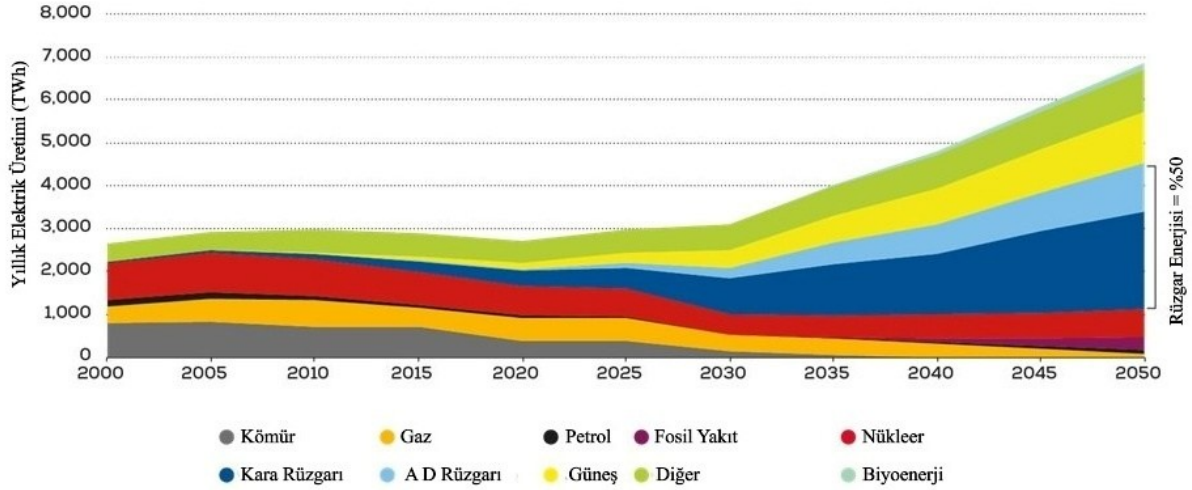
Şekil 1.3. Avrupa için rüzgar enerjisi kapasite projeksiyonu (WindEurope Raporu, 2024).



Şekil 1.4. Avrupa'da açık deniz rüzgar enerjisinin artan payı.

Türkiye’de enerji bağımsızlığı gündemin üst sıralarında yer almakta olup, rüzgar enerjisi gibi temiz ve yenilikçi bir enerji türü, güçlü siyasi ve toplumsal desteğe sahiptir. Ekim 2024’te ülkemiz, 2035’e kadar her yıl en az 2 GW’lık Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA) ihaleleri yapacağını duyurmuş olup 2025’in başında, büyük ölçüde talep fazlası olan 1,2 GW’lık karasal rüzgar ihalesi gerçekleştirilecektir. Ayrıca, enerji santralleri için izin süreçlerinde değişiklikler öngörülmüş, mevcut dört yıllık standart işlem süresinin en az yarıya indirilmesi hedeflenmiştir. Bunun yanı sıra, şebekeye 29,6 GW rüzgar enerjisi entegrasyonunu sağlayacak önemli iletim sistemi yatırımları duyurulmuştur. WindEurope, Türkiye’nin 2030’a kadar fazladan 12,5 GW karasal rüzgar enerjisi santrali ekleyeceğini ve toplamda 26 GW’ı aşan karasal rüzgar enerjisi kapasitesine ulaşacağını beklemektedir (WindEurope Raporu, 2024).

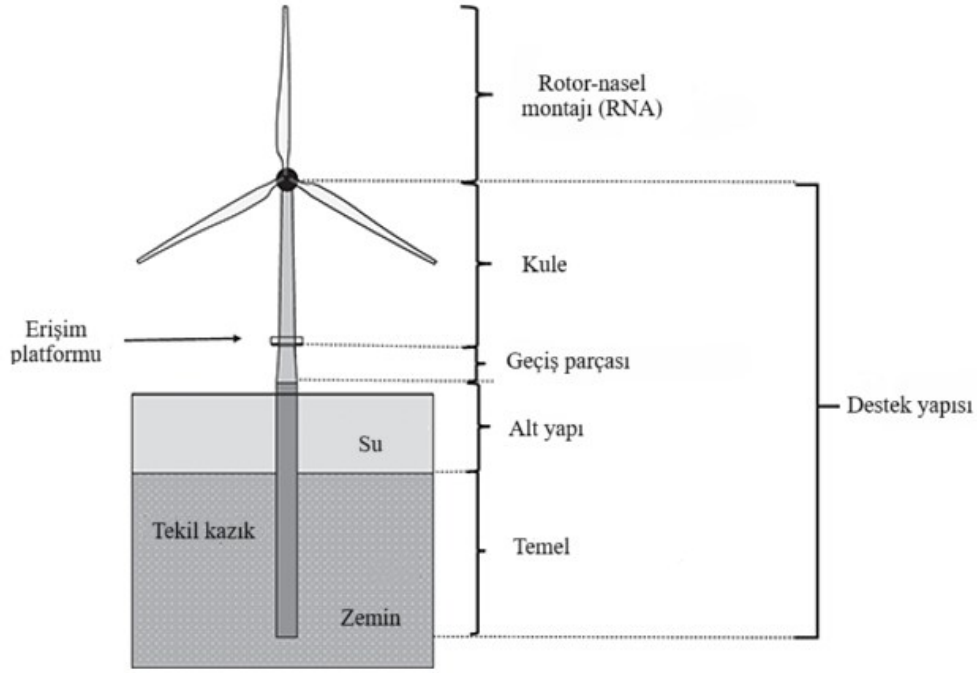
Avrupa Komisyonu Etki Değerlendirmesi'ne göre, Avrupa Birliği'nin 2050 yılına kadar enerjisinin yarısını rüzgardan elde etmesi öngörülmektedir. Şekil 1.5.'te görüldüğü üzere, elektrik üretimi artmaya devam edecek ve bunun çoğunluğu açık deniz ve karasal rüzgar enerjisi projeleri kullanılarak üretilecektir (WindEurope Raporu, 2024).



Şekil 1.5. Avrupa'da rüzgar enerjisinin toplam enerji üretimine tahmini katkısı (WindEurope Raporu, 2024).

1.2. Açık Deniz Rüzgar Türbininin Bileşenleri

Açık deniz rüzgar türbinleri temel, kule, motor bölümü (nacelle) ve kanatlar gibi birkaç temel bileşenden oluşur. Açık deniz rüzgar türbinlerinin temeli genellikle kazık tipi türbin temeli şeklinde projelendirilmekte olup bu temel tipleri, türbine destek sağlamak için deniz tabanına çakılan büyük çaplı bir çelik borudan oluşmaktadır. Kazık tipi türbin temeli, su seviyesinin üzerine uzanan ve nacelle ile kanatlar için bir platform sağlayan bir geçiş parçası (transition piece) ile kuleye bağlanır. Genellikle çelikten yapılan kule, jeneratör, şanzıman ve türbinin diğer mekanik ve elektrik bileşenlerini barındıran motor bölümünü (nacelle) destekler. Genellikle kompozit malzemelerden yapılan kanatlar, motor bölümüne bağlanır ve rüzgarın enerjisini yakalayıp elektriğe dönüştürmekten sorumludur. Bu bileşenler birlikte çalışarak rüzgardan temiz, yenilenebilir enerji üretir. Örnek bir açık deniz rüzgar türbini Şekil 1.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Açık deniz rüzgar türbininin (OWT) bileşenleri.

1.2.1. Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için Temel Sistemleri

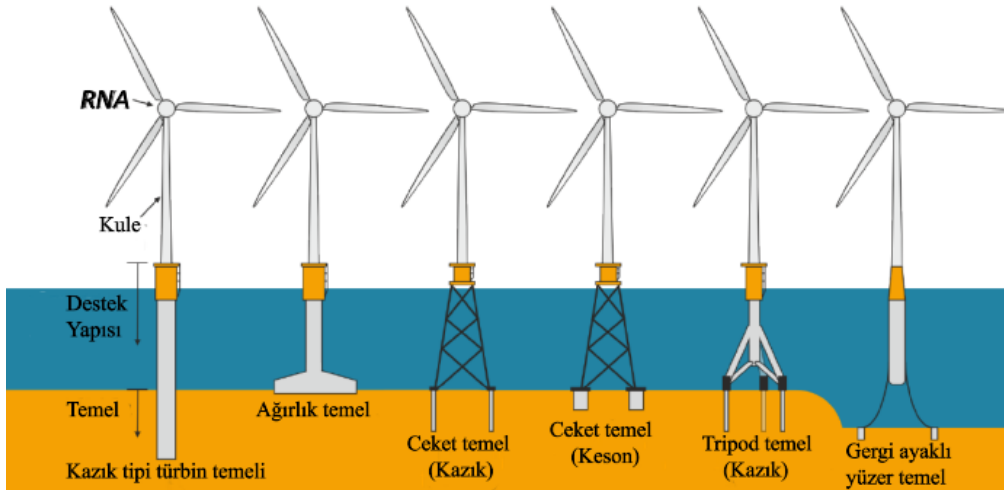
Açık deniz rüzgar türbinlerini desteklemek amacıyla kullanılan temel türleri şunlardır:

- **Ağırlık temelleri (Gravity foundations):** Ağırlık temelleri, taşıdıkları yapıya destek sağlamak ve yatay yükleri karşılamak için kendi ağırlıklarına başvuran temellerdir. Genellikle zeminin sığ olduğu ve yapının ağırlığını taşıyabilecek yeterli taşıma kapasitesine sahip olduğu durumlarda kullanılır. Bu tür temellerin inşası genellikle basit ve ekonomiktir; ancak yatay yükleri karşılamadaki kapasiteleri sınırlıdır ve derin ya da kararsız zeminlerde kullanıma uygun olmayabilir.
- **Kazık tipi türbin temeli (Monopile):** Kazık tipi türbin temelleri, yapıyı desteklemek amacıyla deniz tabanına çakılan, genellikle çelik veya betondan imal edilmiş büyük çaplı tek bir düşey kazıktan oluşur. Bu temel türü, açık deniz ortamlarında – özellikle rüzgar türbinleri veya petrol platformları gibi yapılarda – yaygın olarak tercih edilir. Kazık tipi türbin temelleri, yapım açısından görece basit ve ekonomiktir; ancak yatay yükler karşısında diğer bazı temel türlerine göre daha sınırlı performans gösterebilir.
- **Gergi halatlı kazık tipi türbin temeli (Monopile with guy wires):** Gergi halatlı Kazık tipi türbin temelleri, klasik monopile sistemine ek olarak zemine sabitlenen gergi halatlarıyla donatılarak yapıya ilave yatay stabilite sağlar. Bu sistem, yüksek yatay yüklerin beklendiği açık deniz koşullarında tercih edilmektedir.
- **Tripod temeller,** üst kısmında birleşen üç dikey kazığın oluşturduğu üç ayaklı bir yapıdan meydana gelir. Açık deniz rüzgar türbinleri veya petrol platformları gibi yapılarda kullanılır.

Tripod temeller, Kazık tipi türbin temeli sistemlerine kıyasla yatay yükleri daha etkin şekilde karşılayabilir; fakat yapım maliyeti ve yapısal karmaşıklığı daha yüksektir.

- Ceket temel (Jacket foundation): Ceket temeller, birbirine bağlı düşey kazıklar ve yatay kirişlerden oluşan, kafes biçiminde çerçeve (jacket) yapısına sahip sistemlerdir. Derin veya kararsız deniz zeminlerinde, yüksek yatay yüklere karşı dayanım gerektiğinde tercih edilir. Yüksek yapısal dayanım sağlamalarına rağmen, inşaat süreçleri karmaşık ve maliyetlidir.
- Emme kovasıyla sabitlenmiş gerdirmeye ayaklı sistemler (Tension leg with suction buckets): Bu temel türü, düşey gerdirmeye ayaklarının deniz tabanına emme kovaları (suction buckets) yardımıyla sabitlendiği sistemleri ifade eder. Yüksek yatay stabilite sağlayan bu temeller, genellikle petrol platformları gibi büyük açık deniz yapıları için geliştirilmiştir. Derin deniz koşullarında etkin bir çözüm sunmakla birlikte, karmaşıklıkları ve maliyetleri yüksektir.

Bu temel türleri, diğerleriyle birlikte Şekil 1.7.'de görselleştirilmiştir.



Şekil 1.7. Açık deniz rüzgar türbinlerinin temelleri ve üst yapıları (Kallehave vd., 2015).

Kazık tipi türbin temelleri, sade ve sağlam tasarımları, nispeten düşük maliyetleri ve kolay inşa edilebilmeleri sayesinde açık deniz rüzgar türbinlerinin (OWT'ler) desteklenmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Genellikle 30 ila 45 metre arasındaki derinliklerde bulunan sığ sularda kullanılırlar (Kallehave vd., 2015).

Ancak daha derin denizlerde, yatay yükleri karşılama kapasiteleri daha yüksek ve daha fazla stabilite ile güvenilirlik sunan diğer temel türleri, Kazık tipi türbin temellere kıyasla tercih edilebilir. Bu alternatif temel türleri arasında ceket temeller (jacket foundations), tripod temeller ve emme kovasıyla sabitlenmiş gerdirmeye ayaklı sistemler (tension leg with suction buckets) yer alır. Bu temeller, kazık tipi sistemlere göre daha karmaşık ve maliyetli olsalar da, derin sular ve/veya daha kararsız zemin koşulları için daha uygun çözümler sunarlar.

1.2.2. Kazık Tipi Türbin Temelleri (Monopiles)

Açık deniz rüzgar türbinleri kendine özgü avantajlar sunmasına rağmen, geleneksel tasarlanabilirlik açısından da sınırlamalarla karşı karşıyadır. En kritik sınırlama, açık deniz ortamlarının yapısal, geoteknik veya çevresel açıdan zorlu koşullar sunması nedeniyle temeldir. Borkum Riffgrund-3 açık deniz rüzgar santrali için kazık tipi türbin temelleri aşağıdaki Şekil 1.8.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Borkum Riffgrund-3 açık deniz rüzgar santrali için kazık tipi türbin temelleri.

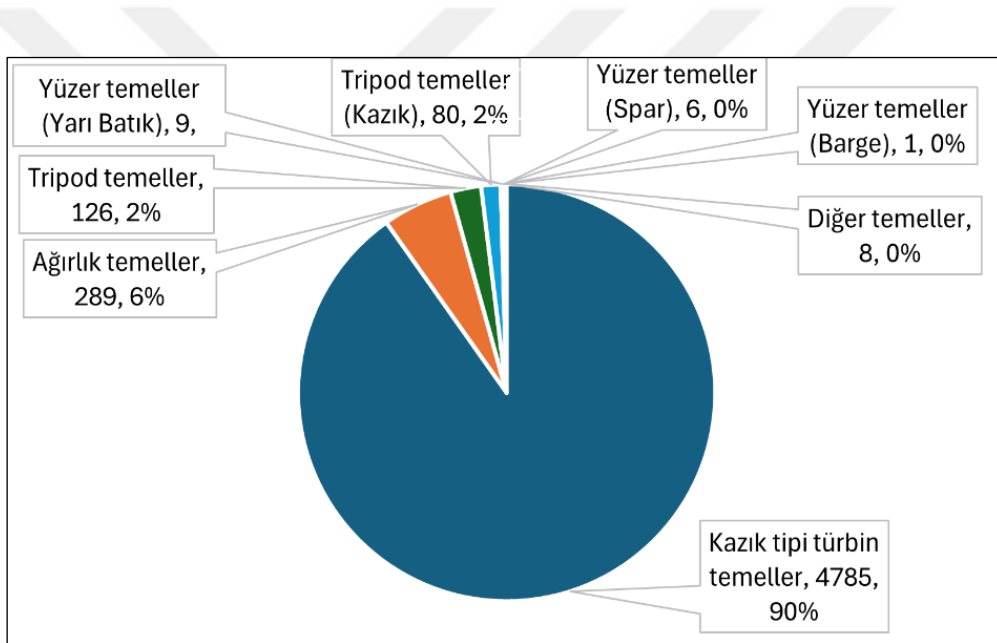
Kazık tipi türbin temelleri, ekonomik faydaları ve kurulum kolaylığı nedeniyle açık deniz rüzgar türbini temelleri için en uygun seçeneklerden biri olarak kabul edilir. Kazık tipi türbin temeli, kule ve türbinin ağırlığından kaynaklanan düşey yüklere ve rüzgar, okyanus dalgaları ve akıntılardan kaynaklanan önemli yanal kuvvetler ile bükülme momentlerine maruz kalan, büyük çaplı, açık uçlu boru şeklindedir. Bu yükleri, yetkin üst zemin katmanlarında yatay yeryüzü basınçlarını mobilize ederek deniz tabanına aktarır (Arshad vd., 2016).

Kazık tipi türbin temellerini geleneksel kazıklardan ayıran en önemli özelliği, 6 m ila 12 m arasındaki çok büyük çaplarda olmalarıdır. Böylesine büyük çaplı bir kazığın, rüzgar, dalga, akıntı gibi çevresel yüklere, operasyonel yüklere ve büyük kütlelerinden kaynaklanan atalet gibi iç yüklere karşı doğru bir şekilde tasarlanması büyük zorlukları barındırmaktadır (Bhattacharya, 2019). Bahsedilen hidrodinamik ve aerodinamik yüklere ek olarak, özellikle yüksek sismik aktiviteye sahip bölgelerde kazık tipi türbin temeli kurulumlarının yaygınlaşmasıyla sismik tasarımın önemi de giderek artmaktadır (He vd., 2020; Kaynia, 2019).

Açık deniz rüzgar türbinleri, rüzgar ve dalga gibi sürekli değişen yüklere maruz kalan çok büyük yapılar olduğundan, destek yapısı tasarımı bu yükleri karşılayabilecek kadar sağlam ve rijit olmalıdır. Kazık tipi türbin temellerinin performansı uzun süredir araştırılmakta olup, birkaç on yıl önce imkansız gibi görünen ebatları mümkün kılan büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Türkiye açısından bakıldığında,

ülkemizin uzun kıyı şeridi ile rüzgar enerjisi için büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir ve bu potansiyel halen tam manasıyla fark edilmiş değildir; hükümet, açık deniz rüzgar çiftlikleri geliştirmek için uygun alanları analiz etmek ve belirlemek amacıyla çeşitli projeler başlatmıştır. Açık deniz rüzgar türbini temelleri için en iyi seçenek olarak öne çıkan kazık tipi türbin temellerinin yenilikçi tasarımının, Türkiye ve bölgedeki diğer ülkelerde açık deniz rüzgar enerjisi devrimine öncülük etmesi beklenmektedir. Bu nedenle, yerel coğrafi koşullara odaklanarak, mevcut en son araçlar ve ekipmanlar kullanılarak kazık tipi türbin temellerinin davranışlarını incelemek son derece kritik hale gelmektedir.

Wind Europe Derneği'ne göre 2021 yılında, kazık tipi türbin temeli alternatifi, geliştiricilerin tercih ettiği seçenek olmaya devam etmiş ve 2021'deki tüm kurulumların üçte ikisinden fazlasını oluşturmuştur. Aşağıda Şekil 1.9.'da gösterildiği üzere, kazık tipi türbin temelleri kümülatif olarak 4.785 adede ulaşmış ve en çok kullanılan temel tipi olmaya devam etmiştir (%81,5) (Wind Europe, Offshore Wind Energy: 2021 Mid-Year Statistics).



Şekil 1.9. Altyapı türüne göre kurulmuş temellerin kümülatif sayısı (Wind Europe, 2021).

Wind Europe 2021 Raporu'na göre, açık deniz rüzgar türbinlerinin %80'inden fazlası kazık tipi türbin temelleri üzerine inşa edilmektedir; bu nedenle, bu tarz temellerin benimsenmesinin bir ülkenin açık deniz rüzgar enerjisi kapasitesinin gelişiminde kritik bir etkisi olduğu söylenebilir. Türkiye, 8.000 km uzunluğundaki kıyı şeridi ile açık deniz rüzgar enerjisi için gerçekten büyük bir potansiyel sunmaktadır. Yaklaşık 85 milyon nüfuslu bir ülkede karada rüzgar çiftlikleri için her zaman arazi kıtlığı olacağından, açık denizin tercih edilmesi kaçınılmazdır. Ekonomik açıdan bakıldığında, Türkiye bir enerji ithalatçısı ülkedir ve hükümetin verilerine göre enerji ithalatı %74 seviyesindedir. Bu ithalat faturasını düşürmek için hükümet, yerel olarak mevcut olan fırsatlara çok önem vermektedir. Bir diğer önemli nokta, ülkelerin karbon nötr olma yarışında zamana karşı verdikleri mücadelede, büyüyen ekonomiler için rüzgar gibi temiz enerjiye geçişin kaçınılmaz olmasıdır (Wind Europe, 2021).

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. Yanal Yük Altındaki Kazıklar

Kazık temelinin yanal yükleri karşılayabilmesi için kazığın boyutu ve şekli kritik öneme sahiptir. Daha büyük çaplı kazıklar veya kare ya da dikdörtgen gibi bükülmeye dirençli kesit tasarımlarına sahip kazıklar, genellikle daha küçük veya daha ince kazıklara nazaran yanal yükleri karşılamada daha etkilidir.

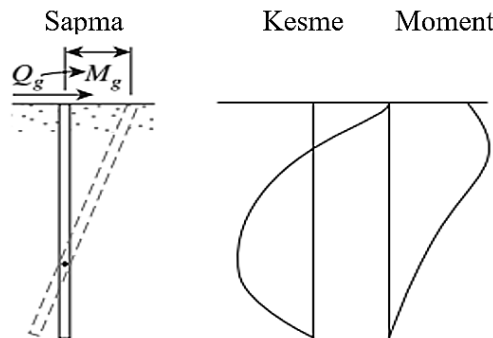
Kazığın yanal gerilimlere dayanma kabiliyeti, aynı zamanda onun rijitliği, yani deformasyona karşı direnci ile de etkilenir. Genel olarak, beton veya çelik gibi yüksek rijitlikteki malzemelerden yapılan kazıklar, ahşap veya plastik gibi düşük rijitlikteki malzemelerden yapılan kazıklara kıyasla yanal yükleri karşılamada daha başarılıdır.

Tasarımda düşünülmesi gereken bir diğer önemli husus, kazığın yerleştirileceği zeminin rijitliğidir. Kil veya sıkı kum gibi yüksek rijitliğe sahip zeminler, genellikle kazığa daha fazla destek sağlamakta ve gevşek kum veya turba gibi düşük rijitliğe sahip zeminlere kıyasla yanal gerilimlere daha iyi dayanabilmektedir.

Bir diğer önemli faktör, kazık uçlarının soketlenme durumudur, yani kazık uçlarının zemine ne kadar güvenli bir şekilde sabitlendiğidir. Uçları zemine sağlam şekilde ankrajlanmış sabit uçlu kazıklar, zemine sabitlenmemiş serbest uçlu kazıklara kıyasla yanal gerilimlere karşı daha iyi direnç gösterir.

Bu faktörlere ek olarak, kazığın yerleştirme derinliği de yanal yükleri karşılama başarısını etkileyebilir. Zemin genellikle daha derinlerde daha stabil ve destekleyici olduğundan, daha derin kazıklar, daha sığ olanlara kıyasla yanal yükleri karşılamada daha etkili olabilir.

Genel olarak, bir kazık temelinin yanal yükleri karşılama kapasitesi, tüm bu değişkenlerin etkileşimi, kazığın özgül tasarımı ve öngörülen yükleme koşullarıyla belirlenir. Mühendisler, bir kazık temelinin yanal yükleri etkin bir şekilde karşılayabilmesini sağlamak için bu unsurların her birini tasarım sürecinde dikkatle değerlendirir. Şekil 2.1’de kısa bir kazık için sapma, moment ve kesme kuvveti değişimleri gösterilmiştir. Yanal yüklere maruz kaldığında, kısa bir kazık uzun ve esnek kazıklara kıyasla rijit olarak dönecektir.



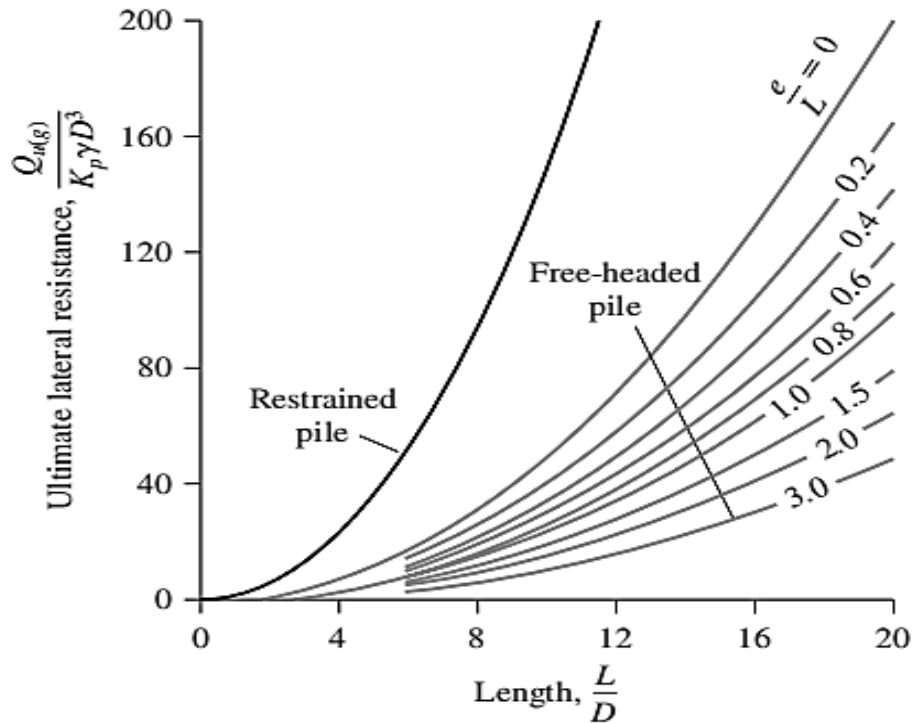
Şekil 2.1. Kısa kazık için kazık uzunluğu boyunca sapma, kesme ve moment dağılımı (Das, 2014).

2.1.1. Brom Yaklaşımı

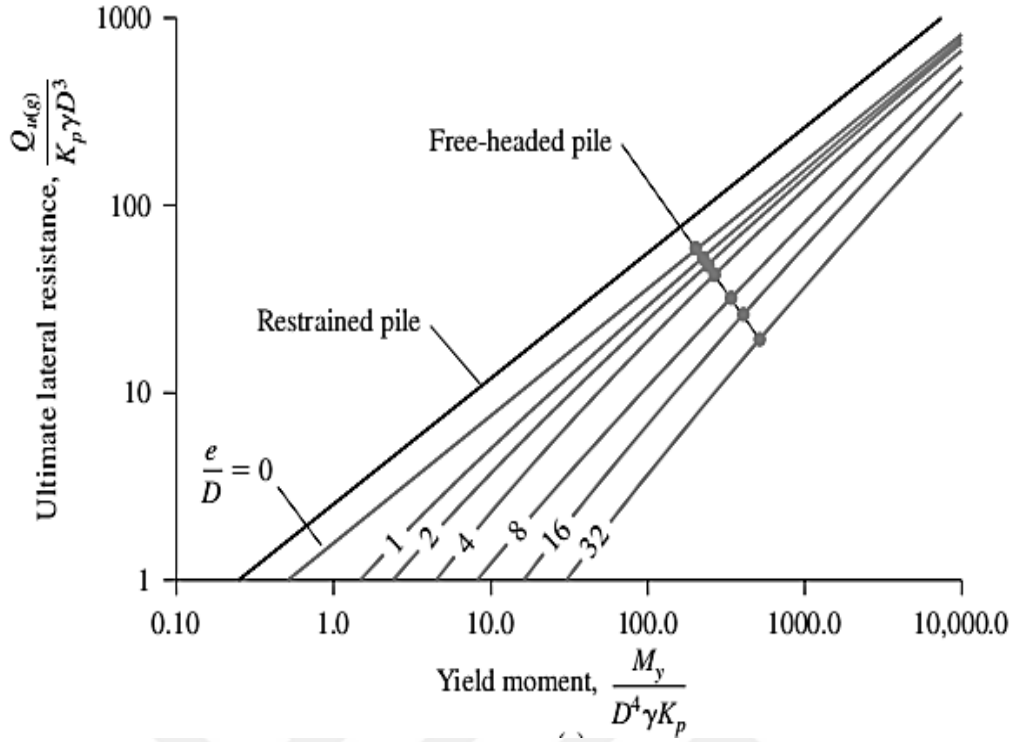
Brom çözümü, bazen Brom yöntemi olarak da adlandırılan ve kazıkların zemin seviyesindeki yanal hareketini çalışma yükleri altında belirleyen bir yöntemdir; bu yöntemde, taban reaksiyonu kavramı kullanılmaktadır. Taban reaksiyonu, kazığın tepesine uygulanan yanal yüke karşılık olarak zeminin kazığın tabanına uyguladığı yanal kuvvettir. Broms yönteminin temeli, uygulanan yük, kazığın nihai yanal direncinin yarısından üçte birine kadar olduğunda, kazığın sapmasının uygulanan yükle doğrusal olarak arttığı varsayımına dayanır.

Brom yöntemi, kohezif zeminlere (örneğin kil) ve kohezyonsuz zeminlere (örneğin kum) gömülü kazıklar için, ayrıca kısa veya rijit kazıklar ile uzun veya elastik kazıklar için çözümler sunar. Yöntem, zeminin rijitliği, kazığın rijitliği, kazığın şekli, boyutu ve uçlarındaki sabitlik durumunu dikkate alır.

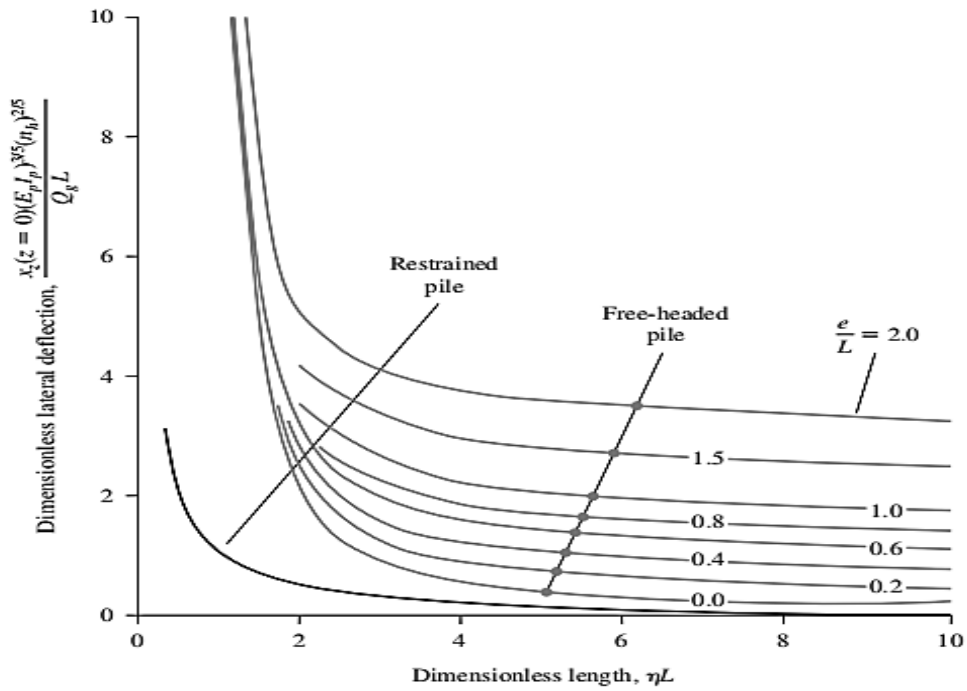
Brom çözümünün ilk aşamasında kazığa etki etmesi öngörülen yanal yük ve nihai yanal direnç hesaplanmalıdır. Daha sonra çalışma yükleri altında kazığın zemin seviyesinde beklenen sapması hesaplanmaktadır. Bu bilgiler, kazık temelinin yanal yükleri etkin bir şekilde karşılayabilecek şekilde tasarlanması için kullanılabilir. Çözümler Şekil 2.2., Şekil 2.3. ve Şekil 2.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Brom'un kohezyonsuz zemin içine gömülü kısa kazıklar için nihai yanal direnç çözümü (Das, 2014).



Şekil 2.3. Brom'un kohezyonsuz zemine gömülü uzun kazıklar için nihai yanal direnç çözümü (Das, 2014).



Şekil 2.4. Brom'un kohezyonsuz zemine gömülü kazıklarda başlık deplasmanını tahmin etme çözümü (Das, 2014).

2.1.2. Elastik Çözüm ve Winkler Modeli

Matlock ve Reese çözümü olarak da bilinen, kohezyonsuz zeminlere (örneğin kum veya çakıl) gömülü düşey bir kazığın, zemin yüzeyinde yatay yükler ve eğilme momentlerine maruz kaldığında momentlerini ve deplasmanlarını tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, zemini elastik bir ortam olarak kabul eden ve bir dizi doğrusal olmayan, bağlantısız elastik yaylarla değiştirilebilen Winkler modeline dayanır (Matlock & Reese, 1960).

Matlock ve Reese çözümünü kullanmak için, öncelikle kazığın maruz kalması beklenen yatay yükleri ve bükülme momentlerini, ayrıca kazığın gömülü olduğu zeminin elastisite modülü ve Poisson oranı gibi özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Daha sonra Matlock ve Reese çözümü kullanılarak kazık gövdesinde beklenen momentler ve deformasyonlar hesaplanabilir.

Bu bilgiler, kazık temelinin tasarlanması ve yanal yükleri etkin bir şekilde karşılayabileceğinin belirlenebilmesi için kullanılabilir. Ayrıca, uygulanan yüklerin büyüklüğünde veya yönünde ya da zeminin özelliklerinde meydana gelen değişiklikler gibi farklı yükleme koşulları altında kazığın davranışını tahmin etmek için de kullanılabilir.

Daha basit olan Winkler modelinde, elastik bir ortam olarak kabul edilen zemin, bir dizi doğrusal olmayan, bağlantısız elastik yaylarla değiştirilebilir. Bu, aşağıda verilen denklemi sağlar;

$$k = p'/x \quad (2.1)$$

burada;

k - taban reaksiyon modülü (kN/m^2)

p' - zemindeki basınç (kN/m)

x - kazık sapması (m)

Kohezyonsuz zeminlerde, z derinliğinde taban reaksiyon modülü şu şekilde verilir:

$$k_z = n_h * z \quad (2.2)$$

burada;

n_h - yatay taban reaksiyon katsayısı.

Elastik bir temel üzerindeki kirişler teorisinden;

$$E_p I_p * \frac{d^4 x}{dz^4} = p' \quad (2.3)$$

burada;

E_p - kazık malzemesinin elastisite modülü

I_p - kazık kesitinin atalet momenti

Winkler modeline dayalı olarak,

$$p' = -kx \quad (2.4)$$

2.3 ve 2.4 denklemlerini birleştirerek:

$$E_p I_p * \frac{d^4 x}{dz^4} + kx = 0 \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'in çözümleri, aşağıda sırasıyla denklemler 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 ve 2.10 ile temsil edildiği üzere, herhangi bir z derinliğinde kazık sapmasını ve kazığın eğimini verir.

$$x(z) = \frac{A_x Q_g T^3}{E_p I_p} + \frac{B_x M_g T^2}{E_p I_p} \quad (2.6)$$

$$\theta(z) = \frac{A_\theta Q_g T^2}{E_p I_p} + \frac{B_\theta M_g T}{E_p I_p} \quad (2.7)$$

$$M(z) = \frac{A_m Q_g T^2}{E_p I_p} + \frac{B_m M_g T}{E_p I_p} \quad (2.8)$$

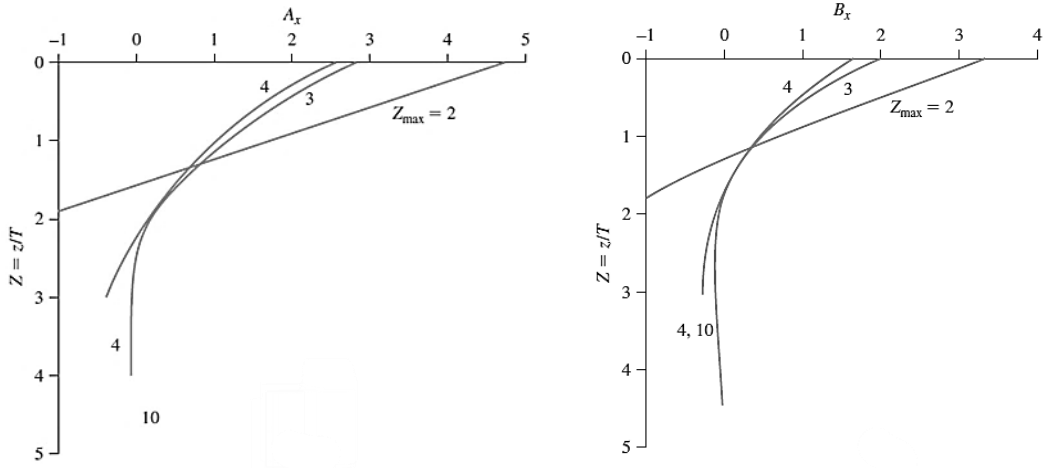
$$V(z) = \frac{A_v Q_g T^2}{E_p I_p} + \frac{B_v M_g T}{E_p I_p} \quad (2.9)$$

$$p(z) = \frac{A_p Q_g T^2}{E_p I_p} + \frac{B_p M_g T}{E_p I_p} \quad (2.10)$$

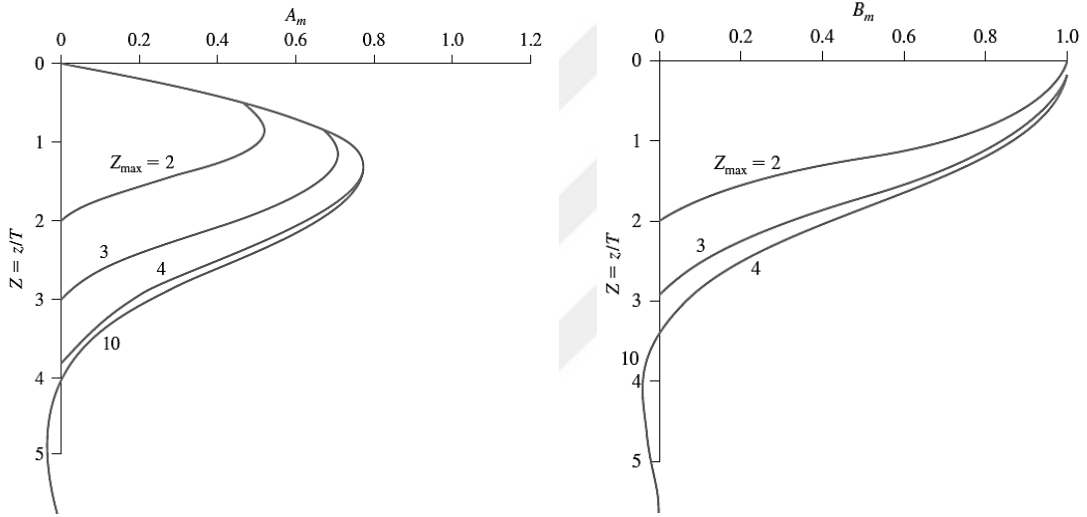
burada:

$A_x, B_x, A_\theta, B_\theta, A_m, B_m, A_v, B_v, A_p$ ve B_p , aşağıda verilen grafiklerden tahmin edilen katsayılarıdır.

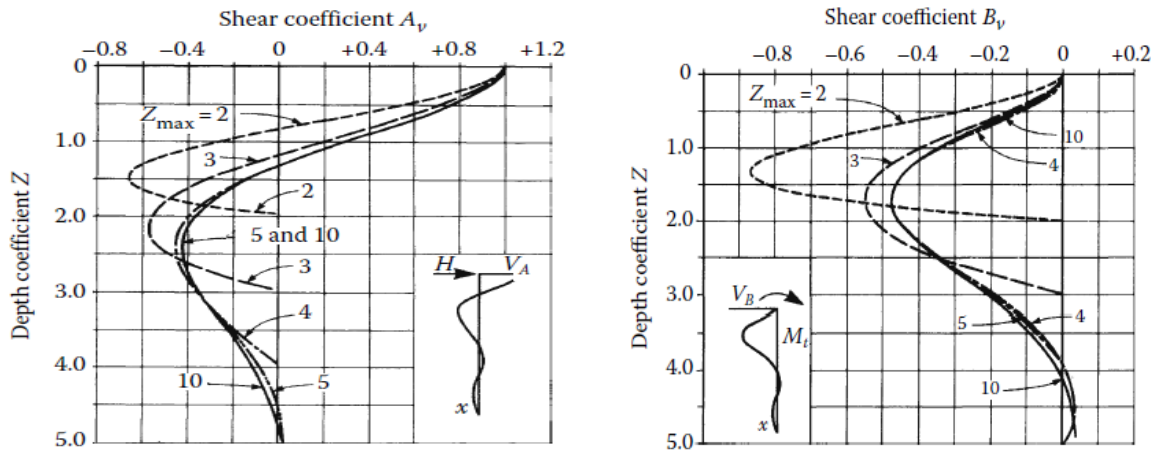
Kazık tipi türbin temeli için, bu çalışmada ilgi çeken parametre, çamur hattında ($z=0$) sapma, kesme kuvveti, bükülme momenti, zemin reaksiyonu ve eğimdir. Kuma gömülü kazıklar için yer değiştirme, moment, kesme ve zemin reaksiyonu katsayıları sırasıyla Şekil 2.5., Şekil 2.6., Şekil 2.7. ve Şekil 2.8.'de gösterilmektedir.



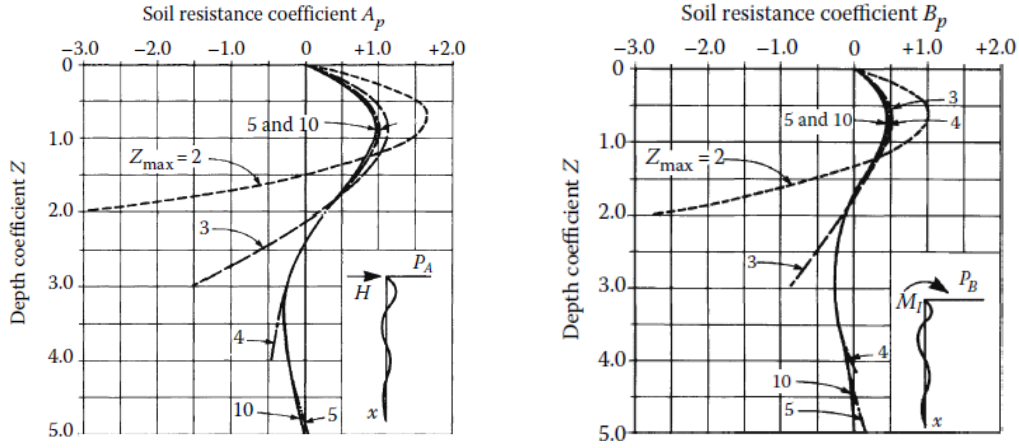
Şekil 2.5. Kumdaki kazıklar için yer değiştirme katsayıları (Das, 2014).



Şekil 2.6. Kumdaki kazıklar için moment katsayıları (Das, 2014).



Şekil 2.7. Kumdaki kazıklar için kesme katsayıları (Matlock & Reese, 1960).



Şekil 2.8. Kumdaki kazıklar için zemin reaksiyon katsayıları (Matlock & Reese, 1960).

2.2. Sonlu Fark Yöntemi ve FLAC3D

2.2.1. Sonlu Fark Yöntemi

Sonlu Farklar Yöntemi (FDM) uzun süredir sayısal analizin temel taşlarından biri olup, çok çeşitli fiziksel fenomenlerin temeli oluşturulan kısmi türev denklemlerini (PDE'ler) çözmek için güçlü bir çerçeve sunmaktadır. İnşaat ve geoteknik mühendisliği alanında, FDM özellikle değerli olduğunu kanıtlamış; zemin mekaniği, şev stabilitesi, yeraltı kazıları, yeraltı suyu akışı ve sismik analiz gibi karmaşık problemlerin üstesinden gelmeyi mümkün kılmıştır. FDM'nin özünde, problem alanını ayrıklaştırma işlemi yer alır; bu işlem, sürekli PDE'lerin sonlu fark formülleri kullanılarak yaklaşık olarak çözüldüğü bir düğüm ızgarasına dönüştürür. Taylor serisi açılımlarından türetilen bu formüller, bir düğümdeki türevi, komşu düğümlerdeki fonksiyon değerlerinin ağırlıklı toplamı olarak ifade eder. Bu ayrıklaştırma süreci, PDE'leri bilgisayarla çözülebilir bir cebirsel denklem sistemine etkili bir şekilde dönüştürür. FDM'nin doğruluğu, yaklaştırma derecesi, ızgara düğümleri arasındaki boşluk ve çözümün kendisinin düzgünlüğü gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Daha yüksek dereceli yaklaşımlar ve daha ince ızgaralar genellikle daha doğru sonuçlar verirken, aynı zamanda daha fazla hesaplama kaynağı gerektirir. Doğruluk ve hesaplama verimliliği arasında bir denge sağlamak, bu ayrıklaştırma parametrelerinin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir.

İnşaat ve geoteknik mühendisliği bağlamında, FDM geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Mühendislerin, farklı yükleme koşulları altında zemin davranışını analiz etmesine, gerilme dağılımını ve deformasyonları tahmin etmesine, temel, dolgu ve istinat duvarlarının tasarımını bilgilendirmesine olanak tanır. Ayrıca, FDM, şev stabilitesinin değerlendirilmesinde, yeraltı kazıları çevresindeki zemin ve kaya davranışının analizinde, karmaşık jeolojik oluşumlarda yeraltı suyu akışının simülasyonunda ve zemin içindeki sismik dalgaların yayılımının tahmininde kritik bir rol oynar. FDM'nin bu uygulamadaki popülaritesi, kavramsal basitliğinden, hesaplama verimliliğinden ve geniş uygulanabilirliğinden kaynaklanmaktadır. Ancak, sınırlamalarının da farkında olmak önemlidir.

Geleneksel FDM, basit ve yapılandırılmış geometrilili problemler için en uygunudur. Karmaşık veya düzensiz sınırların işlenmesi zorluklar yaratabilir ve bu durum, koordinat dönüşümleri veya daha karmaşık ağ oluşturma teknikleri gerektirebilir. Ayrıca, FDM'nin doğruluğu, ızgara çözünürlüğüne doğrudan bağlıdır. Hızlı değişiklikler veya süreksizlikler olan bölgelerde yüksek doğruluk elde etmek, çok ince ızgaralar gerektirebilir ve bu da hesaplama maliyetini artırabilir.

Bu sınırlamalara rağmen, FDM sürekli olarak gelişmektedir. Devam eden araştırmalar, FDM'yi sonlu eleman yöntemi veya sonlu hacim yöntemi gibi diğer sayısal tekniklerle birleştiren hibrit yöntemleri keşfetmekte, her bir yaklaşımın güçlü yönlerinden faydalanmayı amaçlamaktadır. Uyarlanabilir ağ sıkılaştırma teknikleri, hesaplama çabasını en çok ihtiyaç duyulan bölgelere yoğunlaştırarak hem doğruluğu hem de verimliliği artırmak için ızgara çözünürlüğünü dinamik olarak ayarlayabilmektedir. Ayrıca, yüksek performanslı bilgi işlemedeki ilerlemeler, FDM'nin giderek daha büyük ölçekli ve karmaşık problemlere uygulanmasını mümkün kılmaktadır.

2.2.2. FLAC3D Yazılımı

FLAC3D, mühendislik mekaniği hesaplamaları için üç boyutlu açık Lagrangian sonlu hacim programıdır. Bu programın temeli, iki boyutlu program FLAC tarafından kullanılan iyi kurulmuş sayısal formülasyona dayanır. FLAC3D, FLAC'ın analiz yeteneğini üç boyuta genişletir ve zemin ve kaya gibi malzemelerden müteşekkil üç boyutlu yapıların deformasyon-gerilme davranışını simüle eder.

Malzemeler, modellenmesi gereken nesnenin şekline uyacak şekilde kullanıcı tarafından ayarlanan üç boyutlu bir ızgara (grid) içinde polihedral elemanlarla temsil edilir. Her eleman, uygulanan kuvvetler veya sınır kısıtlamalarına yanıt olarak öngörülen doğrusal veya doğrusal olmayan göçme yasasına göre davranır. Malzeme akma ve akış gösterebilir ve ızgara (büyük gerinim modunda) deformasyona uğrayabilir ve temsil edilen malzemeyle birlikte hareket edebilir.

FLAC3D'de kullanılan açık, Lagrangian hesaplama şeması ve karışık-ayrıklaştırma bölgeleme tekniği, plastik çökme ve akışın çok doğru bir şekilde modellenmesini sağlar. Hiçbir matris oluşturulmadığından, büyük üç boyutlu hesaplamalar aşırı bellek gereksinimi olmadan yapılabilir. Açık formülasyonun dezavantajları (yani küçük zaman adımı sınırlaması ve gerekli sönümlleme sorusu), başarısızlık yolundaki etkileri en aza indiren otomatik atalet ölçeklendirme ve otomatik sönümlleme ile aşılr. FLAC3D, geoteknik mühendisliğinde üç boyutlu problemlerin çözümü için ideal bir analiz aracı sunar.

FLAC3D, geomekanik alanında karmaşık problemleri çözmek için geniş bir yelpazede yetenekler sunar. FLAC3D ızgarasındaki her bölge farklı bir malzeme modeline veya özelliğe sahip olabilir ve herhangi bir özelliğin sürekli bir gradyanı veya istatistiksel dağılımı belirtilebilir.

FLAC3D ayrıca, kullanıcının yeni değişkenler ve fonksiyonlar tanımlamasına olanak tanıyan güçlü bir yerleşik programlama dili olan FISH'i içerir. FISH, analizleri kendi özel ihtiyaçlarına göre uyarlamak isteyen kullanıcılara benzersiz bir yetenek sunar. Örneğin, FISH şunları sağlar:

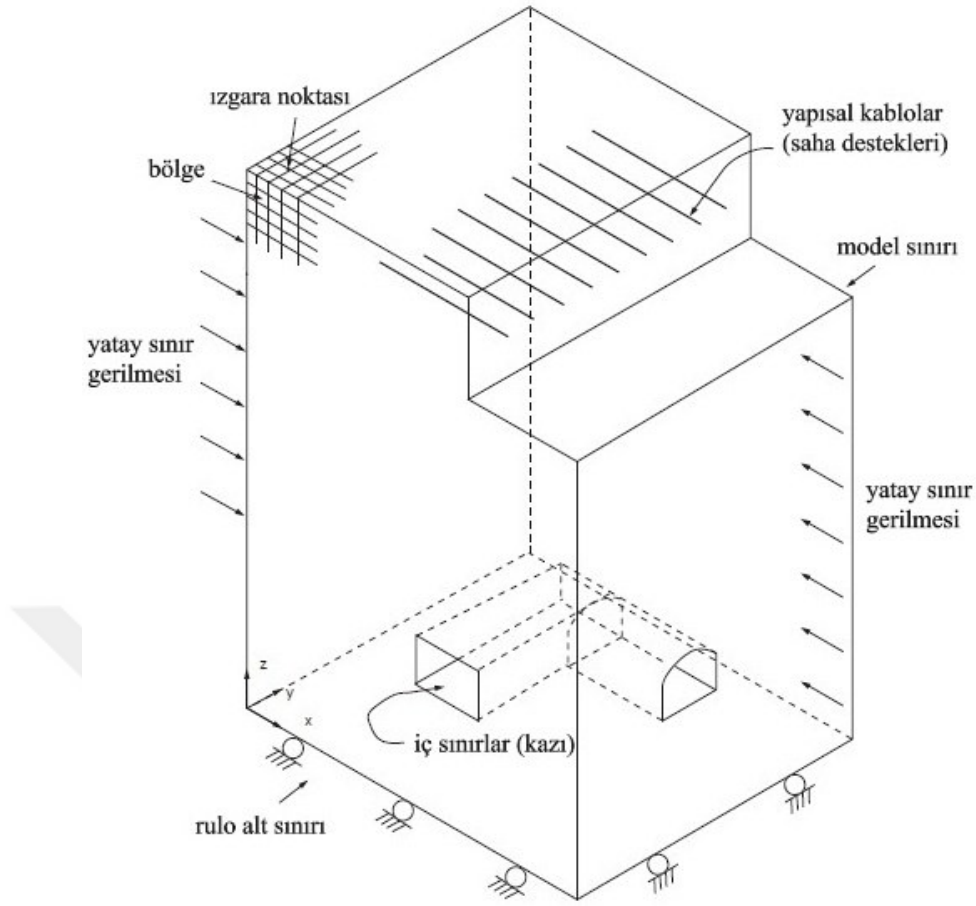
- ızgarada kullanıcı tarafından belirlenen özellik değişimleri (örneğin, derinlikle modülün doğrusal olmayan artışı);
- kullanıcı tanımlı değişkenlerin çizilmesi ve yazdırılması (yani özel tasarlanmış grafikler);
- özel ızgara oluşturucuların uygulanması;
- sayısal testlerin kontrolü;
- olağandışı sınır koşullarının belirlenmesi;
- zaman ve mekândaki değişimler;
- parametre çalışmalarının otomasyonu.

Dinamik analiz, isteğe bağlı dinamik hesaplama modülü kullanılarak FLAC3D ile gerçekleştirilebilir. Kullanıcı tarafından belirtilen ivme, hız veya gerilme dalgaları, modelde dış sınır koşulu veya model içinde bir uyarma olarak doğrudan modele girilebilir. FLAC3D, modelin çevresindeki sonsuz elastik bir ortamın etkisini simüle etmek için emici ve serbest alan sınır koşulları içerir. Dinamik hesaplama, yeraltı suyu akış modeline bağlanabilir; bağlanma seviyesi, dinamik gözenek basıncı üretimini (sıvılaşma) içerir.

2.2.3. FLAC3D Terim Tanımları

FLAC3D, genel olarak geleneksel sonlu fark veya sonlu eleman programlarında gerilme analizi için kullanılan terminolojiyle uyumlu bir adlandırma kullanır. Terimlerin temel tanımları, açıklık getirmek amacıyla burada gözden geçirilmiştir. Şekil 2.9.'da genel FLAC3D terminolojisini göstermektedir.

- Model: Model (veya FLAC3D modeli), kullanıcının tanımladığı fiziksel bir problemin simülasyonunu ifade eder. Bu bağlamda, bir FLAC3D modeli, problemin koşullarını tarif eden ve sayısal çözümünü mümkün kılan bir dizi komutu belirtir.
- Zone: Zon, FLAC3D ağındaki en küçük sonlu fark elemanıdır ve gerilme-deformasyon gibi fiziksel davranış değişikliklerini değerlendirmek için kullanılır. Zonlar, genellikle tuğla, kama, piramit veya tetrahedral şeklinde polihedral yapıdadır ve modeli oluşturmak için kullanılır. Dahili olarak, her polihedral zon, iki örtüşen beş tetrahedral alt-zon seti içerir, ancak kullanıcılar genellikle bunlarla doğrudan etkileşime girmez. “Eleman” terimi de kullanılabilir, ancak bu genellikle yapısal elemanlar için ayrılmıştır.
- Gridpoint: Düğüm noktaları, sonlu fark zonlarının köşelerinde bulunur ve model geometrisini tanımlar. Her zon, şekline bağlı olarak dört ila sekiz düğüm noktası içerebilir. Düğüm noktalarına belirli x, y ve z koordinatları atanır ve bu koordinatlar her zonun tam yerini belirler. Genellikle “nodal nokta” veya “düğüm” ile eşanlamlı olsa da, bu terimler FLAC3D’de genellikle yapısal elemanlar için kullanılır.



Şekil 2.9. FLAC3D modeline bir örnek.

- Finite Volume Grid: Sonlu hacim ızgarası, analiz edilen fiziksel alanı temsil eden bir veya daha fazla zondan oluşur. Bu, genellikle ağ (mesh) olarak da adlandırılır. Tüm durum değişkenlerinin saklandığı yerleri tanımlar: vektör büyüklükleri (örneğin, kuvvetler, yer değiştirmeler, hızlar) düğüm noktalarında saklanırken, skalar ve tensör büyüklükleri (örneğin, gerilme, malzeme özellikleri) zon merkezlerinde saklanır.
- Model Boundary: Model sınırı, sonlu fark ızgarasının dış kenarını, (iç boşluklar veya diğer süreksizlikler dahil) ifade eder.
- Boundary Conditions: Sınır koşulları, model sınırları boyunca kısıtlamaları veya kontrollü değerleri belirtir. Örnekler arasında mekanik problemler için sabit yer değiştirmeler veya kuvvetler, akışkan akışı için geçirimsiz sınırlar ve termal simülasyonlar için adiabatik sınırlar yer alır.
- Initial Conditions: Başlangıç koşulları, herhangi bir dış yükleme veya kazı gibi harici etkiler öncesinde tüm model değişkenlerinin durumunu, örneğin gerilme veya boşluk suyu basıncını tanımlar.

- **Constitutive Model:** Malzeme modeli, her zona atanan deformasyon ve dayanım davranışını tanımlar. FLAC3D, farklı jeolojik malzeme davranışlarını simüle etmek için çeşitli yapı modelleri sunar. Malzeme özellikleri ve yapı modelleri, zon bazında atanabilir.
- **Null Zone:** Boş zonlar, modelde hiçbir malzemenin bulunmadığı boşlukları temsil eder.
- **Subgrid:** Altızgara, FLAC3D, karmaşık geometrileri kolaylaştırmak için modelin alt ızgaralara bölünmesine olanak tanır. Örneğin, bir baraj alt ızgarası, temel alt ızgarası üzerine modellenenebilir.
- **Attached Faces:** Bağlı yüzeyler, bir araya getirilen alt ızgaraların bitişik yüzeyleridir. Bu yüzeyler eş düzlemlidir ve temas halinde olmalıdır, ancak düğüm noktalarının çakışması gerekmez. Farklı zon yoğunlukları desteklenebilir.
- **Interface:** Arayüz, simülasyon sırasında açılabilen veya kayabilen alt ızgaralar arasındaki bağlantıdır. Faylar veya malzeme arayüzleri gibi fiziksel süreksizlikleri modellemek için kullanılır.
- **Range:** Aralık, komutları model nesnelere seçici olarak uygulamak için kullanılan bir filtredir. Aralıklar, nesne kimliklerine veya mekansal koordinatlara atıfta bulunabilir ve model geliştikçe evrilebilir.
- **Range Element:** Aralık elemanı, bir aralık içindeki belirli bir kriteri tanımlar. Aralıklar, birden fazla aralık elemanından oluşabilir ve birleşim, kesişim veya ters seçimleri temsil edebilir.
- **Group:** Gruplar, modeldeki bir veya daha fazla nesneye kullanıcı tarafından atanan etiketlerdir. Grup isimleri, “slot” adı verilen kategoriler içinde düzenlenir; her nesne her slotta bir gruba sahip olabilir, ancak farklı slotlarda birden fazla gruba ait olabilir.
- **ID Number:** Kimlik no, örneğin zonlar, düğüm noktaları, arayüzler, geçmiş veriler ve yapısal elemanlar, benzersiz bir kimlik (ID) numarasına sahiptir. Bu kimlikler, doğrudan referans ve manipülasyon için kullanılır. Yapısal elemanlar, düğümler, bağlantılar ve elemanlar için bileşen kimliklerini de içerir.
- **Names:** Adlar, bazı model nesneleri (örneğin geçmişler, tablolar, arayüzler), daha kolay referans için kullanıcı tanımlı isimlerle atanabilir. Bu isimler, otomatik olarak dizilere dönüştürülen tamsayılar dahil alfanümerik dizeler olabilir.
- **Structural Element:** Yapısal elemanlar: FLAC3D, iki tür yapısal eleman sağlar: doğrusal iki düğümlü elemanlar (kirişler, kablolar, kazıklar) ve üçgen üç düğümlü elemanlar (kabuklar, astarlar, geogridler). Her yapısal varlık, düğümler, elemanlar ve düğüm/ızgara bağlantılarından oluşur. Bazı yapısal elemanlar için doğrusal olmayan davranış modellenenebilir.
- **Step:** Hesap adımı: FLAC3D, açık bir çözüm yöntemi kullanarak çalışır ve ızgara boyunca bilgiyi yaymak için birden fazla hesaplama adımı (zaman adımları veya döngüler) gerektirir. Dinamik analizlerde, her adım fiziksel bir zaman adımına karşılık gelir.

- **Static Solution:** Statik çözüm, kinetik enerji oranının ihmal edilebilir hale geldiği, sabit durum veya denge koşulunu gösterdiği zaman elde edilir. Bu, sisteme sönümleme uygulanarak sağlanır. Model, verilen yükler altında denge mümkün değilse sabit akış veya kararsızlık durumunda kalabilir.
- **Unbalanced Force:** Dengelenmemiş kuvvet, modelin mekanik dengeye ne kadar yakın olduğunu ölçer. Bu, tüm ızgara noktalarındaki maksimum eşdeğer nodal kuvvet vektörüdür. Bu kuvvet, toplam uygulanan yüklerle kıyasla küçük olduğunda model dengede kabul edilir. Sürekli sıfır olmayan değerler, plastik deformasyon veya başarısızlığı gösterebilir.
- **Dynamic Solution:** Dinamik çözüm, atalet etkileri dahil tam hareket denklemlerinin çözülmesini içerir. Bu, sismik veya patlama senaryoları gibi yüksek frekanslı, kısa süreli yükleme olaylarını içeren problemler için gereklidir.
- **Large Strain / Small Strain:** Büyük birim deformasyon/küçük birim deformasyon: Varsayılan olarak, FLAC3D küçük gerinim modunu kullanır; burada düğüm noktası koordinatları sabit kalır. Büyük gerinim modunda, düğüm noktaları, hesaplanan yer değiştirmelere dayalı olarak güncellenir ve geometrik nonlineariteye izin verir.
- **Primitive:** Öncüler, standart ızgara konfigürasyonları oluşturmak için “zone create” komutuyla kullanılan önceden tanımlı şekillerdir. Bunlar, modelin parçalarını oluşturmak için şablon görevi görür.

2.2.4. Üç Boyutlu Sonlu Fark Modelinin Formülasyonu

FLAC3D, sürekli bir üç boyutlu ortamın mekanik davranışını, özellikle dengeye yaklaştığında veya sabit plastik akış yaşadığında sayısal olarak incelemek için geliştirilmiş açık bir sonlu fark programıdır. Gözlemlenen tepki, iki temel unsurdan kaynaklanır: (1) problemin fizikini yöneten matematiksel model ve (2) bunu çözmek için kullanılan özel sayısal uygulama. Bu yönler aşağıda özetlenmiştir (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).

Matematiksel Model Tanımı: Ortamın mekanik davranışı, gerinim tanımları ve hareket yasaları gibi genel fiziksel ilkeler temelinde, idealize edilmiş malzeme tepkisini karakterize eden yapı denklemleriyle birlikte formüle edilir. Bu, mekanik değişkenleri (örneğin, gerilme) kinematik değişkenlerle (örneğin, gerinim oranı ve hız) bağlayan bir kısmi türev denklemleri sistemine yol açar. Bu denklemler, belirli geometriler ve malzeme özellikleri için, özel sınır ve başlangıç koşulları altında çözülür (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).

Modelin temel bir özelliği, FLAC3D'nin öncelikle ortamın dengeye yakın gerilme ve deformasyonunu değerlendirmeye odaklanmasına rağmen, hareket denklemlerinin dahil edilmesidir. Bu çerçevede, atalet terimleri, dengeye doğru yakınsama sürecini stabilize ederek sayısal bir rol oynar.

Kullanımlar: FLAC3D tarafından kullanılan Lagrangian formülasyonunda, ortamdaki herhangi bir malzeme noktası aşağıdaki vektör bileşenleriyle tanımlanır:

- x_i : konum
- u_i : yer değiştirme
- dv_i/dt : ivme

burada $i=1,2,3$ üç mekansal boyuta karşılık gelir.

Aşağıdaki notasyon kuralları kullanılır:

- Kalın harfler, bağlama bağlı olarak vektörleri veya tensörleri ifade eder.
- a_i Kartezyen koordinat sisteminde $[a]$ vektörünün i 'inci bileşenini temsil eder.
- A_{ij} , $[A]$ tensörünün (i,j) -inci bileşenini ifade eder.
- $\alpha_{,i}$ bir skaler, vektör veya tensör bileşeni α 'nın x_i 'ye göre kısmi türevini temsil eder.

Çekme ve uzama pozitif kabul edilir. Einstein toplama kuralı benimsenmiştir, ancak yalnızca 1,2,3 aralığında değişen i, j ve k indisleri için geçerlidir.

Sayısal Formülasyon: FLAC3D'deki çözüm yöntemi, aşağıdaki üç yaklaşımla karakterize edilir:

- Sonlu Fark Yaklaşımı: Alan değişkenlerinin birinci dereceden mekansal ve zamansal türevleri, sonlu fark teknikleri kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanır. Bu, uzay ve zamanda ayrık aralıklarda doğrusal değişim varsayımı altında yapılır.
- Ayrık Model Yaklaşımı: Sürekli ortam, tüm kuvvetlerin-hem uygulanan hem de içsel-üç boyutlu bir ağın düğümlerinde yoğunlaştığı ayrık bir sistem olarak temsil edilir.
- Dinamik Çözüm Yaklaşımı: Hareket denklemlerinden gelen atalet terimleri korunur ve sistemin denge durumuna doğru sayısal olarak yönlendirilmesi için kullanılır.

Bu yaklaşımlar uygulanarak, sürekli mekanik denklemleri, her düğüm noktasında Newton'un ikinci yasasının ayrık formlarına dönüştürülür. Ortaya çıkan adi türev denklemleri sistemi, zamanda açık bir sonlu fark şeması kullanılarak çözülür.

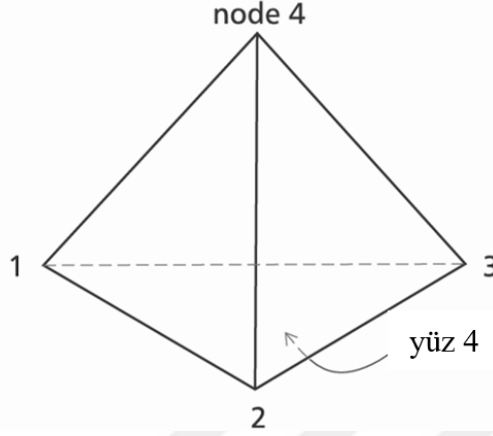
Eşdeğer ortamı tanımlamak için kullanılan mekansal türevler, esas olarak düğüm hızları cinsinden gerinim oranı tanımlarından kaynaklanır. Hız gradyanlarını uzayda değerlendirmek için model, alanı sabit gerinim oranı elemanlarına-genellikle tetrahedral formda-ayrıklaştırır. Izgara düğümleri, bu dört yüzlü (tetrahedral) elemanların köşeleri olarak hizmet verir. Bir dört yüzlü (tetrahedron) eleman, aşağıdaki Şekil 2.10.'da bir örnek olarak gösterilmiştir (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).

FLAC3D'de kullanılan prosedürler aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Sayısal Uygulama: FLAC3D, incelenen ortamın hacmini ayrıklaştırmak için iki temel yöntem sunar: altı yüzlü (hexahedral) ve dört yüzlü (tetrahedral) ızgara oluşturma. İki tür gövde ayrıklaştırması ele alınmıştır:

Altıyüzlü (hexahedral) Izgara Oluşturma: Varsayılan olarak, alan, kullanıcının yerleşik ağ oluşturma araçlarını kullanarak oluşturduğu altı yüzlü zonlara ayrıklaştırılır. Dahili olarak, her altıyüzlü zon, gerinim ve gerilme hesaplamaları için temel elemanlar olarak hizmet veren bir dört yüzlü setine daha fazla bölünür. Yazılım, kullanıcının her zon içinde tek bir örtüşme veya çift örtüşme arasında seçim yapmasına olanak tanır. Çoğu model için, özellikle yüksek gerilme veya deformasyon gradyanlarının

olduğu alanlarda doğruluğu artırmak amacıyla varsayılan olarak iki örtüşme uygulanır. Ayrıca, FLAC3D, sabit gerinim dört yüzlü elemanların plastik akış sırasında sıkça sergilediği aşırı rijit davranışı azaltmak için karışık ayrıklaştırma tekniği kullanır (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).



Şekil 2.10. Tetrahedron (dört yüzlü) (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).

Dört yüzlü (Tetrahedral) Izgara Oluşturma: FLAC3D, dışarıdan oluşturulan dört yüzlü ağları da destekler ve bunlar yazılıma aktarılabilir. Bu durumda, sayısal hesaplamada yalnızca tek bir örtüşme kullanılır. Gerinime nodal karışık ayrıklaştırma (NMD) tekniğini uygulamak için, malzeme modelini çağırmadan hemen önce aşağıdaki üç adımlı döngü yürütülür:

1. Düğüm hızlarından hesaplanan hacimsel gerinim oranları, zon alanları/hacimleri ile birlikte ızgara noktalarına dağıtılır.
2. Her ızgara noktasında hacimsel gerinim oranının hacim ağırlıklı ortalaması hesaplanır.
3. Gridpoint değerleri kullanılarak ortalama hacimsel gerinim oranı yeniden hesaplanır ve zonlara yeniden atanır.

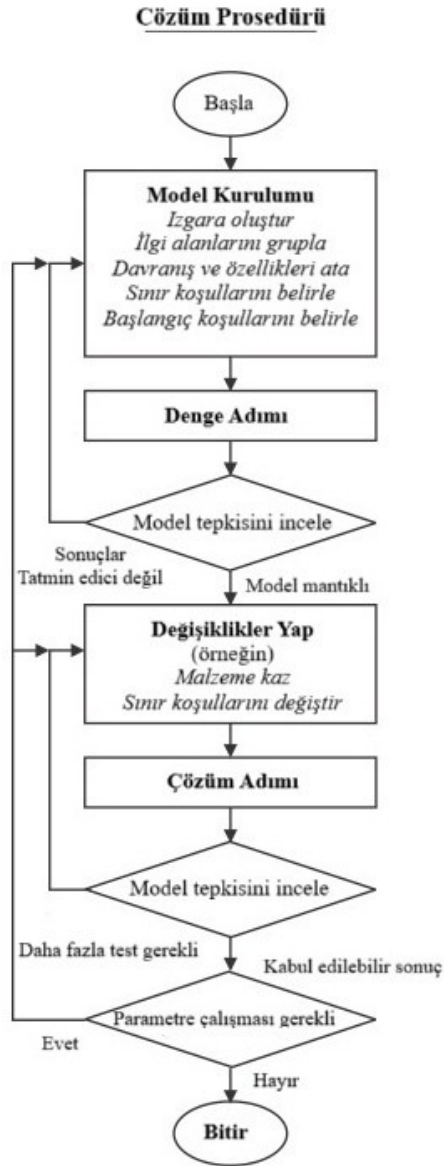
Başlangıç ve Sınır Koşulları: FLAC3D’de sınır koşulları şunları içerebilir:

- Yüzey çekme kuvvetleri
- Yoğunlaştırılmış düğüm yükleri
- Öngörülen yer değiştirmeler
- Gövde kuvvetleri
- Başlangıç gerilme koşulları

Başlangıçta, tüm gerilmeler ve düğüm hızları sıfıra ayarlanır. Kullanıcı daha sonra başlangıç gerilme alanlarını belirtebilir, yüzey düğümlerine yoğunlaştırılmış yükler uygulayabilir ve düğüm hızları aracılığıyla sınır yer değiştirmelerini öngörebilir. Dahili olarak, hem gövde kuvvetleri hem de yüzey çekme kuvvetleri, sayısal modelin başlangıç durumunu oluşturan statik olarak eşdeğer düğüm kuvvetlerine dönüştürülür. Ana Hesaplama Adımları aşağıda özetlenmektedir. FLAC3D, yönetici denklemleri açık bir zaman ilerletme sonlu fark şeması kullanarak çözer. Her zaman adımı için aşağıdaki sıralama gerçekleştirilir:

1. Gerinim Oranı Hesaplaması: Gerinim oranları, mevcut düğüm hızlarından türetilir.
2. Gerilme Güncellemesi: Yapı modelleri, yeni gerinim oranları ve önceki gerilme durumuna dayalı olarak güncellenmiş gerilmeleri hesaplamak için kullanılır.
3. Hız ve Yer Değiştirme Güncellemesi: Hareket denklemleri, hesaplanan gerilmeler ve uygulanan kuvvetlere dayalı olarak düğüm hızlarını ve yer değiştirmeleri güncellemek için uygulanır.

Bu süreç her zaman adımında tekrarlanır. Simülasyon boyunca, modeldeki maksimum dengesiz kuvvet izlenir. Eğer bu kuvvet sıfıra doğru eğilim gösteriyorsa, sistem denge durumuna yaklaşıyor demektir. Alternatif olarak, sıfır olmayan bir değerde sabitlenirse, model sabit durum plastik akış yaşıyor olabilir. Kullanıcı, ara sonuçları değerlendirmek için simülasyonu herhangi bir zamanda duraklatabilir. Genel FLAC3D çözüm algoritması Şekil 2.11.'de gösterilmiştir.

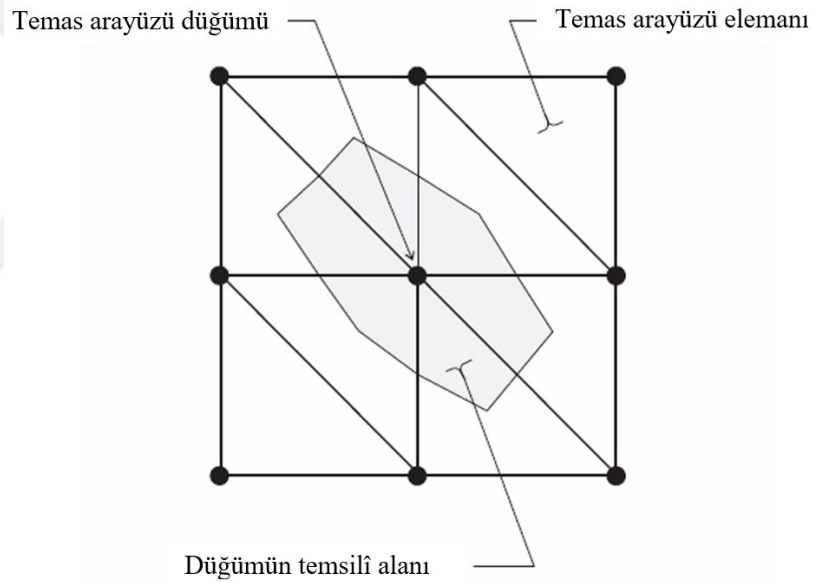


Şekil 2.11. Genel FLAC3D çözüm prosedürü.

2.2.5. FLAC3D'de Temas Arayüzleri

FLAC3D'de arayüzler, her biri üç arayüz düğümü tarafından tanımlanan üçgen elemanların bir koleksiyonu olarak modellenir. Bu arayüz elemanları, model uzayında herhangi bir yere yerleştirilebilir, ancak genellikle zon yüzeylerine bağlıdır. Bir zonun her dörtgen yüzü için iki üçgen arayüz elemanı oluşturulur. Bu üçgenlerin köşeleri, arayüz oluşturma işlemi sırasında otomatik olarak oluşturulan arayüz düğümleri haline gelir (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).

Her arayüz elemanı, yüzey alanını ağırlıklı bir şekilde dağıtarak üç köşe düğümüne katkıda bulunur ve böylece her arayüz düğümü için temsili bir alan elde edilir. Bu nedenle, tüm arayüz, toplam temas alanının bir kısmından sorumlu olan bir dizi aktif arayüz düğümünden oluşur. Bu mekansal dağılım, arayüz seviyesinde kuvvetlerin ve temas davranışının doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlar. Şekil 2.12.'de arayüz elemanları ile arayüz düğümleri arasındaki ilişkiyi ve tek bir düğümle ilişkili temsili alanı göstermektedir (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).



Şekil 2.12. Temsilî alanların temas arayüzü düğümlerine dağılımı (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).

FLAC2D'de arayüzler iki taraflı iken, FLAC3D arayüzleri doğası gereği tek taraflıdır. Bir benzetme yapılacak olursa, FLAC3D, tanımlanan bir arayüzü, model yüzeyine uyan bir shrink-wrap (sarma) katmanı olarak düşünmektir. Bu shrink-wrap, karşılaştığı herhangi bir başka yüzle temasa duyarlı hale gelir ve böylece iç içe geçmeyi algılama ve buna tepki verme yeteneği kazanır (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).

Temel temas ilişkisi, arayüz düğümü ile bir zon yüzü (hedef yüz olarak da bilinir) arasında tanımlanır. Arayüz kuvvetinin normal yönü, hedef yüzün yönelimi ile belirlenir.

Her zaman adımımda, her arayüz düğümü ve temas ettiği hedef yüz için mutlak normal iç içe geçme ve göreceli kesme hızı hesaplanır. Bu iki değer, arayüz yapı modelinde normal kuvvet ve kesme

kuvveti vektörünü hesaplamak için kullanılır. Yapı modeli, bir arayüz düğümünde etki eden kesme kuvvetini sınırlayan doğrusal bir Coulomb kesme dayanımı kriteri, normal ve kesme rijitlikleri, çekme ve kesme bağ dayanımı ve kesme dayanımı sınırına ulaşıldıktan sonra hedef yüzde etkili normal kuvvetin artmasına neden olan bir dilatasyon açısı ile tanımlanır. Varsayılan olarak, boşluk suyu basıncı, arayüz etkili gerilme hesaplamasında kullanılır (FLAC3D Dokümantasyonu, 2025).

2.2.6. Davranış Modelleri

Geomekanik davranışın sayısal modellemesi esnasında üç temel zorlukla karşılaşabilmektedir. Çözüm sürecindeki fiziksel kararsızlık, doğrusal olmayan sistemlerde gerinim izi bağımlılığı ve yüksek derecede doğrusal olmayan gerilme-gerinim tepkileri. FLAC3D, tam atalet etkilerini içeren açık bir dinamik çözüm şeması kullanarak bu zorlukları ele alır; bu, simülasyonun fiziksel yükleme yollarını gerçekçi bir şekilde izlemesine olanak verebilmektedir. Tablo 2.1.'de görüldüğü üzere, FLAC3D, üç kategoriye ayrılmış bir dizi malzeme modeli sunar:

Tablo 2.1. FLAC3D'de mevcut olan davranış modelleri.

Null Model Grubu	Null Model
Elastik Model Grubu	Elastic Model Orthotropic Model Anisotropic Model
Plastik Model Grubu	Drucker-Prager Model Mohr-Coulomb Model Ubiquitous-Joint Model Ubiquitous-Anisotropic Model Strain-Softening/Hardening Model Bilinear-Softening/Hardening U-Joint Model Double-Yield Model Modified Cam-Clay Model Hoek-Brown Model Hoek-Brown-PAC Model Cap-Yield (CYSoil) Model Simplified CYSoil (CHSoil) Model Plastic-Hardening Model Swell Model Mohr-Coulomb-Tension (MohrT) Model

Bu modellerden bizim de çalışmamızda kullanacağımız iki tanesine kısaca değinecek olursak:

Elastik Model: Bu model, homojen, izotropik ve doğrusal elastik davranışı temsil eder. Young modülü ve Poisson oranı gibi iki sabit ile karakterize olur. Bu model, sağlam, akma göstermeyen malzemelerde küçük gerinim tepkilerini simüle etmek için uygundur.

Mohr-Coulomb Modeli: Zemin ve kayalarda kesme türü göçme davranışını simüle etmek için yaygın olarak kullanılan bir modeldir; kohezyon, sürtünme açısı, dilatasyon açısı ve çekme dayanımı ile yönetilir. Kesme tipi göçme için ilişkisiz bir akış kuralı ve çekme başarısızlığı için ilişkili bir kural kullanır, geomateryallerin hem tepe hem de kalıntı dayanım davranışını yakalayabilmektedir.

2.3. Önceki Çalışmalar

Achmus vd. (2009), özellikle kumlu zeminlerde açık deniz rüzgar türbinleri için yaygın olarak kullanılan büyük çaplı kazık tipi türbin temellerinin döngüsel yanal yük davranışına yönelik sayısal bir inceleme sunmuştur. Araştırma, rüzgar ve dalga kuvvetlerinden kaynaklanan uzun vadeli döngüsel yüklemeye maruz kalan kazık tipi türbin temellerinde oluşan yanal yer değiştirmelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesi zorluğunu ele almıştır. Bu davranışı ortaya koyabilmek için yazarlar, çok sayıda yük döngüsü boyunca rijitlik bozulmasını yakalamak amacıyla sonlu eleman modellemesini döngüsel üç eksenli test verileriyle birleştiren bir “degradation stiffness model” geliştirmiştir. Model, kazık çapı, gömülü uzunluk ve yükleme parametreleri gibi çeşitli faktörlerin yer değiştirme birikim hızını nasıl etkilediğini değerlendirmiştir. Bu durum kazık tipi türbin temellerinin stabilitesini ve türbinin ömrü boyunca hizmet verebilirliğini sağlamak için kritik bir husustur. Bu çalışmanın önemli bir katkısı, mühendislerin her döngü için yoğun hesaplama modellemesi gerektirmeden döngüsel kaynaklı deformasyonları tahmin etmelerini sağlayan, ön temel boyutlandırması için tasarım grafiklerinin geliştirilmesi olmuştur. Bu grafikler, yer değiştirmeyi yük seviyesi ve kazığın nihai direnci fonksiyonu olarak normalize ederek, başlangıç tasarım aşaması için erişilebilir bir referans aracı sunar. Çalışma ayrıca, kazık uzunluğunu belirlemek için kullanılan geleneksel tasarım kriterlerini, örneğin “zero-toe-kick” ve “vertical tangent” koşullarını eleştirerek, bu standartların büyük çaplı kazık tipi türbin temelleri için gereksiz derecede muhafazakar tasarımlara yol açabileceğini savunmuştur. Bunun yerine, yazarlar, performans gerekliliklerine uygun kalırken temel boyutlarını optimize edebilecek, kabul edilebilir birikmiş deformasyon seviyelerine dayalı bir tasarım önerisinde bulunmuştur. “Degradation stiffness” modeli deneysel sonuçlarla güçlü bir uyum gösterse de, Achmus vd., özellikle oldukça değişken yükleme koşullarına sahip açık deniz ortamlarında, gerçek dünya koşullarında uygulanabilirliğini iyileştirmek için daha fazla büyük ölçekli doğrulama ihtiyacı olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışma, böylece hem rafine bir modelleme yaklaşımı hem de açık deniz rüzgar uygulamaları için daha verimli ve doğru kazık tipi türbin temeli tasarımı sağlayan pratik tasarım yönergeleri sunarak katkıda bulunmuştur.

Murphy vd. (2018), büyük çaplı kazık tipi türbin temeller için geleneksel p-y eğrisi yöntemlerinin sınırlamalarını ele alarak, yanal yükleme altında bu temellerin tasarımı için üç boyutlu sonlu eleman yöntemi (3D/FEM) yaklaşımı sunmuştur. Plaxis 3D yazılımı kullanılarak ve saha testi verileriyle kalibre edilen model, Hardening Soil (HS) modeli içinde Koni Penetrasyon Testi (CPT) türevli zemin parametrelerini içermekte ve farklı kazık çapları ve uzunluklarında doğrusal olmayan zemin davranışını elde etmektedir. Bu yaklaşım, kazık montaj etkilerini, jacking gerilmelerini simüle ederek model tahminleri ile saha sonuçları arasındaki uyumu iyileştirmiştir. Saha testi verileriyle doğrulama, sonlu elemanlar modelinin yanal yer değiştirmeleri ve kazık gövdesi boyunca eğilme momentlerini doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermiştir, böylece zemin-kazık etkileşimine dair daha iyi bir anlayış sunmuştur. Çalışma, kazığın direnç momentinin %90'a varan kısmının yanal zemin reaksiyonlarından kaynaklandığını, geri kalanının ise taban kesme ve moment etkilerinden geldiğini ve bu etkilerin kazık narinlik oranı azaldıkça daha önemli hale geldiğini ortaya koymuştur. Yazarlar, bu modelin, verimlilik için bir boyutlu Winkler kiriş modelleriyle birleştirildiğinde, geleneksel yöntemlerin göz ardı ettiği zemin-kazık etkileşim dinamiklerini dikkate alarak açık deniz rüzgar uygulamaları için Kazık tipi türbin temeli tasarım doğruluğunu önemli ölçüde artırabileceğini önermiştir.

Wolf vd. (2013), kohezyonsuz zeminde yer alan ve esnek olmayan bir kazık tipi türbin temeli için p-y eğrilerini çıkarmak amacıyla üç boyutlu sonlu eleman analizi gerçekleştirmiştir ve açık deniz rüzgar türbini temel tasarımında kullanılan geleneksel p-y eğrilerini değerlendirmiştir. Çalışma, Barrow Açık Deniz Rüzgar Çiftliği'ndeki bir kazık tipi türbin temeline odaklanmış ve zemin parametreleri CPT testlerinden türetilmiştir. Yazarlar, p-y eğrileri için veri noktaları oluşturmak için iki yöntem kullanmıştır: bu yöntemler: gerçek saha koşullarını simüle eden kademeli uygulanan kuvvet ile yükleme ve kazığın tamamının zorlanmış yatay yer değiştirmesi şeklinde uygulanmıştır. Çalışma, yükleme yöntemi ve malzeme modelinin seçiminin p-y davranışını önemli ölçüde etkilediğini bulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi ile türetilen p-y eğrileri, özellikle daha büyük derinliklerde, geleneksel p-y eğrisi formülasyonuna kıyasla daha az rijit bir tepki ortaya koymaktadır. Yazarlar, Hardening Soil modelinin en doğru sonuçları sağladığı sonucuna varmıştır.

Sun vd. (2023), doymun kumda kurulu büyük çaplı kazık tipi rüzgar türbini temellerinin döngüsel yükleme altında birikimli deformasyonunu incelemiştir. Yazarlar, FLAC3D yazılımını kullanarak geliştirilen bir sayısal modeli, üç eksenli ve santrifüj testleriyle doğrulamıştır. Model, döngüsel yüklemenin sayısı, genliği ve frekansı, zemin geçirgenliği, bağlı yoğunluk ve kazık çapı gibi çeşitli faktörlerin etkilerini dikkate alacak şekilde rafine edilmiştir. Çalışma, geçici fazla gözenek basıncının birikimi ve dağılımının, kazık çevresindeki zeminin daha büyük çökmesine ve kapasitesinin azalmasına yol açarak birikimli deformasyonu artırdığını bulmuştur. Parametrik çalışma kapsamında, yazarlar, kazık çapı, zemin bağlı yoğunluğu ve döngüsel yükleme seviyesinin etkilerini dikkate alarak kazık ucunda birikimli deplasmanları hesaplamak için bir analitik model geliştirmiştir. Bu model, doymun kumlarda santrifüj ve model kazık testleriyle doğrulanmıştır. Yazarlar, açık deniz rüzgar

türbinlerini destekleyen kazık tipi temellerin uzun vadeli performansını değerlendirirken geçici fazla gözenek basıncının etkisinin dikkate alınması gerektiği sonucuna varmıştır.

Knudsen vd. (2013), kumdaki kova temeller için p-y eğrilerini belirlemek amacıyla sonlu eleman modellemesi kullanarak bir çalışma yürütmüştür. Yazarlar, açık deniz rüzgar türbini temellerinde yaygın olarak kullanılan emme kovalarının tasarımını iyileştirmeyi amaçlamıştır. Geleneksel tasarım yöntemleri, esnek kazıklarla yapılan deneylerden türetilen p-y eğrilerine dayanmaktadır, ancak emme kovaları, daha küçük uzunluk-çap oranı nedeniyle daha rijit davranmaktadır. Yazarlar, zemin tepkisini simüle etmek için PLAXIS 3D’de “Hardening Soil Small Strain (HSsmall)” modelini kullanmıştır. Bu model, zeminin gerilime bağlı davranışını dikkate almakta ve geleneksel modellere kıyasla daha gerçekçi sonuçlar sağlamaktadır. Çalışma, p-y eğrilerinin üzerindeki etkisini belirlemek için çeşitli kova çapları, etek uzunlukları ve içsel sürtünme açılarını değerlendirmiştir. Sonlu eleman modeli, sınır koşulları, ağ oluşturma ve yakınsama dikkate alınarak dikkatle yapılandırılmıştır. Yazarlar, kova temeline öngörülen bir yatay yer değiştirme uygulamış ve simülasyondan zemin reaksiyon basıncını ve plastik deformasyonu çıkarmıştır. Sonuçlar, etek uzunluğu-çap oranı 0,5 olan modeller için p-y eğrilerinin başlangıç rijitliğinin, oranı 1 olanlara kıyasla daha büyük olduğunu göstermiştir. Yazarlar daha sonra zemin tepkisini tanımlamak için hiperbolik tanjant fonksiyonunu normalize edilmiş p-y eğrilerine uydurarak bir matematiksel model geliştirmiştir. Bu fonksiyonun katsayıları, uydurma parametrelerinin toplamı ve çarpımı ile belirlenmiş ve bunların kova geometrisine ve zemin dayanımına bağımlılığı araştırılmıştır. Çalışma, geliştirilen matematiksel modelin, verilen kova geometrisi ve zemin dayanımı için zemin basıncını hızlı ve doğru bir şekilde hesaplamak için kullanılabileceği sonucuna varmıştır. Bu model, kova temellerinin analitik tasarım yöntemlerinde uygulanabilir, böylece açık deniz rüzgar türbini temellerinin verimli ve güvenilir tasarımını mümkün kılar. Yazarlar, model parametrelerini daha geniş bir geometri ve zemin dayanımı yelpazesıyla kalibre etmek için daha fazla araştırma yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Esfeh & Kaynia (2020), sıvılaşmanın açık deniz rüzgar türbinleri için sığ (keson) ve derin (Kazık tipi türbin temeli) temellerin performansı üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışma yürütmüştür. Yazarlar, FLAC3D yazılımını ve “SANISAND” zemin modelini kullanarak doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirmiştir. Deprem etkisi ve statik/döngüsel rüzgar yükleri kombinasyonları dahil olmak üzere çeşitli yükleme senaryoları altında temellerin tepkisini incelemişlerdir. Çalışma, sıvılaşabilir bir zemin tabakasında farklı boyutlardaki keson ve kazık tipi türbin temellerinin performansını değerlendirmiştir. Bulgular, kazık/keson içindeki boşluk suyu basıncı oluşumunun, temel tarafından sağlanan kinematik kısıtlama nedeniyle dışarıya kıyasla daha düşük olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, sıvılaşmanın kesonlarda geniş kalıcı dönmelere neden olabileceğini, ancak bu dönmelerin keson çapı arttıkça azaldığını göstermiştir. Benzer şekilde, deprem sırasında kazık tipi türbin temellerinin dönmesi, kazık uzunluğu arttıkça azalmıştır. Yazarlar, deprem etkisi sırasında rüzgar yükünün neden olduğu asimetrik yüklemenin, sıvılaşabilir zeminde türbin temellerinde, hatta orta düzey

zemin sarsıntılarında bile büyük dönmelere yol açabileceği ve bu yapıların işlevselliğini ve stabilitesini tehdit edebileceği sonucuna varmıştır.

Diaz vd. (2011), açık deniz rüzgar türbini temellerinde yaygın olarak kullanılan esnek olmayan yanal yüklü kazıkların davranışını incelemiştir. Çalışma, bir basınç tankında küçük ölçekli testler, boyutsuz analiz ve FLAC3D ile Plaxis 3D kullanılarak sayısal modelleme içermiştir. Yazarlar, genellikle esnek kazıklarla yapılan deneylerden türetilen p-y eğrilerine dayanan kazık tipi türbin temel tasarımı yöntemlerindeki belirsizlikleri ele almayı amaçlamıştır. Daha düşük esneklik oranlarına sahip kazıklar, yanal yükleme altında farklı davranmaktadır. Küçük ölçekli testler, farklı bindirme basınçları altında doymuş kumda alüminyum kazıklar üzerinde yapılmıştır. Testler, değişen incelik oranlarının ve bindirme basınçlarının yanal kazık deplasmanı, eğilme momenti dağılımı ve p-y eğrileri üzerindeki etkisini analiz etmeyi amaçlamıştır. Boyutsuz analiz, yanal yer değiştirme ile uygulanan yük arasındaki ilişkiyi anlamaya odaklanmış, zemin porozitesi, kazık çapı ve gömülü uzunluk gibi faktörleri dikkate almıştır. Yazarlar, yanal kazık yer değiştirmesini tanımlamak için genel bir denklem türetmiştir. FLAC3D ve Plaxis 3D kullanılarak yapılan sayısal modelleme, Mohr-Coulomb, Hardening Soil ve Hardening Soil Small Strain gibi farklı malzeme modellerini kullanmıştır. Modeller, küçük ölçekli testlere karşı kalibre edilmiş ve tam ölçekli model davranışı ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Bulgular, malzeme modeli seçiminin, kazık davranışını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmıştır. Hardening Soil modeli ile yapılan analiz sonuçları, Mohr-Coulomb modeli ile yapılanlara kıyasla deneysel veriler ile daha iyi uyum sağlamıştır.

Abdel-Rahman & Achmus (2005), rüzgar ve dalga etkilerinden kaynaklanan yatay yüklemeler altında büyük çaplı kazık tipi türbin temellerinin davranışını analiz etmek için üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli kullanmıştır. Yazarlar, sayısal simülasyonlarının sonuçlarını, yanal yüklü kazıkların tasarımı için yaygın olarak kullanılan p-y yöntemiyle karşılaştırmıştır. Yazarlar, açık deniz rüzgar çiftliklerinin giderek daha önemli bir enerji kaynağı haline geldiğini, ancak açık deniz kurulum ve şebeke entegrasyonunun yüksek maliyetlerinin ekonomik inşaat ve tasarım yöntemleri gerektirdiğini belirtmiştir. Rüzgar türbini kuleleri için temel vazifesi görmek üzere deniz tabanına çakılan büyük çaplı çelik kazıklar potansiyel olarak maliyet etkin bir çözüm sunar. Ancak yazarlar, daha büyük açık deniz rüzgar türbinleri için gerekli olan 6 ila 8 m çap aralığındaki kazık tipi türbin temellerinin yük-deformasyon davranışına dair deneyim bulunmadığını vurgulamıştır. Yazarlar, ABAQUS programını kullanarak, 7,5 m çapında ve 30 m gömülü uzunlukta, sıkı kumda yer alan bir kazık tipi türbin temelinin davranışını analiz etmek için üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Model, deniz tabanından 30 m yükseklikte yatay bir yüke maruz bırakılmış ve tasarım dalga yükünü simüle etmiştir. Yazarlar, sayısal simülasyonlarının sonuçlarını, American Petroleum Institute (API) koduna dayanan p-y yöntemiyle karşılaştırmıştır. Yazarlar, p-y yönteminin büyük yatay yükler için kazık deformasyonlarını hafife aldığını bulmuştur. Bunun, API yönteminin büyük derinliklerde başlangıç zemin rijitliğini abartmasından kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Yazarlar, p-y yönteminin büyük çaplı

kazık tipi türbin temellerinin tasarımı için kullanılmaması gerektiği sonucuna varmış ve bu tür tasarımlar için sayısal araştırmalar önermiştir.

Chaloulos vd. (2024), sıkı kohezyonsuz zeminlerde açık deniz rüzgar türbinleri için kazık tipi temellerin döngüsel yükleme altındaki tepkisine dair bir çalışma sunmuştur. Çalışmada, drenaj koşullarının kazık tipi türbin temeli davranışına etkilerini araştırmak için üç boyutlu döngüsel zaman geçmişi sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, drenajın genellikle göz ardı edilmesine rağmen temel performansı için kritik olduğunu vurgulamıştır. Çalışma, çeşitli drenaj koşullarında karmaşık zemin tepkisini doğru bir şekilde temsil etme yeteneği nedeniyle seçilen, sahaya özel döngüsel testlerle kalibre edilmiş “Ta-Ger” zemin modelini FLAC3D yazılımı ile birlikte kullanmıştır. Yazarlar, 12 MW’lık bir açık deniz rüzgar türbinini destekleyen kazık tipi temeli, tasarım fırtınasına karşılık gelen 600 saniyelik bir yük geçmişiyle yükleyerek davranışı simüle etmiştir. Analizler, drenaj koşullarının kazık tipi türbin temeli tepkisini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Düşük geçirgenlikteki zeminlerde, yaygın sıvılaşma, izin verilen sınırları aşan yüksek düzeyde dönmelere yol açabilir. Ancak, etkili drenaj sistemlerinde, performansı tehlikeye atmadan orta düzeyde fazla gözenek basınçları gelişir. Çalışma ayrıca sayısal sonuçları, genellikle drenaj hakkında basitleştirilmiş varsayımlar kullanan mevcut tasarım prosedürleriyle karşılaştırmıştır. Yazarlar, bu prosedürlerin muhafazakar veya muhafazakar olmayan sonuçlar üretebileceğini savunmuş ve belirsizlikleri değerlendirmek ve standart tasarım yöntemlerini tamamlamak için doğrulanmış gelişmiş sayısal analizlerin kullanılmasını önermiştir.

Krishnaveni vd. (2016), büyük çaplı Kazık tipi türbin temelleri için p-y eğrilerinin sayısal modelleme yoluyla oluşturulmasını ele almıştır. Yazarlar, geleneksel API yönteminin, çapı 2 metreye kadar olan kazıklar üzerinde yapılan test sonuçlarına dayandığını belirtmiştir. Yazarlar, daha büyük çaplı kazık tipi türbin temelleri için API yönteminin, başlangıç zemin rijitliğini abarttığı için kazık ucu sapmasını hafife alabileceğini öne sürmüştür. Yazarlar, 1 metreden 7 metreye kadar değişen çaplara sahip kazık tipi türbin temelleri için p-y eğrileri oluşturmak amacıyla bir sonlu elemanlar modeli kullanmıştır. Sonlu elemanlar analizinin sonuçları, geleneksel API yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Yazarlar, kazık çapları 2 metreye kadar olanlar için her iki yöntemin ürettiği p-y eğrilerinin benzer olduğunu bulmuştur. Ancak, daha büyük çaplı kazık tipi temeller için sonlu elemanlar modeli tarafından üretilen p-y eğrilerinin, API yöntemiyle üretilenlerden önemli ölçüde farklı olduğunu ifade etmişlerdir.

Augustesen vd. (2009), deniz tabanına çakılan ve açık deniz rüzgar türbinleri için temel olarak kullanılan büyük çaplı kazıkların davranışını incelemiştir. Yazarlar, p-y eğrilerine dayalı geleneksel kazık temel tasarımının, kazık ve alt zemin arasındaki etkileşimi doğru bir şekilde hesaba katmadığını belirtmiştir. Yazarlar, kazık ve alt zemin arasındaki etkileşimi dikkate alarak monotonik yükleme altında bir K-kazık tipi türbin temelini davranışını incelemek için üç boyutlu FLAC3D yazılımını kullanmıştır. Çalışma, Kuzey Denizi’nin Danimarka sektöründe yer alan Horns Rev’de bir rüzgar türbini için temel olarak kullanılan bir kazığa odaklanmıştır. Kazığın dış çapı 4 m’dir ve konumlardaki alt zemin esas olarak kumdan oluşur. Yazarlar, sayısal simülasyonların sonuçlarını, şu anda önerilen p-y eğrilerini

kullanan geleneksel Winkler tipi bir yaklaşımla karşılaştırmıştır. Winkler tipi yaklaşım, zemin tepkisinin bağlantısız doğrusal olmayan yaylar olarak formüle edilebileceği varsayımına dayanır. Yazarlar, sayısal simülasyonların, Winkler tipi yaklaşıma kıyasla deniz tabanı seviyesinde ve kazık ucunda daha büyük sapmalar tahmin ettiğini bulmuştur. Yazarlar, Winkler tipi yaklaşımın, rüzgar türbinleri için büyük çaplı kazıkların sapmalarını belirlemede muhafazakar olmayan bir yaklaşım olduğu sonucuna varmıştır.

Mansour vd. (2021), çeşitli yapılarda yüksek yanal yükleri karşılamak için kullanılan dikdörtgen şekilli kazıklar olan yanal yüklü baretlerin davranışını incelemiştir. Yazarlar, doğrulanmış sayısal modeller kullanarak yanal yüklü baretler için p-y eğrileri oluşturmak için kapsamlı bir yaklaşım sunmayı amaçlamıştır. Çalışma, kohezyonsuz zemin oluşumları için p-y eğrileri geliştirmeye odaklanmıştır. Geliştirilen p-y eğrileri, Reese (1974) ve API (1993) formülleriyle oluşturulanlarla karşılaştırılmıştır. Yazarlar, farklı boyutlardaki yanal yüklü baretleri analiz etmek ve karşılık gelen p-y eğrilerini oluşturmak için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Baretlerin p-y eğrilerini, eşdeğer çevre ve alana sahip kazıklarla ve baret genişliğine eşit çapa sahip kazıklarla karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, yanal yükler altında dikdörtgen baretlerin p-y eğrilerinin, eşdeğer çevreye sahip kazıklarinkine nispeten benzer olduğunu göstermiştir. Yazarlar, baretin çevresini üreten eşdeğer bir çapa sahip bir kazık kullanmanın, baretin sapma ve zemin direnci sonuçlarıyla iyi bir uyum sağladığı sonucuna varmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar yönteminin, yanal yüklü baretlerin davranışını incelemek için tutarlı ve maliyet etkin bir yol olduğunu bulmuşlardır. Çalışma, analizde beton çatlamasının dikkate alınmasının önemini vurgulamış ve yanal yüklü baretler için p-y eğrileri oluşturmak için pratik bir yaklaşım sunmuştur.

Fard (2021), kazık tipi türbin temellerinin uzun vadeli döngüsel dalga etkisi ve deprem yükleri altındaki tepkisini, zemin-yapı etkileşimi ve sıvılaşma duyarlılığına odaklanarak incelemiştir. Çalışma, döngüsel basit kesme testi verileriyle kalibre edilmiş “Pressure Dependent Multi Yield (Basınca bağlı çoklu yenilme)” zemin yapı modelini kullanan açık kaynaklı sonlu eleman programı OpenSees’i kullanmıştır. Araştırma, kazık tipi türbin temeli çapı, gömme derinliği, dalga periyodu, deniz suyu derinliği ve yükleme süresinin kazık tipi türbin temeli performansı ve zemin tepkisi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Temel bulgular şunlardır:

- Kazık tipi türbin temeli çapı: Aynı dalga yükleme süresi altında kazık tipi türbin temeli çapının artırılması, temeli daha rijit hale getirerek daha az yanal yer değiştirme ve çevresindeki zeminde daha düşük fazla gözenek suyu basıncı oranı ve kesme gerinimi ile sonuçlanmıştır.
- Uygulanan dinamik yükün süresi: Döngüsel yükün süresi, zemin tepkisini önemli ölçüde etkilemiş, daha uzun süreler daha fazla zemin deformasyonuna ve daha yüksek boşluk suyu oranlarına yol açmıştır.
- Deniz suyu derinliği: Deniz suyu derinliğinin deniz dalgası yükü formülasyonu üzerindeki doğrudan etkisi nedeniyle, daha yüksek deniz suyu derinliklerinde kazık tipi türbin temeli deformasyonu için maksimum değerler gözlemlenmiştir.

- Sıvılaşma Duyarlılığı: Çalışma, deniz dalgası ve deprem yüklerinin eşleşmiş uygulamasında deniz tabanına gömülü kazığın çevresindeki zeminde sıvılaşmanın mümkün olduğunu bulmuştur.

Yazar, zemin-yapı etkileşimini dikkate alan uzun vadeli dinamik analizin, açık deniz kazık tipi türbin temellerinin çevresindeki zeminin sıvılaşma duyarlılığını değerlendirmek ve döngüsel dalga yükleri altında performanslarını değerlendirmek için kritik olduğu sonucuna varmıştır.

Ebin (2012), kuma gömülü kazık tipi türbin temellerinin, döngüsel yüklemeye tepkisini incelemiştir. Yazar, döngüsel ve yanal yük etkisi altında kazık tipi türbin temelleri için mevcut tasarım metodolojilerinin, özellikle yüksek sayıda yükleme döngüsü ve kazık tipi türbin temellerinin mevcut yapısı nedeniyle gerçekçi olarak uygulanamayan p-y yönteminin sınırlamalarını vurgulamıştır. Çalışma, üç boyutlu sonlu elemanlar analizi programı olan Plaxis 3D Foundation kullanılarak sürdürülen modelleme sonuçlarını içermektedir. Model, zemin rijitliğinin yükleme döngüsü sayısına bağlı olarak azalmasını tanımlamak için modül bozulma eğrilerini içermiştir. Bu eğriler, kumdaki bir kazık tipi türbin temelinin uzun vadeli davranışını modellemek için sonlu elemanlar yöntemiyle entegre edilerek kullanılmıştır. Çalışma ayrıca, modül bozulmasının etkileri de dahil olmak üzere, çoklu yükleme döngüleri için kazık tipi türbin temelinin tepkisini incelemiştir. Sonuçlar, modül bozulmasının, özellikle yer değiştirmeler ve dönmeler üzerinde, kazık tepkisini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Yazar, modül bozulma eğrilerini ve sonlu elemanlar analizini birleştirerek geliştirilen yöntemin, kumdaki kazık tipi türbin temellerinin döngüsel yükleme altındaki uzun vadeli davranışını etkin bir şekilde modelleyebileceği sonucuna varmıştır. Çalışma, açık deniz rüzgar türbinleri için kazık tipi türbin temellerinin tasarımı ve analizi için değerli bilgiler sunmakta, geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını ele alarak deniz ortamlarında döngüsel yüklemenin getirdiği özel zorlukları ortaya koymaktadır.

Burd vd. (2020), açık deniz rüzgar türbini uygulamaları için yanal yüklü kazık tipi türbin temellerin analizi ve tasarımı için ‘PISA tasarım modeli’ olarak adlandırılan bir tek boyutlu (1D) hesaplama modeli sunmuştur. Model, PISA (Pile Soil Analysis) projesi kapsamında geliştirilmiştir. PISA tasarım modeli, kazık tipi türbin temelinin gömülü bir giriş olarak temsil eden ve kazık üzerinde etkili olduğu varsayılan çeşitli zemin reaksiyon bileşenlerini temsil etmek için özel olarak formüle edilmiş fonksiyonlar, yani zemin reaksiyon eğrileri kullanan bir boyutlu bir modeldir. Model, üç boyutlu sonlu eleman analizlerinden elde edilen verilerle kalibre edilmiştir. Yazarlar, açık deniz homojen kum sahalarına kurulu kazık tipi türbin temelleri için, drenajlı yükleme için geçerli alternatif bir zemin reaksiyon eğrisi formülasyonu tarif etmiştir. Modelin performansı, örnek tasarım vakalarının analiziyle gösterilmiştir. Model, homojen zemin ve monotonik yükleme için geçerlidir, ancak zemin tabakalaşması ve döngüsel yükleme durumlarını da ele almak mümkündür. PISA tasarım modeli, açık deniz rüzgar türbinlerini destekleyen kazık tipi türbin temellerinin tasarımında sınırlamaları olan geleneksel p-y yöntemine kıyasla basitleştirilmiş ve verimli bir alternatiftir. Yazarlar, PISA tasarım modelinin, geleneksel p-y yöntemine kıyasla kazık tipi türbin temeli davranışını daha doğru tahmin ettiğini bulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, kazık tipi türbin temelinin davranışını analiz etmek için kullanılan malzemeler ve yöntemler tanıtılmaktadır. Kazık tipi türbin temeli, açık deniz rüzgar türbinlerini deniz tabanına sabitlemek için yaygın olarak kullanılan bir destek yapısı türüdür. Bu temeller genellikle çelikten yapılır ve özel ekipmanlar kullanılarak deniz tabanına çakılır. Kazık tipi türbin temeli temelinin yapımında kullanılan malzemelerin yanı sıra, temelinin davranışı, kurulduğu zeminin özelliklerinden önemli ölçüde etkilenir. Bu çalışmada, analizde zemin malzemesi olarak orta-sıkı ve sıkı kum koşulları dikkate alınmıştır.

Çalışmanın ilk kısmında, öncelikle kazık tipi türbin temellerinin statik yüklere tepkisi incelenmiştir. Bu, sonlu fark programı FLAC3D’de bir sayısal model geliştirilerek gerçekleştirilmiştir; bu modelde, et kalınlığı, gömülü uzunluk ve kazık çapı gibi çeşitli yapısal parametrelerin yanı sıra elastisite modülü ve sürtünme açısı gibi zemin parametrelerinin, çeşitli yanal statik yüklere tepkisi çalışılmıştır. Kazık tipi türbin temeli sisteminin performansı, çamur hattı yer değiştirmesi, kazık dönmesi, eğilme momenti, kesme kuvveti ve p-y eğrileri şeklinde zemin reaksiyonu gibi parametrelerle izlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan statik model, sonuçların API, FEM ve Winkler modeli gibi diğer yöntemlerle karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Winkler yaklaşımı, zemin-kazık etkileşimini bir dizi yay ve sönümleyici kullanarak temsil eden matematiksel bir modeldir.

İkinci kısımda, aynı model dinamik analiz için uygun hale getirilmiş ve kazık tipi türbin temelinin davranışı, Amerika Birleşik Devletleri’nde kurulu Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı’nın (NREL) 5MW türbin sistemi için Openfast programı kullanılarak türetilen 30 saniyelik bir rüzgar kuvveti geçmişiye yanıt olarak incelenmiştir. Bu analizin temel amacı, dinamik zemin reaksiyonunu histerez ilmeği yapısındaki p-y eğrileri oluşturmak suretiyle zamana bağlı olarak incelemektir.

3.1. Modellemede Kullanılan Malzeme Özellikleri

Modelleme çalışmasında dikkate alınan malzemeler, zemin ortamı için orta-sıkı/sıkı kum ve kazık tipi türbin temeli için yüksek mukavemetli çeliktir. Açık deniz sahalarının çoğu kohezyonsuz kumlu zeminlerle kaplıdır. Açık deniz rüzgar türbininin destek sistemi olan kazık tipi türbin temelleri ise genellikle çelikten yapılır.

3.1.1. Kohezyonsuz Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada dikkate alınan geoteknik parametreler, zeminin dayanım ve rijitlik parametrelerini içerir. Bu parametreler esas olarak orta ve yoğun kumları temsil eder. Zemin parametreleri Tablo 3.1.’de belirtilmiştir.

Tablo 3.1. Parametrik analizler için zemin parametreleri.

Sürtünme Açısı ϕ (°)	Young Modülü E_s (MPa)
30	40
36	80
42	120

3.1.2. Kazık Tipi Türbin Temeli

Açık deniz rüzgar türbinleri için temel yapıları olarak yaygın olarak kullanılan kazık tipi türbin temelleri, maruz kalacakları zorlu deniz ortamlarına karşı dirençli olabilmesi için genellikle yüksek dayanımlı çelikten imal edilir. Kullanılan çelik, genellikle S355 veya S420 gibi düşük karbonlu veya yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliktir; bu çelikler, dayanım, kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci arasında bir denge sunar. Bu malzemeler, rüzgar ve dalga kuvvetlerinden kaynaklanan önemli döngüsel yüklemelere ve deniz suyunun aşındırıcı etkilerine dayanacak şekilde seçilir. Kazık tipi türbin temelleri genellikle büyük boyutlara sahiptir; çapları 4 ila 14 metre arasında değişir ve et kalınlıkları, su derinliği, türbin boyutu ve zemin koşullarına bağlı olarak 60 ila 180 milimetre arasında değişmektedir. Bu sağlam boyutlar, yapısal bütünlüğü ve stabiliteyi sağlar, Kazık tipi türbin temellerinin türbin ve çevresel kuvvetlerden kaynaklanan büyük düşey ve yanal yükleri operasyonel ömrü boyunca desteklemesine olanak tanır. Analizde kullanılan çeliğin malzeme özellikleri Tablo 3.2.'de özetlenmiştir.

Tablo 3.2. Çeliğin malzeme özellikleri.

Kütle Yoğunluğu, ρ	Young Modülü, E_p	Poisson Oranı, ν
7850 kg/m ³	210 GPa	0.3

Kazık tipi türbin temellerinin parametrik analizinde, sistemin genel performansı ve stabilitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için temel yapısal özellikler sistematik olarak değiştirilmiştir. İncelenen temel parametreler, Kazık tipi türbin temelinin gömülü uzunluğu, duvar kalınlığı ve çapını içerir. Bu parametreler değiştirilerek, yapısal bütünlüğü artıran, malzeme kullanımını en aza indiren ve açık deniz rüzgar türbini temelleri için tasarım standartlarına uygunluğu sağlayan optimum konfigürasyonların belirlenmesi amaçlanır. Analizde kullanılan kazık tipi türbin temelinin yapısal özellikleri aşağıdaki Tablo 3.3.'te özetlenmiştir.

Tablo 3.3. Parametrik analizler için Kazık tipi türbin temeli yapısal özellikleri.

Kazık Dış Çapı D (m)	Kazık Et Kalınlığı t (mm)	Kazık Gömülü Derinliği L_p (m)
6	80	20
10	120	40

3.2. Sayısal Modelleme

Bu alt başlığın devamında yer alan alt başlıklarda, statik modelleme süreci kapsamında uygulanan tüm prosedürler, süreçler ve kavramsal yaklaşımlar akademik bir çerçevede ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Sırasıyla Geometriye İlişkin Hususlar, Temas Arayüz Uygulaması, Davranış Modelleri, Statik Analiz Yöntemi ve Sayısal Modelin Doğrulanması başlıkları altında, statik modelleme sürecinin bileşenleri sistematik bir biçimde açıklanmaktadır.

3.2.1. Geometriye İlişkin Hususlar

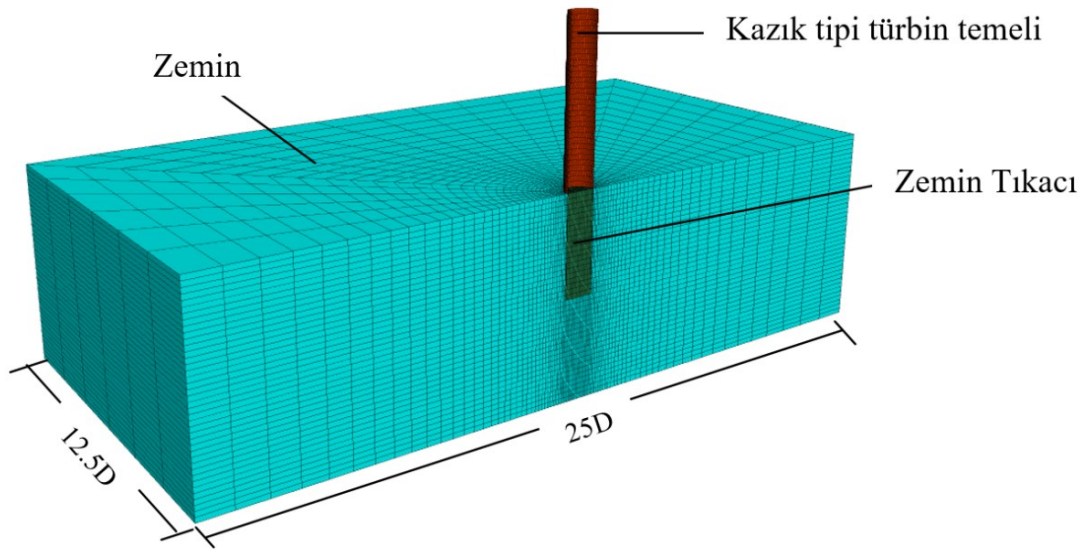
FLAC3D’de kazık tipi türbin temellerinin analizi için geliştirilen sayısal model, doğruluk ve hesaplama verimliliğini sağlamak amacıyla birkaç kritik geometrik hususu içermektedir. Zemin alanı, FLAC3D terminolojisinde hacimsel elemanları temsil eden zonlar kullanılarak modellenirken, kazık tipi türbin temeli, astar yapısal elemanı kullanılarak temsil edilir. Bu ayrım, zemin ve kazık tipi türbin temeli arasındaki etkileşimi doğru bir şekilde yakalamak için esastır. Kazık tipi türbin temeli çevresindeki yüksek gerilme gradyanlarını hesaba katmak için, kazık yakınındaki zemin hacmi daha ince ağ elemanlarına ayrıştırılır. Bu yerel inceltme, gerilme değişimlerinin ve deformasyon modellerinin en önemli olduğu bölgelerde yeterince çözülmesini sağlar.

Zemin-kazık sınırında, iki malzeme arasındaki etkileşimi modellemek için bir arayüz tanıtlır. FLAC3D’deki arayüzler, zemin ile kazık tipi türbin temeli arasında ayrılma ve kayma imkanı sağlar; bu, gerçekçi zemin-yapı etkileşimi davranışını simüle etmek için kritik öneme sahiptir. Astar gibi yapısal elemanlar kullanıldığında arayüzlerin uygulanmasının farklılık gösterdiği ve bu yönün, etkileşim mekaniğinin doğru temsilini sağlamak için ayrı olarak ele alındığı dikkat çekicidir.

Hesaplama kaynaklarını optimize etmek için, problemin simetrisinden yararlanılarak yarım simetrik bir model oluşturulmuştur. Modelin üst sınırı, deniz tabanı yüzeyine karşılık gelen ($z=0$) noktasında serbest yüzey olarak tanımlanmıştır. Modelin tabanı, düşey yer değiştirmeyi kısıtlamak için z -yönünde sabitlenmiştir; yanlara ise yalnızca model düzleminde harekete izin veren silindirik sınırlar uygulanmıştır. Simetri düzleminde bulunan düğümler, simetri koşullarını zorlamak için y -yönünde kısıtlanmıştır.

Sınır etkilerini en aza indirmek ve modelin sonsuz bir zemin alanını doğru bir şekilde temsil etmesini sağlamak için, zemin alanının boyutları dikkatle seçilmiştir. Zemin alanının genişliği (B), Kazık tipi türbin temeli çapının 12,5 katı olarak belirlenirken, uzunluk (L) Kazık tipi türbin temeli çapının 25 katı olarak ayarlanmıştır. Modelin derinliği (H), kazık tipi türbin temelinin altından 20 metre aşağıya uzanır ve böylece toplam model derinliği, Kazık tipi türbin temelinin gömülü uzunluğuna ek olarak 20 metredir. Bu boyutlar, sınırların sonuçları etkileyebilecek yapay kısıtlamalar oluşturmasını önlemek için yerleşik kılavuzlara dayanılarak seçilmiştir.

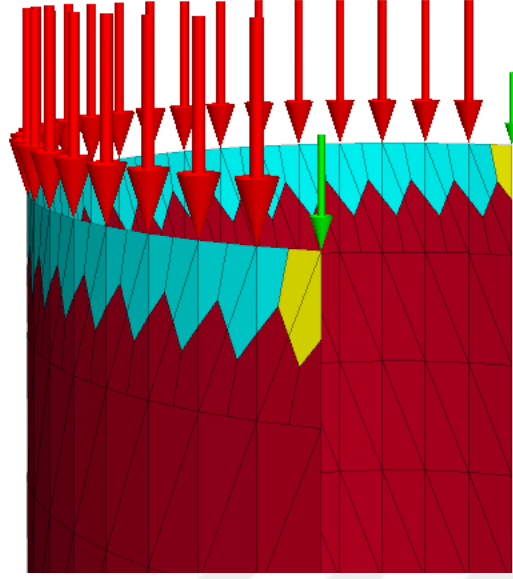
Ana analizler yapılmadan önce, ağ çözünürlüğünün doğru sonuçlar verecek kadar ince olduğundan emin olmak için ağ yakınsama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 6 metrelik kazık tipi türbin temeli çapına ve 20 metre gömülü uzunluğa sahip model için nihai zemin alanı, 43.200 zon ve 47.281 düğüm noktasından oluşur; bu miktarın, hesaplama verimliliği ile sayısal doğruluk arasında optimum bir denge sağladığı belirlenmiştir. Bu geometrik ve ağ oluşturma hususları, sayısal modelin tutarlı, güvenilir olmasını ve çeşitli yükleme koşulları altında Kazık tipi türbin temeli-zemin sisteminin karmaşık davranışını yakalayabilmesini sağlamaktadır. 6 metre çaplı kazık tipi türbin temeli için sayısal modelin genel bir görünümü Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. 6 metre çapında Kazık tipi türbin temeli içeren modelin izometrik görünümü.

Kazık tipi türbin temeli, bir açık deniz rüzgar türbini kurulumunun geçiş parçasını temsil etmek için çamur hattının 32 metre yukarısına uzatılmıştır. Yükler, kazık tipi türbin temelinin üst ucunda yer alan 25 düğüme uygulanır. Toplam uygulanan yük, simetri düzlemindeki 2 düğüme kalan düğümlere uygulanan yükün %50'si olacak şekilde dağıtılır. Bu uygulamanın görsel temsili Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.

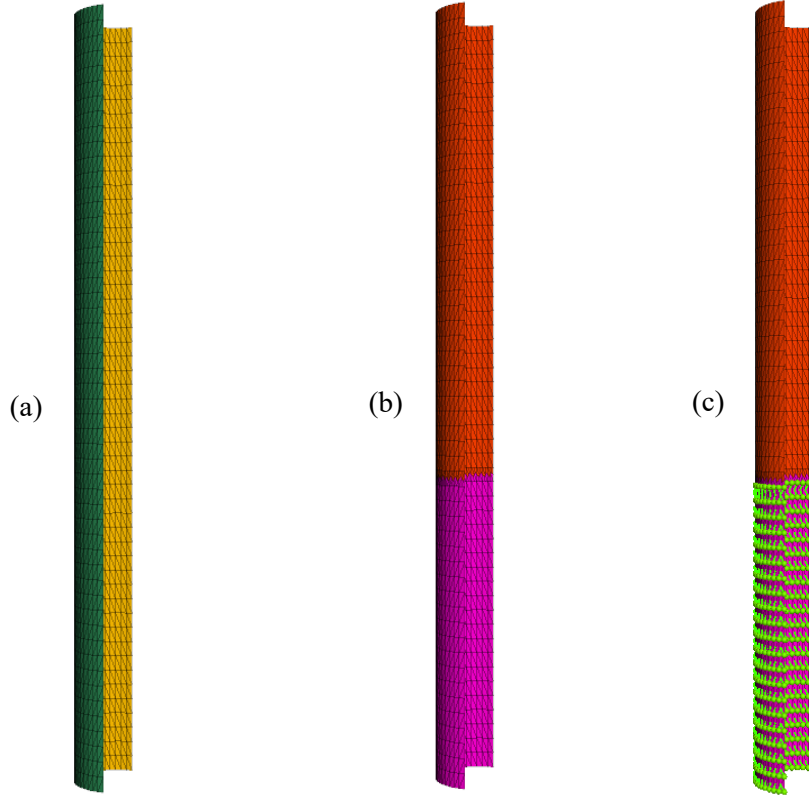
Kazık tipi türbin temeli, zonlarla değil, astar yapısal elemanı olarak modellendiğinden, gerekli koordinat sistemlerini oluşturmak için uygun işlemler gerçekleştirilir. Zonlar veya model bütünü bir küresel koordinat sistemine sahipken, astar gibi yapısal elemanlar farklı bir yerel koordinat sistemine sahiptir ve bunların birbirleriyle doğru bir şekilde etkileşime girmesi esastır.



Şekil 3.2. Kazık tipi türbin temeli üstüne eksenel yük uygulanması.

3.2.2. Temas Arayüz Uygulaması

FLAC3D’de arayüz uygulaması, astar gibi yapısal elemanlarla çalışırken biraz farklıdır. Zonlarda, arayüzü zonların sınır yüzeylerinde kullanırken, astar elemanı ile zemin arasındaki etkileşim, bağlantılar (link) kullanılarak modellenir. FLAC3D’de bulunan gömülü fonksiyon ile astar kullanılarak, kazık tipi türbin temeli, kısmen zemine gömülü iki yüzlü bir yapı olarak tanımlanır. Şekil 3.3.(a)’da gösterildiği gibi, Kazığın 1. yüzü, kazık tipi türbin temelinin içindeki zemin tapası ile etkileşime girer ve 2. yüzü, kazığın dışındaki zemin ile etkileşime girer. Şekil 3.3.(b)’de, pembe renkte gösterilen kazığın zemine gömülü olan kısmıdır. Şekil 3.3.(c)’de, zemin ile kazık arasındaki etkileşimi sağlayan bağlantılar gösterilmiştir. Şekil 3.3.(c)’den de görülebileceği gibi hem iç hem de dış tarafta bağlantılar geliştirilerek hem zemin tapası hem de dış zemin ile etkileşim sağlanmıştır.



Şekil 3.3. FLAC3D'de yapısal bağlantılar kullanılarak temas arayüz uygulaması.

3.2.3. Davranış Modelleri

Sayısal analizde hem zemin hem de kazığın davranışını doğru bir şekilde temsil etmek için uygun yapı modelleri kullanılır. Mohr-Coulomb modeli, açık deniz ortamındaki orta-sıkı ve sıkı kumun mekanik tepkisini simüle etmek için kullanılır. Bu model, granüler malzemelerin temel özelliklerini, örneğin kesme dayanımı, dilatans davranışı ve gerilime bağlı rijitlik gibi, yakalama yeteneği nedeniyle seçilir; bu özellikler, döngüsel yükleme koşulları altında zemin-yapı etkileşimini doğru bir şekilde tahmin etmek için kritik öneme sahiptir. Bu model, zeminin gerilme-gerinim davranışını elastik-plastik durumda tanımlar. Elastik kısım Hooke yasası ile tarif edilirken, plastik kısımda gerinim, elastik ve plastik gerinimlerin toplamı olarak ifade edilir. Mohr-Coulomb modelinin basitliği ve kullanışlılığı, özellikle büyük deformasyonlar ve başarısızlık mekanizmaları bağlamında, kumun doğrusal olmayan ve plastik davranışını modellemek için uygun hale getirir.

Astar elemanı kullanılarak modellenen kazıklar için, FLAC3D'de elastik, izotropik bir yapı modeli kullanılır. Bu durumda, gerilme-gerinim ilişkisi Hooke yasası ile tanımlanır. Bu seçim, çeliğin operasyonel yükleme koşullarında yüksek rijitlik ve doğrusal-elastik davranış göstermesi ve yapısal bütünlüğü sağlamak için genellikle plastik deformasyonun önlenmesi gerekliliği ile açıklanabilir. Elastik model, kazığın eğilme, kesme ve eksenel yüklere tepkisini verimli bir şekilde yakalar ve hesaplama verimliliğini korur. Zemin için Mohr-Coulomb modeli ile kazık için elastik modelin birleştirilmesiyle,

sayısal analiz, temel ile çevredeki deniz tabanı arasındaki karmaşık etkileşimlerin dengeli bir temsilini sağlar ve açık deniz ortamlarında kazık tipi türbin temellerinin performansının güvenilir şekilde tahminini mümkün kılmaktadır.

3.2.4. Statik Analiz Yöntemi

Sayısal modelleme yöntemi, birleşik düşey ve yanal yüklemeye maruz kalan bir kazık tipi türbin temelini tepkisini simüle etmek için iyi tanımlanmış bir dizi aşama şeklinde yapılandırılmıştır. Analiz, zemin alanının ve sınırlarının mekansal konfigürasyonunun tanımlandığı ve ızgaraya bölündüğü model geometrisinin oluşturulmasıyla başlar. Bu ilk aşama, sonraki simülasyonlar için gerekli hesaplama çerçevesini oluşturur.

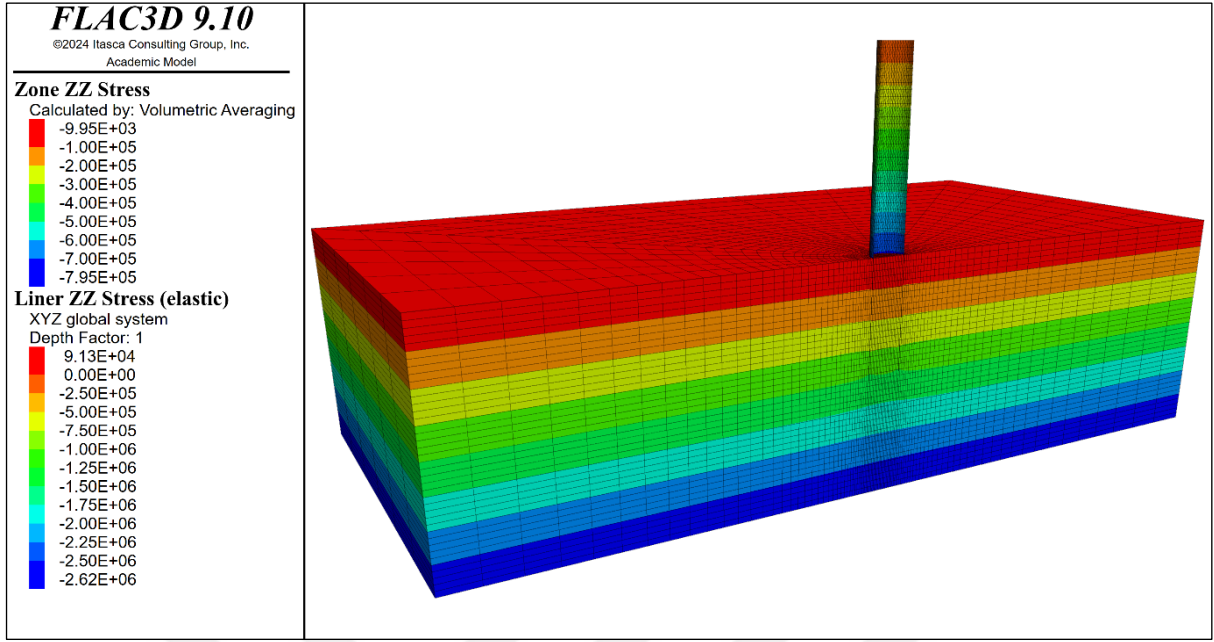
Geometri oluşturma işleminin ardından, kohezyonsuz zemini temsil eden mekanik özellikler, rijitlik, sürtünme açısı ve Poisson oranı gibi parametreler dahil olmak üzere ilgili alana atanmaktadır. Bu özellikler, kumlu zemin ortamının davranışını karakterize eder. Bu parametreler uygulandıktan sonra, yapısal elemanlar tanımlanmadan önce zeminin temel koşullarını korumak için başlangıç model durumu kaydedilir.

Daha sonra, kazık tipi türbin temeli, zemin alanı içinde gömülü bir yapısal astar elemanı olarak modele tanıtılır. Yükleme altında etkileşim davranışını gerçekçi bir şekilde yakalamak için kazık-zemin sınırına arayüz elemanları dahil edilir. Kazığın yapısal özellikleri ve arayüz parametreleri tanımlanır ve kazık montajından sonra modelin dengeye ulaşmasına izin verilir. Bu aşama, tüm sonraki yükleme senaryoları için referans koşul olarak hizmet verir. Kazığın ağırlığı da dahil olmak üzere, başlangıç gerilme durumundaki düşey gerilmenin konturları aşağıdaki Şekil 3.4.'te gösterilmiştir.

Kazık tipi türbin temelini düşey taşıma kapasitesini değerlendirmek için, kazık başına öngörülen bir düşey hız uygulanır ve eksenel yükleme altında penetrasyon simüle edilir. Bu aşamanın sonuçları, zeminin sunduğu nihai düşey dirence dair öngörü sağlar. Ancak, operasyonel yükleme koşulları için bu düşey yük aşaması daha fazla analiz için tutulmaz. Bunun yerine, model, montaj sonrası duruma geri döndürülür ve tipik bir açık deniz rüzgar türbininden gelen hizmet yükünü temsil eden statik bir düşey yük, kazık başına uygulanır.

Düşey yükleme uygulandıktan sonra, yanal yükleme, önceden tanımlanmış adımlarla kademeli olarak tanıtılır. Her yanal yük artımından sonra, bir sonraki yükleme seviyesine geçmeden önce modelin dengeye ulaşması için döngü yapılır. Bu kademeli yaklaşım, doğrusal olmayan zemin-kazık etkileşimi davranışını yakalamaya olanak tanır ve sayısal kararsızlığı önler. Her aşamada, artan yanal kuvvet altında sistem tepkisini belgelemek için model sonuçları kaydedilir.

Simülasyon süreci boyunca, kazık uzunluğu boyunca önemli konumlarda yapısal ve geoteknik tepkileri izlemek için çıktı parametreleri kullanılır. Bu parametreler, yanal yer değiştirme, eğilme momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu gibi miktarları hesaplar ve böylece birleşik yükleme koşulları altında kazık tipi türbin temeli davranışının ayrıntılı bir şekilde yorumlanmasını sağlar.

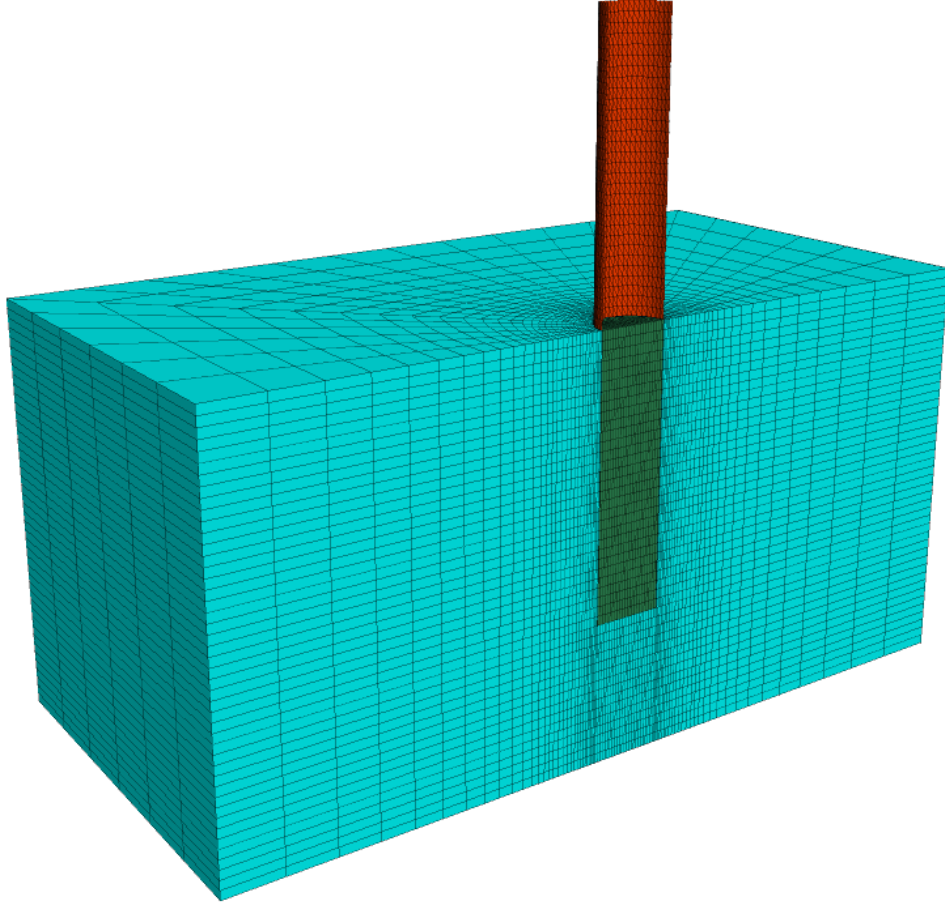


Şekil 3.4. Kazığın başlangıç gerilme durumundaki düşey gerilmenin konturları.

3.2.5. Sayısal Modelin Doğrulanması

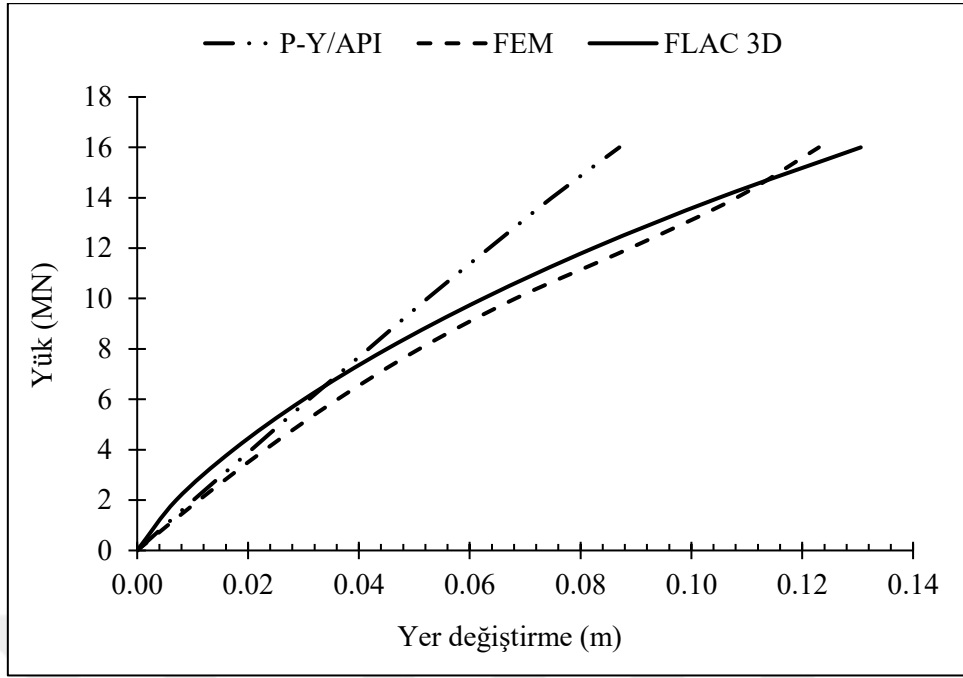
Sayısal model, Achmus ve diğerlerinin çalışmalarında elde ettiği bulgularla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bunun yanı sıra, API ve Matlock ile Reese tarafından geliştirilen, Winkler modeli olarak da bilinen elastik çözüm sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır.

Bu doğrulamayı gerçekleştirmek için, Achmus ve diğerleriyle aynı koşullara sahip benzer bir model FLAC3D’de geliştirilmiştir. 7,5 metre çapında ve 9 santimetre duvar kalınlığına sahip bir kazık tipi türbin temeli, astar elemanı kullanılarak modellenmiştir. Kazık tipi türbin temeli kurulduktan sonra, Achmus vd. çalışmasına benzer şekilde, 10 MN’lik bir yük düşey olarak uygulanmıştır. Yanal yük, 2 MN’dan 16 MN’ye kadar, her biri 2 MN’lik artışlarla 10 adımda kademeli olarak uygulanmaktadır. Modelin görsel temsili olarak Şekil 3.5.’te gösterilmiştir.

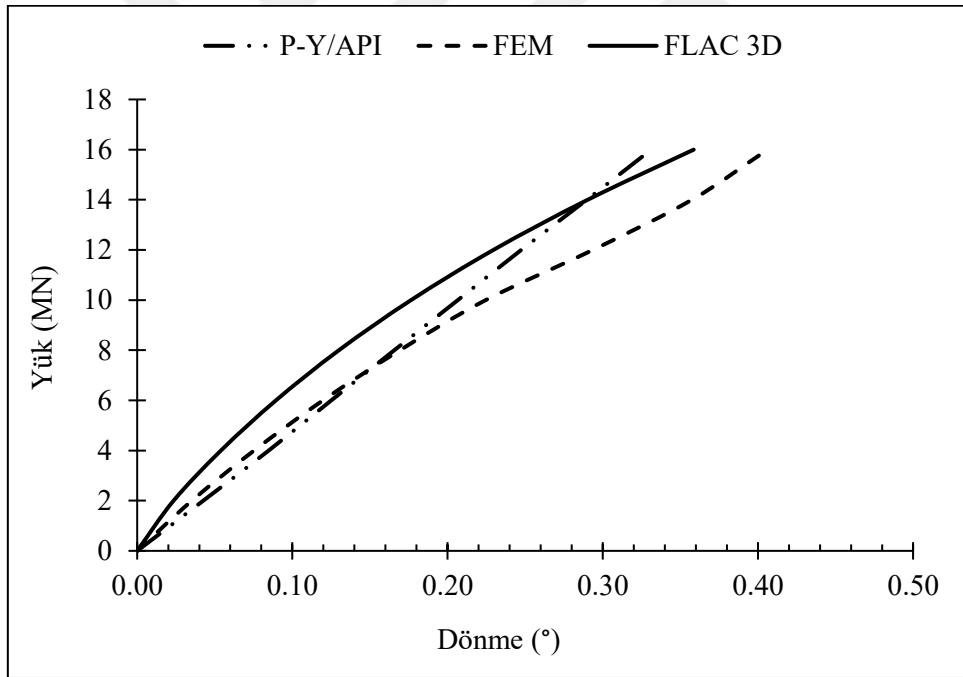


Şekil 3.5. Doğrulama çalışmaları sırasında kullanılan modelin izometrik görünümü.

Bu karşılaştırmadan elde edilen bazı bulgular Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.’da gösterilmektedir. Yer değiştirme grafiğinden açıkça görüldüğü üzere, başlangıçtaki daha küçük yanal yükler için FLAC3D, 8 MN’ye kadar API yaklaşımına benzer şekilde daha rijit bir davranış sergiler ve daha yüksek yükler için Achmus vd. tarafından sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile elde edilen sonuçlara yakınsamaktadır. Kazık tipi türbin temelini dönüşü açısından, FLAC3D, 8 MN’ye kadar olan yükler için API ile büyük ölçüde uyum göstermekte ancak daha yüksek yükler için FEM, dönüş açısını abartılı bir şekilde tahmin ediyor gibi görünmektedir. Bu tezde, sonuçlar bölümünün başında ayrıntılı bir karşılaştırma sunulmaktadır.



Şekil 3.6. API, FEM ve FLAC3D yöntemleri için yük-yer değiştirme ilişkisi.



Şekil 3.7. API, FEM ve FLAC3D yöntemleri için yük-yer değiştirme ilişkisi.

3.3. Dinamik Analiz

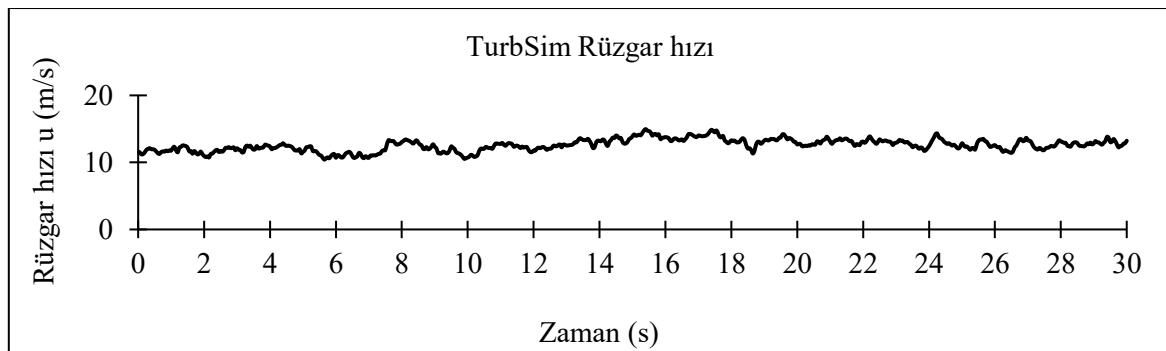
Daha önce belirtildiği üzere, bu tez çalışması iki kısma ayrılmaktadır. Bu kısım, kumdaki kazık tipi türbin temelının dinamik davranışının modellenmesine odaklanmaktadır. Analiz için dinamik yükler, yani 30 saniyelik rüzgar ve dalga yükü kaydı, OpenFAST programı ile türetilmiştir. Dinamik analizin temel amacı, kohezyonsuz deniz tabanına gömülü kazık tipi türbin temelının davranışını, döngüsel yüklemeye yanıt olarak elde edilen bulgulara dayanarak p-y eğrileri şeklinde zemin reaksiyonunu incelemektir. Elde edilen p-y eğrileri dinamik yüklemenin döngüsel yapısı nedeniyle histerez ilmeği şeklinde ortaya çıkmakta olup statik durum iin elde edilen p-y eğrilerine göre oluşturulması ve yorumlanması zorluklar barındırmaktadır.

3.3.1. Dinamik Girdi Parametreleri: OpenFAST

OpenFAST, ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen açık kaynaklı bir hesaplama aracıdır. Bu yazılım, rüzgar türbinlerinin aero-hidrokinamik ve yapısal davranışlarını entegre bir şekilde modellemeye olanak tanır. FAST bünyesindeki temel modüller arasında yapısal dinamiklerin hesaplandığı ElastoDyn ve SubDyn; çevresel koşullar ile uygulanan yüklerin tanımlandığı InflowWind, HydroDyn ve AeroDyn modülleri yer almaktadır. Bu modüller arasındaki yük ve tepki transferi, FAST sürücü programı (driver) aracılığıyla sağlanmaktadır.

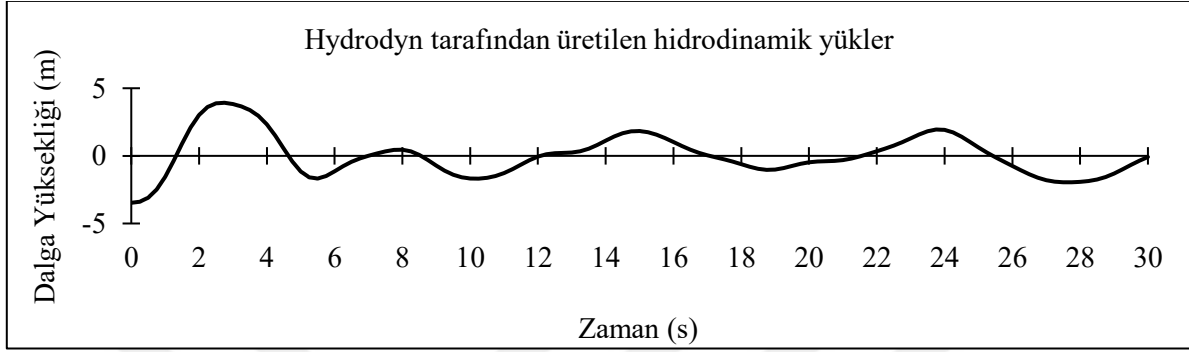
FAST analizinde kullanılan ana giriş dosyası (filename.fst), çalıştırılacak tüm modülleri tanımlar ve birbirine bağlar. Simülasyonda uygulanan rüzgar yükü, TurbSim yazılımı tarafından üretilmiş olup, bu yükler FAST içerisindeki InflowWind modülüne girdi olarak aktarılmaktadır. Kullanılan rüzgar zaman serisine ait dosya, generatedFile_TurbSim.bts olarak adlandırılmıştır. Simülasyonda dikkate alınan rüzgar parametreleri, ekte yer alan TurbSim.SUM adlı özet dosyada ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Şekil 3.8.'de, yatay yönlerdeki rüzgar hızının (u-bileşeni) zaman serisi verilmiştir. u-yönündeki rüzgar hızında yaklaşık 12 m/s civarında dalgalanmalar gözlemlenmekte; v ve w yönlerindeki hızlar ise sıfır etrafında değişmektedir.



Şekil 3.8. Yatay yönlerdeki rüzgar hızının (u-bileşeni) zaman serisi.

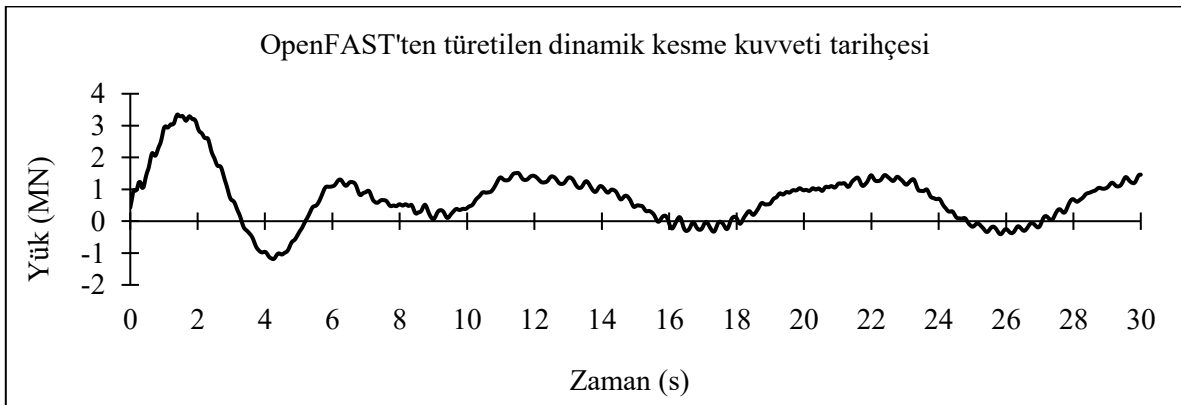
Hidrodinamik yükler, HydroDyn modülü tarafından oluşturulmuş ve düzensiz JONSWAP dalga spektrumu kullanılmıştır. Bu spektrumda anlamlı dalga yüksekliği (H_s) 6 m, spektral dalga periyodu (T_p) ise 10 saniye olarak alınmıştır. Simülasyona ait HydroDyn giriş dosyası, generatedFile_TurbSim.bts ve TurbSim.SUM gibi diğer dosyalarla birlikte tezin ekler bölümünde sunulmuştur. Şekil 3.9.'de, HydroDyn tarafından oluşturulan dalga yüksekliği zaman serisi gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Dalga yüksekliği zaman serisi.

Kazık Tipi Türbin Temeli üzerine etkiyen büyük yatay yükler, türbinin yüksek kule yapısı nedeniyle temelde önemli büyüklükte devrilme momentlerine neden olmaktadır. Maksimum eğilme momenti genellikle temel seviyesinin hemen altındaki noktada meydana gelmektedir. Bu nedenle, çamur hattındaki (mudline) eğilme momenti, denizüstü rüzgar türbini temellerinin tasarımında özel önem arz eder. En yüksek kesme kuvvetleri de yine temelde yoğunlaşmaktadır.

FAST simülasyonuna ait sonuçlar, yazılımın çıktı dosyalarında sunulmuştur. Uygulanan ortalama rüzgar ve dalgaların x-yönünde olması nedeniyle, türbinin önden-arkaya (fore-aft) yönü en çok uyarılan serbestlik derecesi olmuştur. Şekil 3.10.'da çamur hattındaki önden-arkaya yönündeki kesme kuvvetinin zamanla değişimi verilmiştir.



Şekil 3.10. OpenFAST'ten türetilen çamur hattındaki kesme kuvveti.

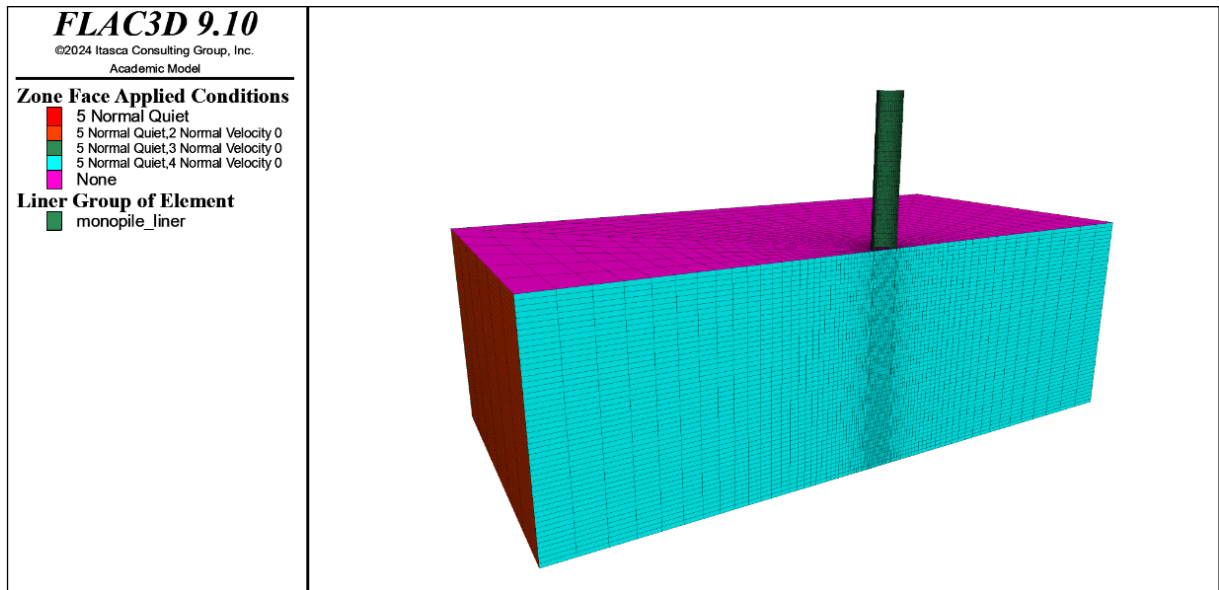
3.3.2. Dinamik Model için Dikkate Alınan Önemli Hususlar

Dinamik model, statik modele benzer şekilde, uzunluğu kazık çapının 25 katı ve genişliği kazık çapın 12,5 katı boyutlarındadır. Hesaplama kaynaklarını optimize etmek için, problemin simetrisinden yararlanılarak yarım simetrik bir model üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Modelin üst sınırı, deniz tabanı yüzeyine veya çamur hattına ($z = 0$) karşılık gelen serbest yüzey olarak tanımlanır. Modelin tabanı, düşey yer değiştirmeyi kısıtlamak için z -yönünde sabitlenirken, yanlara yalnızca model düzleminde harekete izin veren hareketli sınırlar uygulanmıştır. Simetri düzleminde bulunan düğümler, simetri koşullarını sabitlemek için y -yönünde kısıtlanmıştır.

Mohr-Coulomb modeli, açık deniz ortamındaki orta-sıkı ve sıkı kumun mekanik tepkisini simüle etmek için kullanılır. Astar elemanı kullanılarak modellenen kazık tipi türbin temeli için, FLAC3D’de elastik-izotropik bir malzeme modeli uygulanır.

Statik modele benzer şekilde, dinamik modelde de kazık tipi türbin temeli, açık deniz rüzgar türbini kurulumunun geçiş parçasını temsil etmek için çamur hattının 32 metre yukarısına uzatılır. Dinamik analiz sırasında, 30 m gömülü uzunluğa ve 6 m çapa sahip bir kazık tipi türbin temeli, Young modülü 80 MPa ve iç sürtünme açısı 36 derece olan kohezyonsuz zeminle çevrili olarak modellenmiştir. Yükler, kazık tipi türbin temelini ucunda yer alan 25 düğümde uygulanır. Toplam uygulanan yük, simetri düzlemindeki 2 düğüme, kalan düğümlere ise uygulanan yükün %50’si olacak şekilde dağıtılır.

Statik simülasyonda kullanılanla benzer bir arayüz yaklaşımı, zemin-kazık etkileşimini modellemek için uygulanır. Kazık tipi türbin temelini hem iç hem de dış duvarlarında, zemin tapası (soil plug) ve çevreleyen zemin ile etkileşimi sağlamak için yapısal bağlantılar geliştirilir. Sönümleyici sınır koşullarıyla modellenen sistemin izometrik perspektifi Şekil 3.11.’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Sönümleyici sınır koşullarıyla modellenen sistemin izometrik perspektifi.

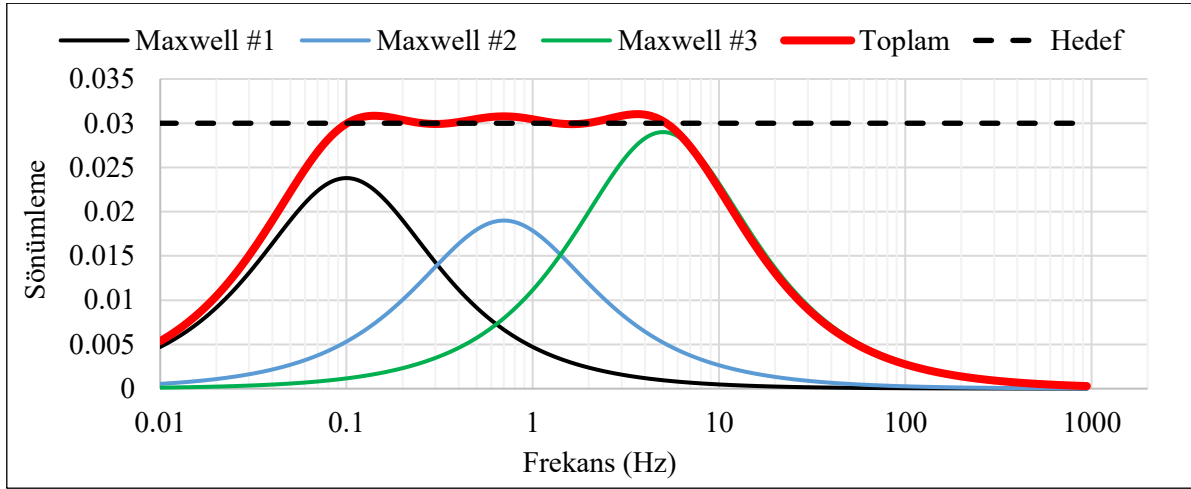
3.3.3. Sönümleyici Sınır Koşulları

Bu çalışmada, dinamik simülasyon sırasında model sınırlarında dışa yayılan dalgaların yansımaları en aza indirmek için FLAC3D’de sönümleyici (silent) sınırlar uygulanır. Bu, dinamik analizlerde özellikle önemlidir, çünkü dalga yansımaları dinamik tepkinin gerçek dışı amplifikasyonuna veya bozulmasına yol açabilir ve sonuçların doğruluğunu tehlikeye atabilir. Sönümleyici sınırlar, serbest zemin yüzeyini temsil eden üst yüzey hariç, modelin tüm yanlarına uygulanır. Bu sınırlar, dışa yayılan dalgaların enerjisini absorbe ederek çalışır, sonsuz bir alanı simüle eder ve dinamik tepkinin yapay sınır etkilerinden etkilenmemesini sağlar. FLAC3D’de sönümleyici sınırlar, sınır düğümlerindeki parçacık hızına orantılı kuvvetler uygulayan viskoz sönümleyiciler kullanılarak uygulanır ve dalgaların enerjisini etkili bir şekilde dağıtır. Sessiz sınırların kullanımı, özellikle sismik, rüzgar veya darbe yüklemesi gibi dalga yayılımını içeren durumlarda, zemin-kazık sisteminin gerçek dinamik davranışını yakalamak için esastır.

3.3.4. Sönümleme

Dinamik analizde, döngüsel yükleme koşulları altında sistemin tepkisini yakalamak için enerji dağılımının doğru temsili esastır. Bu çalışmada, zemin ve kazık tipi türbin temeli yapısının sönümleme özelliklerini modellemek için FLAC3D’de Maxwell sönümlemesi kullanılır. Frekansa bağlı bir sönümleme formülasyonu olan Maxwell sönümlemesi, FLAC3D’de mevcut olan yerel sönümleme veya Rayleigh sönümlemesi gibi diğer sönümleme seçeneklerine tercih edilir, çünkü geniş bir frekans aralığında daha tutarlı bir sönümleme oranı sağlama yeteneğine sahiptir. Bu tutarlılık, dinamik tepkinin çoklu frekans bileşenlerinden etkilendiği zemin-yapı etkileşimi problemlerinde özellikle avantajlıdır. Ayrıca, Maxwell sönümlemesi, diğer sönümleme yöntemlerine kıyasla hesaplama süresini yaklaşık %75 oranında azaltarak hesaplama açısından verimlidir ve büyük ölçekli dinamik simülasyonlar için pratik bir seçimdir. Sönümleme parametreleri, zemin ve kazık temelinin malzeme özelliklerine dayalı olarak seçilir.

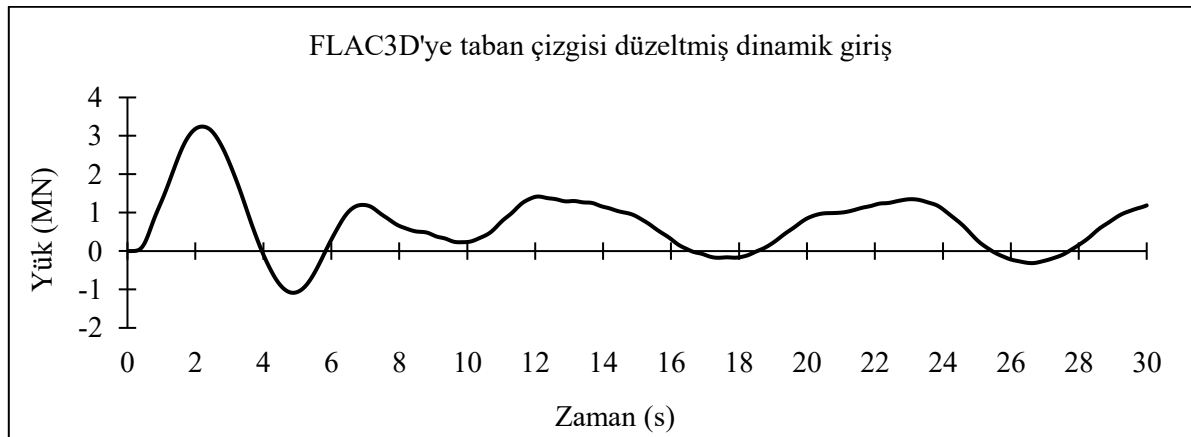
Zemin, sürekli bir ortam olarak modellenirken, kazık tipi türbin temeli astar elemanları kullanılarak temsil edilir ve her iki bileşene, dinamik etkileşimlerinde uyumluluğu sağlamak için aynı sönümleme parametreleri atanır. Bu yaklaşım, zemindeki histeretik sönümleme ve kazık tipi türbin temelindeki yapısal sönümleme dahil olmak üzere enerji dağılım mekanizmalarının etkili bir şekilde temsil edilmesini sağlar. %3 hedef sönümleme için sönümleme parametreleri, Itasca’dan alınan ve Şekil 3.12.’da gösterilen grafik kullanılarak tahmin edilir. Maxwell sönümlemesinin uygulanması, dinamik analiz için dengeli ve verimli bir çerçeve sağlarken, sonuçların doğruluğunun uygun sönümleme parametrelerinin kalibrasyonuna ve modelde bulunan varsayımlara bağlı olduğu kabul edilir.



Şekil 3.12. Maxwell sönümleme parametrelerinin tahmini.

3.3.5. Taban Çizgisi Düzeltmesi (Baseline Correction)

Dinamik girişin temel düzeltmesi, FLAC3D dinamik analizinde, zaman-geçmiş verilerinden fiziksel olmayan sapmaları gidererek yapısal tepkinin doğru simülasyonunu sağlamak için önemli bir adımdır. Kazık tipi türbin temeli analizinde, hatalı yer değiştirmeleri önleyerek p-y eğrileri sonuçlarının güvenilirliğini artırmaktadır. Bu çalışmada, NREL tarafından geliştirilen OpenFAST'ten türetilen 30 saniyelik rüzgar ve dalga yükü kaydına temel düzeltme uygulanmış, FLAC3D'de kazık tipi türbin temelinin dinamik tepkisinin doğruluğu artırılmıştır. Oluşturulan rüzgar ve dalga yükü kaydı Şekil 3.13.'de grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Dinamik analizde girdi olarak kullanılan kuvvet-zaman kaydı.

3.3.6. Python ile Dinamik Veri Son-İşleme

Bu tezin dinamik analiz bölümünde, FLAC3D yazılımı ile gerçekleştirilen dinamik simülasyonların sonuçları dikkate alınarak p-y eğrileri geliştirmek için Python programlama dilinden faydalanılmıştır. Dinamik simülasyon, bağlantı kuvvetleri ve düğüm yer değiştirmeleri gibi kritik

verileri yakalamak için 0,05 saniyelik aralıklarla sonuç dosyalarını dışa aktaracak şekilde yapılandırılmıştır; model durum dosyaları ise son işleme için kapsamlı veri kullanılabilirliğini sağlamak amacıyla her 1 saniyede bir kaydedilmiştir.

Dışa aktarılan sonuçlar, FLAC3D ile arayüz oluşturan itasca modülü kullanılarak Python'a aktarılmış ve bu, simülasyon verilerinin verimli bir şekilde çıkarılmasını ve işlenmesini sağlamıştır. Verileri düğüm ve derinlik seviyesine göre düzenlemek, her derinlikte ortalama yer değiştirmeleri ve kuvvetleri hesaplamak ve p-y eğrileri oluşturmak için bir Python kodu geliştirilmiştir. Bu kod, sonuç dosyalarını inceleyerek düğüm yer değiştirmelerini ve bağlantı kuvvetlerini çıkarmakta ve her derinlik seviyesi için normalleştirilmiş kuvvet ve yer değiştirme değerlerini hesaplamaktadır. Bu değerler daha sonra çıktı dosyalarına yazılmakta ve bunlar ardından p-y eğrilerini çizmek için kullanılmaktadır. Python'un kullanımı, son işleme için iş akışını kolaylaştırmakta ve dinamik yükleme koşulları altında kazık tipi türbin temellerinin zemin-yapı etkileşimi davranışını anlamak için gerekli olan p-y eğrilerinin otomatik ve hassas bir şekilde türetilmesine olanak vermektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasının bulgular bölümü temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, yerleşik analitik yöntemlerle karşılaştırmaları da içeren statik analiz bulguları sunulmakta ve parametrik analizlerden elde edilen sonuçlar tartışılmaktadır. İkinci kısımda ise, kazık tipi türbin temellerinin döngüsel yükleme altındaki davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilen dinamik analiz bulguları yer almaktadır.

Bu çalışmada, kazık tepkilerine ilişkin parametreler normalize edilerek farklı kazık geometrileri ve zemin koşulları altında karşılaştırılabilir hâle getirilir. Göreli rijitlik oranı, $\lambda = E_p I_p / E_s D^4$ şeklinde tanımlanır ve kazığın (elastisite modülü E_p ve atalet momenti I_p) çevresindeki zemine (elastisite modülü E_s ve kazık çapı D) göre rijitlik farkını temsil eder.

Yanal yük, $H_r = E_p I_p / L_p^2$ referans kuvveti ile normalize edilerek boyutsuz yanal yük–yer değiştirme ilişkilerinin değerlendirilmesi yapılmıştır.

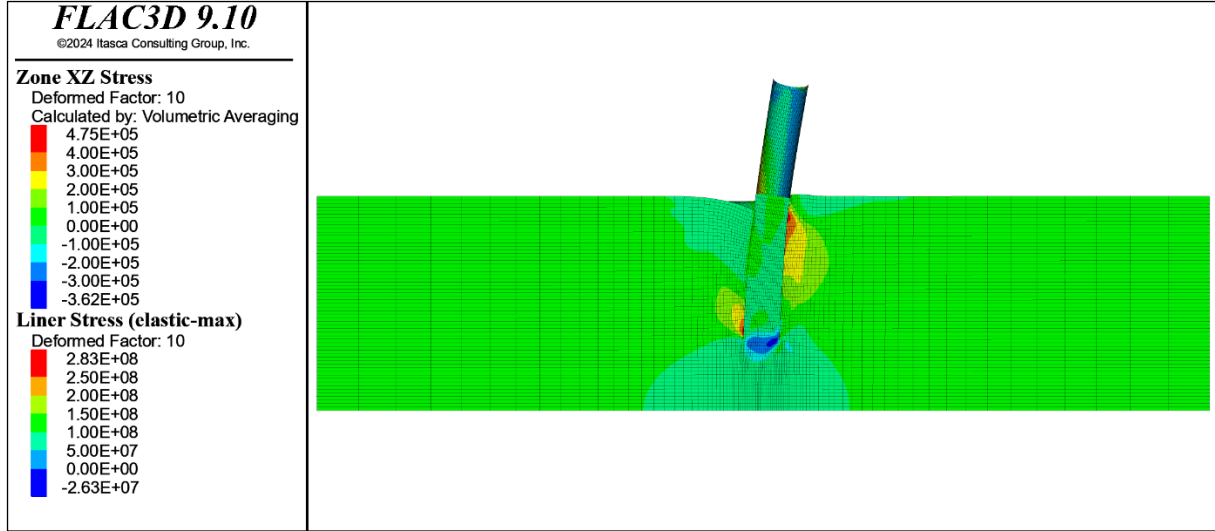
Eğilme momenti $M^* = M / (E_p I_p / D)$ ifadesiyle, kesme kuvveti ise $V^* = V / (E_p I_p / L_p^2)$ şeklinde normalize edilerek tüm büyüklüklerin boyutsuz hâle gelmesi ve karşılaştırmalı analizlere olanak tanınması sağlanmıştır.

Not:

Bu tez bölümünde sunulan tüm bulgular yalnızca yarım kazık modeli için geçerlidir. Simetrik model, hesaplama süresini azaltmak amacıyla geliştirildiğinden, sonuçlar, bulgular ve karşılaştırmalar kazık tipi türbin temelinin yalnızca yarısı üzerinden verilmiştir.

4.1. Tekil Kazıklı rüzgar Türbin Temellerinin Statik Yükler Altındaki Davranışı

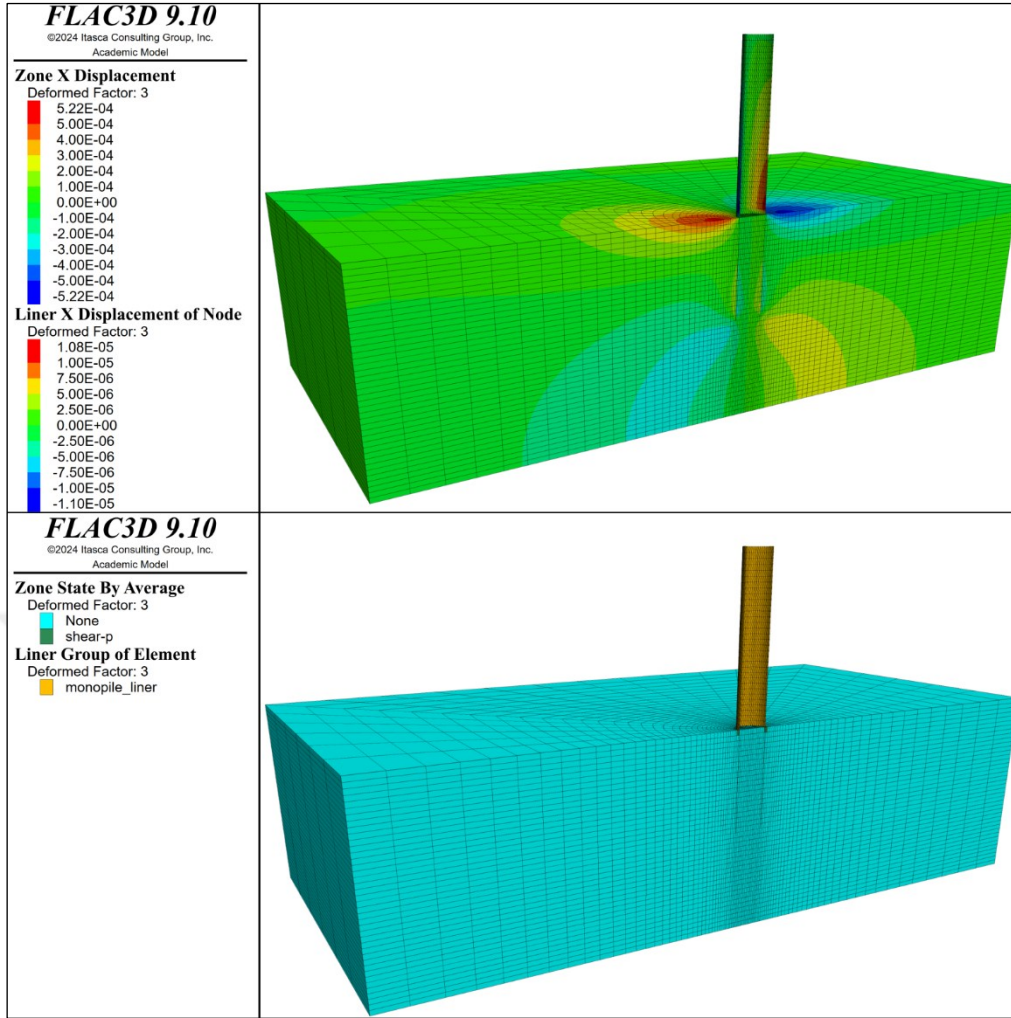
Bu bölümde, tekil kazıklı rüzgar türbin temellerinin statik yükler altındaki davranışına yönelik bulgular ve tartışmalar sunulmaktadır. Kazık tipi türbin temellerinin çamur hattı deplasmanı, eğim, eğilme momenti, dönme noktası, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu gibi önemli tasarım parametreleri için FLAC3D, API ve Winkler modeli temelli elastik çözümler ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu parametrelerin her biri, parametrik analiz sonuçlarından elde edilen boyutsuz veya normalize edilmiş formlarda ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Statik yüklemede kazık çevresinde gözlenen gerilme birikimi Şekil 4.1.'de gösterilmektedir. Özellikle çamur hattına yakın kazığın üst bölümünü ve alt ucunu çevreleyen zeminde gerilme artışlarının yoğunlaştığı görülmektedir. Kazık tipi türbin temelinin, dönme noktası üzerinde ve altında zıt işaretli yataklama gerilmeleri ile karakteristik yükleme davranışı gözlemlenebilir.



Şekil 4.1. Statik yüklemde kazık çevresinde gözlenen gerilme birikimi.

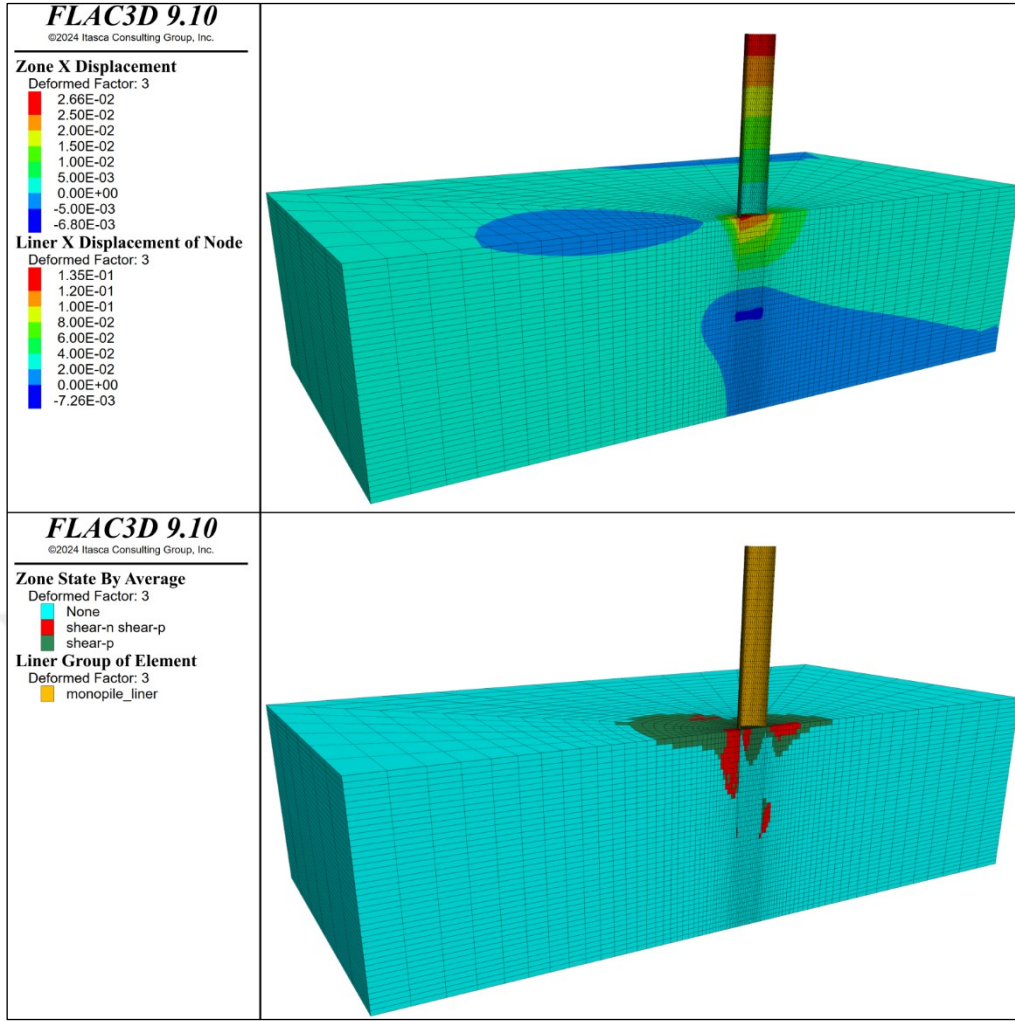
Şekil 4.2.-Şekil 4.8.'deki görsellerin üst yarlarında, zemin bölgeleri ve kazık çeperi (liner) için hesaplanan x-yönü yer değiştirme (displacement) konturları sunulmakta; alt tarafta ise yükleme sırasında zemin plastisitesi ve akma durumu gösterilmektedir.

Şekil 4.2., yanal yük uygulanmadan önce kazığın yerleştirildiği statik denge durumunu temsil etmektedir. Görüldüğü üzere, 0 MN'lık yükte kazık, kurulum dengesi aşamasında yatay yer değiştirme göstermemekte ve zeminle uyumlu bir stabilite sergilemektedir. X-yönü yer değiştirme konturları, herhangi bir deformasyonun oluşmaması nedeniyle mavi tonlarda sabit bir alan oluştururken, kazık X deplasmanı 0.00 cm seviyesinde kalmaktadır. Alttaki görselde, zemin ve kazık çevresinde herhangi bir plastikleşme izine rastlanmamakta, shear-p veya shear-n gerilimleri henüz ortaya çıkmadığı görülmekte; bu durum, yapının başlangıçtaki sağlamlığını ve yük öncesi doğal durumunu yansıtmaktadır.



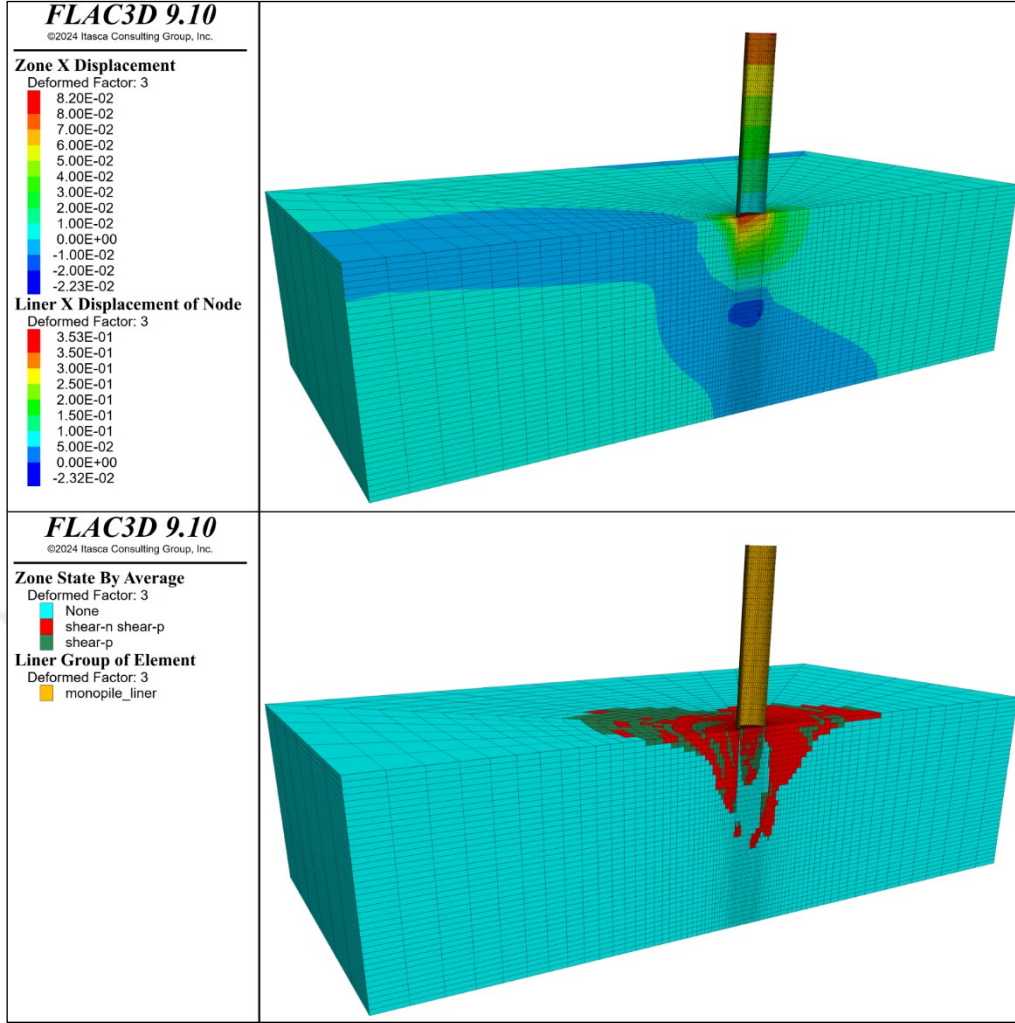
Şekil 4.2. Kazığın yerleştirilme dengesinde x-yer değiştirme konturu ve zemin göçme zonu durumu.

Şekil 4.3.'te görüldüğü gibi, 2 MN'lik yanal yükün pozitif x yönünde uygulanmasıyla kazık başında yatay yer değiştirme belirginleşmekte ve bu etki, kazık boyu boyunca aşağıya doğru azalarak zeminin derin katmanlarına yayılmaktadır. X-yönü yer değiştirme konturları, maksimum 2.66 cm'lik deplasmanla üst bölgede yoğun bir deformasyon eğrisi oluştururken, kazık X deplasmanı 13.50 cm'ye ulaşmaktadır. Alttaki görselde, yüzeye yakın bölgelerde ve kazık tabanında shear-p (kırmızı) ve shear-n (yeşil) gerilimleriyle ilk plastikleşme izleri ortaya çıkmakta, pozitif x yönündeki akma durumu, kazığı çevreleyen zeminin sınır mukavemetine yaklaştığını ifade etmektedir.



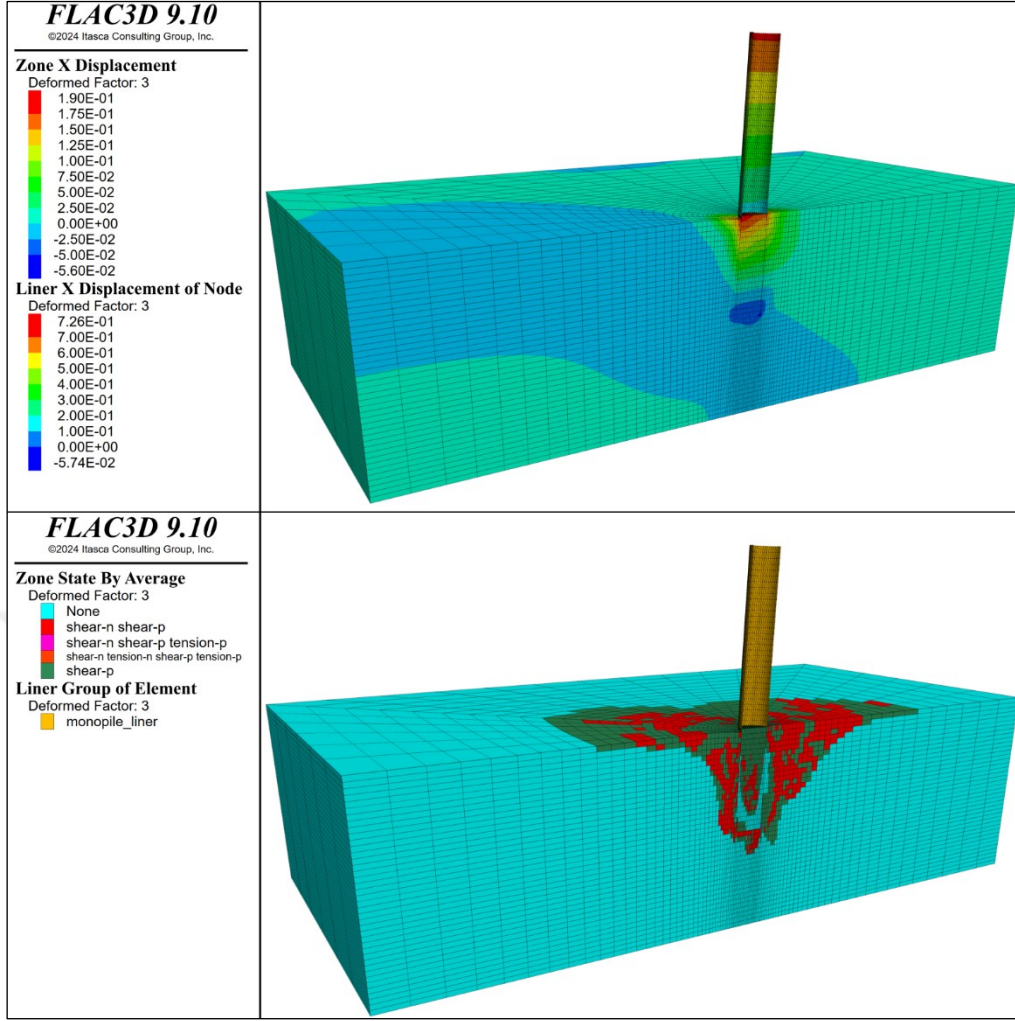
Şekil 4.3. 2 MN'lik yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.

Şekil 4.4.'te gözlendiği üzere, 4 MN'lik yanal yükün pozitif x yönünde uygulanmasıyla kazık başındaki yatay yer değiştirme 2 MN yük durumuna kıyasla artarak 8.00 cm'ye ulaşmakta ve bu etki, kazık boyunca zeminin derin katmanlarına yayılmaktadır. X-yönü yer değiştirme konturları üstte yoğunlaşırken, kazık X deplasmanı 35.30 cm'ye sıçramaktadır. Alttaki görselde, plastikleşme shear-p ve shear-n gerilimleriyle tabanda derin bir çökme konisine dönüşmekte, pozitif x yönündeki akma yapının stabilitesini daha da zorlamaktadır.



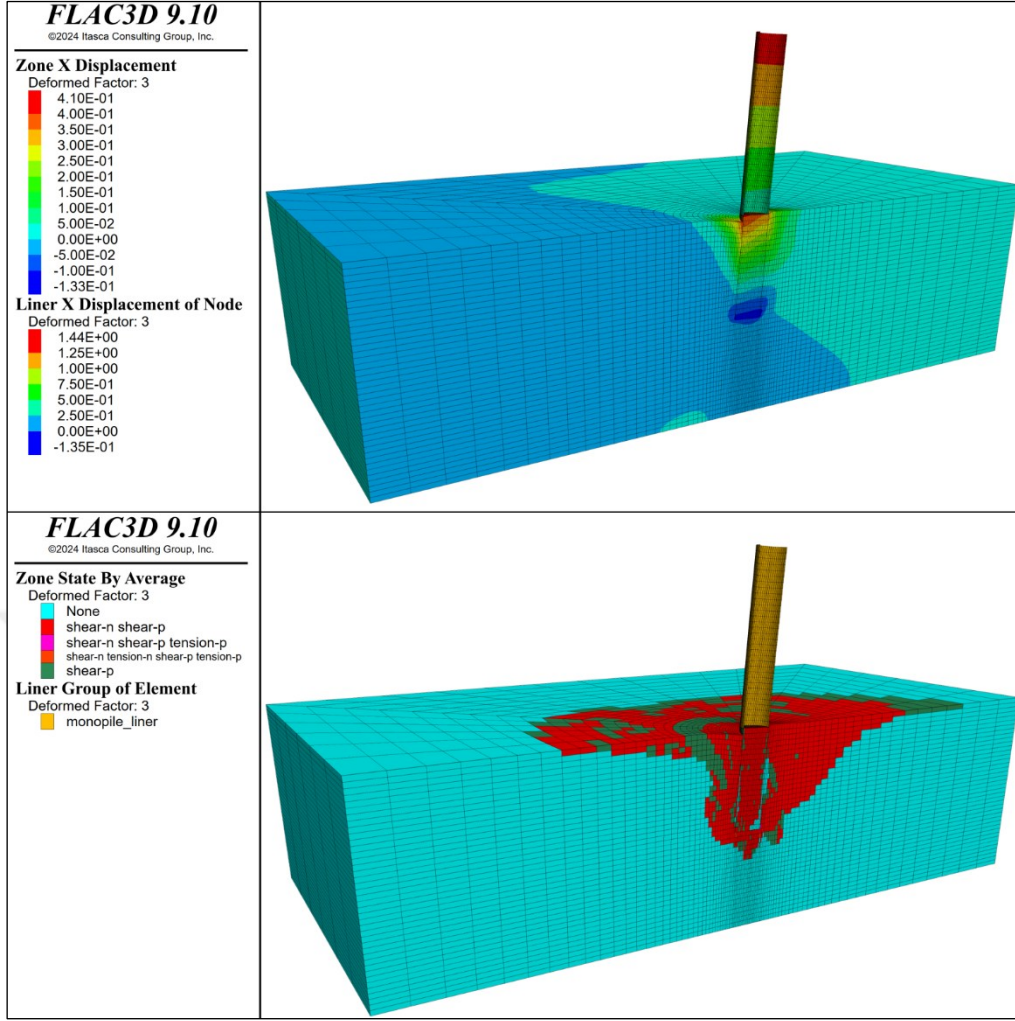
Şekil 4.4. 4 MN'lik yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.

Şekil 4.5.'te görüldüğü üzere, 6 MN'lik yanal yükün pozitif x yönünde uygulanmasıyla kazık başındaki yatay yer değiştirme 4 MN yükleme durumuna göre dramatik bir artışla 19.00 cm'ye ulaşmakta ve bu etki, zeminin daha derin katmanlarına nüfuz etmektedir. X-yönü yer değiştirme konturları keskin bir eğim oluştururken, kazık X deplasmanı 72.60 cm'ye çıkmaktadır. Altteki görselde, plastikleşme shear-p, shear-n ve shear-tension (mor) gerilimleriyle çökme konisini genişletmiş, pozitif x yönündeki akma yapının yıkıma yaklaştığını göstermektedir.



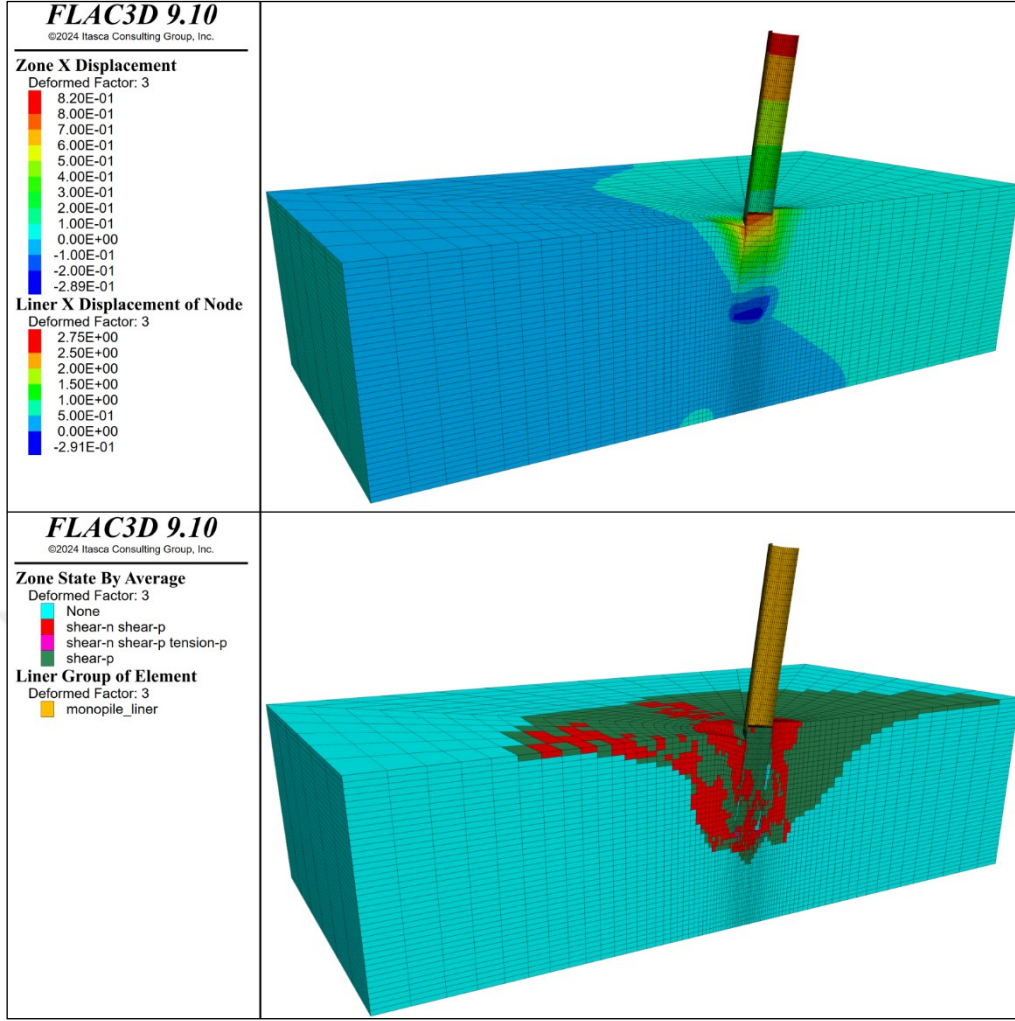
Şekil 4.5. 6 MN'lık yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.

Şekil 4.6.'da görüldüğü üzere, 8 MN'lık yanal yükün pozitif x yönünde uygulanmasıyla kazık başındaki yatay yer değiştirme 6 MN durumuna kıyasla 40.00 cm'ye yükselerek yapısal sınırları aşma noktasına gelmekte ve zeminin derin katmanlarına yayılmaktadır. X-yönü yer değiştirme konturları yoğunlaşırken, kazık X deplasmanı 144.00 cm'ye sıçramaktadır. Altaki görselde, plastikleşme shear-p, shear-n ve shear-tension gerilimleriyle tam bir çökme konisine dönüşmüş, pozitif x yönündeki akma yapının çökme eşiğine geldiğini doğrulamaktadır.



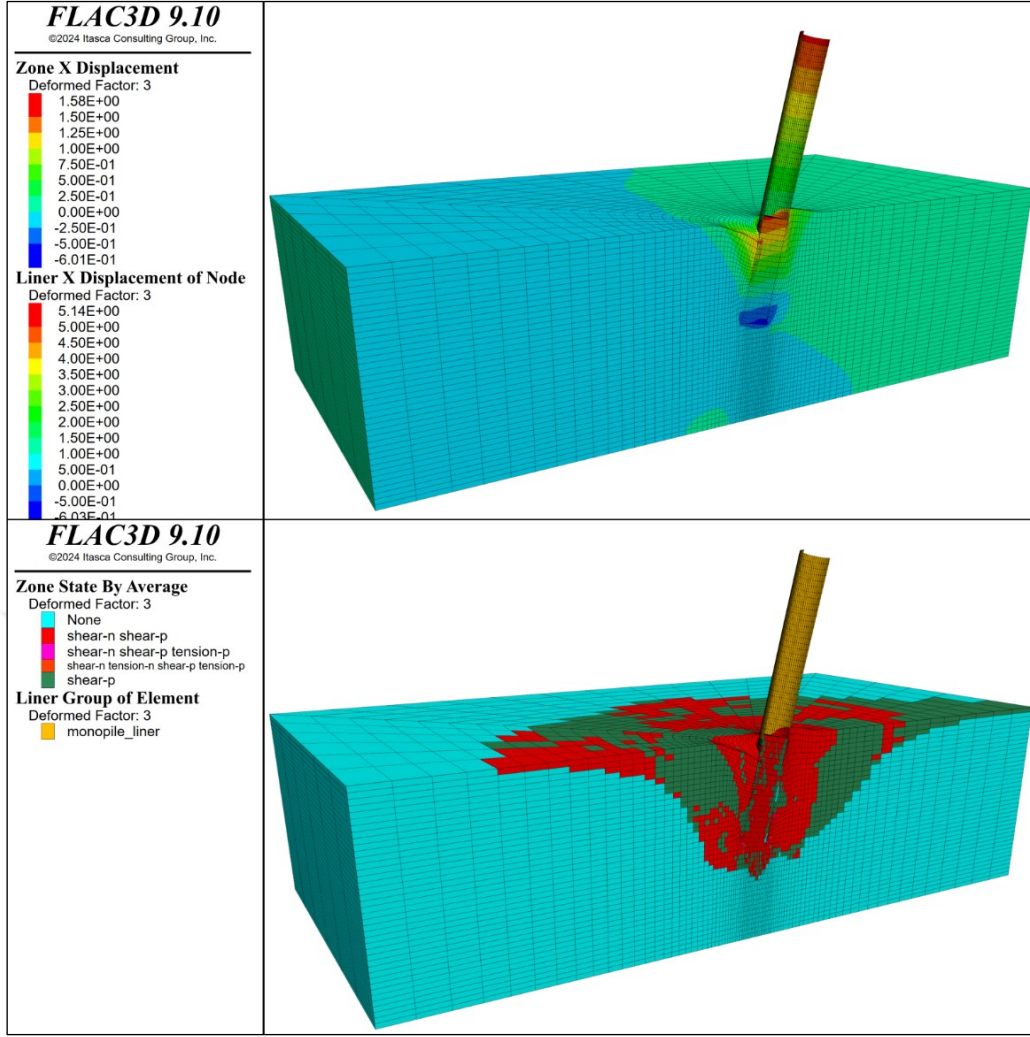
Şekil 4.6. 8 MN'lık yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.

Şekil 4.7.'de görüldüğü üzere, 10 MN'lık yanal yükün pozitif x yönünde uygulanmasıyla kazık başındaki yatay yer değiştirme 82.00 cm'ye ulaşarak yapısal çöküşe işaret etmekte ve zeminin derin katmanlarına yayılmaktadır. X-yönü yer değiştirme konturları üstte yoğunlaşırken, kazık X deplasmanı 275.00 cm'ye çıkmaktadır. Altta görselde, plastikleşme shear-p ve shear-n gerilimleriyle kazık tabanında derinleşmiş, pozitif x yönündeki akma yapının geri dönüşü olmayan bir hasar aşamasına girdiğini göstermektedir.



Şekil 4.7. 10 MN'lik yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.

Şekil 4.8.'de görüldüğü üzere, 12 MN'lik yanal yükün pozitif x yönünde uygulanmasıyla kazık başındaki yatay yer değiştirme 158.00 cm'ye çıkarak yapısal çöküşü tamamlamakta ve zeminin derin katmanlarına nüfuz etmektedir. X-yönü yer değiştirme konturları üstte belirginleşirken, kazık X deplasmanı 514.00 cm'ye ulaşmaktadır. Alttaki görselde, plastikleşme shear-p, shear-n ve shear-tension gerilimleriyle kazık çevresinde yıkım konisi oluşturmuş, pozitif x yönündeki akma yapının tamamen çöktüğünü ve stabilitenin kaybolduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.8. 12 MN’lik yanal yük uygulanması durumunda X-yönü yer değiştirme konturu ve zemin zonlarının plastiklik durumu.

4.1.1. Sayısal Modellemede Elde edilen Bulguların Analitik Yöntemlerle Karşılaştırması

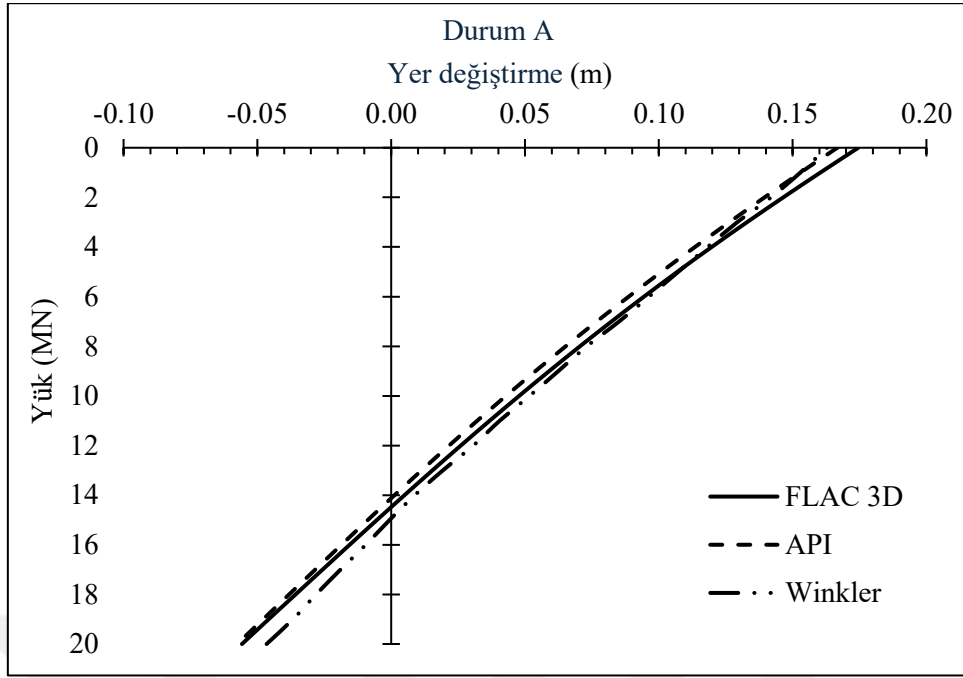
Bu bölümde doğrulanmış sayısal modelimiz ile elde edilmiş bulunan analiz sonuçları literatürde yer alan ve kabul gören analitik yöntemler ile karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir. Karşılaştırma, benzer zemin koşullarında yapısal olarak farklı dört kazık tipi türbin temeli için yapılmıştır. Hazırlara ilişkin farklı yapısal özellikler Tablo 4.1.’de sunulmaktadır.

Tablo 4.1. Dört farklı durumun yapısal özellikleri.

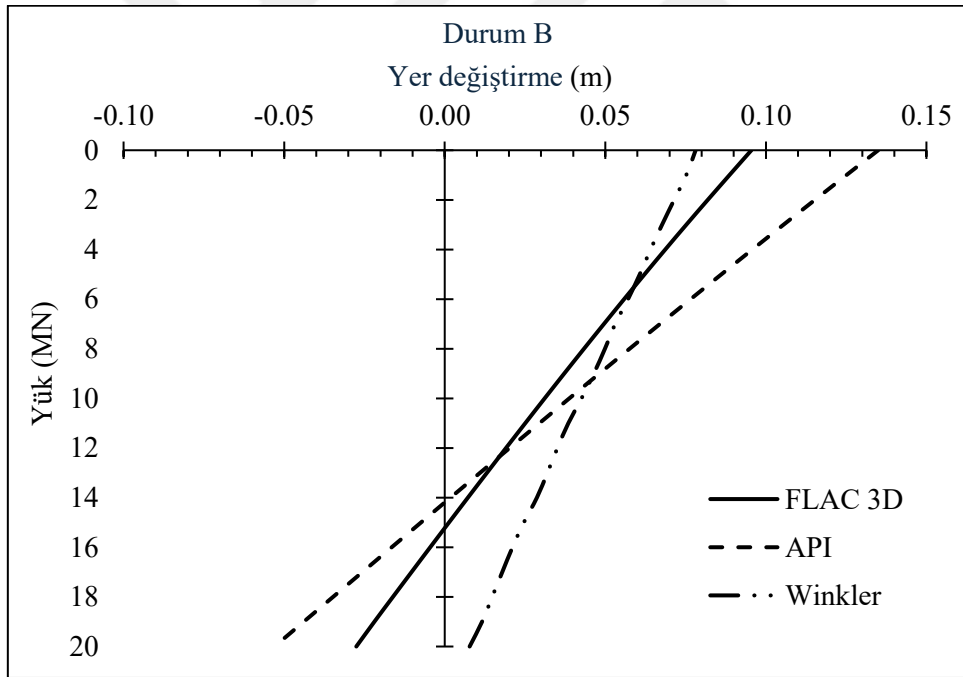
Durum	Gömülü derinlik L_p (m)	Çap D (m)	Kazık et kalınlığı t (cm)	Yanal yük H (MN)
A	20	6	8	6
B	20	10	12	8
C	40	6	8	10
D	40	10	12	16

Kazık gövdesi boyunca gözlenen yanal yer değiştirme profilleri, dört farklı durum için (Durum A, B, C, D) Şekil 4.9., Şekil 4.10., Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'te sırasıyla analitik yöntemlerle karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır.

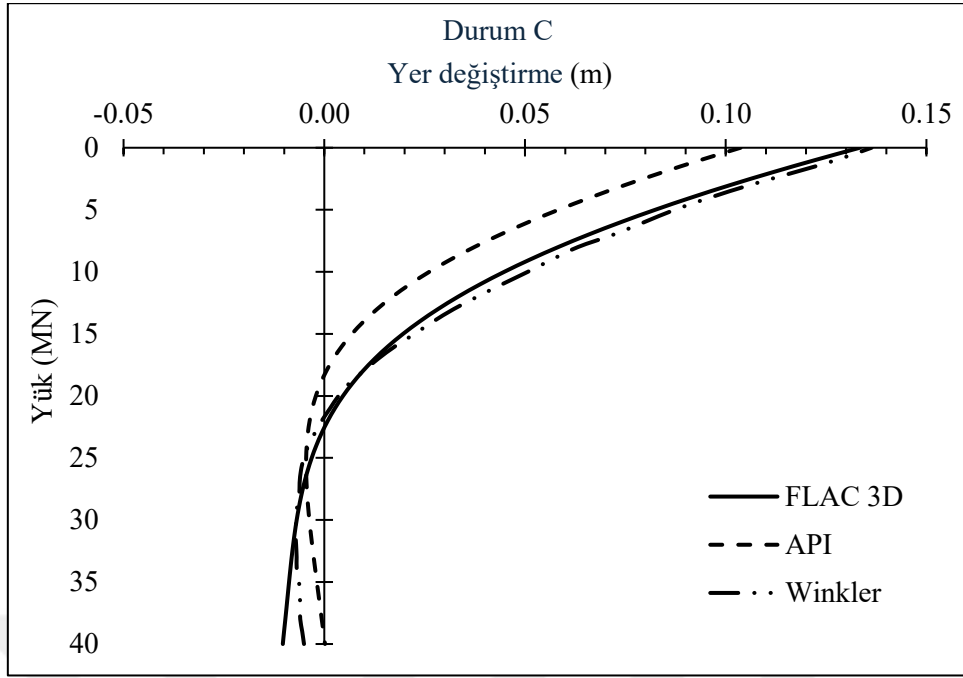
İlgili şekiller incelendiğinde, gözlenen yatay deformasyonların, kazığın çapı, gömülü uzunluğu ve yanal yükün etkileşimiyle belirgin şekilde farklılaştığı görülmektedir. Uzun gömülü uzunluğa ve yüksek yan yüke sahip koşulları temsilen Durum C kazığı, deniz tabanında en büyük yer değiştirmeyi sergiler; bu, daha uzun kazıkların artan esnekliği ve yüksek yükün zemin direncini aşmasından kaynaklanır. Buna karşılık, büyük çapa sahip Durum B kazığı, artan zemin-kazık temas alanı nedeniyle daha yüksek bir zemin tepkisine olanak vererek kazık gövdesinde en küçük yer değiştirmeyi üretir. FLAC3D ile elde edilen sonuçlar, API standardına kıyasla sürekli olarak daha yüksek yer değiştirmeler ortaya koymaktadır, çünkü API'nin ampirik p-y eğrileri, sıg zeminlerde zemin rijitliğini olması gerekenden daha yüksek tahmin etmekte olduğundan kazık gövdesinde yer değiştirmeyi düşük tahmin etmektedir. Winkler yöntemi, sıg derinliklerde sayısal analiz bulguları ile uyum göstermekte, ancak daha yüksek derinliklerde zemin sıkılığının artması nedeniyle tahminleri farklılaşmakta ve bu yöntemle elde edilen yer değiştirmeler genellikle sayısal analiz sonuçlarına kıyasla daha büyük gözlenmektedir. Daha büyük çaplar (Durum B ve D), zeminle daha fazla temas sağlayarak yer değiştirmeyi azaltırken, uzun gömülü uzunluklar (Durum C ve D) kazığın eğilme kapasitesini artırarak yer değiştirmeyi yükseltmektedir; yüksek yükler (Durum D) ise zemin deformasyonunu daha da artırır. FLAC3D' ile gerçekleştirilen sayısal modelleme, zemin-kazık etkileşimindeki doğrusal olmayan etkileri ve derinlik bağımlı zemin davranışını yakalamada üstündür, API yaklaşımı ise sıg derinliklerde aşırı sert tepkiler üretirek gerçek davranışı tahmin edememektedir. Özellikle A ve B durumundaki kazık deformasyon profili incelendiğinde doğrusala yakın bir davranış gözlenmekte, B ve C durumlarında ise davranış eğrileşmektedir. Bu durum kazığın boyu, et kalınlığı ve yüklerin kombine etkisi ile şekillenmekte olup kazığın “kısa kazık” ya da “uzun kazık” davranışına yönelmesine sebep olmaktadır. Bu gözlemin yanında zeminin dayanımının değişmesi de bu kombine davranışa ek bir ayak oluşturmakta ve gözlenen kazık davranışının çok parametreye dayalı hibrit bir davranış olduğunu ortaya koymaktadır.



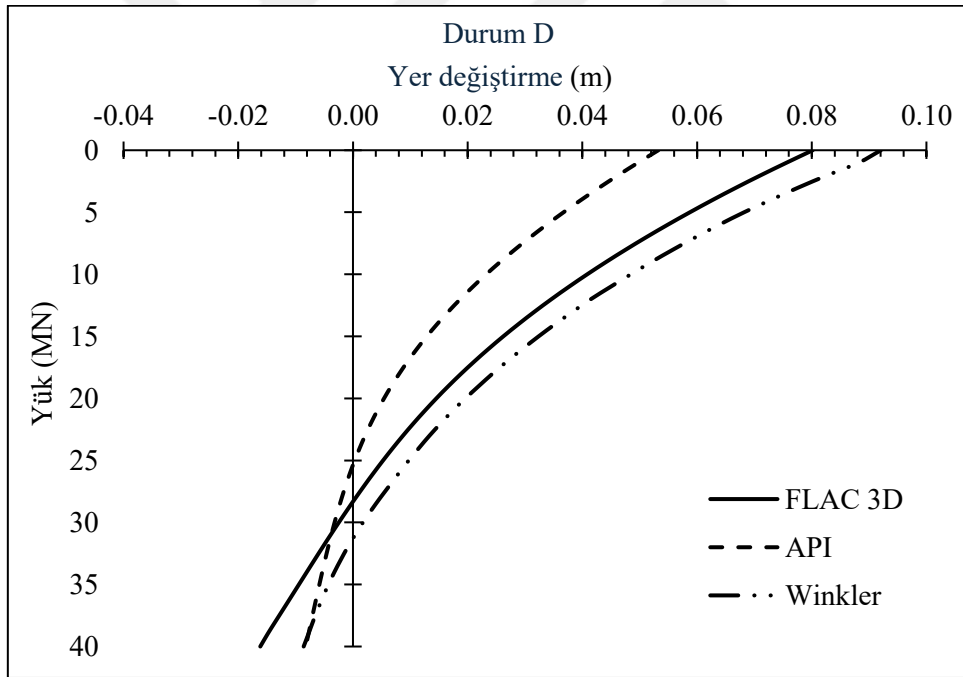
Şekil 4.9. A durumunda kazık boyunca ölçülen yer değiştirme profili.



Şekil 4.10. B durumunda kazık boyunca ölçülen yer değiştirme profili.



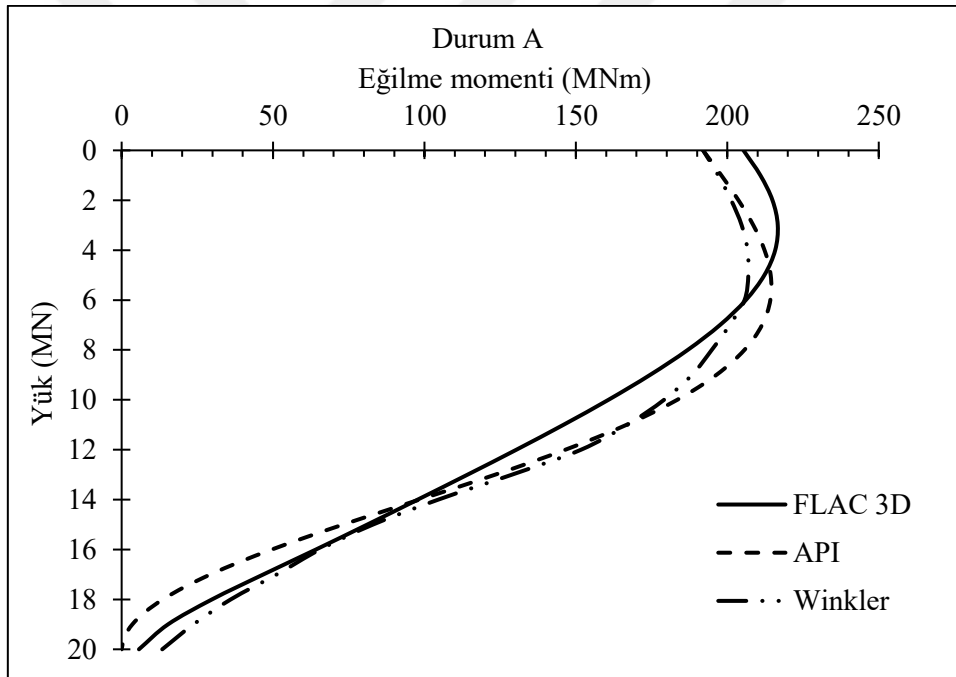
Şekil 4.11. C durumunda kazık boyunca ölçülen yer değiştirme profili.



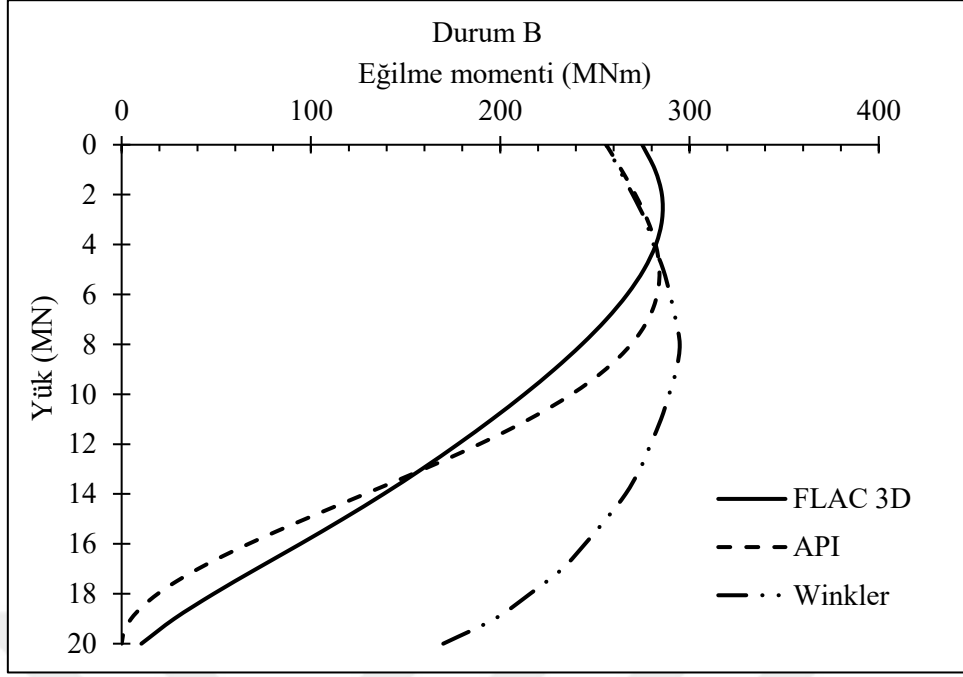
Şekil 4.12. D durumunda kazık boyunca ölçülen yer değiştirme profili.

Kazık gövdesi boyunca gözlenen eğilme momenti profilleri, dört farklı durum için (Durum A, B, C, D) sırasıyla Şekil 4.13., Şekil 4.14., Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'da analitik yöntemlerle karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. İlgili şekiller incelendiğinde, gözlenen eğilme momentlerinin, deplasmanlarda olduğu benzer şekilde kazığın çapı, gömülü uzunluğu ve yanal yükün etkileşimiyle farklılaştığı görülmektedir. Büyük çapa ve yüksek yatay yüke sahip Durum D, kazık gövdesinde en yüksek momentleri üretmektedir, çünkü geniş çap zemin direncini artırırken oluşan kuvvet bileşkesi

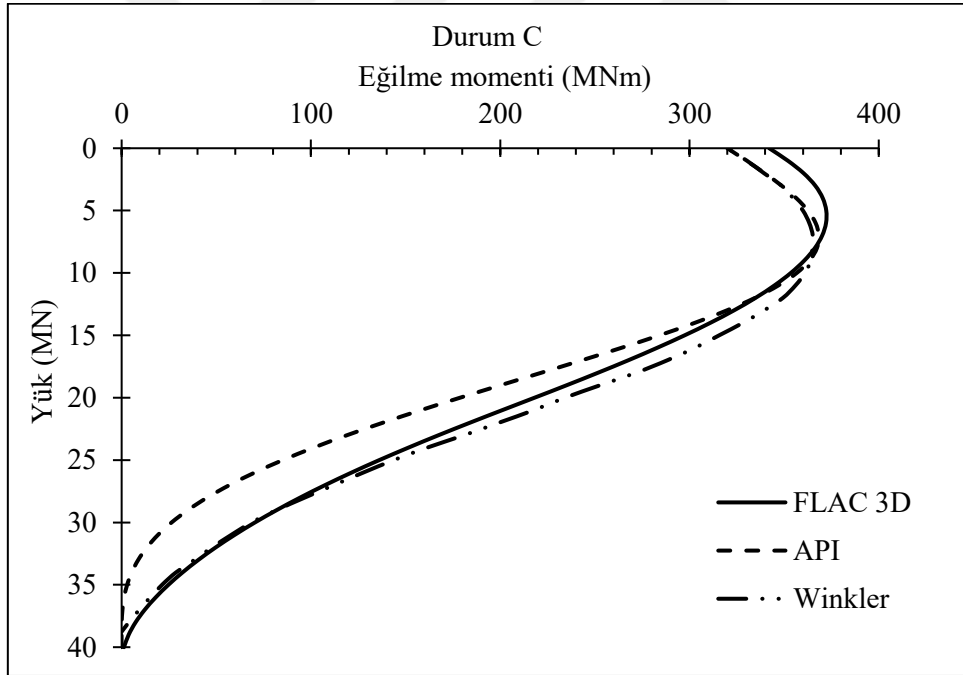
aynı zamanda oluşan momentleri de büyütmemektedir; buna karşılık, küçük çaplı ve düşük yüklü Durum A en düşük momentleri sergilemektedir. API yaklaşımı, sığ derinliklerde eğilme momentlerini genellikle fazla tahmin etmektedir, çünkü ampirik zemin rijitliği varsayımları, zemin-kazık etkileşiminin karmaşıklığını göz ardı etmektedir; FLAC3D ise daha büyük derinlerde zemin yenilmesi ve doğrusal olmayan davranışları modelleyerek daha gerçekçi moment dağılımları sunmuştur. Winkler yaklaşımı ile, sayısal analizde elde edilen değerlere yakın momentler bulunmakta, ancak sığ derinliklerde bir miktar yüksek tahminler verebilmektedir, çünkü Winkler yöntemindeki yay sabiti yaklaşımı zemin sürekliliğini tam olarak yansıtamamaktadır. Daha büyük çaplar (Durum B ve D), zeminle artan temas yoluyla moment kapasitesini güçlendirir; uzun gömülü uzunluklar (Durum C ve D), yatay yükün daha derin zemine aktarılmasına olanak sağlayarak eğilme momentleri artırmakta; yüksek yükler (Durum D) ise momentleri önemli ölçüde büyütmemektedir. FLAC3D'nin ayrıntılı sayısal yaklaşımı, API'nin basitleştirilmiş tahminlerine kıyasla, zemin-kazık sisteminin dinamiklerini daha doğru bir şekilde temsil etmekte ve özellikle yüksek yüklerde daha gerçekçi olduğu sonucuna varılmaktadır.



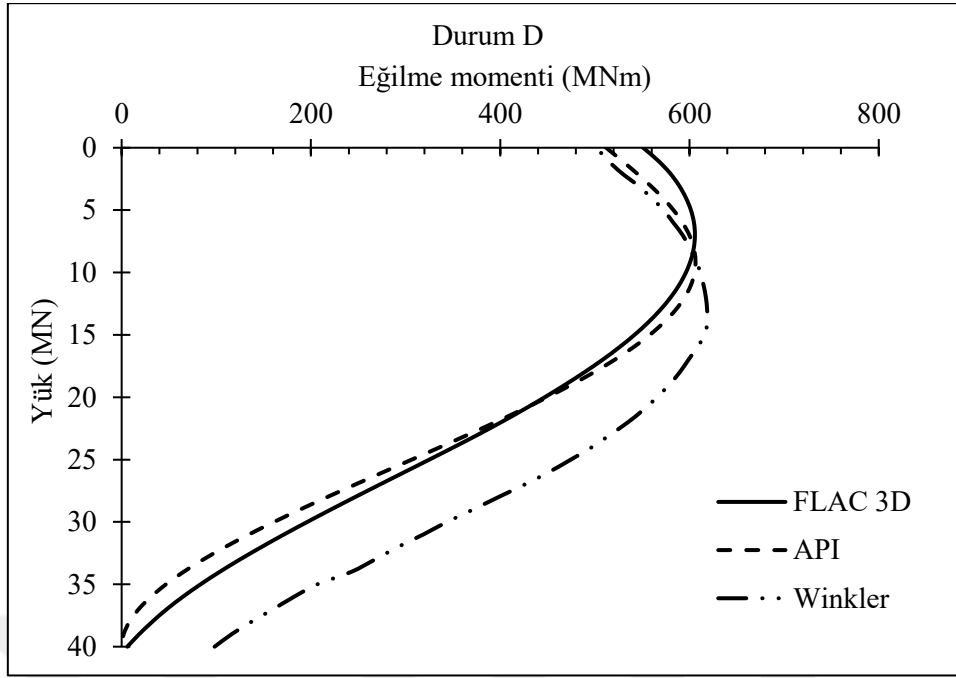
Şekil 4.13. A durumu için kazık boyunca eğilme momenti profili.



Şekil 4.14. B durumu için kazık boyunca eğilme momenti profili.

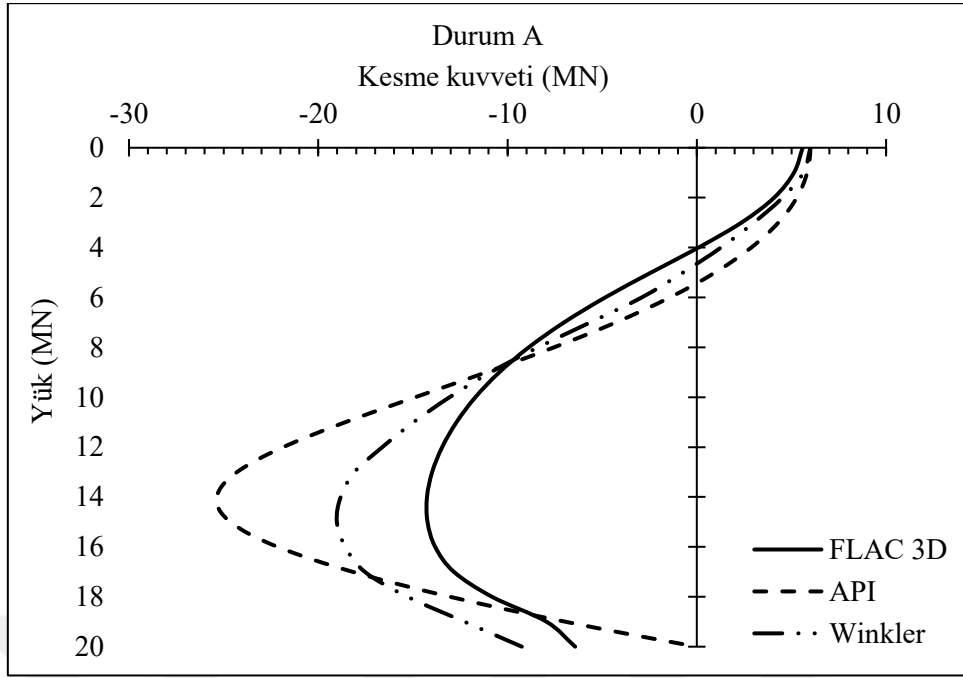


Şekil 4.15. C durumu için kazık boyunca eğilme momenti profili.

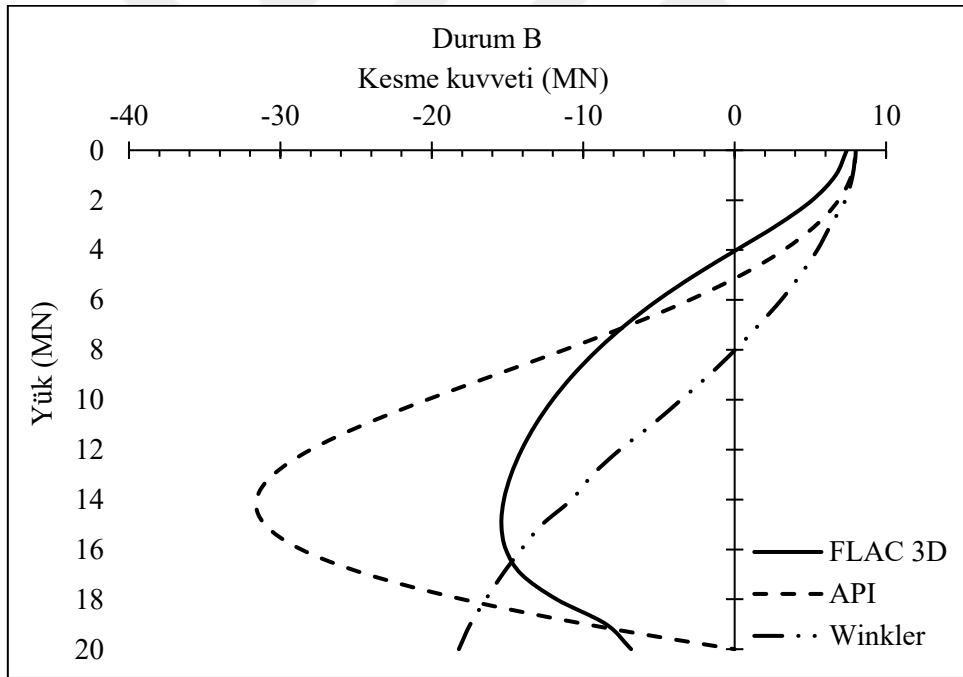


Şekil 4.16. D durumu için kazık boyunca eğilme momenti profili.

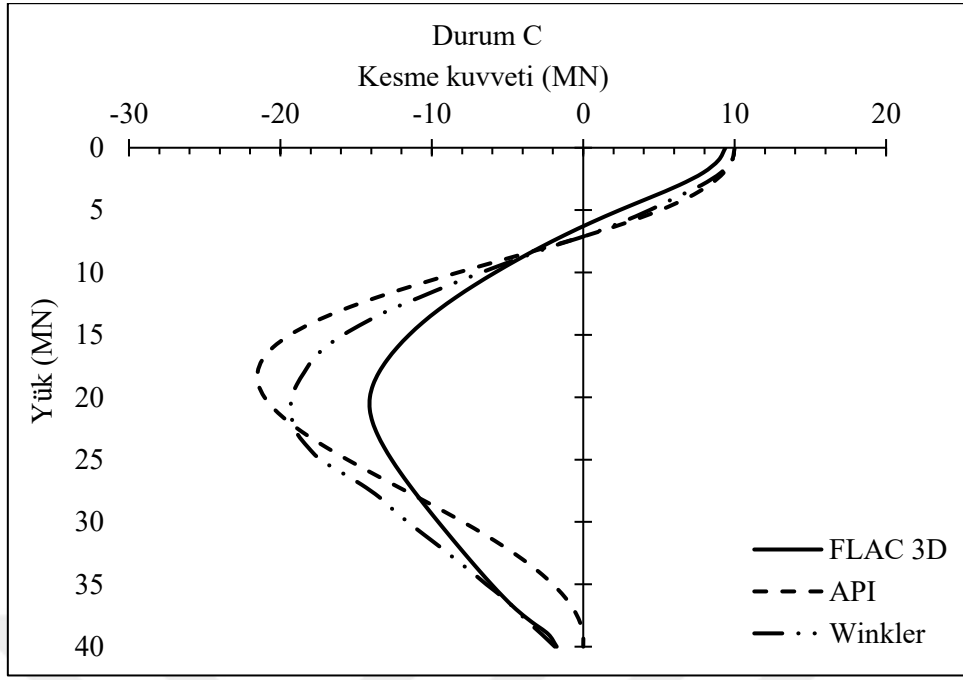
Kazık gövdesi boyunca gözlenen kesme kuvveti profilleri, dört farklı durum için (Durum A, B, C, D) sırasıyla Şekil 4.17., Şekil 4.18., Şekil 4.19. ve Şekil 4.20.'de analitik yöntemlerle karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Kesme kuvveti, dört durumda da ortak olarak deniz tabanında en yüksek değerine ulaşır ve yanal yük, kazık çapı ve gömülü uzunluğun etkisiyle değişiklik göstermektedir. En yüksek yüke sahip Durum D, büyük yanal yükün zemin reaksiyonunu tetiklemesiyle birlikte en büyük kesme kuvvetlerini üretir; düşük yüklü ve küçük çaplı Durum A ise en küçük kuvvetleri sergilemektedir. API, zemin rijitliğini yüksek öngörmesi nedeniyle, özellikle Durum A ve C'de, sayısal analizlerde gözlenen değerlere kıyasla daha yüksek kesme kuvvetleri tahmin etmektedir, çünkü ampirik model, sığ zeminlerde zemini olduğundan yüksek düzeyde dirençli varsaymaktadır; FLAC3D, zemin davranışındaki doğrusal olmayan etkileri yakalayarak daha dengeli sonuçlar göstermiştir. Winkler yaklaşımıyla, sayısal model sonuçlarına yakın kesme kuvvetleri öngörülmektedir, ancak daha derinlerde zemin rijitliğinin artmasıyla bir miktar düşük tahminde bulunmaktadır, çünkü yay modeli zemin kütlelerinin kazık gövdesi ile tam etkileşimini yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir. Daha büyük çaplar (Durum B ve D), zeminle artan temas yoluyla kesme kuvvetlerini yükseltir; uzun gömülü uzunluklar (Durum C ve D), yükün derine yayılımını sağlayarak kuvvetleri artırır; yüksek yükler (Durum D) ise kesme kuvvetlerini önemli ölçüde büyütür. FLAC3D, özellikle yüksek yük koşullarında, API'nin sığ derinliklerdeki aşırı yüksek tahminlerine kıyasla daha doğru ve gerçekçi kesme kuvveti tahminleri sağlar.



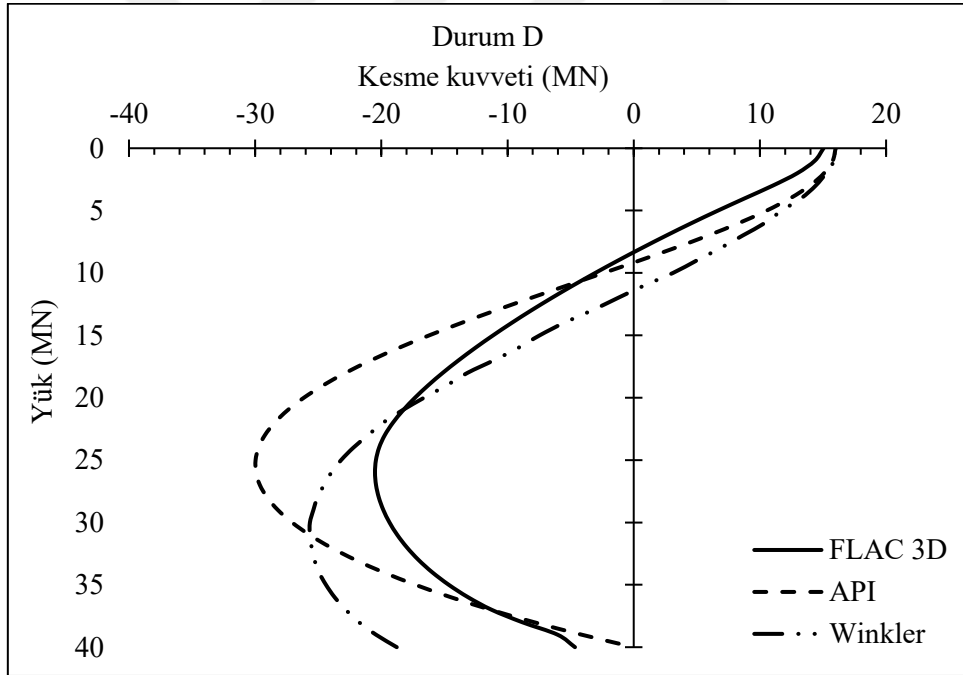
Şekil 4.17. A durumu için kazık boyunca kesme kuvveti profili.



Şekil 4.18. B durumu için kazık boyunca kesme kuvveti profili.



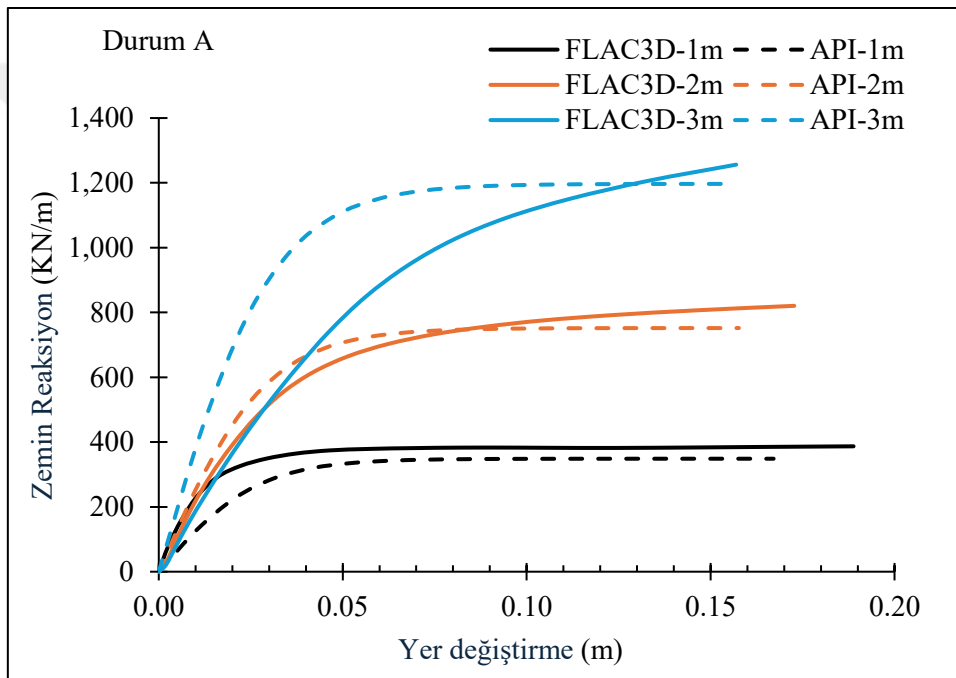
Şekil 4.19. C durumu için kazık boyunca kesme kuvveti profili.



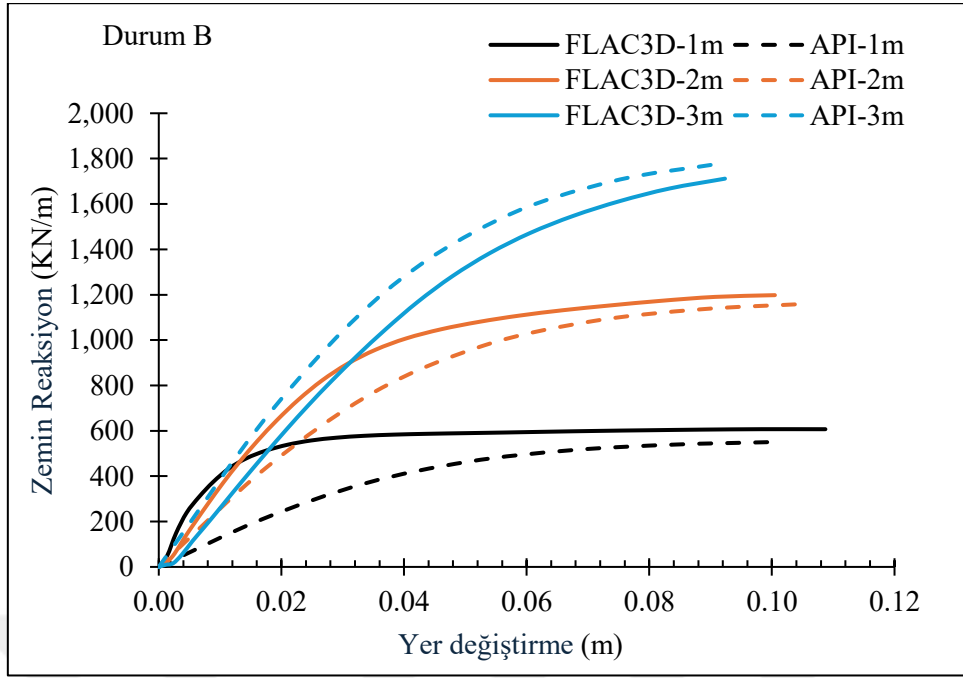
Şekil 4.20. D durumu için kazık boyunca kesme kuvveti profili.

Zemin tepkisi (p-y eğrileri), Şekil 4.21., Şekil 4.22., Şekil 4.23. ve Şekil 4.24., incelenen dört durumda 1m, 2m ve 3m derinliklerde değerlendirildiğinde, FLAC3D'nin API'nin ampirik eğrilerine kıyasla daha yumuşak tepkiler ürettiği görülür. Büyük çaplı kazıkları temsilen Durum B ve D, zeminle artan temas alanı sayesinde daha yüksek zemin tepkileri sergilemekte; uzun gömülü uzunluğa sahip Durum C, kazık gövdesinin daha fazla zemin kütlesiyle etkileşime girmesi nedeniyle daha güçlü tepkiler üretmektedir; küçük çaplı ve düşük yüklü Durum A'da ise en düşük yanal zemin tepkisi görülmektedir.

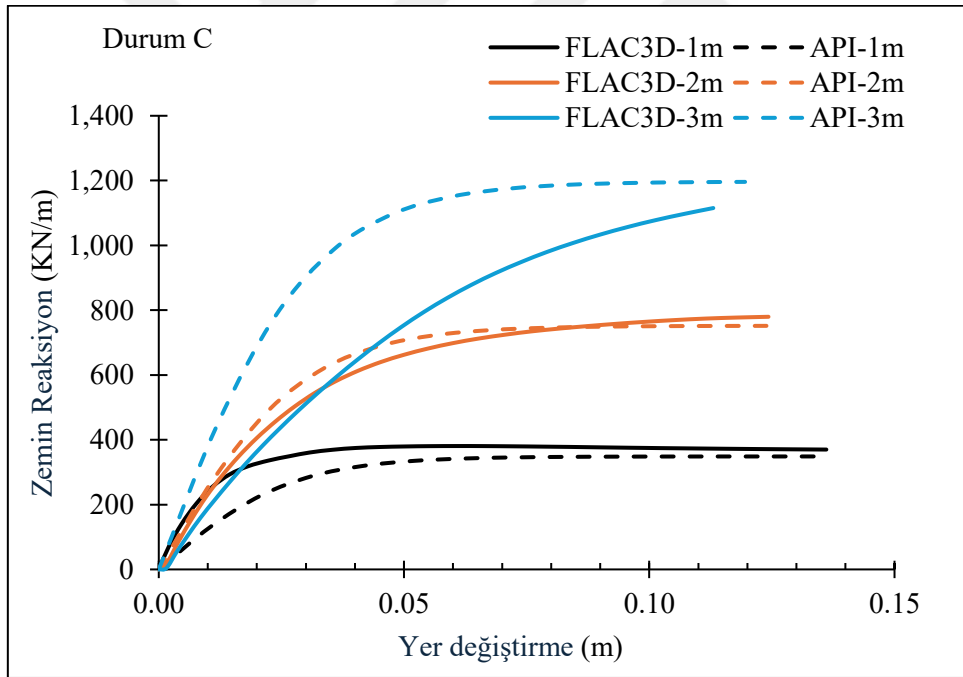
API, sığ derinliklerde zemin sertliğini yüksek varsayması nedeniyle daha yüksek tepki kuvvetleri öngörür, bu da gerçek davranışın tahmininde belli bir düzeyde yetersizliğe yol açar; FLAC3D, zemin yenilmesi ve derinlik bağımlı doğrusal olmayan davranışları modelleyerek daha gerçekçi sonuçlar sunar. Winkler yaklaşımı, sığ derinliklerde FLAC3D ile uyumludur, ancak daha derinlerde zemin sıkışmasının artmasıyla rijitliğini daha fazla tahmin etmekte, buna ilave olarak yay modeli zemin sürekliliğini tam olarak yansıtamamaktadır. Yüksek yükler (Durum D), zemin tepkisini yükseltirken, büyük çaplar (Durum B ve D) ve uzun gömülü uzunluklar (Durum C ve D) benzer şekilde tepkiyi güçlendirmektedir. FLAC3D'nin sayısal modellemesi, API'nin ampirik yaklaşımına kıyasla, zemin-kazık etkileşiminin karmaşık dinamiklerini daha doğru bir şekilde temsil etmekte ve özellikle derinlik bağımlı davranışlarda üstün olduğu görülmektedir.



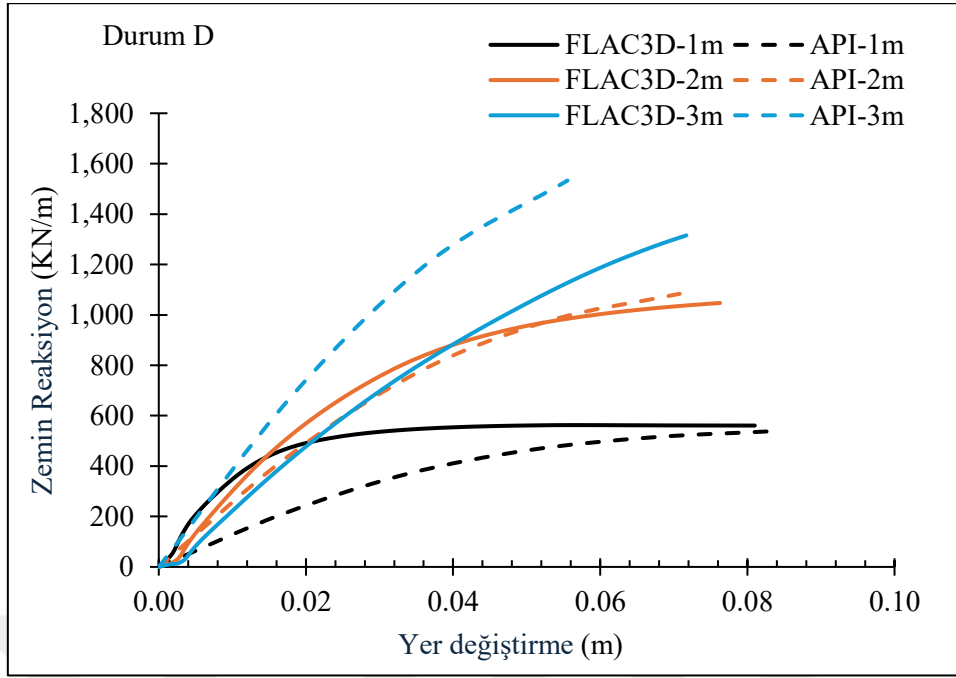
Şekil 4.21. A durumunda 1 m, 2 m ve 3 m derinliklerdeki (p-y) zemin reaksiyonları.



Şekil 4.22. B durumunda 1 m, 2 m ve 3 m derinliklerdeki (p-y) zemin reaksiyonları.



Şekil 4.23. C durumunda 1 m, 2 m ve 3 m derinliklerdeki (p-y) zemin reaksiyonları.



Şekil 4.24. D durumunda 1 m, 2 m ve 3 m derinliklerdeki (p-y) zemin reaksiyonları.

4.1.2. Yük Uygulama Yüksekliğinin Etkisi

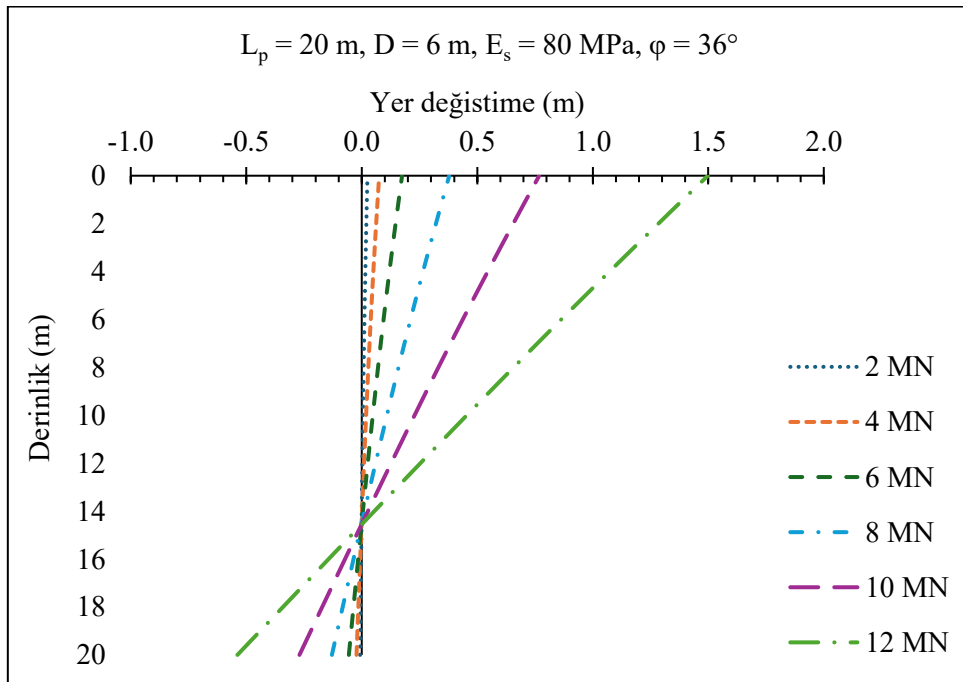
API yöntemi ile FLAC3D simülasyonu arasındaki temel modelleme farkı, yanal yükün uygulandığı yükseklikte yatmaktadır. FLAC3D modelinde, kazık tipi türbin temeli, çamur hattının 32 metre yukarısına uzanmakta ve bu durum, açık deniz rüzgar türbini kulesinin açıkta kalan kısmını temsil etmektedir. Yanal yük, bu uzatılmış kısmın tepesine uygulanır ve bu, doğal olarak çamur hattında yanal yük ile moment kolu uzunluğunun çarpımına eşit bir eğilme momenti oluşturmaktadır. Buna karşılık, API yöntemi bu durumu basitleştirerek hem yanal kuvveti hem de momenti doğrudan çamur hattına uygulamaktadır. Yük uygulama biçimindeki bu temel fark, iç kuvvet dağılımını ve ortaya çıkan zemin-kazık etkileşimini önemli ölçüde etkiler. Sayısal modelde yük çamur hattının üzerinde uygulandığı için, moment kazık şaftı boyunca yapısal deformasyon sonucu kademeli olarak gelişir ve kazık başına yakın kesme kuvveti API modeline kıyasla azalır. Bu etki, kazık uzunluğunun özellikle üst kesimlerinde zemine daha dağıtılmış bir şekilde aktarılmasına ve kesme ile eğilme profillerinde daha düzgün bir değişime yol açmaktadır. Buna karşılık, API yaklaşımı yükü ve momenti tek bir derinlikte yoğunlaştırır, kesme kuvvetinde keskin bir düşüş ve eğilme momentinde yerel bir tepe noktası oluşturmaktadır. Bu karşılıklı, sayısal modelin sürekli olarak daha küçük büyüklükler ve daha kademeli geçişler gösterdiği kesme kuvveti diyagramlarında en belirgindir. Ayrıca, bu fark, üst katmanlardaki p-y eğrilerinin şeklini ve eğimini etkiler; çünkü sayısal modelde, eğilme nedeniyle zemin direncinin kademeli mobilizasyonu yakalanabilmektedir, oysa API yöntemi anında ve yoğunlaşmış bir tepki varsayar. Bu nedenle, iki yöntem arasında gözlemlenen varyasyon, yalnızca analitik formülasyonlarından değil, aynı zamanda yük uygulama konfigürasyonundaki bu farktan da önemli ölçüde etkilenir.

4.2. Parametrik Analiz Bulguları

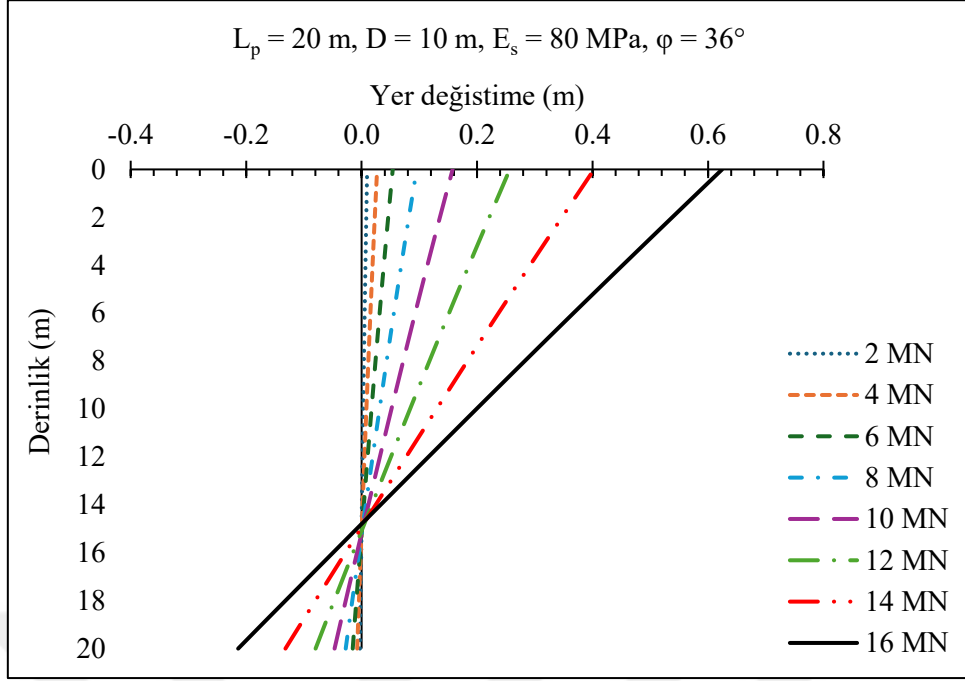
Parametrik analizler için bulgular, büyük ölçüde yanal yer değiştirme, çamur hattı yer değiştirmesi, dönme noktası, kazık başı eğimi, eğilme momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu (p-y eğrileri) olarak ayrılmıştır. Her bölüm iki kısma bölünmüştür. İlk kısımda, farklı kazık tipi türbin temeli yapısal özelliklerine sahip bazı analizlerden yanal yük için genelleştirilmiş sonuçlar derlenmiş ve her analiz için temel tepki ayrı ayrı incelenmiştir. İkinci kısımda ise, değişen yapısal ve zemin parametrelerinden bağımsız olarak tepkileri incelemek için normalizasyon ve eğilme sertliği parametreleri (λ) tanıtılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Bu tezin ekler bölümünde, parametrik analiz yapısını ve her bir kazık ile zemin konfigürasyonu için eğilme rijitliğinin (λ) nasıl değiştiğini açıklayan bir tablo sunulmuştur.

4.2.1. Yanal Yer Değiştirme Profillerinin Değerlendirilmesi

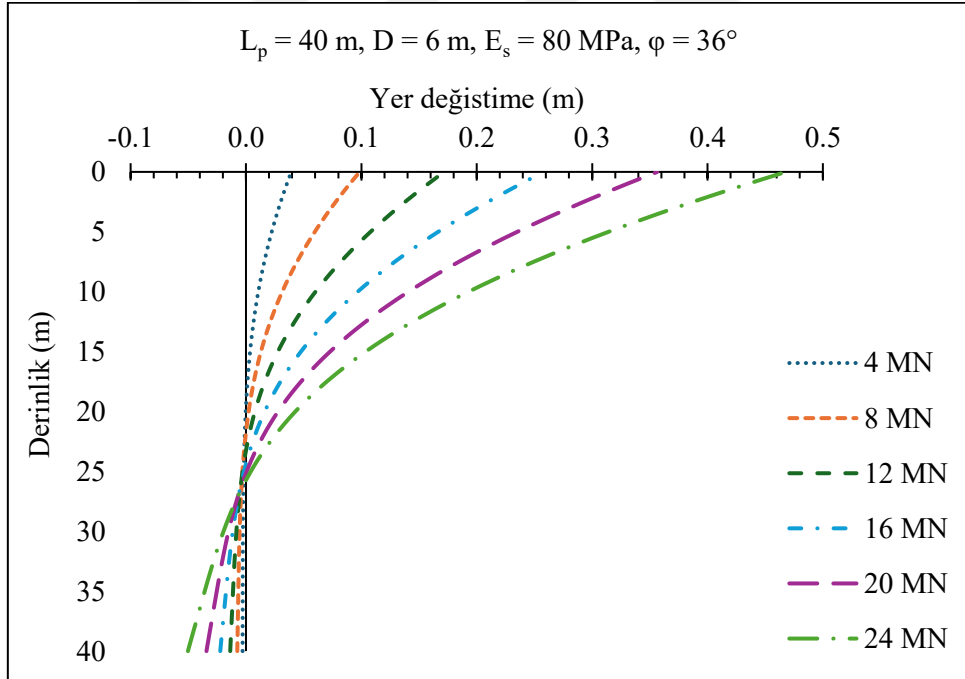
Bu bölümde kademeli yanal yüklerin etkisi altında farklı kazık yapısal konfigürasyonları için gözlenen yer değiştirme-derinlik profilleri sunulmaktadır. Kazık boyları 20m ve 40m, kazık çapları 6m ve 10 m olacak şekilde kıyaslamalar yapılmıştır. Tüm kazık konfigürasyonlarının elastisite modülü 80 MPa ve içsel sürtünme açısı 36° olan kohezyonsuz zeminde gömülü olduğu kabul edilmiştir. Kıyaslamalar Şekil 4.25., Şekil 4.26., Şekil 4.27. ve Şekil 4.28.'de yapılmıştır.



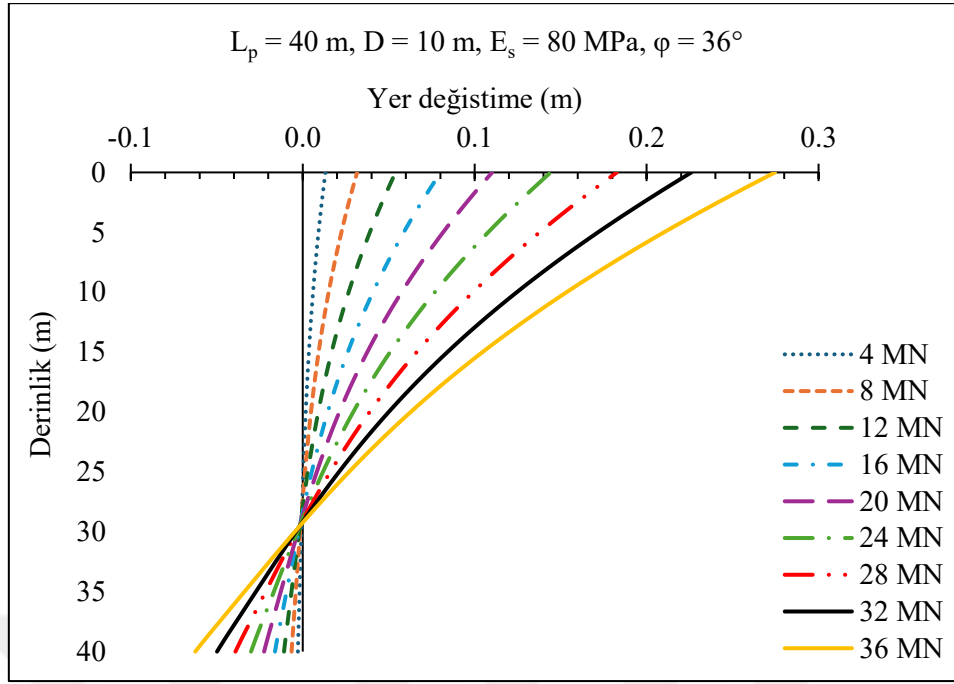
Şekil 4.25. Kademeli yanal yük altında kazık yer değiştirme profilleri.



Şekil 4.26. Kademeli yanal yük altında kazık yer değistirme profilleri.



Şekil 4.27. Kademeli yanal yük altında kazık yer değistirme profilleri.



Şekil 4.28. Kademeli yanal yük altında kazık yer değiştirme profilleri.

Bu bölümde dört farklı kazık tipi türbin temeli konfigürasyonu üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Bu konfigürasyonlar aşağıda sunulmuştur:

- Kısa soket boyuna sahip ve küçük çaplı ($L_p = 20\text{m}$, $D = 6\text{m}$),
- Kısa soket boyuna sahip ve büyük çaplı ($L_p = 20\text{m}$, $D = 10\text{m}$),
- Uzun soket boyuna sahip küçük çaplı ($L_p = 40\text{m}$, $D = 6\text{m}$),
- Uzun soket boyuna sahip ve büyük çaplı ($L_p = 40\text{m}$, $D = 10\text{m}$)

Bu konfigürasyonlar artmakta olan yan yüklere (2MN - 38MN arası) maruz kaldığında, yanal yer değiştirmeler çamur hattından kazık dip ucuna kadar derinlik boyunca belirgin şekilde farklılık göstermektedir. Kısa ve küçük çaplı kazıklar, düşük yüklerde sınırlı yer değiştirmeler sergilemekte, ancak yük arttıkça, özellikle çamur hattında, önemli yer değiştirmeler meydana gelmektedir; bu, sınırlı zemin temas alanının yüksek yükler altında yetersiz direnç sağlamasından kaynaklanmakta olup kısa uzunluk, minimum eğilme ile ağırlıklı olarak rotasyona yol açtığı görülmüştür, yer değiştirme profili sığ derinliklerde keskin bir artış ve yüksek derinlikte hızlı bir azalma sergilemektedir. Buna karşılık, kısa ve büyük çaplı kazıklar, geniş zemin temas alanı sayesinde daha belirgin zemin tepkisine maruz kalmakta, bu nedenle tüm yük seviyelerinde en küçük yer değiştirmeleri göstermektedir; davranış türünde genel olarak rotasyon hakim olmakta, kazık esnekliğine bağlı eğilme ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır. Deplasman profili sığ derinliklerde daha düz bir eğimle, derinlik boyunca minimum azalma ile karakterize olmakta, bu da artan çapın zemin direncini arttırdığını yansıtmaktadır. Uzun ve küçük çaplı kazıklarda, uzun soket boyu nedeniyle daha fazla esneklik oluşmakta ve yüksek yüklerde, özellikle çamur hattına yakın kazık bölgelerinde, büyük yer değiştirmeler gözlenmektedir; eğilme rotasyonu bu noktada baskın davranış türü haline gelmekte, yükün derin zemine aktarılmasıyla destek miktarı

artmakta ve yer değiştirme profili, yük arttıkça belirgin bir eğrilikle, derinlik boyunca kademeli bir azalma sergilemektedir.

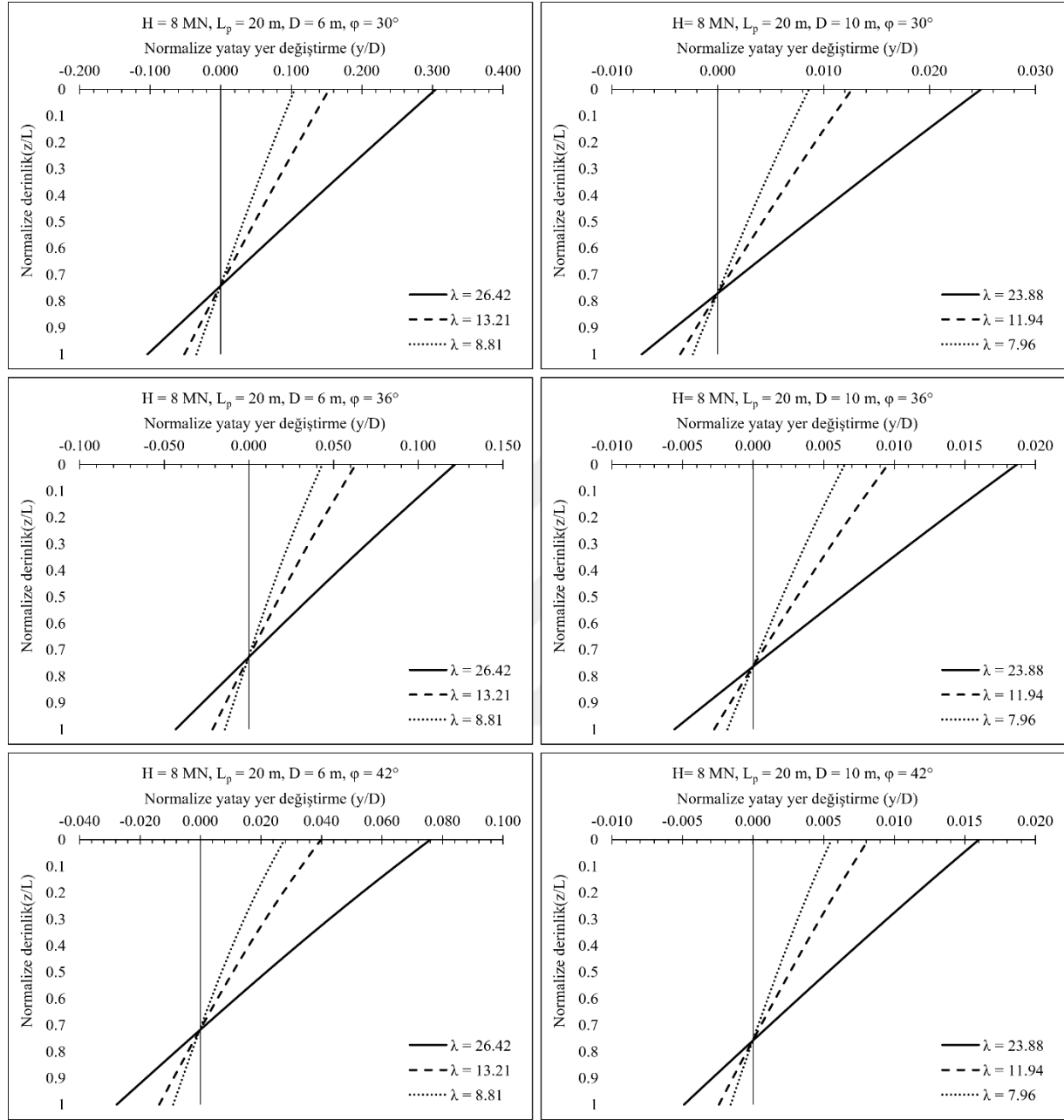
Uzun ve büyük çaplı kazıklar, yüksek yük kapasitesine rağmen, uzun soket boyu ve büyük çapın bileşke etkisiyle önemli yer değiştirmeler göstermekte, kısa ve büyük çaplı kazıklara kıyasla eğilme davranışı ön plana çıkmakta, bununla birlikte rotasyon davranışı daha az gözlenmektedir. Deplasman profili sığ derinliklerde yüksek yer değiştirmelerle başlamakta, derinlik boyunca daha yavaş bir azalma sergilemekte, bu da yüksek yüklerin zemin deformasyonunu yoğunlaştırdığını, büyük çapın direnci artırdığını ve uzunluğun eğilme esnekliğini yükselttiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak, yer değiştirme büyüklüğü tüm konfigürasyonlarda artan yanal yüklerle birlikte artar, ancak büyük çaplı kazık temelleri (özellikle kısa tipte olanlar) rotasyon odaklı daha küçük yer değiştirmeler üretirken, uzun kazık tipi türbin temelleri eğilme nedeniyle daha büyük yer değiştirmelere meyillidir; deplasman profilleri, küçük çaplı kazıklarda sığ derinliklerdeki keskin artışlarla karakterize olmakta, büyük çaplı olanlarda ise daha düz deplasman değişimleri sergilemektedir. Uzun kazıklarda derinlik boyunca kademeli azalmalar görülmekte, bu da zemin-kazık etkileşiminin karmaşıklığını ve yapısal özelliklerin derinlik bağımlı davranış üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır.

Şekil 4.29.'de, soket uzunluğu 20 m olan kısa kazık için normalize edilmiş yanal yer değiştirme ve normalize edilmiş derinlik (z/L) arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu şekillerde yatay eksen normalize edilmiş kazık yer değiştirmesini (y/D), dikey eksen ise normalize edilmiş derinlik(z/L) değerlerini temsil etmektedir.

Şekil 4.29., çapı 6m olan kazık ve çapı 10m olan kazıklar için olmak üzere iki alt grup çatısı altında değerlendirilecektir. Çapı 6m, zemin Young modülü 40MPa ve sürtünme açısı 30° , 36° , 42° olan konfigürasyonlarda, sürtünme açısının artması yer değiştirme büyüklüklerini azalttığı görülmektedir; çünkü yüksek sürtünme açısı, zeminin kayma direncini artırarak daha mukavim bir tepki sağlamaktadır. Yer değiştirme profilleri, çamur hattında ($z/L = 0$) belirgin bir tepe noktası gösterir ve derinlik arttıkça hızla azalır; bu durum, kısa soket boyu nedeniyle minimum eğilme ile rotasyonun baskın olduğu bir davranışı yansıtmaktadır. Çapı 6m, Young modülü sırasıyla 80MPa ve 120MPa olan konfigürasyonlarda ise zemin rijitliğinin artması yer değiştirmeleri daha da azaltmakta; özellikle 120 MPa'lık elastisite modülüne sahip zemin ($\lambda = 8.81$) içinde yer alan kazıklar, en küçük yer değiştirmeleri sergilemektedir. Bu profiller, rotasyon baskın olup sığ derinliklerde hafifçe düzleşir, ancak çamur hattında belirgin bir tepe noktası sergilemektedir.

Çapı 10m olan kazıklarda (Young modülü 40MPa, 80MPa, 120MPa), daha büyük çap nedeniyle zemin temas alanı artmakta ve bu durum, 6m çaplı kazıklara kıyasla yer değiştirmeleri önemli ölçüde azaltmaktadır. Profiller, rotasyonun baskın olduğu benzer bir şekil gösterir, ancak sığ derinliklerde daha düz eğimler ve daha küçük çamur hattı yer değiştirmeleri ile karakterizedir; özellikle 120MPa'lık zemin içinde yer alan kazıklar ($\lambda = 7.96$) en az yer değiştirmeyi göstermektedir. Genel olarak, kısa kazıkların rotasyon odaklı olduğunu, çamur hattında keskin yer değiştirme tepeleri

sergilediğini ve bu tepe değerlerin, daha büyük çap ve yüksek zemin rijitliği ile azaldığı görülmekte olup sürtünme açısının ise ikincil bir etkiye sahip olduğu kanaatine varılmaktadır.

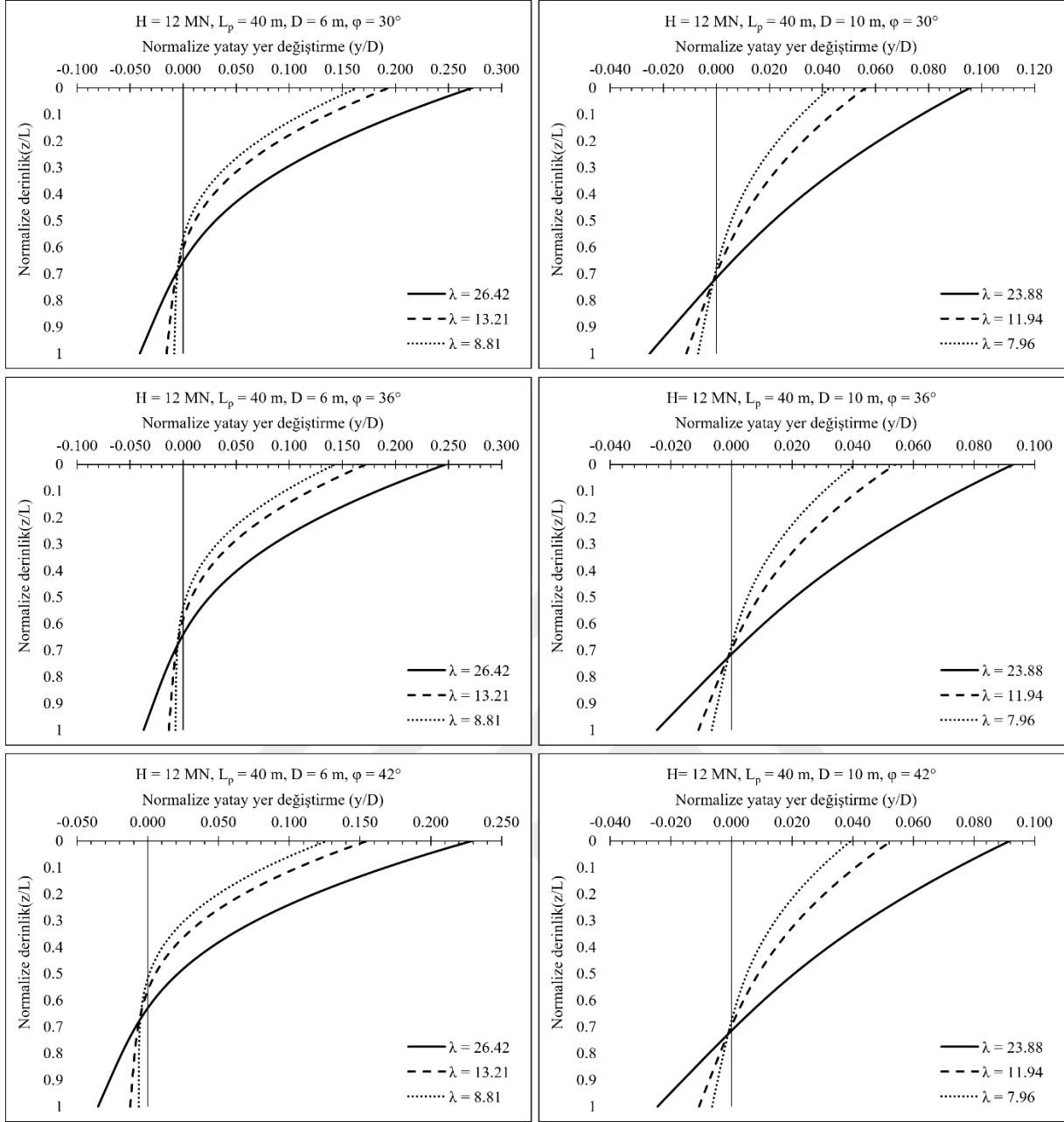


Şekil 4.29. 20m soket boyu ve 6m/10m çaplı kazık tipi türbin temelleri için yanıl yer değıştirme profilleri.

Şekil 4.30.'de, soket uzunluğu 40m olan uzun kazık davranışını ortaya koymak üzere için normalize edilmiş yanıl yer değıştirme ve normalize edilmiş derinlik (z/L) arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu şekil, çapı 6m olan kazık ve çapı 10m olan kazıklar için olmak üzere iki alt grup çatısı altında değerdendirilecektir. Çapı 6m, Young modülü 40MPa ve sürtünme açısı sırasıyla 30° , 36° , 42° olan konfigürasyonlarda, yer değıştirmeler önceki şekilde gösterilen kısa kazık davranışına kıyasla daha büyüktür ve deformasyon profilleri, daha ziyade eğilme odaklı davranış gösteren belirgin bir

eğrilik sergiler. Çamur hattında yüksek yer değiştirmeler gözlenmekte olup bu durum, derinlik boyunca kademeli olarak azalmakta; uzun soket boyu, yükleri daha derine aktarabilmekte ve düşük zemin rijitliği ($\lambda = 26.42$) bu etkiyi güçlendirmektedir. Çapı 6m, Young modülü 80MPa ve 120MPa olan konfigürasyonlarda, zemin rijitliğinin artması yer değiştirmeleri de azaltmakta; 120MPa elastisite modülüne ($\lambda = 8.81$) sahip zemin içerisinde yer alan, küçük çaplı uzun kazıklar arasında en küçük yer değiştirmeler gözlenmektedir. Bu deformasyon profilleri, eğilme odaklı olup daha düşük eğime sahiptir.

Çapı 10 m olan kazıklarda (Young modülü 40MPa, 80MPa, 120MPa), daha büyük çaplar, küçük çaplı kazık davranışına kıyasla yer değiştirmeleri önemli ölçüde azaltmakta; 120MPa elastisite modülüne sahip zeminde yer alan kazıklar ($\lambda = 7.96$), en küçük yer değiştirmeleri sergilemektedir. Bu deplasman profilleri, eğilme davranışını halen vurgulamakta, ancak daha düşük eğrilik ve daha küçük çamur hattı deplasmanları göstermektedir, bu durum büyük çapın ve yüksek zemin rijitliğinin mobilize olan zemin direncini artırdığını yansıtmaktadır. Uzun kazıklarda gözlenen eğilme odaklı davranış, kısa kazıklarda görülen rotasyon odaklı davranışa kıyasla daha düzgün ve kademeli yer değiştirme profilleri ortaya koymakta; çap ve zemin rijitliği, yer değiştirmeleri azaltmada en etkili faktörler olarak değerlendirildikten, sürtünme açısı daha az etki göstermektedir.



Şekil 4.30. 40m soket boyu ve 6m/10m çaplı kazık tipi türbin temelleri için yanal yer değistirme profilleri.

4.2.2. Çamur Hattı Yer Deęistirmelerinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.31.'te, soket uzunluğu 20m olan kısa kazık davranışını ortaya koymak üzere normalleştirilmiş çamur hattı yer değistirmesi ve normalize edilmiş yanal yükler arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu şekillerde yatay eksen normalize edilmiş çamur çizgisi yer değistirmesini (u/D), düşey eksen ise normalize edilmiş yanal yük ((H/H_r)) değerlerini temsil etmektedir. Uygulanan yükler, 0MN ile 50MN arasında değişmektedir ancak bu değerler H_r değeri ile normalize edilmiştir. 20m soket uzunluğu ve 6m çapı olan kısa kazık için H_r değeri 3424 MN, 20m soket uzunluğu ve 10m çapı olan kazık için H_r değeri 23878 MN, 40m soket uzunluğu ve 6m çapı olan kazık için H_r değeri 856 MN ve

40m soket uzunluğu ve 10m çapı olan kazık için H_r değeri 5969 MN olup farklı yükler için H_r değerleri şu şekildedir: $H_r = E_p I_p / L_p^2$. Uygulanan yükler ve normalize edilmiş değerleri Tablo 4.2.'de gösterilmektedir.

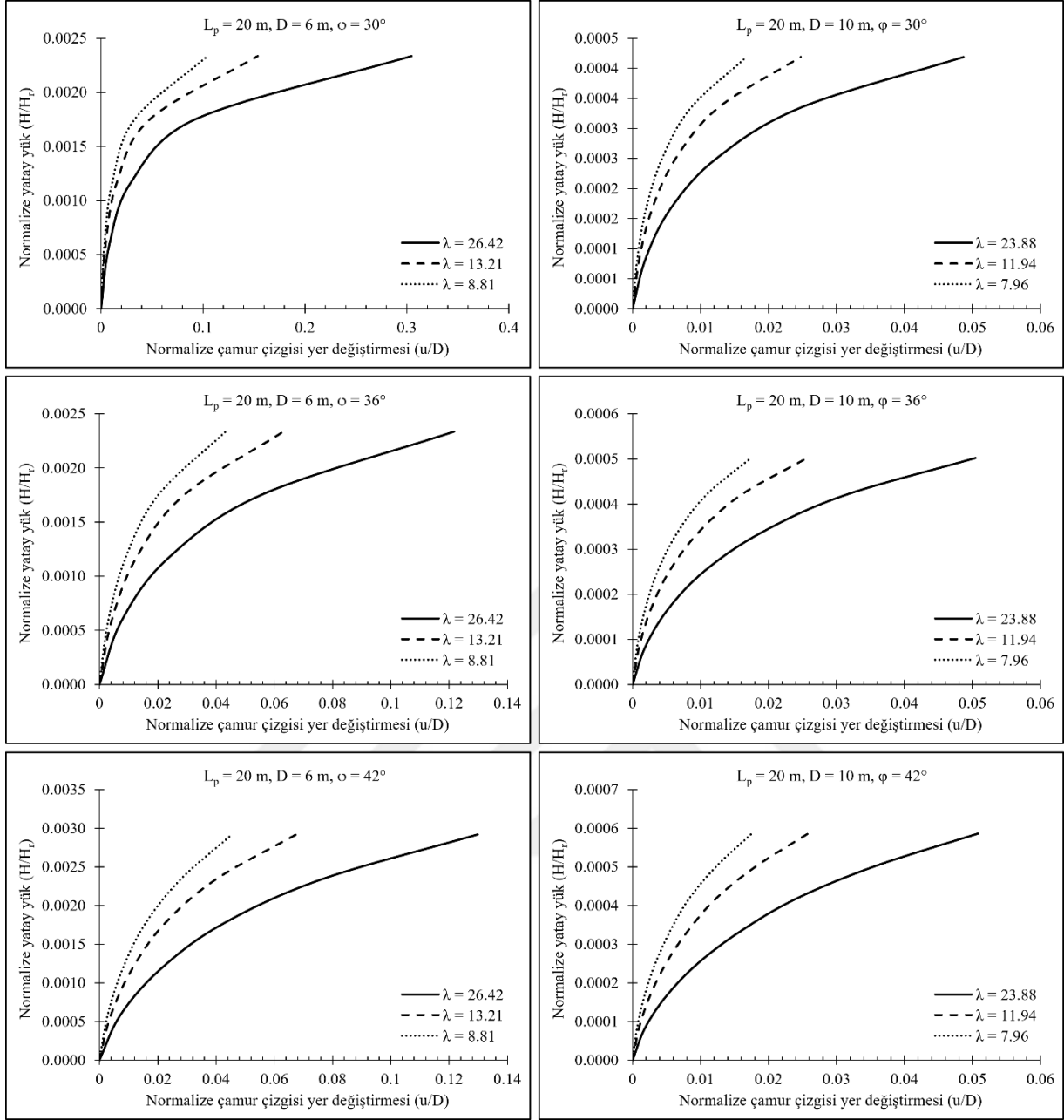
Tablo 4.2. Farklı kazık konfigürasyonları için H/H_r oranları.

Yanal yük H (MN)	20m soket uzunluğu kazık için		40m soket uzunluğu kazık için	
	6m Çapı	10m Çapı	6m Çapı	10m Çapı
	Normalize yanal yük H_r	Normalize yanal yük H_r	Normalize yanal yük H_r	Normalize yanal yük H_r
2	0.0006	0.0001	0.0023	0.0003
4	0.0012	0.0002	0.0047	0.0007
6	0.0018	0.0003	0.0070	0.0010
8	0.0023	0.0003	0.0093	0.0013
10	0.0029	0.0004	0.0117	0.0017
12	0.0035	0.0005	0.0140	0.0020
14	0.0041	0.0006	0.0164	0.0023
16	0.0047	0.0007	0.0187	0.0027
18	0.0053	0.0008	0.0210	0.0030
20	0.0058	0.0008	0.0234	0.0034
22	0.0064	0.0009	0.0257	0.0037
24	0.0070	0.0010	0.0280	0.0040
26	0.0076	0.0011	0.0304	0.0044
28	0.0082	0.0012	0.0327	0.0047
30	0.0088	0.0013	0.0350	0.0050
32	0.0093	0.0013	0.0374	0.0054
34	0.0099	0.0014	0.0397	0.0057
36	0.0105	0.0015	0.0420	0.0060
38	0.0111	0.0016	0.0444	0.0064
40	0.0117	0.0017	0.0467	0.0067
42	0.0123	0.0018	0.0491	0.0070
44	0.0128	0.0018	0.0514	0.0074
46	0.0134	0.0019	0.0537	0.0077
48	0.0140	0.0020	0.0561	0.0080
50	0.0146	0.0021	0.0584	0.0084

Şekil 4.31., çapı 6m olan kazık ve çapı 10m olan kazıklar için olmak üzere iki alt grup çatısı altında değerlendirilecektir. İlk grupta çapı 6m ($\lambda = 26.42, 13.21, 8.81$) ve ikinci grupta çapı 10m ($\lambda = 23.88, 11.94, 7.96$) olan kazık davranışları ele alınmaktadır. Çapı 6m olan ve Young modülü 40MPa ($\lambda = 26.42$) ile içsel sürtünme açısı $30^\circ, 36^\circ, 42^\circ$ olarak değişen zeminlerde gömülü olan kazıklarda, içsel sürtünme açısının artması ($\phi = 30^\circ$ 'den 42° 'ye) çamur hattında gözlenen yer değiştirmeleri azaltmakta olup örnek vermek gerekirse, 4MN yükte ($\phi = 30^\circ$ için 0.0294, $\phi = 42^\circ$ için 0.0207 deplasman meydana gelmektedir. Bu durum, yüksek sürtünme açısının zemin kayma direncini artırarak daha sert tepki

sağladığını gösterir. Yer değiştirmeler, düşük zemin rijitliği nedeniyle yüklerle orantısız artmakta (örneğin, 8MN'de $\phi = 30^\circ$ için 0.3044) ve rotasyon odaklı davranışı yansıtmaktadır. Çapı 6m, Young modülü 80MPa ($\lambda = 13.21$) ve 120MPa ($\lambda = 8.81$) olan zeminlerde yer alan kazıklarda ise, artan zemin rijitliği yer değiştirmeleri önemli ölçüde azaltmakta; 4MN'de $E = 40$ MPa için 0.0294 oluşurken, $E = 120$ MPa için bu değer 0.0110'a düşmektedir. En küçük yer değiştirmeler, $E = 120$ MPa ($\lambda = 8.81$) durumunda gözlenmektedir, çünkü yüksek zemin rijitliği bu konfigürasyonda rotasyonu sınırlamaktadır.

Çapı 10 m olan kazıklarda ($E = 40$ MPa, $\lambda = 23.88$; $E = 80$ MPa, $\lambda = 11.94$; $E = 120$ MPa, $\lambda = 7.96$), daha büyük kazık çapı, zemin temas alanını artırarak yer değiştirmeleri azaltmakta; örneğin, 4MN'de $D = 6$ m, $E = 120$ MPa durumu için 0.0110 deplasman gözlenmekte iken, $D = 10$ m, $E = 120$ MPa için 0.002 değeri görülmektedir. En düşük yer değiştirmeler, $D = 10$ m ve $E = 120$ MPa ($\lambda = 7.96$) durumunda görülmekte olup büyük çap ve yüksek zemin rijitliğinin rotasyonu minimuma indirmesinin bu durumun temel sebebi olduğu düşünülmektedir. Kısa kazıklarda yer değiştirmeler, yüklerle birlikte hızlı şekilde artmakta ve genellikle baskın davranışın rotasyon ağırlıklı olduğu görülmektedir; genel itibarıyla büyük kazık çapı, yüksek zemin rijitliği ve içsel sürtünme açısı çamur hattında gözlenen yer değiştirmeleri azalttığı kanaatine varılmıştır.

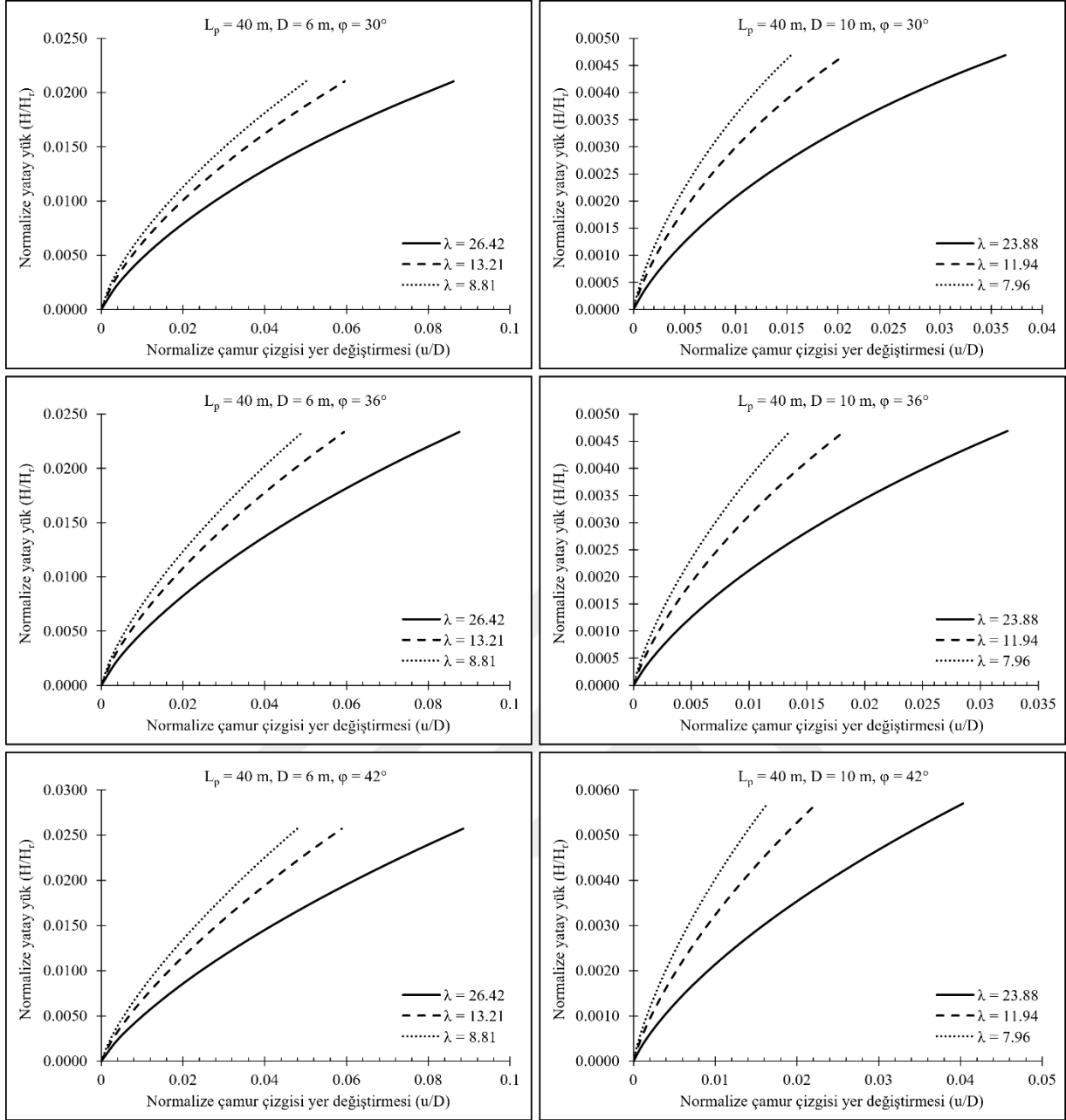


Şekil 4.31. 20m soket boyu ve 6m/10 m çaplara sahip kazıklarda çamur hattı yer değiştirmesi.

Şekil 4.32.'te, soket uzunluğu 40m olan uzun kazık davranışını ortaya koymak üzere normalize edilmiş çamur hattı yer değiştirmesi ve normalize edilmiş yanal yükler arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu şekil, çapı 6m olan kazık ve çapı 10m olan kazıklar için olmak üzere iki alt grup çatısı altında değerlendirilecektir. İlk grupta çapı 6m ($\lambda = 26.42, 13.21, 8.81$) ve ikinci grupta çapı 10m ($\lambda = 23.88, 11.94, 7.96$) olan kazık davranışları ele alınmaktadır. Çapı 6m olan ve Young modülü 40MPa ($\lambda = 26.42$) ile sürtünme açısı $30^\circ, 36^\circ, 42^\circ$ olarak değişen zeminlere gömülü kazıklarda, içsel sürtünme açısının artması çamur hattındaki yer değiştirmeleri bir miktar azaltmakta; örneğin, 8MN'de (normalize değer:0.0023) $\phi = 30^\circ$ içsel sürtünme açısı değeri için 0.004, $\phi = 42^\circ$ değeri için ise 0.003'tür. Ancak, kısa kazıklara kıyasla yer değiştirmeler daha küçüktür (örneğin, 8MN'de (normalize değer: 0.0023) kısa

kazık durumu için 0.3044, uzun kazık durumu için 0.0040), çünkü yüksek soket boyu yükleri derine aktararak eğilme odaklı davranışı teşvik etmektedir.

Çapı 6m, Young modülü 80MPa ($\lambda = 13.21$) ve 120 MPa ($\lambda = 8.81$) olan kazık konfigürasyonlarında, zemin rijitliğinin artması yer değiştirmeleri azaltmakta; 8MN'de (normalize değer:0.0093) $E = 40\text{MPa}$ durumu için 0.018 gözlenmekte iken, $E = 120\text{ MPa}$ durumu için 0.0153 değeri oluşmaktadır. En küçük yer değiştirmeler, $E = 120\text{MPa}$ ($\lambda = 8.81$) durumunda gözlenmekte olup çapı 10 m olan kazıklarda ($E = 40\text{MPa}$, $\lambda = 23.88$; $E = 80\text{MPa}$, $\lambda = 11.94$; $E = 120\text{MPa}$, $\lambda = 7.96$), büyük çaplar, yer değiştirmeleri daha da azaltmakta; örneğin, 8MN'de (normalize değer:0.0093) $D = 6\text{m}$, $E = 120\text{MPa}$ durumu için 0.0153 gözlenmekte iken, $D = 10\text{ m}$, $E = 120\text{ MPa}$ durumu için 0.00247 oluşmaktadır. En düşük yer değiştirmeler, $D = 10\text{m}$ ve $E = 120\text{MPa}$ ($\lambda = 7.96$) durumu için görülmekte, çünkü büyük çap ve yüksek zemin rijitliği eğilme direncini artırmaktadır. Uzun kazıklarda yer değiştirmeler, kısa kazıklara kıyasla daha yavaş artmakta ve eğilme baskın davranış sergilemektedir; büyük çap ve zemin rijitliği esas azaltıcı faktörler olarak görülmekte olup, zemin içsel sürtünme açısının ikincil bir rol oynadığı söylenebilir.



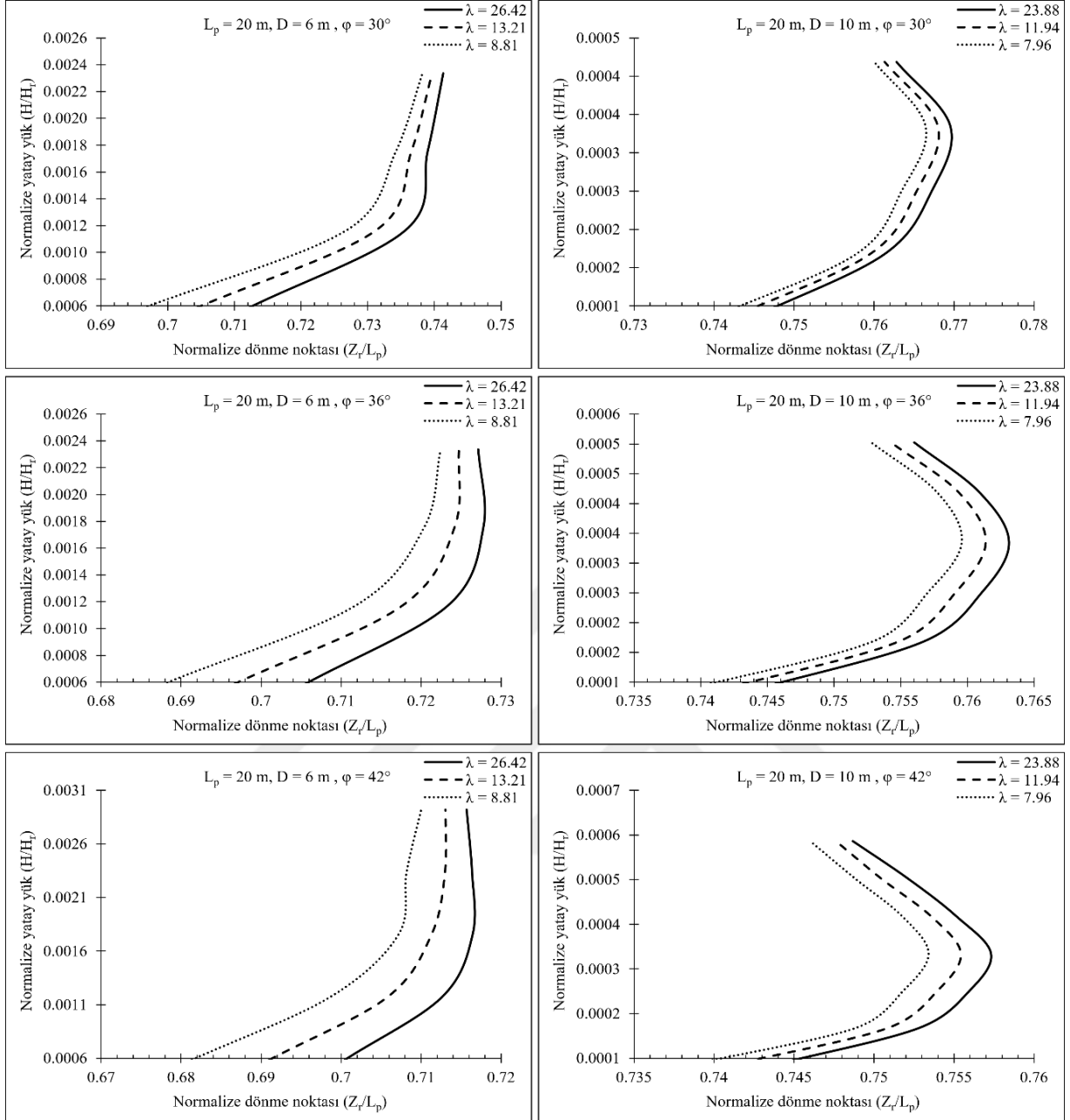
Şekil 4.32. 40m soket boyu ve 6m/10 m çaplara sahip kazıklarda çamur hattı yer değiştirmesi.

4.2.3. Kazık Dönme Noktası ile İlgili Değerlendirmeler

Şekil 4.33.'da soket boyu 20m olan kısa kazıklar için normalize edilmiş dönme noktası (Z_r/L_p) ile normalize edilmiş yanal yük (H/H_r) arasındaki ilişkiler sunulmaktadır. Bu şekillerde yatay eksen normalize edilmiş dönme noktasını, düşey eksen ise normalize edilmiş yanal yük (H/H_r) değerlerini temsil etmektedir. Z_r değeri dönme noktasının, çamur hattından ölçülmüş dönme noktası pozisyonu, L_p ise kazık boyudur. Normalize edilmiş dönme noktası tayininde kazık çamur hattından itibaren belirlenen dönme (rotasyon) noktası (Z_r) mesafesi L_p değerine bölünerek biçimsizleştirilmiştir.

Şekil 4.33., çapı 6m ($\lambda = 26.42, 13.21, 8.81$) ve 10m ($\lambda = 23.88, 11.94, 7.96$) olan kazıklar için olmak üzere iki alt grup çatısı altında değerlendirilecektir. Çapı 6m olan kazıkların Young modülü 40MPa ($\lambda = 26.42$) ile içsel sürtünme açısı $30^\circ, 36^\circ, 42^\circ$ olan zemine gömülü olması durumunda, içsel sürtünme açısının artması ($\phi = 30^\circ$ 'dan 42° 'ye) dönme noktasını bir miktar yükseltmektedir; örneğin, $H/H_r = 0.0012$ 'de $\phi = 30^\circ$ için $Z_r/L_p = 0.7357$, $\phi = 42^\circ$ için 0.7126'dır. Bu durum, yüksek içsel sürtünme açısının zemin direncini artırarak dönme merkezini yüzeye yaklaştırdığını gösterir. Dönme noktaları, yük arttıkça bir miktar yukarı hareket ederek (örneğin, $\phi = 30^\circ$ için $H/H_r = 0.0006$ 'da 0.7121, $H/H_r = 0.0023$ 'te 0.7413), rotasyon baskın davranış nedeniyle kazık ucuna yaklaşmaktadır. Çapı 6m olan kazıkların, Young modülü 80MPa ($\lambda = 13.21$) ve 120MPa ($\lambda = 8.81$) olarak değişen zeminlerde yer alması durumunda ise, zemin rijitliğinin artması dönme noktasını daha da yukarı kaydırmakta; $H/H_r = 0.0012$ 'de $E = 40$ MPa için $Z_r/L_p = 0.7357$, $E = 120$ MPa için ise 0.7269 olarak gözlenmektedir. En yüksek dönme noktaları, $E = 120$ MPa gibi yüksek elastisite modülüne sahip zeminlerde yer alan kazıklarda $\lambda = 8.81$ durumunda gözlenmektedir. Bu durumun sebebinin yüksek zemin rijitliğinin kazık rotasyonunu kısıtlaması olduğu düşünülmektedir.

Çapı 10 m olan kazık tipi türbin temellerinde ($E = 40$ MPa, $\lambda = 23.88$; $E = 80$ MPa, $\lambda = 11.94$; $E = 120$ MPa, $\lambda = 7.96$ durumlarında), daha büyük kazık çaplarının dönme noktasını yukarı kaydırmakta olduğu görülmektedir; örneğin, $H/H_r = 0.0006$ 'da $D = 6$ m, $E = 120$ MPa konfigürasyonu için $Z_r/L_p = 0.6963$, $D = 10$ m, $E = 120$ MPa, $H/H_r = 0.0004$ 'te konfigürasyonu için ise 0.7600'dir. En yüksek dönme noktaları, $D = 10$ m çaplı kazıklarda ve zemin elastisite modülü $E = 120$ MPa ($\lambda = 7.96$) durumunda görülmekte olup bu durumun sebebinin büyük çap ve yüksek zemin rijitliğinin zemin temas kuvvetlerini artırarak dönme merkezini yüzeye yaklaştırması olduğu düşünülmektedir. Kısa kazıklarda dönme noktaları, uygulanan yatay yüklerle birlikte bir miktar yukarı hareket etmekte olup ve davranış rotasyon ağırlıklı gerçekleşmektedir; büyük çap, yüksek zemin rijitliği ve zemin içsel sürtünme açısı dönme noktasını çamur hattına yaklaştırmaktadır.

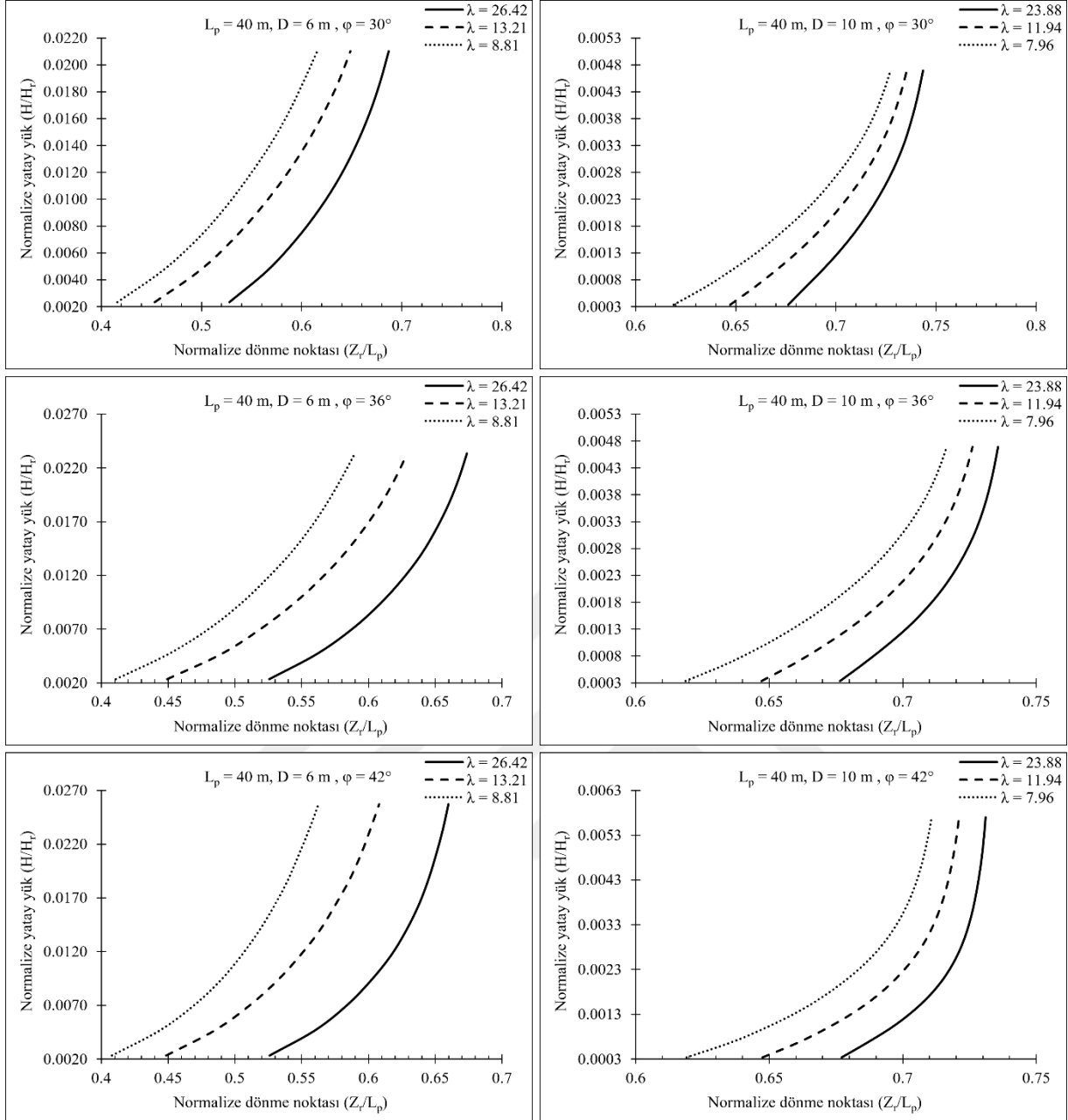


Şekil 4.33. 20 m soket boyu ve 6m/10 m çaplardaki kazıklarda dönme noktası.

Şekil 4.34.'de sunulmakta olan ikinci altı kazık konfigürasyonu, soket boyu 40m olan uzun kazık tipi türbin temeller için normalize edilmiş dönme noktasını incelenmekte olup çapı 6m ($\lambda = 26.42$, 13.21, 8.81) ve çapı 10m ($\lambda = 23.88$, 11.94, 7.96) olarak farklı kazık çaplarına göre iki guruba ayrılmıştır. Çapı 6m, Zemin elastisite modülü 40MPa ($\lambda = 26.42$) ve sürtünme açısı 30°, 36°, 42° olan konfigürasyonlarda, zemin içsel sürtünme açısının artmasının dönme noktasını yukarı kaydırıldığı görülmektedir; örneğin, $H/H_r = 0.0100$ 'de $\phi = 30^\circ$ için $Z_r/L_p = 0.6210$, $\phi = 42^\circ$ için 0.6071'dur. Ancak, kısa kazıklara kıyasla dönme noktaları önemli mertebede daha yüksektir (örneğin, $H/H_r = 0.0012$ 'de kısa kazık için $Z_r/L_p = 0.7357$, $H/H_r = 0.0023$ 'te uzun kazık için ise 0.5278). Uzun soket boyunun eğilme baskın davranışı teşvik etmekte olduğu ve dönme merkezinin kazık ucundan uzaklaştığı anlaşılmaktadır.

Çapı 6m, zemin Young modülü 80MPa ($\lambda = 13.21$) ve 120MPa ($\lambda = 8.81$) olan konfigürasyonlarda, zemin rijitliğinin artması dönme noktasını yukarı ötelemektedir; $H/H_r = 0.012$ 'de $E = 40$ MPa için $Z_r/L_p = 0.6392$, $E = 120$ MPa için 0.5475'tir. En yüksek dönme noktaları, zemin elastisite modülü $E = 120$ MPa ($\lambda = 8.81$) durumunda gözlenmektedir.

Çapı 10m olan kazıklarda ($E = 40$ MPa, $\lambda = 23.88$; $E = 80$ MPa, $\lambda = 11.94$; $E = 120$ MPa, $\lambda = 7.96$), büyük kazık çapının dönme noktasını daha da yukarı ötelediği dikkate alınmalıdır; örneğin, $H/H_r = 0.0023$ 'te $D = 6$ m, $E = 120$ MPa konfigürasyonu için $Z_r/L_p = 0.4159$, $D = 10$ m, $E = 120$ MPa konfigürasyonu için 0.6913'tur. En yüksek dönme noktaları, $D = 10$ m ve $E = 120$ MPa ($\lambda = 7.96$) durumunda görülmekte olup büyük çap ve yüksek zemin rijitliğinin eğilme direncini artırarak dönme merkezini yüzeye yaklaştırdığı kanaatine varılmaktadır. Uzun kazıklarda dönme noktaları, kısa kazıklara kıyasla daha yüksekte yer alır ve yüklerle birlikte daha fazla yukarı ötelenmektedir; büyük çap ve zemin rijitliğinin kazık dönme noktasının oluşumunda en önemli faktörler olduğu, zemin içsel sürtünme açısının ise ikincil bir rol oynadığı anlaşılmaktadır.



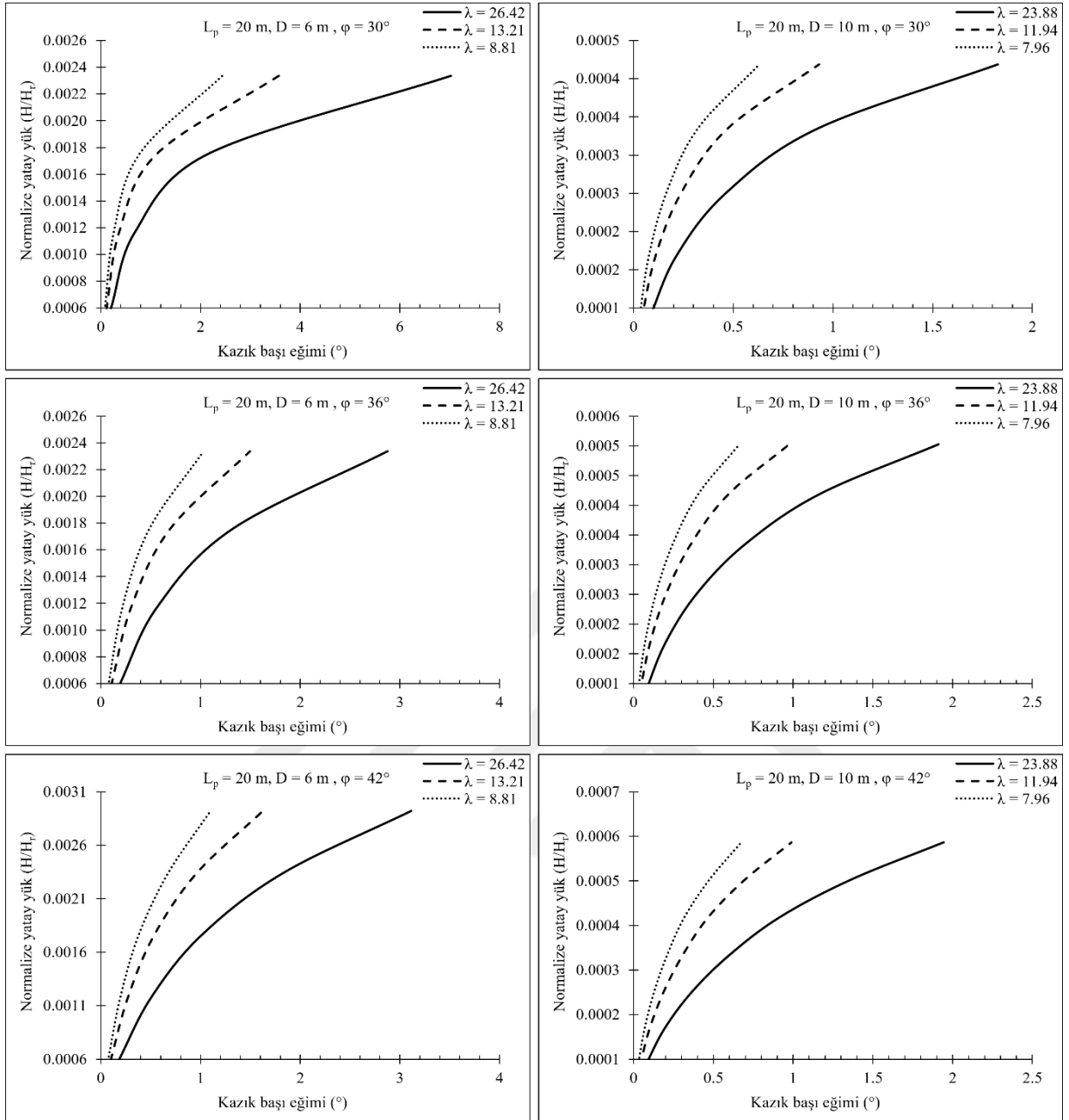
Şekil 4.34. 40m soket boyu ve 6m/10m çaplarda kazıklar için dönme noktası.

4.2.4. Kazık Başı Eğimi

Şekil 4.35.'de soket boyu 20m olan kısa kazıklar için kazık başı eğimi (derece cinsinden) ile normalize edilmiş yanıl yük (H/H_r) arasındaki ilişkiler sunulmaktadır. Bu şekillerde yatay eksen kazık başı eğimini, düşey eksen ise normalize edilmiş yanıl yük (H/H_r) değerlerini temsil etmektedir. İlgili şekil çapı 6m ($\lambda = 26.42, 13.21, 8.81$) ve çapı 10m ($\lambda = 23.88, 11.94, 7.96$) olarak farklı kazık çaplarına göre iki guruba ayrılmıştır. Çapı 6 m, zemin Young modülü 40MPa ($\lambda = 26.42$) ve zemin içsel sürtünme açısı $30^\circ, 36^\circ, 42^\circ$ olan konfigürasyonlarda, içsel sürtünme açısının artması ($\phi = 30^\circ$ 'dan 42° 'ye) kazık başı eğimini azaltmaktadır; örneğin, $H/H_r = 0.0023$ yatay yüklemesinde $\phi = 30^\circ$ için eğim 7.0229° , $\phi =$

42° için ise 1.8219° 'dur. Bu durum, yüksek sürtünme açısının zemin direncini artırarak rotasyonu azalttığını gösterir. Kazık başı eğimleri, yük arttıkça hızlıca artar (örneğin, $\phi = 30^\circ$ için $H/H_r = 0.0006$ 'da 0.1927° , $H/H_r = 0.0023$ 'te ise 7.0229°), rotasyon odaklı davranış baskındır. Çapı 6m, Young modülü 80MPa ($\lambda = 13.21$) ve 120MPa ($\lambda = 8.81$) olan konfigürasyonlarda, zemin rijitliğinin artması eğimi önemli ölçüde azaltır; $H/H_r = 0.0023$ 'te $E = 40$ MPa için 7.0229° , $E = 120$ MPa için 2.4340° değerleri gözlenmiştir. En düşük kazık başı eğimleri, zemin elastisite modülü $E = 120$ MPa ($\lambda = 8.81$) durumunda gözlenmekte olup yüksek zemin rijitliğinin rotasyonu sınırlamasına bağlanabilir.

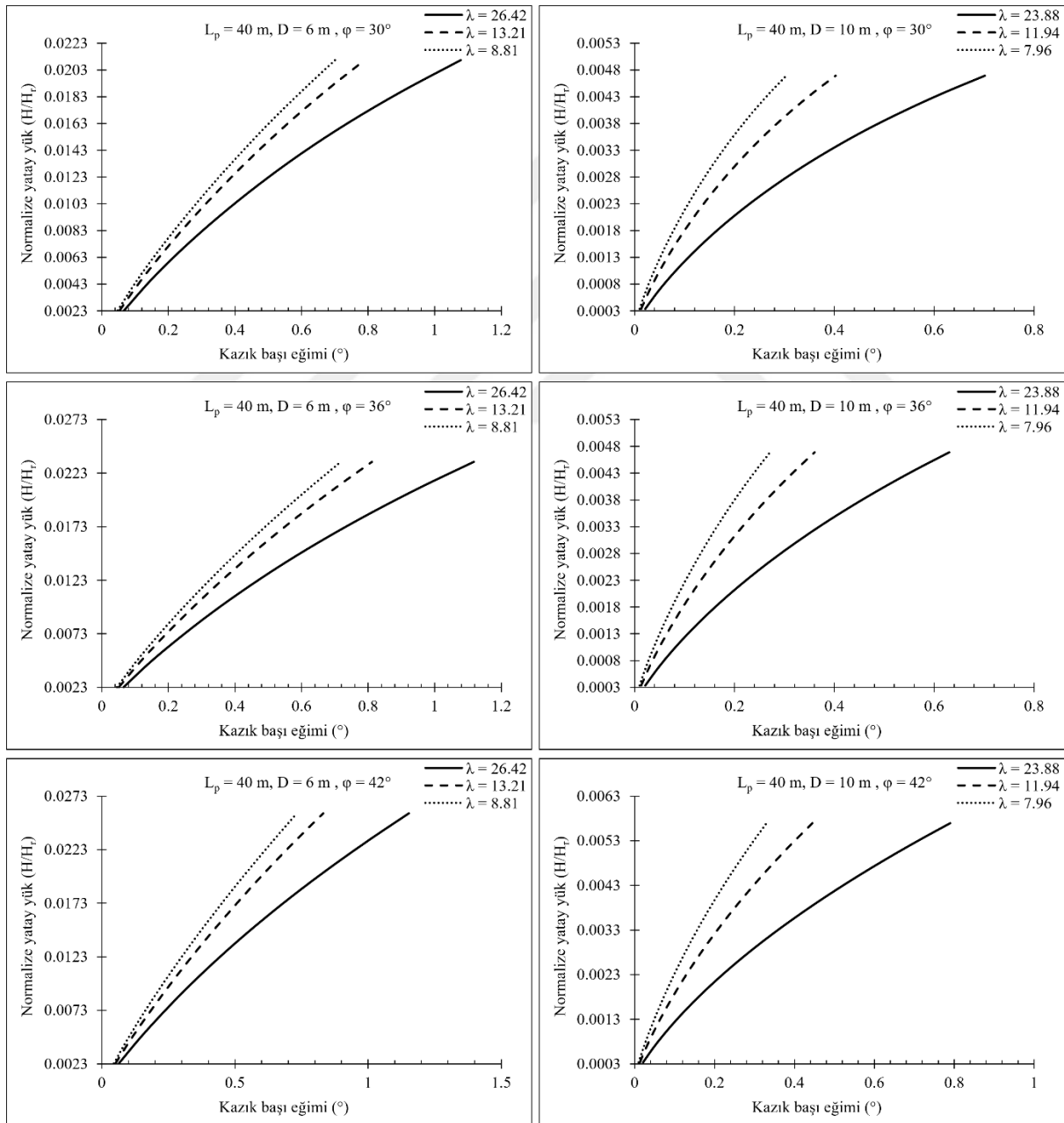
Çapı 10m olan kazıklarda ($E = 40$ MPa, $\lambda = 23.88$; $E = 80$ MPa, $\lambda = 11.94$; $E = 120$ MPa, $\lambda = 7.96$), daha büyük kazık çapları eğimleri azaltır; örneğin, $H/H_r = 0.0006$ 'da $D = 6$ m, $E = 120$ MPa konfigürasyonu için 0.0793° , $H/H_r = 0.0004$ 'te, $D = 10$ m, $E = 120$ MPa konfigürasyonu için 0.63° değerleri gözlenmektedir. En düşük eğimler, $D = 10$ m ve $E = 120$ MPa ($\lambda = 7.96$) konfigürasyonunda görülmekte olup bu durum büyük kazık çapı ve yüksek zemin rijitliğinin rotasyonu düşürmesine bağlanabilir. Kısa kazıklarda eğimler, yüklerle birlikte hızlı şekilde artmakta ve rotasyon baskın gerçekleşmektedir; büyük çap, yüksek zemin rijitliği ve zemin içsel sürtünme açısı kazık başı eğimlerini azaltmaktadır.



Şekil 4.35. 20m soket boyu ve 6m/10m çapa sahip kazıklarda kazık başı eğimi.

Şekil 4.36.'da bu sefer soket boyu 40m olan kısa kazıklar için kazık başı eğimi (derece cinsinden) ile normalize edilmiş yanal yük (H/H_r) arasındaki ilişkiler sunulmaktadır. Çapı 6m, zemin Young modülü 40MPa ($\lambda = 26.42$) ve zemin içsel sürtünme açısı 30° , 36° , 42° olan konfigürasyonlarda, sürtünme açısının artması kazık başı eğimini bir miktar azaltmaktadır; örneğin, $H/H_r = 0.0093$ 'te $\phi = 30^\circ$ için eğim 0.3516° , $\phi = 42^\circ$ için 0.3190° olarak gözlenmiştir. Ancak, kısa kazıklara kıyasla eğimler daha küçük gerçekleşmektedir (örneğin, $H/H_r = 0.0023$ 'te kısa kazıklar için 7.0229° , uzun kazıklar için 0.064°), bu durum uzun soket boyunun eğilme odaklı davranışı teşvik etmesi ve yüklerin derine aktarılmasına olanak sağlamasıyla açıklanabilir. Çapı 6m, zemin Young modülü 80MPa ($\lambda = 13.21$) ve 120MPa ($\lambda = 8.81$) olan konfigürasyonlarda, zemin rijitliğinin artması kazık başı eğimini azaltmakta;

$H/H_r = 0.0093$ 'te $E = 40\text{MPa}$ için 0.3516° , $E = 120\text{MPa}$ için 0.2510° değerleri gözlenmektedir. En düşük eğimler, $E = 120\text{MPa}$ ($\lambda = 8.81$) durumunda gözlenmektedir. Çapı 10m olan kazıklarda ($E = 40\text{MPa}$, $\lambda = 23.88$; $E = 80\text{MPa}$, $\lambda = 11.94$; $E = 120\text{MPa}$, $\lambda = 7.96$), gözlenen eğim daha da artmakta; örneğin, $H/H_r = 0.0023$ 'te $D = 6\text{m}$, $E = 120\text{MPa}$ için 0.0476° , $D = 10\text{m}$, $E = 120\text{MPa}$ için 0.1103° değerleri gözlenmektedir. En düşük eğimler, $D = 10\text{m}$ ve $E = 120\text{MPa}$ ($\lambda = 7.96$) durumunda görülmekte olup bu durum büyük kazık çapı ve yüksek zemin rijitliğinin kazık eğilme direncini artırmasıyla açıklanabilir. Uzun kazıklarda eğimler, kısa kazıklara kıyasla daha yavaş artmakta ve eğilme baskın davranış sergilemektedir; büyük kazık çapı ve zemin rijitliği birincil azaltıcı faktörler olarak değerlendirilmekte olup zeminin içsel sürtünme açısının ise ikincil bir rol oynadığı kanaatine varılmıştır.

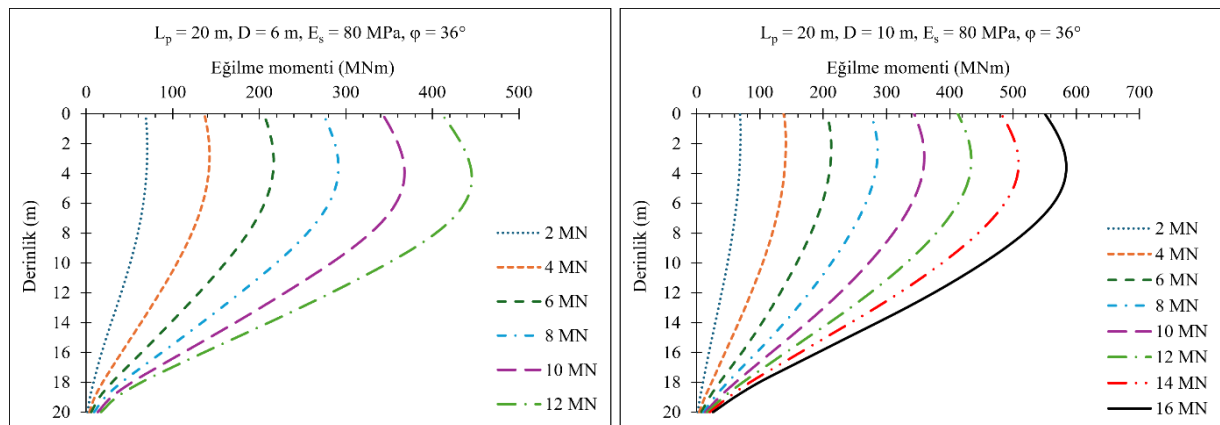


Şekil 4.36. 40m soket boyu ve 6m/10m çapa sahip kazıklarda kazık başı eğimi.

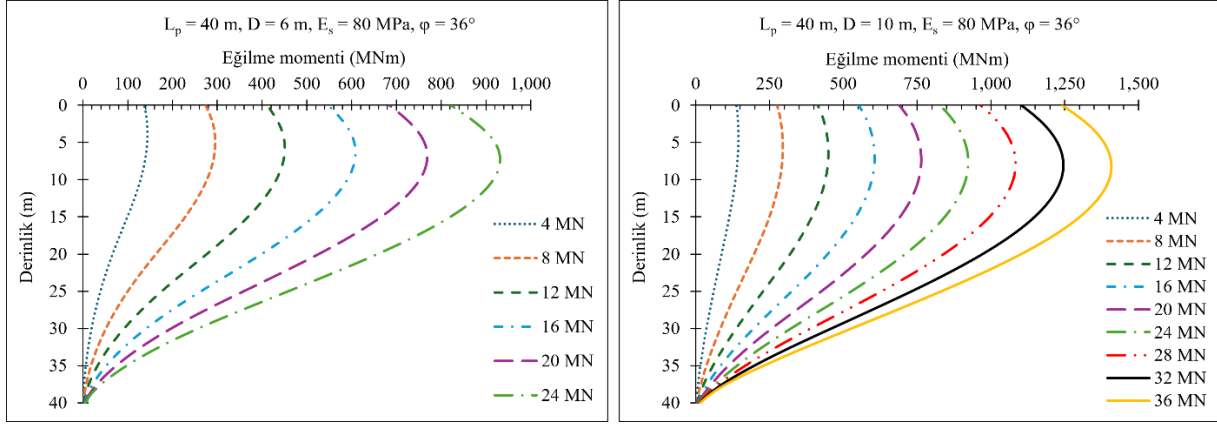
4.2.5. Eğilme Momenti

Şekil 4.37. ve Şekil 4.38.'de dört farklı kazık tipi türbin temeli konfigürasyonu için, sabit zemin özelliklerine (Young modülü $E = 80\text{MPa}$, içsel sürtünme açısı $\phi = 36^\circ$) sahip bir zemin ortamında, kazık yapısal özelliklerdeki değişimlerin (kazık çapı $D = 6\text{m}$ veya 10m ve soket boyu $L_p = 20\text{m}$ veya 40m) eğilme momenti davranışına etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, kısa soket boyuna sahip konfigürasyonlarda ($L_p = 20\text{m}$), özellikle $D = 6\text{m}$ olan durumda, eğilme momentlerinin 4m derinlikte ($0.2L_p$) en yüksek değerlerine ulaştığını göstermektedir; örneğin, 12MN yükte en yüksek moment yaklaşık 445MN-m olarak kaydedilmiştir. Aynı gömülü uzunlukta $D = 10\text{m}$ olan konfigürasyonda momentlerin daha düşük olduğu görülmüş olup 12MN yükte yaklaşık 434MN-m olarak ölçülmüştür; bu, daha büyük çapın kazık rijitliğini artırarak eğilme momentlerini de beraberinde azalttığını ortaya koymaktadır.

Uzun gömülü uzunluğa sahip konfigürasyonlarda ($L_p = 40\text{m}$), momentler daha düşük gerçekleşmekte olup, 7m derinlikte ($0.25L_p$) en yüksek değerlerine ulaşmaktadır; $D = 10\text{m}$ konfigürasyonu, $D = 6\text{m}$ 'ye kıyasla daha düşük momentler sergilemektedir (örneğin, 20MN yükte 7m 'de 769MN-m 'ye karşı 762MN-m). Analizler, momentlerin yanal yüklerle birlikte doğrusal olmayan bir artış sergilediğini ve kısa kazıklarda bu artışın daha belirgin olduğunu göstermektedir; bu durum, kısa kazıklarda rotasyon türü davranışın daha baskın olduğunu doğrulamaktadır. En düşük momentler, $D = 10\text{m}$ ve $L_p = 40\text{m}$ konfigürasyonunda gözlenmiş olup bu durum yapısal rijitlik ve gömülü uzunluğun momentleri azaltmadaki kritik rolünü vurgulamaktadır. Bu bulgular, sabit zemin koşullarında kazık çapı ve gömülü uzunluğun eğilme momenti davranışını kontrol eden temel parametreler olduğunu ve büyük çap ile uzun gömülü uzunluğun momentleri önemli ölçüde azalttığını açıkça ortaya koymaktadır. Tüm konfigürasyonlarda en yüksek eğilme momentinin $0.2L_p$ ile ($0.25L_p$ derinlikler de gözlemlendiği) söylenebilir.



Şekil 4.37. Kademeli yanal yük altında 20m uzunluğunda kazıklar için eğilme momenti profilleri.



Şekil 4.38. Kademeli yanal yük altında 40m uzunluğunda kazıklar için eğilme momenti profilleri.

Şekil 4.39., Şekil 4.40. ve Şekil 4.41.'te farklı yapısal konfigürasyonlara sahip Kazık tipi türbin temellerinin (kazık çapı 6m soket boyu 20m ($\lambda = 26.4, 13.2, 8.8$) ve kazık çapı 10m, soket boyu 40m ($\lambda = 23.8, 11.9, 7.9$), 8MN ile 14MN arasında değişen yanal yüklere maruz kaldıklarında, üç farklı zemin içsel sürtünme açısına ($30^\circ, 36^\circ, 42^\circ$) sahip zeminlerde normalize edilmiş eğilme momenti davranışının analizi, zemin özelliklerinin ve kazık eğilme rijitliğinin moment dağılımı üzerindeki önemli etkilerini ortaya koymaktadır.

İlgili şekillerde yatay eksen normalize edilmiş eğilme momentleri, düşey eksen ise normalize edilmiş derinlik (z/L) değerlerini ifade etmektedir. Eğilme momentleri kazık boyunca gözlenen gerçek eğilme momenti değerleri, $M^* = M/(E_p I_p / D)$ ifadesiyle normalize edilmiş olup burada E_p kazık elastisite modülü, I_p kazık atalet katsayısı ve D kazık çapını temsil etmektedir. Farklı kazık yapısal parametrelerine bağlı olarak moment değerlerinin normalizasyonunda kullanılan değerler Tablo 5.3.'de sunulmuştur.

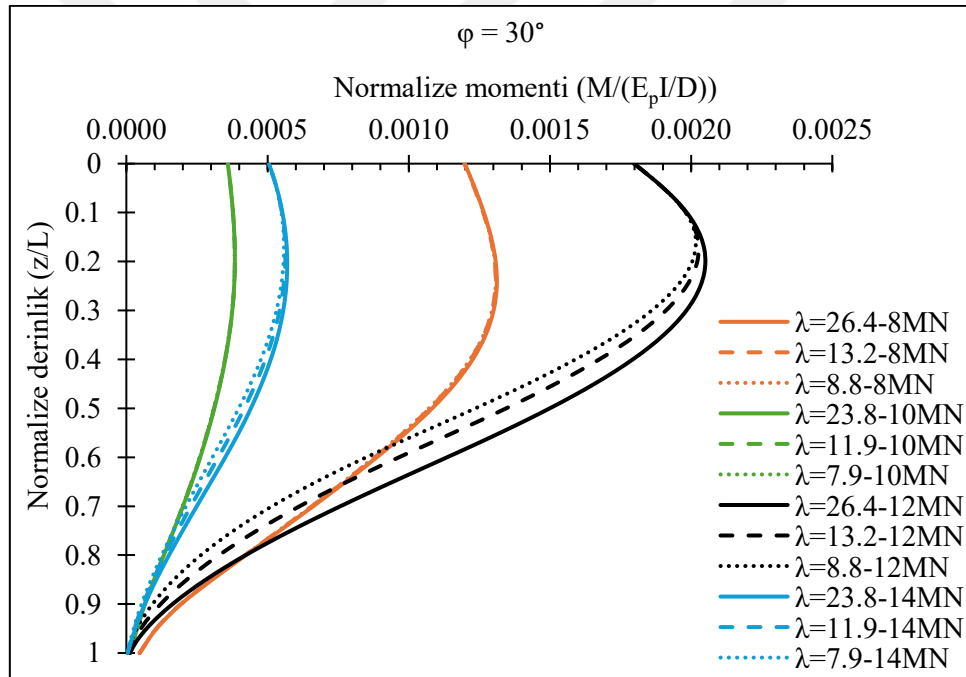
Tablo 4.3. Moment normalizasyon parametreleri.

Kazık çapı D (m)	Kazık et kalınlığı (m)	Kazık elastisite modülü E_p (GPa)	Kazık atalet katsayısı I_p (m ⁴)	$E_p I_p / D$ oranı
6	0.08	210	6.52	2.28E+11
10	0.12	210	45.48	9.55E+11

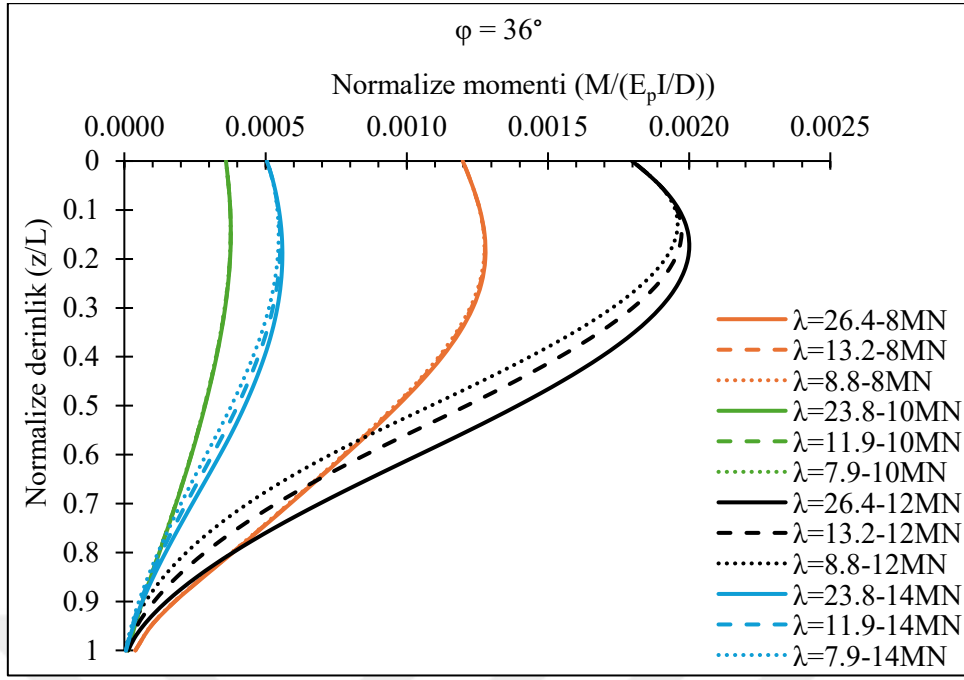
İlgili şekiller incelendiğinde kısa kazıklarda (20m soket boyu), eğilme momentlerinin yaklaşık 0.25 normalize derinlikte (5m) en yüksek değerlerine ulaştığı görülmektedir; 8MN yükte, sırasıyla $\lambda = 26.4, 13.2$ ve 8.8 rölatif eğilme rijitliği değerleri için yaklaşık 0.00131, 0.00130 ve 0.00130 normalize moment değerleri gözlenmiştir, bu durumun sebebi olarak rotasyon baskın davranış ve yüksek λ değerlerinin sağladığı artan eğilme rijitliği nedeniyle zemin içsel sürtünme açısına gösterilen düşük duyarlılık olarak görülmektedir.

Buna karşılık, uzun kazıklarda (40m soket boyu), en yüksek normalize momentler 0.175–0.225 derinlikte (7–9 m) ortaya çıkmakta olup, λ değerleri azaldıkça (23.8’den 7.9’a) momentler 0.000569’dan 0.000534’e düşmektedir; bu durum, azalan λ değerlerinin kazıkların zemin direncinde azalmaya yol açmasıyla birlikte en yüksek moment değerlerini düşürdüğünü göstermektedir. Grafiksel eğilimler, yatay yük artışıyla momentlerde doğrusal olmayan bir yükseliş ortaya koymakta, bu artış kısa kazıklarda daha belirgin olmaktadır.

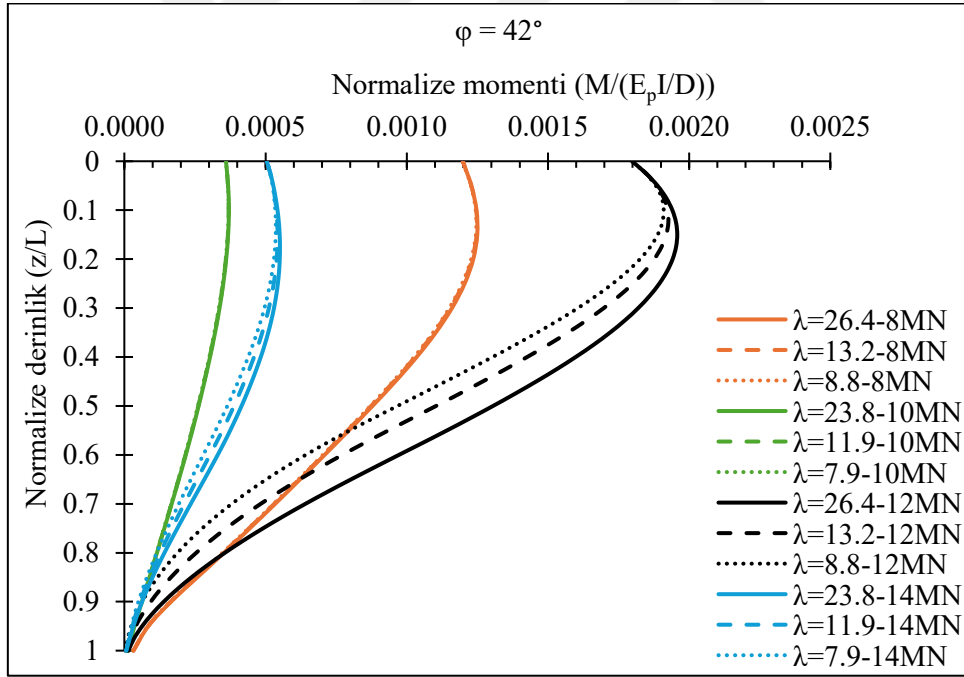
Rölatif eğilme rijitliği λ ve zemin içsel sürtünme açılarında oluşan azalmalar, uzun kazıklarda daha derin seviyelerde en yüksek moment değerlerinin gözlenmesine yol açmaktadır. Büyüyen kazık çapları, özellikle uzun kazıklarda, daha yüksek eğilme rijitliği (λ) ile birleştiğinde tutarlı bir şekilde daha düşük normalize momentler üretmekte, bu da zemin içsel sürtünme açısı, yapısal rijitlik ve gömülü uzunluk arasındaki kritik etkileşimin, çeşitli zemin koşullarında kazık tipi türbin temeli tasarımlarının optimize edilebilmesine olanak sağlayarak yapısal stabilitenin artırılmasında önemli bir rol oynadığını vurgulamaktadır.



Şekil 4.39. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık boyunca eğilme momenti dağılımları ($\phi = 30^\circ$).



Şekil 4.40. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık boyunca eğilme momenti dağılımları ($\phi = 36^\circ$).

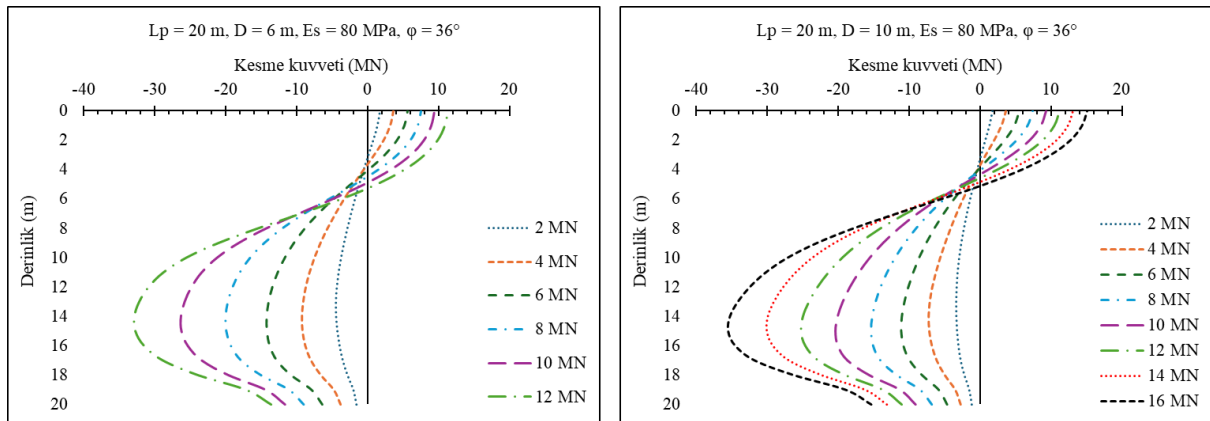


Şekil 4.41. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık boyunca eğilme momenti dağılımları ($\phi = 42^\circ$).

4.2.6. Kesme Kuvveti

Şekil 4.42.'de sunulan 20m soket boyuna sahip olan kazıklarda kesme kuvveti profilleri, 2MN'den 16MN'ye kadar değişen yanal yükler altında yapısal tepkiyi ortaya koymaktadır. 6m çaplı kazık tipi türbin temelleri ($L_p = 20\text{m}$, $D = 6\text{m}$, $E_s = 80\text{MPa}$, $\phi = 36^\circ$) için kesme kuvveti, yaklaşık 4m derinlikte sıfıra yaklaşmakta ve en yüksek değerine yaklaşık 14m derinlikte ($0.7L_p$) ulaşmaktadır; bu durum, bu derinlikte eğilme davranışından ziyade dönme davranışının baskın olduğunu göstermektedir. Bu eğilim, yük aralığı boyunca tutarlı olup, uygulanan yük arttıkça kesme kuvvetleri 2MN'den 10MN'ye yükselmektedir.

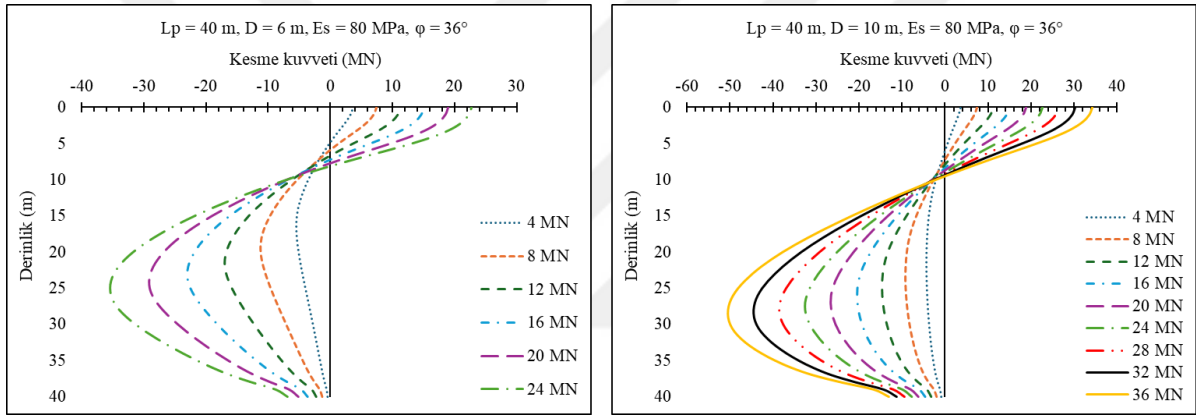
Benzer şekilde, 10m çaplı kazık tipi türbin temelleri ($L_p = 20\text{m}$, $D = 10\text{m}$, $E_s = 80\text{MPa}$, $\phi = 36^\circ$) de aynı davranışı sergilemekte; kesme kuvveti yaklaşık 4m derinlikte ($0.2L_p$, momentin en yüksek olduğu derinlik)) sıfıra yaklaşmakta ve yaklaşık 14m derinlikte ($0.7L_p$) en yüksek değerine ulaşarak 2MN'den 16MN'ye kadar değerler almaktadır. İlginç bir şekilde, eşdeğer yanal yükler altında, daha küçük çaplı (6m) kazıklar için kesme kuvveti profilleri, daha büyük çaplı (10m) kazıklara kıyasla daha yüksek kesme kuvvetleri sergilemektedir. Bu durum, daha küçük çaplı kazığın zeminle etkileşim dinamiklerinin, daha büyük çaplı kazığa göre farklı bir direnç mekanizması geliştirdiğini ve bu farkın kesme kuvveti dağılımında belirgin bir üstünlük yarattığını düşündürmektedir. Bu bulgular, kısa kazıkların eğilmeden ziyade dönme eğilimleriyle uyum içinde olup, 14m derinlikteki maksimum kesme kuvveti bir dönme noktasına işaret etmekte ve yanal yer değiştirme profilleriyle tutarlılık arz etmektedir.



Şekil 4.42. Kademeli yanal yük altında 20m boyundaki kazıklar için kesme kuvveti profilleri.

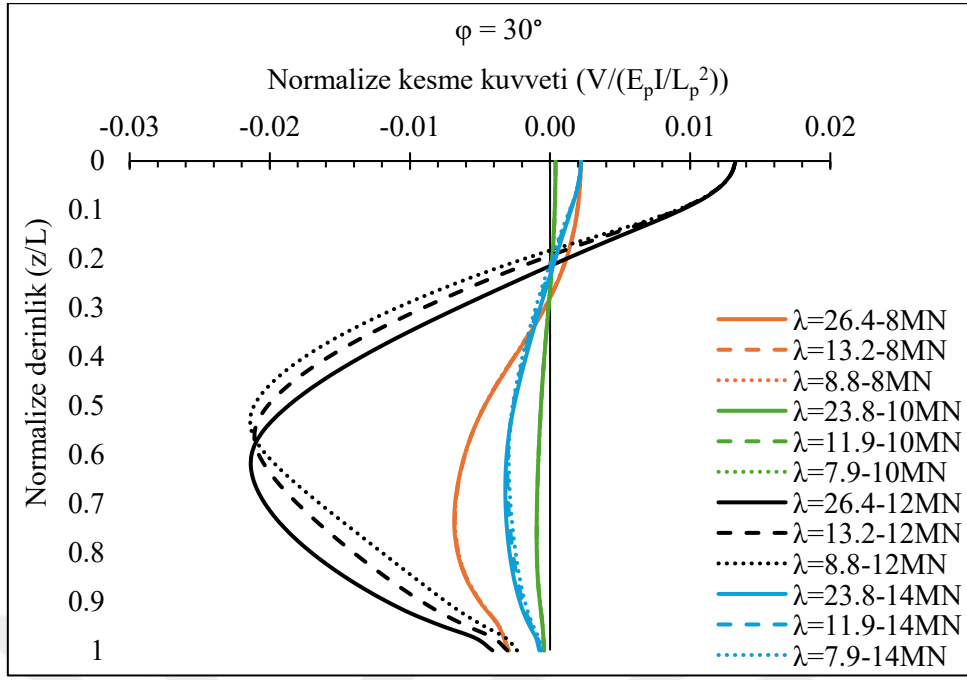
Şekil 4.43.'da gösterilen 40m soket boyuna sahip kazık tipi türbin temellerinde kesme kuvveti profilleri, 4MN'den 36MN'ye kadar değişen yanal yükler altında yapısal tepkiyi ortaya koymaktadır. 6m çaplı kazıklarda ($L_p = 40\text{m}$, $D = 6\text{m}$, $E_s = 80\text{MPa}$, $\phi = 36^\circ$) için kesme kuvveti, yaklaşık 8m derinlikte ($0.2L_p$) sıfıra yaklaşmakta ve en yüksek değerine yaklaşık 24 m derinlikte ($0.6L_p$) ulaşmaktadır; bu durum, uzun kazık yaklaşımıyla uyumlu bir eğilme davranışının baskın olduğunu göstermektedir. Bu eğilim, yük aralığı boyunca tutarlı olup, uygulanan yük arttıkça kesme kuvvetleri 4MN'den 24MN'ye yükselmektedir.

Benzer şekilde, 10m çaplı kazıklarda ($L_p = 40\text{m}$, $D = 10\text{m}$, $E_s = 80\text{MPa}$, $\phi = 36^\circ$) da aynı davranış izlenmekte; kesme kuvvetleri yaklaşık 9m derinlikte ($0,225L_p$) sıfıra yaklaşmakta ve yaklaşık 27m derinlikte ($0,675L_p$) en yüksek değerine ulaşarak 4MN'den 36MN'ye kadar değerler almaktadır. Dikkat çekici bir şekilde, eşdeğer etkili yanal yükler altında, iki farklı kazık çapı için kesme kuvveti değerleri arasında önemli bir fark gözlenmemekte, ancak 6 m çaplı kazık tipi türbin temeli tutarlı bir şekilde bir miktar daha yüksek değerler sergilemektedir. Bu durum, çap farkının kesme kuvvetinin mertebesi üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ve daha küçük çaplı kazığın marjinal olarak daha yüksek tepkisinin, zemin-kazık etkileşimindeki küçük farklardan kaynaklanabileceğini düşündürmektedir. Bu bulgular, uzun kazık yaklaşımında gözlenen eğilme davranışıyla uyum içinde olup, 25 m derinlikteki ($0,625L_p$) maksimum kesme kuvveti, kazıktaki eğilmenin ağırlıklı olarak meydana geldiği bölgeye işaret etmekte ve daha önce tartışılan yanal yer değiştirme profilleriyle tutarlılık arz etmektedir.

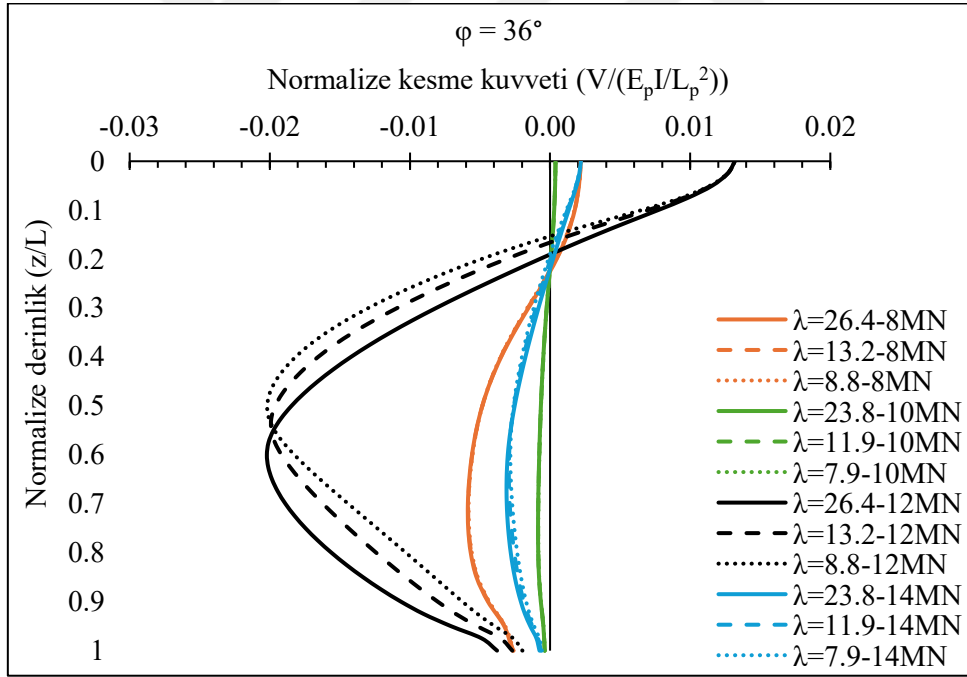


Şekil 4.43. Kademeli yanal yük altında 40m boyundaki kazıklar için kesme kuvveti profilleri.

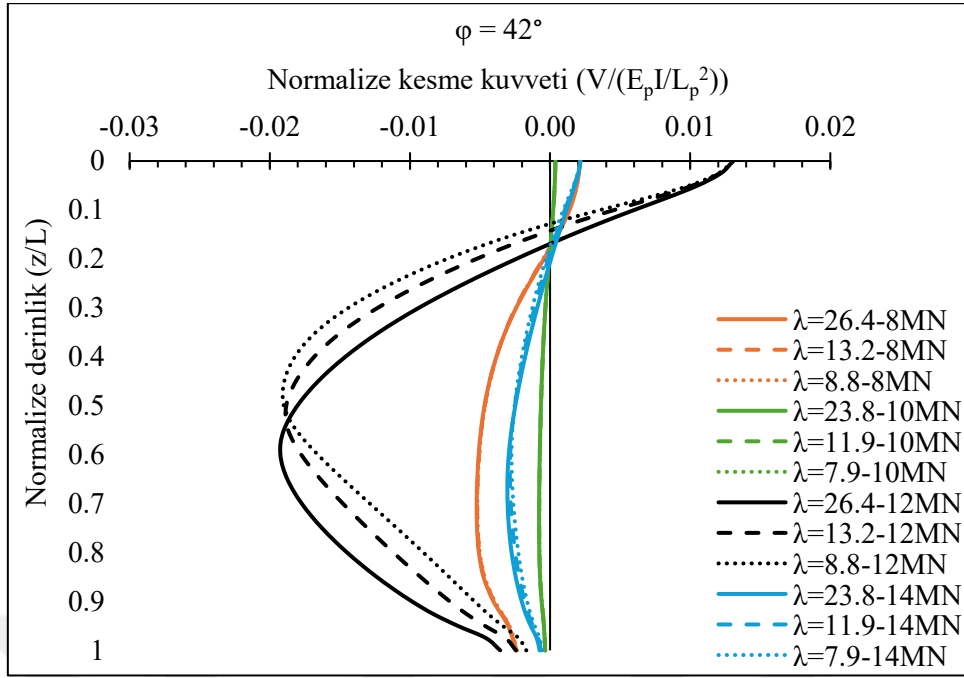
Şekil 4.44., Şekil 4.45. ve Şekil 4.46.'dan görüldüğü üzere, λ değerlerinin ve yanal yükün (H) farklı değerleri için kesme kuvveti profilleri, zemin içsel sürtünme açısının 30° 'den 42° 'ye değiştiği üç durum içinde önemli ölçüde değişmemektedir. İlginç bir şekilde, benzer içsel sürtünme açısı, λ ve yanal yük değerleri için kesme profilleri her durumda oldukça benzer görülmektedir; ancak 40 m soket boyuna ve 6m çapa sahip kazık tipi türbin temellerinde maksimum kesme kuvvetinin derinliği dikkate değer ölçüde farklılık göstermektedir. Bu durum, diğer soket boyları ve çap kombinasyonlarında gözlemlenen tutarlılık ile kontrast oluşturmakta ve zemin-kazık etkileşiminin bu spesifik konfigürasyonda derinlik dağılımı üzerinde benzersiz bir etkiye sahip olabileceğini düşündürmektedir. Bu bulgular, içsel sürtünme açısının kesme kuvveti profilleri üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ve λ ile yanal yükün baskın parametreler olarak öne çıktığını desteklemektedir.



Şekil 4.44. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık tipi türbin temeli boyunca kesme kuvveti dağılımları ($\phi = 30^\circ$).



Şekil 4.45. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık tipi türbin temeli boyunca kesme kuvveti dağılımları ($\phi = 36^\circ$).



Şekil 4.46. Kazık rölatif eğilme rijitliği parametresi (λ) ile değişken yatay yükler için kazık tipi türbin temeli boyunca kesme kuvveti dağılımları ($\phi = 42^\circ$).

4.3. Zemin Reaksiyonu (p-y) Davranışı ile İlgili Değerlendirmeler

Bu bölümde Zeminin, kazığa uygulanan yatay yükler altındaki reaksiyonu kazık gövdesi boyunca farklı derinliklerde oluşturulan p-y eğrileri ile dikkate alınmaktadır. Yanal yüklü kazıkların analizinde, kazık çevresindeki zeminin yatay yönde gösterdiği tepki kritik öneme sahiptir. Bu tepki, genellikle p-y eğrileri olarak adlandırılan ilişkilerle modellenir. Burada:

- p: birim kazık boyu başına zeminin kazığa uyguladığı yatay zemin reaksiyonu (kN/m),
- y: kazığın yatay yer değiştirmesi (m),

olup, p-y eğrisi, kazığın bir noktasındaki yatay deplasmana karşılık gelen zemin reaksiyonunu grafiksel veya analitik olarak ifade eder. P-y eğrileri, kazığın farklı derinliklerinde zeminin davranışını tanımlamak için kullanılır. Eğriler, zemin türüne (kum, kil, silt, kaya vb.), yer altı su seviyesine ve derinliğe bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu eğriler genellikle saha deneylerine (örneğin yanal yükleme testleri) dayalı olarak belirlenir ve doğrusal olmayan yay modeli çerçevesinde değerlendirilir. American Petroleum Institute (API) tarafından önerilen tipik p-y eğrileri için formülasyonlar aşağıda verilmektedir.

a) Yumuşak Doygun Kil (API, 1987)

Yumuşak doygün killerde zemin tepkisi şu şekilde tanımlanır:

$$p = A \cdot p_u \cdot \tanh\left(\frac{k \cdot y}{A \cdot p_u}\right) \quad (4.1)$$

Burada:

- p : birim boy başına zemin reaksiyonu (kN/m),
- y : kazığın yatay deplasmanı (m),
- p_u : nihai zemin tepki kapasitesi (kN/m), genellikle derinliğe bağlı olarak:

$$p_u = N_p \cdot c \cdot d$$
 (N_p ampirik bir katsayı, c kohezyon (kPa), d kazık çapıdır.)
- k : başlangıç yatay zemin yay katsayısı (kN/m^2),
- A : şekil katsayısı (genellikle $1 \leq A \leq 3$),
- c : zemin kohezyonu (kPa),
- d : kazık çapı (m),
- N_p : ampirik katsayı.

b) Kum Zeminler için (API, 1987)

Kum zeminlerde, p - y eğrisi genellikle şu şekilde ifade edilir:

$$p = p_u \cdot \left(\frac{y}{y_{50}}\right) / \left(1 + \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^n\right) \quad (4.2)$$

Burada:

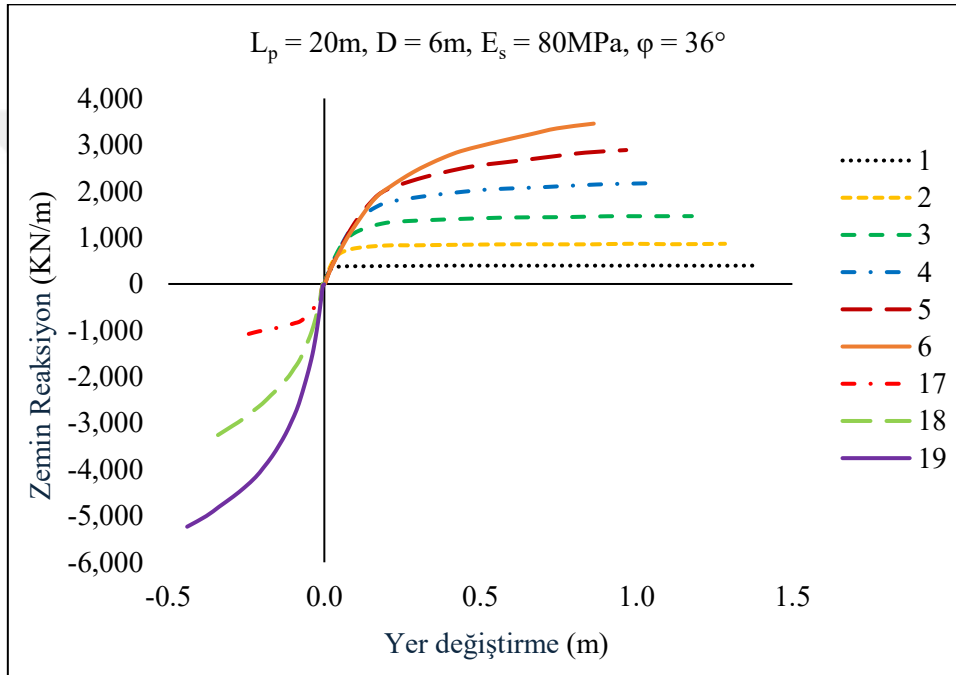
- y_{50} : zemin deformasyon parametresi, nihai yükün %50'sinde oluşan deplasman (genellikle $y_{50}=0.01d$)
- n : deneysel olarak belirlenen eğrisellik parametresi (genellikle $3 \leq n \leq 5$),
- p_u : maksimum zemin direnci (kN/m).

P - y eğrileri, sonlu elemanlar yazılımlarında kazık-zemin etkileşimini modellemek için kullanılmakta ve kazık gövdesi boyunca her derinlikte ayrı bir p - y eğrisi tanımlanarak, kazığın yanal yük altındaki davranışı gerçekçi biçimde simüle edilebilmektedir. P - y eğrileri ile gerçekçi ve sahaya özel zemin davranışı tanımlanabilmekte ve doğrusal olmayan zemin davranışı modellenebilmektedir. Ancak p - y eğrileri zemin türüne özeldir ve dinamik yükler veya sismik etkiler için özel tanımlamalar gerektirmektedir.

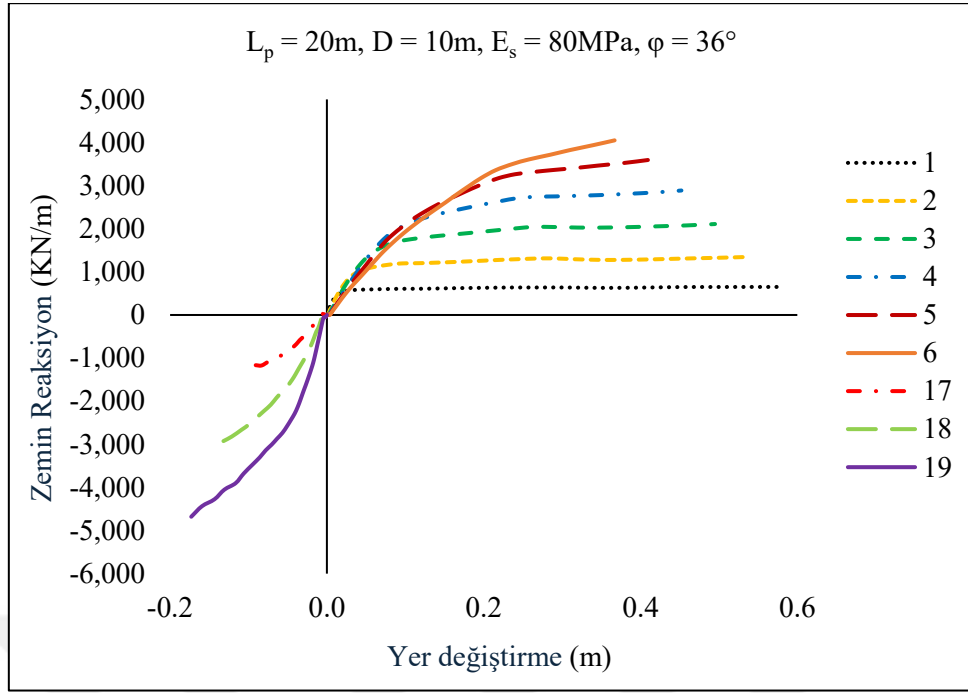
Zemin reaksiyonunun artan derinlikle birlikte arttığı dikkat çekicidir, ancak incelenen kazık boyları için, bu artış 6m ve 7m derinliklerle sınırlıdır ve bundan sonra zemin reaksiyonu, dönme noktası etrafında ihmal edilebilir seviyeye gelene kadar sürekli olarak azalmakta ve daha sonra ilgili noktanın altında negatif hale gelmekte ve tekrar artan derinlikle birlikte büyüklük olarak kademeli olarak

artmaktadır. 6m'nin altındaki derinlikler için zemin reaksiyonu büyüklük olarak daha küçük olduğundan, reaksiyon eğrileri daha sıkı derinlikler için sıklaşmakta ve bu nedenle grafiklerin daha fazla komplike hale gelmemesi için çizilmemektedir.

Şekil 4.47. ve Şekil 4.48.'den görüldüğü üzere, 20m soket boyu için 10m çaplı kazıklar, 6m çaplı kazıklara kıyasla zeminle etkileşime giren daha yüksek yüzey alanı nedeniyle daha yüksek zemin reaksiyonu üretmektedir. İlginç bir şekilde, 20m soket boyuna sahip kazık tipi türbin temelleri, yaklaşık 14m derinlikte bir dönme noktası etrafında dönme eğilimi göstermekte ve bu nedenle, 18m ve 19m gibi daha derin zeminlerde zemin tarafından ters yönde daha yüksek bir reaksiyon mobilize edilmektedir. Bu bulgu, kısa kazıklarda gözlemlenen yanal yer değiştirme profilleriyle iyi bir uyum göstermektedir.

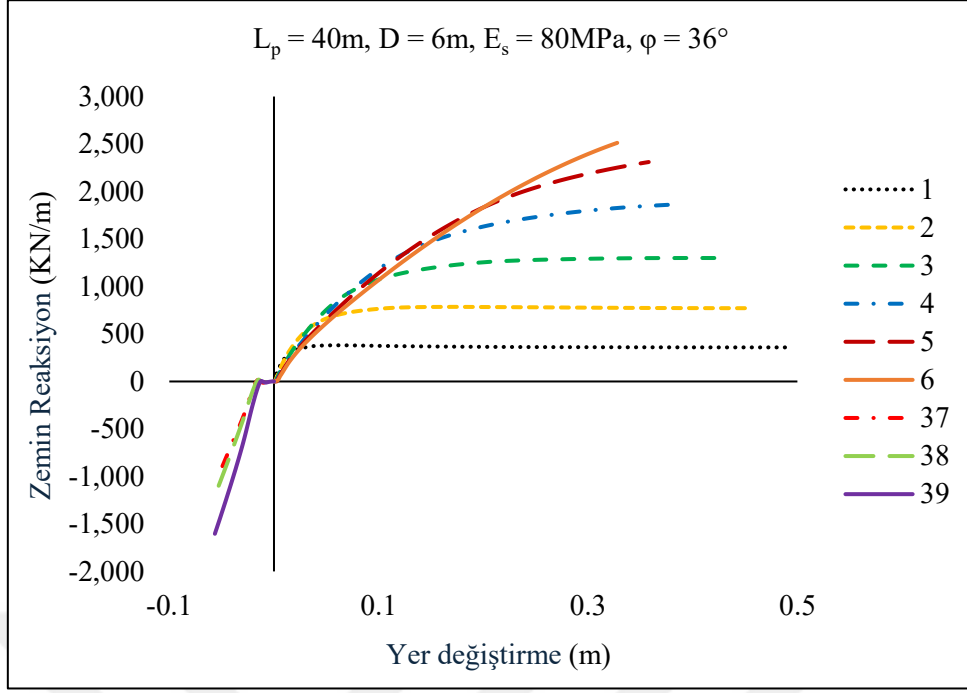


Şekil 4.47. 20m soket boyu ve 6m çapa sahip kazık tipi türbin temelleri için p-y eğrileri.

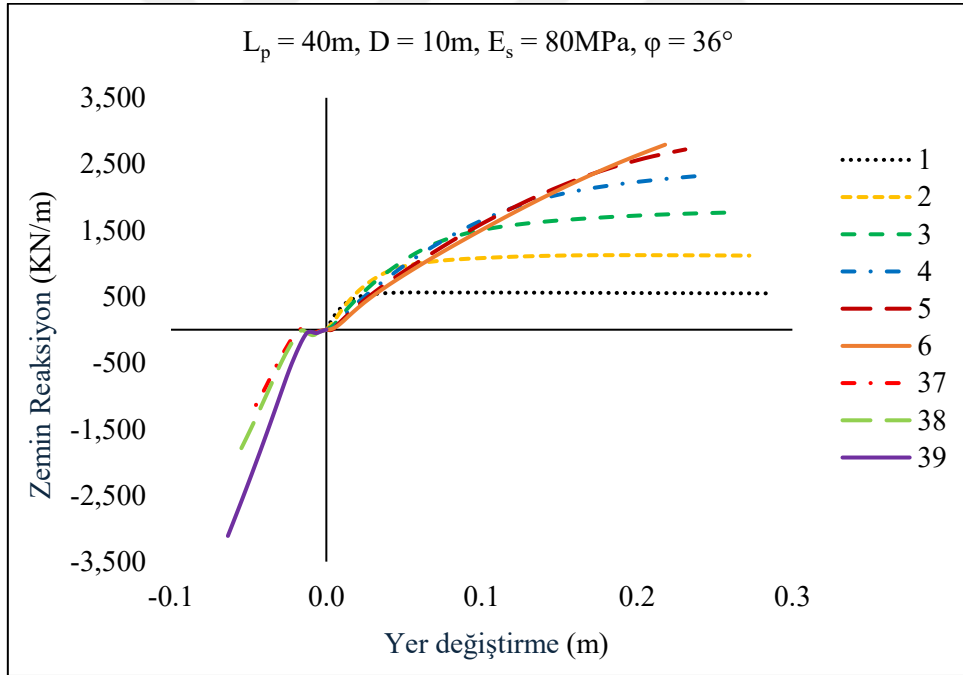


Şekil 4.48. 20m soket boyu ve 10m çapa sahip kazık tipi türbin temelleri için p-y eğrileri.

Şekil 4.49. ve Şekil 4.50.'den açıkça görüldüğü üzere, 40m soket boyuna sahip 10m çaplı kazıklar, 6m çaplı kazıklara kıyasla zeminle etkileşime giren daha yüksek yüzey alanı nedeniyle daha yüksek zemin reaksiyonu üretmektedir. 40m soket boyuna sahip kazık tipi türbin temelleri, kısa kazıklarda olduğu gibi bir dönme noktası etrafında rijit hareket yapmak yerine bükülme eğilimi göstermekte ve bu nedenle, 38m ve 39m gibi derinliklerde zemin tarafından ters yönde daha düşük bir reaksiyon mobilize edilmektedir. Kısa kazıklarla karşılaştırıldığında zemin etkisinin yön değiştirdiği derinlik oldukça büyük gerçekleşmektedir. Bu bulgu, uzun kazık tipi türbin temellerinin yanal yer değiştirme profilleriyle iyi bir uyum göstermektedir; bu profillerde kazık esnekliğine bağlı deformasyonların, rijit kazık deplasmanlarına kıyasla açıkça baskın olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.49. 40m soket boyu ve 6m çapa sahip kazık tipi türbin temelleri için p-y eğrileri.

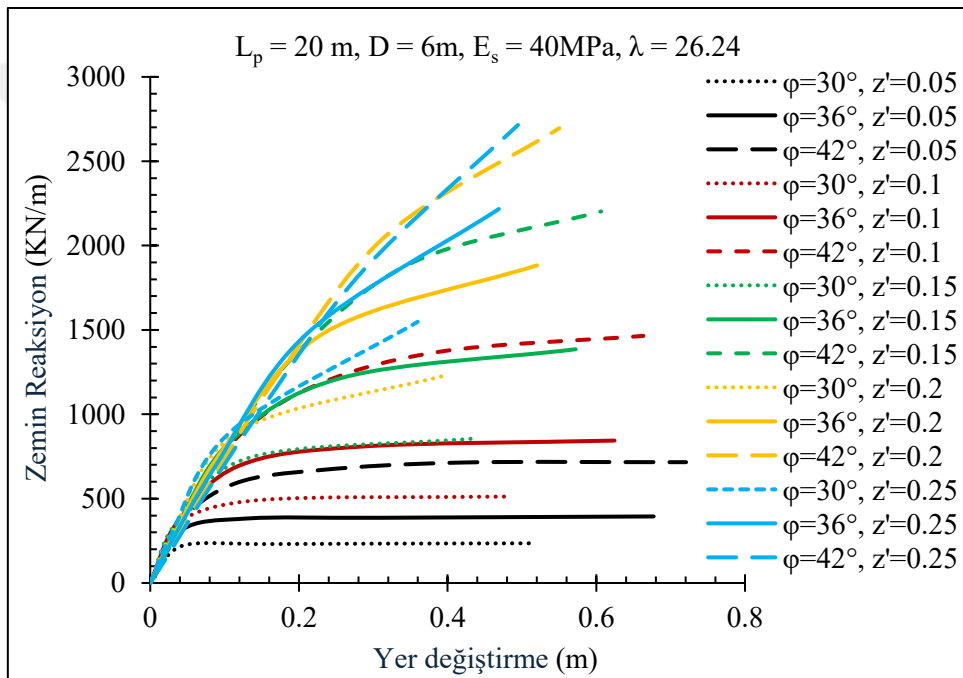


Şekil 4.50. 40m soket boyu ve 10m çapa sahip kazık tipi türbin temelleri için p-y eğrileri.

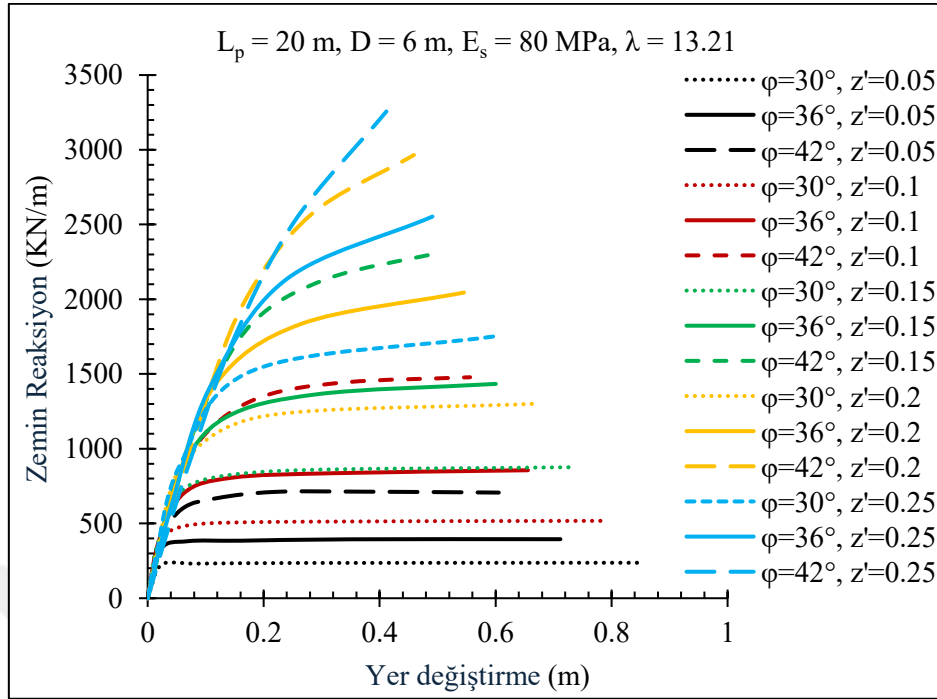
Şekil 4.51., Şekil 4.52. ve Şekil 4.53.'de 6m çaplı ve 20m soket boyuna sahip kazıklar için farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri sunulmuştur. 20m soket boyuna sahip ve 6m çaplı kazıklar için, 1m'den 5m'ye kadar olan derinliklerdeki p-y eğrileri, derinlikle birlikte yanal zemin direncinde tutarlı bir artış sergilemektedir. Yüzeğe yakın derinliklerde zemin direnci, yatay deplasmanla birlikte kademeli bir artış göstermekte olup bu durum, yüzeydeki daha zayıf zemin tepkisini yansıtmaktadır. Derinlik arttıkça p-y eğrileri daha yüksek eğim sergilemektedir,

bu durum zeminin mukavemetinde artış ve yanal harekete karşı daha büyük bir direnç olduğunu göstermektedir. Bu eğilim, zemin içerisinde derinlikle artan çevre basıncından kaynaklanmakta olup, zeminin kazık yer değiştirmesine karşı direnç kapasitesini güçlendirmektedir.

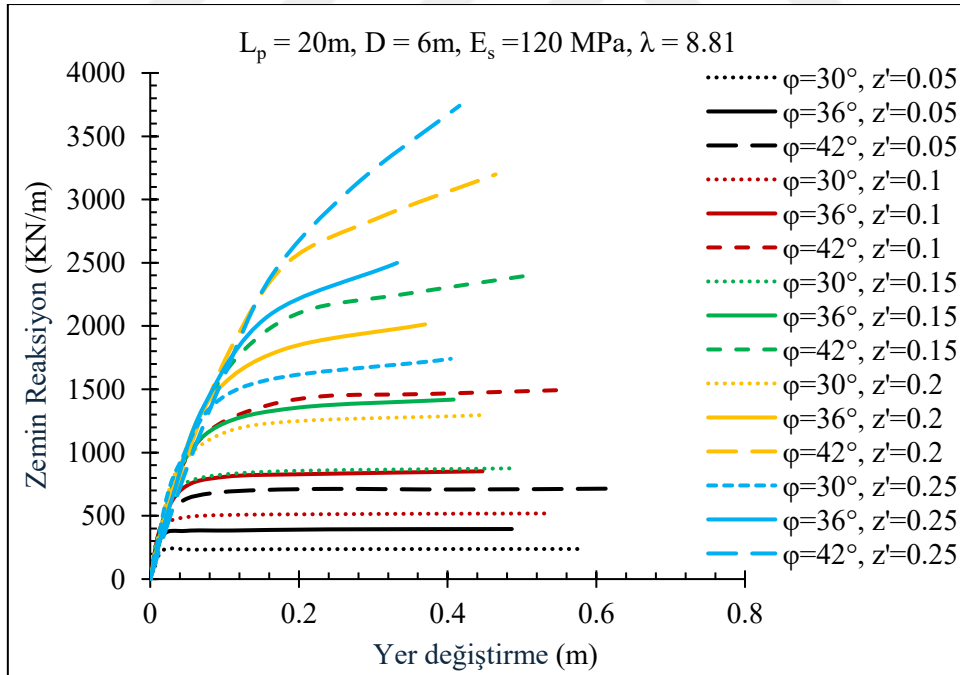
λ parametresi, p-y eğrilerinin başlangıç eğimini etkilemekte; daha yüksek λ değerleri daha yüksek zemin tepkisine karşılık gelmekte, p-y eğrilerinde gözlenen kırılmalar daha yüksek değerlerde meydana gelmekte ve küçük yer değiştirmelerde daha belirgin bir zemin tepkisi mobilize olmaktadır. Her bir derinlikte, zemin içsel sürtünme açısı arttıkça zemin reaksiyonu belirgin bir şekilde artış göstermektedir. İçsel sürtünme açısının 30° 'den 36° 'ye yükselmesi durumunda, zemin reaksiyonu yaklaşık %65 oranında artarken; 36° 'den 42° 'ye yükseldiğinde ise zemin reaksiyonu yaklaşık %70 oranında artış sergilemektedir.



Şekil 4.51. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20$ m, $D = 6$ m, $E_s = 40$ MPa, $\lambda = 26.24$).



Şekil 4.52. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20$ m, $D = 6$ m, $E_s = 80$ MPa, $\lambda = 13.21$).

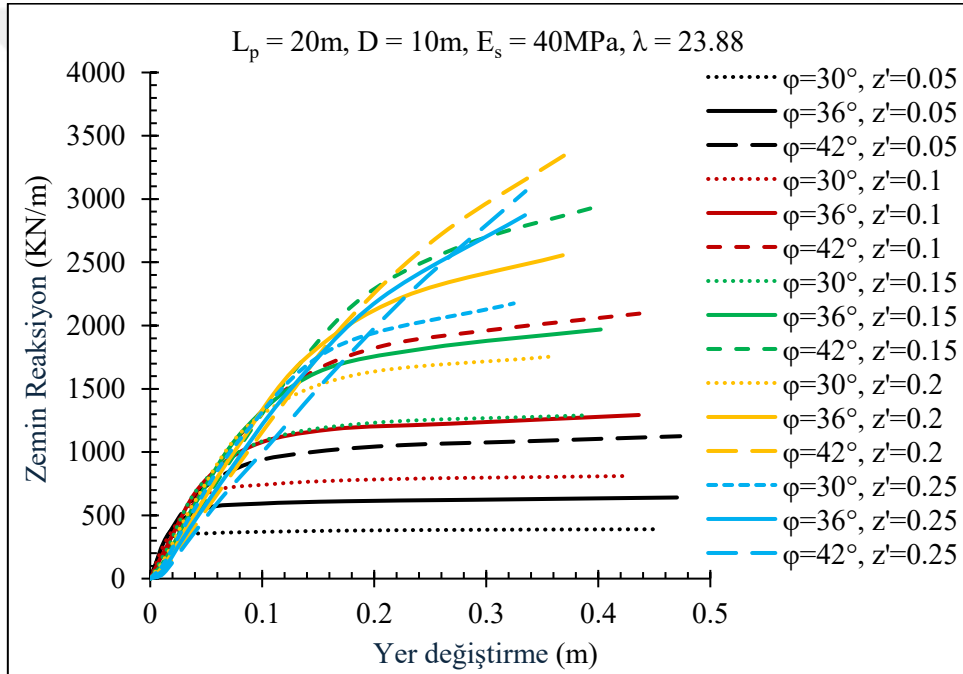


Şekil 4.53. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20$ m, $D = 6$ m, $E_s = 120$ MPa, $\lambda = 8.81$).

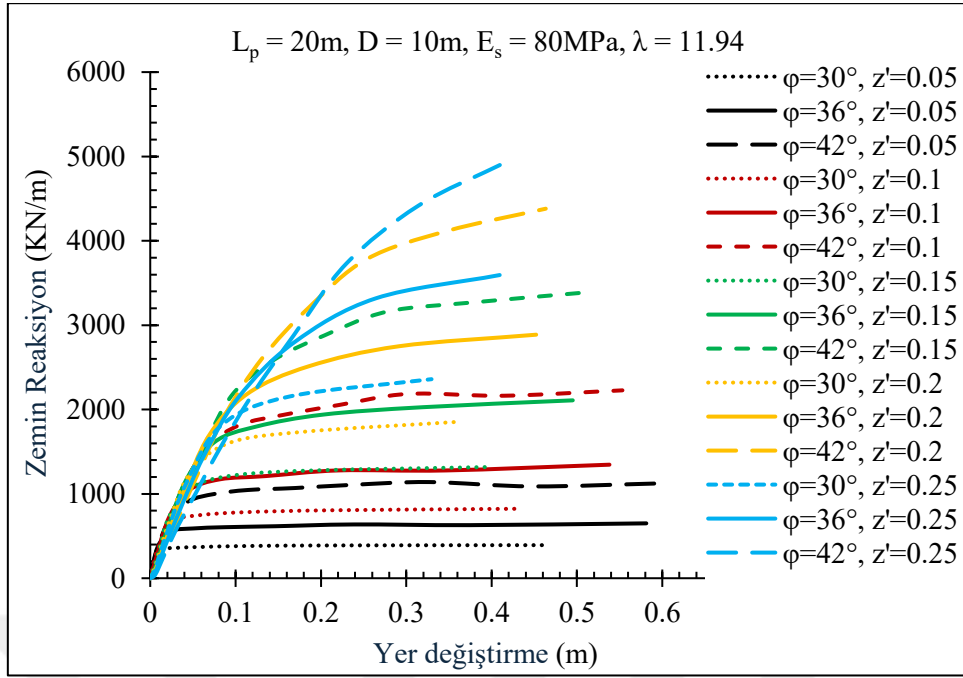
Şekil 4.54., Şekil 4.55. ve Şekil 4.56.'da 10 m çaplı ve 20 m soket boyuna sahip kazıklar için farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri sunulmuştur. 20 m derinlikte gömülü ve daha büyük 10 m çaplı kazık durumunda, 1 m'den 5 m'ye kadar olan

derinliklerdeki p-y eğrileri, derinlikle artan direnç modelini takip etmektedir. Ancak, 6m çaplı kazıkla karşılaştırıldığında, her bir derinlikte direnç, özellikle büyük yer değiştirmelerde belirgin şekilde daha yüksektir. Bu artan direnç, kazığın yüzey alanının genişlemesine bağlanabilir; bu durum zemin-kazık etkileşimini güçlendirmekte ve daha fazla zemin direncinin mobilize olmasını sağlamaktadır.

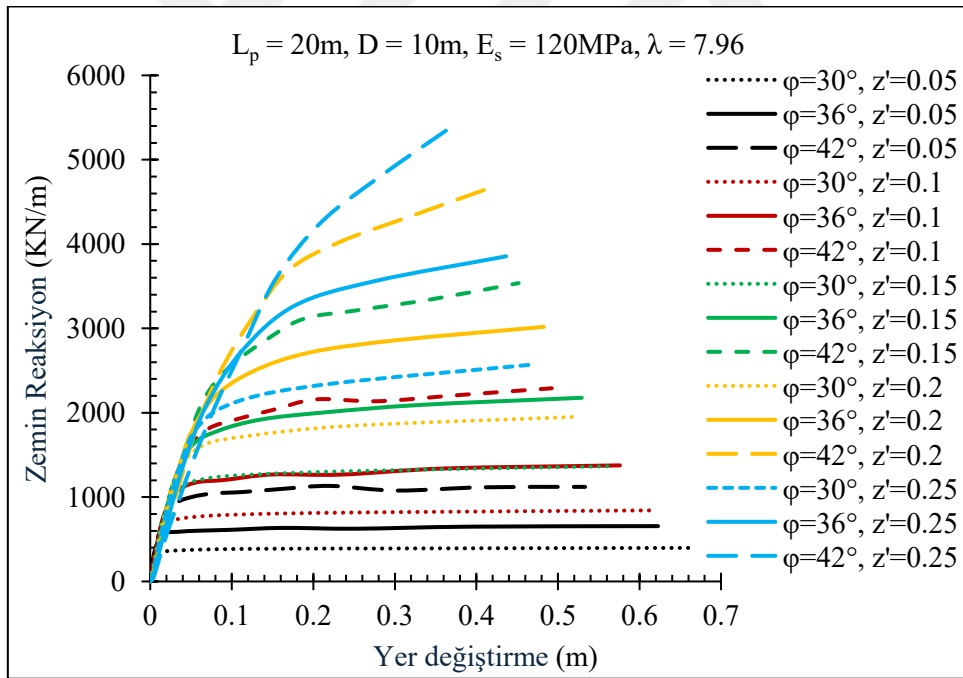
Rölatif eğilme esnekliği katsayısı (λ)'nın etkisi, p-y eğrilerinde açıkça görülmekte; daha yüksek λ değerleri, daha belirgin bir doğrusal olmayan tepkiye yol açmakta ve daha küçük çaplı kazıkta gözlemlenenenden daha küçük yer değiştirmelerde elastikten plastiğe geçişi işaret etmektedir. Her bir derinlikte, zemin içsel sürtünme açısı arttıkça zemin reaksiyonu belirgin bir şekilde artış göstermektedir. İçsel sürtünme açısının 30° 'den 36° 'ye yükselmesi durumunda, zemin reaksiyonu yaklaşık %65 oranında artarken; 36° 'den 42° 'ye yükseldiğinde ise zemin reaksiyonu yaklaşık %70 oranında artış sergilemektedir.



Şekil 4.54. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20\text{m}$, $D = 10\text{m}$, $E_s = 40\text{MPa}$, $\lambda = 23.88$).



Şekil 4.55. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20\text{m}$, $D = 10\text{m}$, $E_s = 80\text{MPa}$, $\lambda = 11.94$).

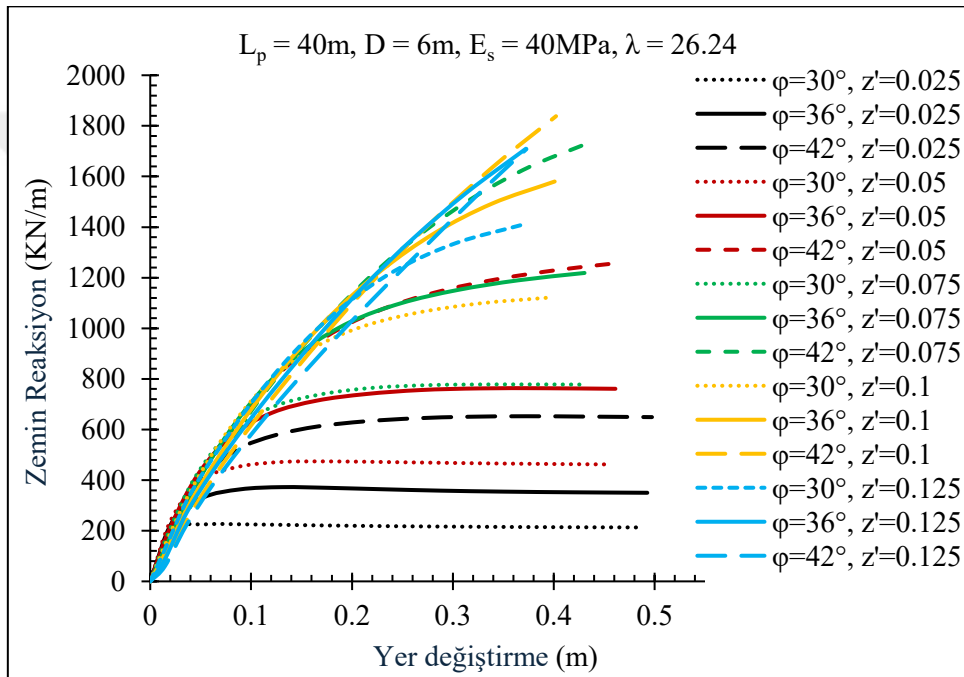


Şekil 4.56. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 20\text{m}$, $D = 10\text{m}$, $E_s = 120\text{MPa}$, $\lambda = 7.96$).

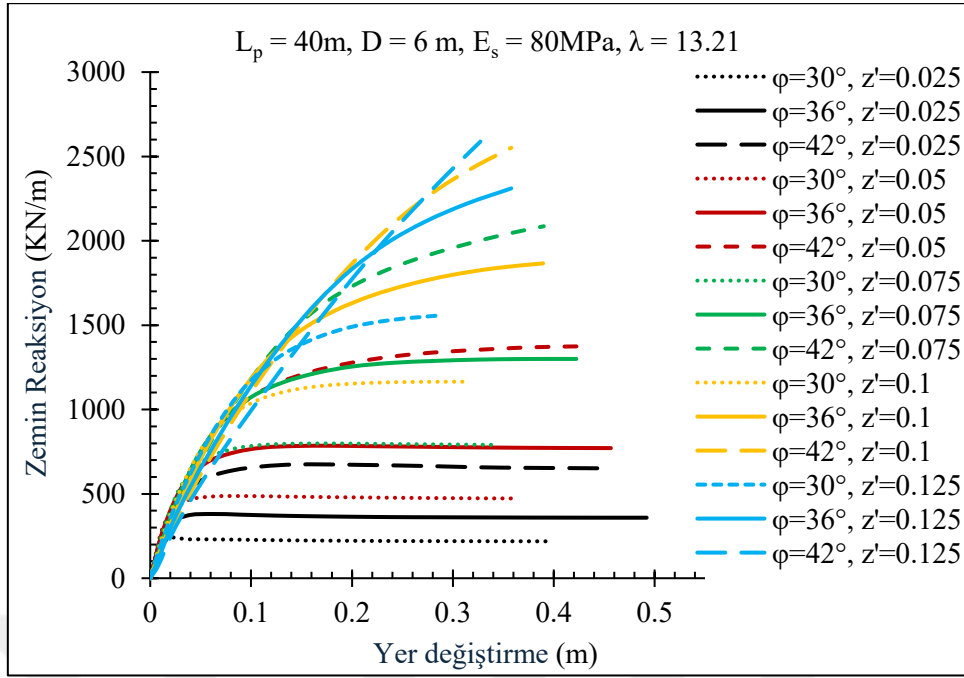
Şekil 4.57., Şekil 4.58. ve Şekil 4.59.'de 6m çaplı ve 40m soket boyuna sahip kazıklar için farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri sunulmuştur. Soket boyu 40 m olan 6 m çaplı kazıklar için, 1 m'den 5 m'ye kadar olan derinliklerdeki p-y eğrileri, 20m soket boyuna sahip kazıklara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek zemin direncine işaret etmektedir. Yüzeğe yakın derinliklerde, eğrilerin yüksek başlangıç eğimleri, zeminin kayda değer bir rijitlik

sergilediğini ortaya koymaktadır. Derinlik arttıkça direnç daha da artmakta; bu, daha derin soket boylarının, daha yüksek zemin çevre basıncı nedeniyle yanal yüklere karşı zeminin direnç kabiliyetini artırdığını göstermektedir.

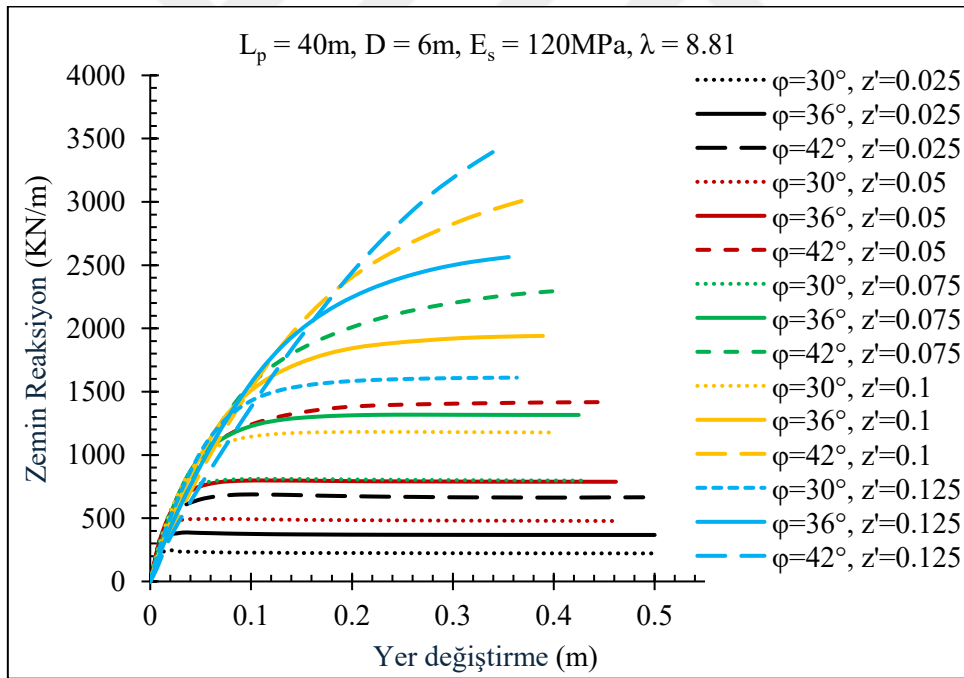
Rölatif eğilme rijitliği parametresi, λ bu davranışa şekil vermekte; ilgili parametrenin değişimi, elastikten plastiğe geçiş noktasını etkileyerek eğrilerin genel profilini şekillendirmektedir. Her bir derinlikte, zemin içsel sürtünme açısı arttıkça zemin reaksiyonu belirgin bir şekilde artış göstermektedir. İçsel sürtünme açısının 30° 'den 36° 'ye yükselmesi durumunda, zemin reaksiyonu yaklaşık %65 oranında artarken; 36° 'den 42° 'ye yükseldiğinde ise zemin reaksiyonu yaklaşık %70 oranında artış sergilemektedir.



Şekil 4.57. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40\text{m}$, $D = 6\text{m}$, $E_s = 40\text{MPa}$, $\lambda = 26.24$).



Şekil 4.58. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40\text{m}$, $D = 6\text{ m}$, $E_s = 80\text{MPa}$, $\lambda = 13.21$).

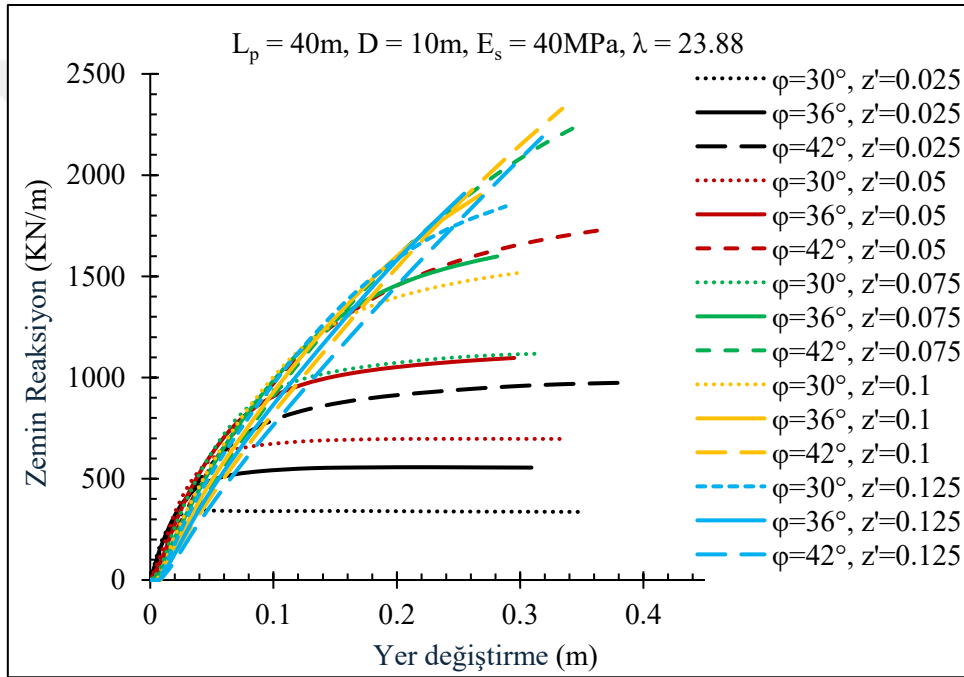


Şekil 4.59. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40\text{m}$, $D = 6\text{ m}$, $E_s = 120\text{MPa}$, $\lambda = 8.81$).

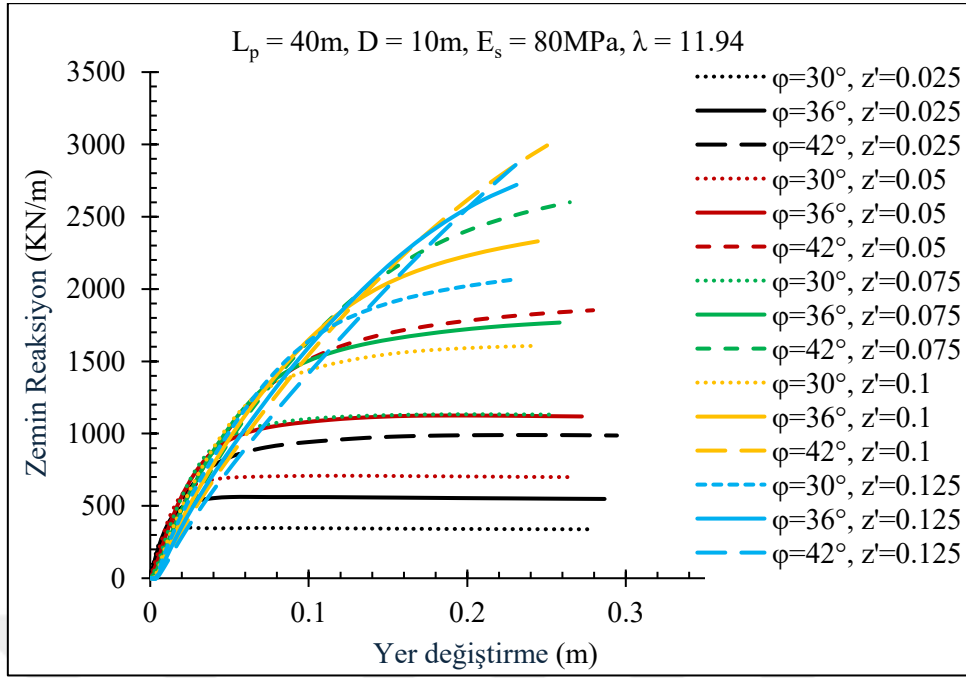
Şekil 4.60., Şekil 4.61. ve Şekil 4.62.'de 10m çaplı ve 40m soket boyuna sahip kazıklar için farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri sunulmuştur. En derin soket boyu olan 40m ve en büyük çap olan 10m konfigürasyonunda, 1 m'den 5 m'ye kadar olan derinliklerdeki p-y eğrileri, incelenen tüm durumlar arasında en yüksek zemin direncini ortaya koymaktadır. Bu eğriler, küçük yer değiştirmelerde çok yüksek mukavemet gösteren oldukça dik

başlangıç eğimleriyle karakterize edilmekte, bu davranışı büyük yer değiştirmelerde kademeli bir plato takip etmekte ve bu bulgu, zeminin nihai yanal yük karşılama kapasitesine yaklaştığını göstermektedir. Yüksek soket boyu ve büyük çapın sinerjisi, önemli yanal yüklere dayanabilecek oldukça etkili bir zemin-kazık sistemi oluşturmaktadır.

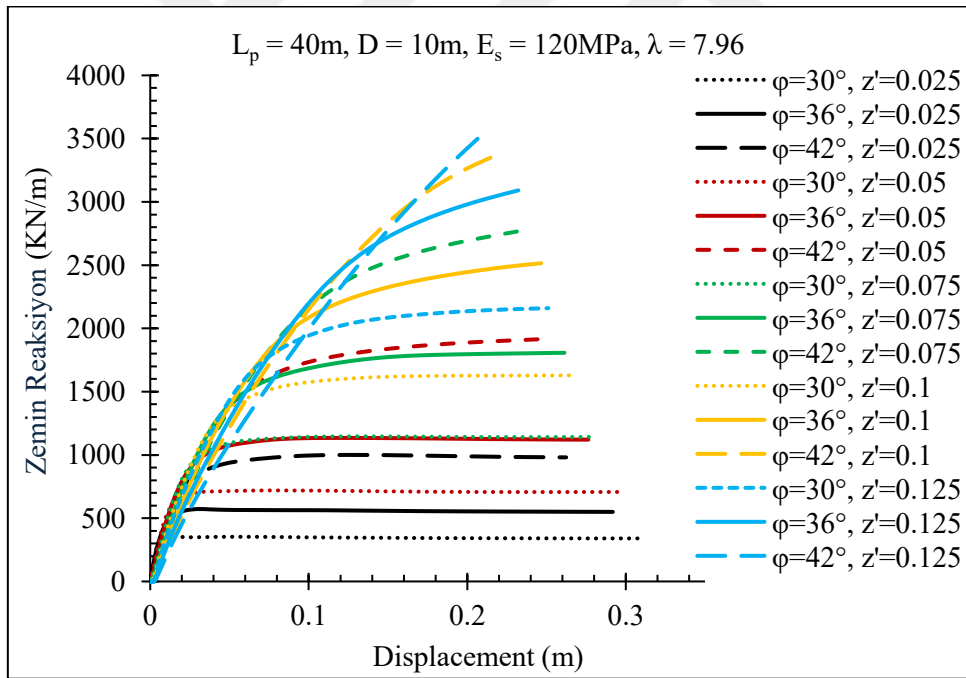
Rölatif eğilme rijitliği parametresi, λ 'nın etkisi burada özellikle belirgindir; daha yüksek değerler başlangıç rijitliğini vurgulamakta ve plastik davranışa geçişi hızlandırarak yanal yüklemeye karşı sağlam ve etkili bir tepki ortaya koymaktadır. Her bir derinlikte, zemin içsel sürtünme açısı arttıkça zemin reaksiyonu belirgin bir şekilde artış göstermektedir. Zemin içsel sürtünme açısının 30° 'den 36° 'ye yükselmesi durumunda, zemin reaksiyonu yaklaşık %65 oranında artarken; 36° 'den 42° 'ye yükseldiğinde ise zemin reaksiyonu yaklaşık %70 oranında artış sergilemektedir.



Şekil 4.60. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40\text{m}, D = 10\text{m}, E_s = 40\text{MPa}, \lambda = 23.88$).



Şekil 4.61. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40\text{m}$, $D = 10\text{m}$, $E_s = 80\text{MPa}$, $\lambda = 11.94$).



Şekil 4.62. Farklı normalize derinliklerde ve zemin içsel sürtünme açıları için elde edilen p-y eğrileri ($L_p = 40\text{m}$, $D = 10\text{m}$, $E_s = 120\text{MPa}$, $\lambda = 7.96$).

4.4. Dinamik Analiz Bulguları

Statik olarak incelenen kazık sisteminin rüzgar yükleri nedeniyle oluşabilecek zamana bağlı olarak değişen gerçekçi dinamik yükler etkisi altında değerlendirilmesi bu çalışmanın kapsamı dahilinde olup, bu bölümde FLAC3D yazılımıyla dinamik analizler gerçekleştirilerek elde edilen bulgular ile, kazık tipi türbin temelinin 30 saniyelik rüzgar ve dalga yükü geçmişine verdiği tepki irdelenmektedir. Başlıca inceleme parametreleri olarak, çamur hattı yer değiştirmesi ve p-y eğrileri dikkate alınarak zemin reaksiyonu tartışılmaktadır.

FLAC3D yazılımı ile dinamik analizlerde dikkate alınana başlıca dinamik parametreler şu şekildedir:

- **Dinamik Girdi ve Uygulanması:** Tekil kazıkların üst ucuna, gerçekçi rüzgar yükü koşullarını temsil etmek amacıyla zamana bağlı yatay bir kuvvet uygulanmaktadır. Şekil 4.13'te gösterilen dinamik yük geçmişi, açık deniz rüzgar türbinleri için geliştirilmiş yüksek doğruluklu bir aero-hidro-servomekanik simülasyon yazılımı olan OpenFAST'ten elde edilmektedir. Yük verisinin dinamik analizde kullanılmaya uygun hale getirilmesi için baz hattı düzeltmesi (baseline correction) uygulanmakta ve yalnızca yapının dinamik cevabını etkileyen baskın frekans bileşenleri korunmaktadır. Bu sayede uzun periyotlu sürüklenmeler ve ortalama yük etkileri modellenmeden filtrelenmektedir. Toplam 30 saniyelik süreyi kapsayan bu sinyal, -1.8 MN ile +3.4 MN arasında değişen kuvvetlerle geniş bir frekans spektrumunu içermektedir. Böylece, tekil kazığın tepe noktasına etki eden türbülanslı rüzgar yüklerini başarıyla temsil etmektedir. Kuvvet, '*TopPile*' grubuna ait düğümlere yönlendirilen özel bir FISH fonksiyonu aracılığıyla modele tanıtılmaktadır. Kuvvet geçmişi '*fish-call*' komutuyla her adımda güncellenmekte ve analiz süresi '*model solve time-total 30*' komutu ile tanımlanmaktadır.
- **Sönümleyici Sınır Koşulları:** Model sınırlarında oluşabilecek yansıma etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla, sonsuz zemin ortamının davranışını temsil eden sessiz (silent) sınır koşulları uygulanmaktadır. Bu koşullar aşağıdaki komutla tanımlanmaktadır:
zone face apply quiet-normal range group "North" or "East" or "West" or "South" or "Bottom".
Bu sınır koşulu, sınır yüzeylerine ulaşan gerilme dalgalarının normal bileşenlerini absorbe ederek, sistem içine geri yansımaları engellemektedir. Sayısal modelin sonlu boyutuna rağmen gerçekçi dalga yayılımı elde edilebilmekte ve analiz doğruluğu korunmaktadır.
- **Maxwell Sönümleme:** Zemin ve yapı elemanlarında enerji sönümünü gerçekçi şekilde modellemek için Maxwell tipi viskoelastik sönümleme kullanılmaktadır. Bu sönümleme yaklaşımı, frekansa bağlı enerji dağılımını temsil etmekte ve uygulanan dinamik yükte bulunan geniş frekans spektrumuna karşı duyarlılık sağlamaktadır. Aynı parametreler hem zemin bölgeleri hem de yapısal elemanlar için kullanılmaktadır:
structure dynamic damping maxwell 0.0238 0.1 0.019 0.7 0.029 5
zone dynamic damping maxwell 0.0238 0.1 0.019 0.7 0.029 5

Bu parametreler üç paralel Maxwell eğrisini tanımlar:

$$\eta 1=0.0238, \tau 1=0.1 s$$

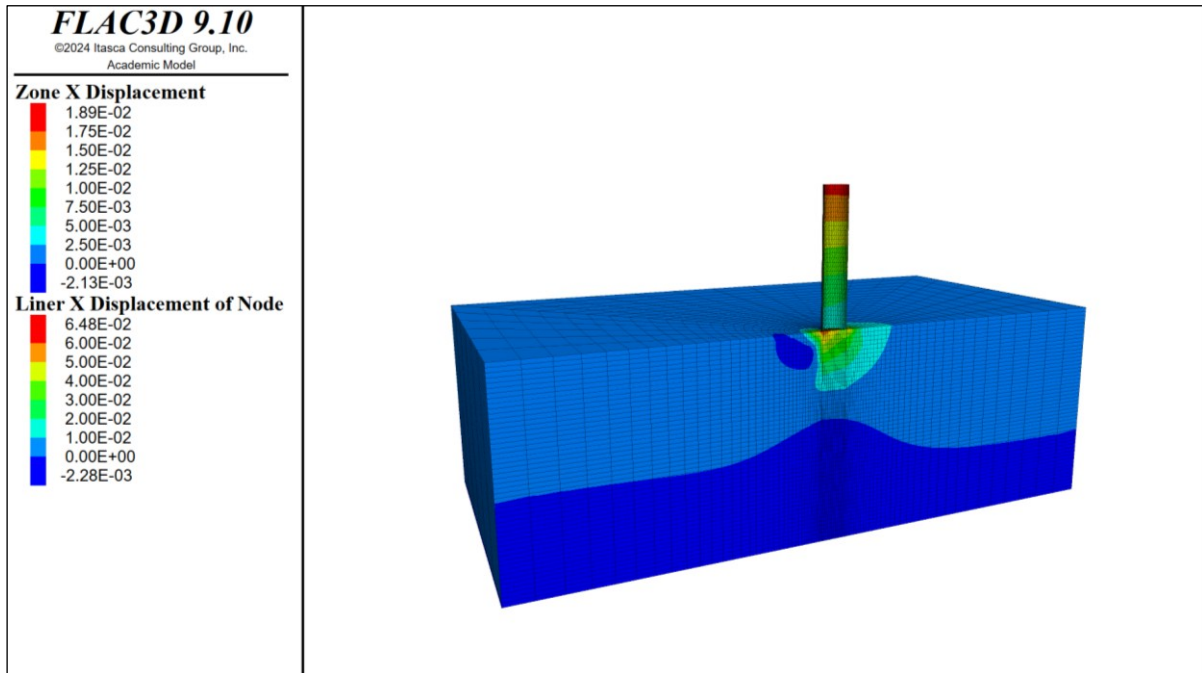
$$\eta 2=0.0190, \tau 2=0.7 s$$

$$\eta 3=0.0290, \tau 3=5.0 s$$

Bu yapı, sistemin baskın frekans aralığında yaklaşık %3 sönüm oranı (damping ratio) elde edilmesini hedeflemektedir. İlk Maxwell bileşeni yüksek frekanslı dalgalara (örneğin, yansıyan dalgalar) karşı etkin olurken, diğer iki bileşen orta ve düşük frekanslı davranışa (örneğin, yapı ve zemin doğal frekansları) karşı duyarlılık sağlar. Bu çok bantlı sönümleme yaklaşımı, frekanslar arası dengeli enerji dağılımı sağlayarak ne fazla ne de yetersiz sönüm oluşmasına izin verir.

Şekil 4.63.'de, FLAC3D kullanılarak yapılan dinamik analizde, 30 saniyelik bir simülasyonun 15. saniyesine ait yatay (X yönü) yer değiştirme konturunu göstermektedir. Sonuçlar, kazık ile çevresindeki zemin arasındaki etkileşimi, dinamik yatay yükleme altında incelemektedir. Maksimum yer değiştirmelerin kazık başı civarında meydana geldiği ve derinlikle birlikte azaldığı gözlemlenmektedir. Zemin kütlesi içerisindeki yer değiştirme dağılımı, kazığın gömülü olduğu bölgeden çevreye doğru yayılan belirgin bir deformasyon davranışını ortaya koymakta bu durum aktif zemin mukavemeti mobilizasyonuna işaret etmektedir.

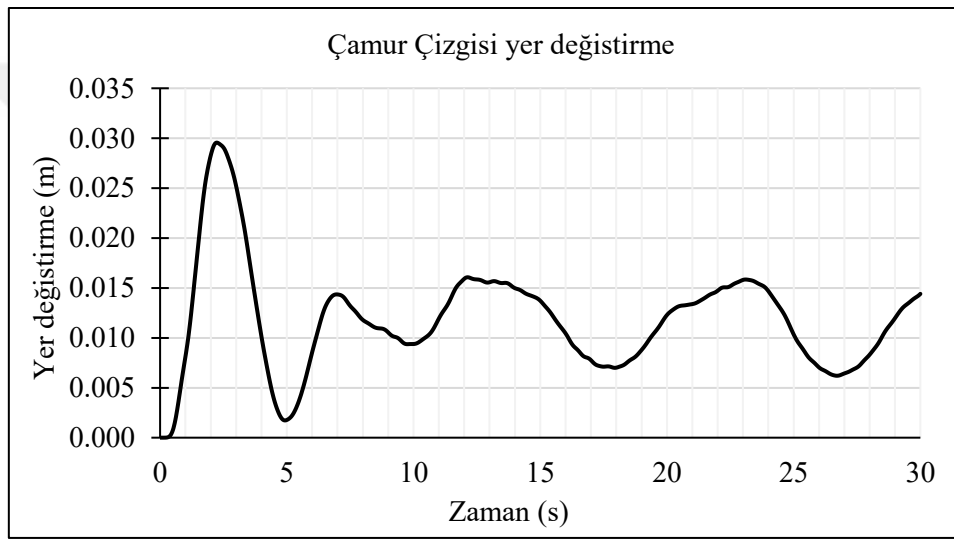
Liner (kazık) en büyük yatay yer değiştirmeyi yaklaşık 6,48 cm ile kazık üst ucunda göstermekte olup, bu durum açıkta kalan kazık bölümünün dinamik kuvvetlerden en fazla etkilenen kısım olduğunu göstermektedir. Çevre zemin ise, yer değiştirme açısından bir gradyan sergilemekte olup, bu durum zemin-yapı arayüzü boyunca enerji sönümlemesi ve gerilme transferinin gerçekleştiğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.63. Dinamik simülasyonun 15. saniyesine ait yatay yer değiştirme konturu.

4.4.1. Çamur Çizgisi Yer Değiştirme

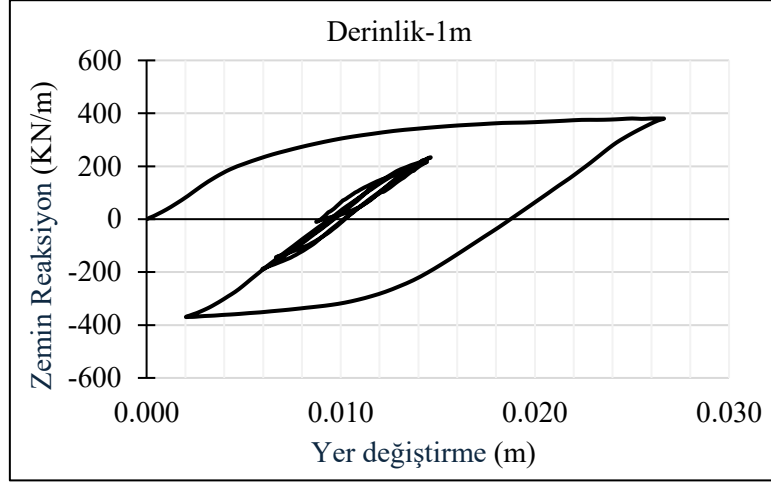
Şekil 4.64.'de, 30 saniyelik rüzgar kuvveti geçmişine maruz kalan kazık tipi türbin temelini çamur çizgisi yer değiştirme tepkisi sunulmuştur. İlk birkaç saniyede, rüzgar kuvvetinin artış dönemine karşılık gelen hızlı bir yer değiştirme davranışı gözlemlenmiş ve yaklaşık 0.03 metre ile maksimum değere ulaşılmıştır. Bu başlangıç tepkisini, zemin-yapı sisteminde enerji sönümlemesini ve dinamik sönümlleme etkilerini yansıtan genlikteki kademeli azalma takip etmektedir. Yaklaşık 10. saniyeden sonra sistemin yer değiştirme tepkisi daha kararlı hâle gelmekte ve daha küçük genliklerle ortalama bir değer etrafında salınım göstermektedir. Bu durum, sistemin çevrimsel yüke karşı yarı-kararlı bir duruma ulaştığını göstermektedir.



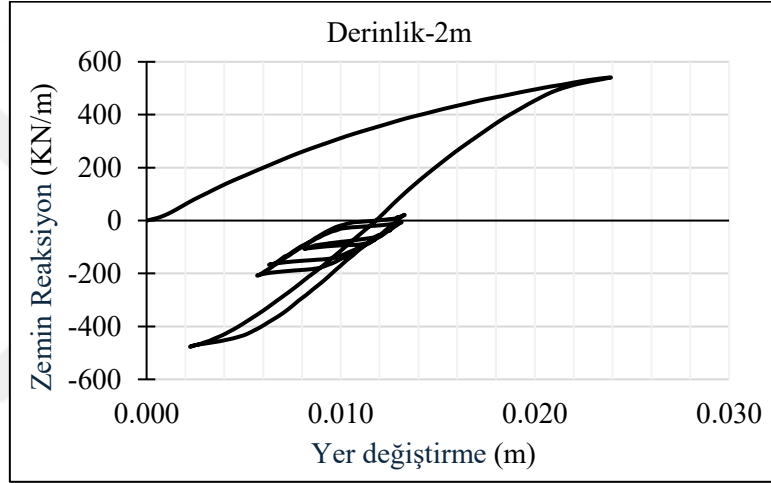
Şekil 4.64. 30 saniyelik simülasyonda çamur çizgisi yer değiştirme-zaman ilişkisi.

4.4.2. Dinamik Zemin Reaksiyonu ve Yatay Yer Değiştirme (p-y) Davranışı

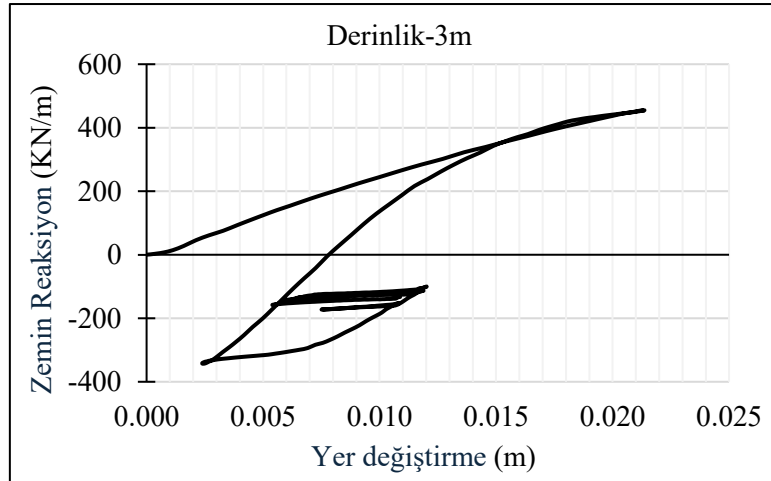
Şekil 4.65., Şekil 4.66., Şekil 4.67., Şekil 4.68. ve Şekil 4.69.'de 1m'den 5m'ye kadar farklı derinliklerde, 30 saniyelik rüzgar ve dalga kuvveti geçmişine maruz kalan kazık tipi türbin temelinde, zemin reaksiyonu-yer değiştirme (p-y) tepkisi sunulmaktadır. Eğriler çevrimsel yükleme bağlı olarak histerez ilmeği şeklinde olup ağırlıklı olarak doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Başlangıçta, p-y eğrisinin yüksek eğimi, zeminin yanıl yer değiştirmeye karşı önemli bir direnç sağladığını göstermektedir. Ancak, çevrimsel yükleme altında zamanla yer değiştirme arttıkça zemin rijitliği kademeli olarak azalmış ve dirençte bir plato oluşmuştur. Bu tepki, tekrarlı yükleme altındaki kum zeminlerin karakteristik bir davranışı olup, gerinim yumuşaması ve pasif direncin mobilizasyonu genel davranışı şekillendirmektedir. Elde edilen sonuçlar, kazık tipi türbin temellerinin dinamik analizlerinde zamana bağlı ve doğrusal olmayan zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.



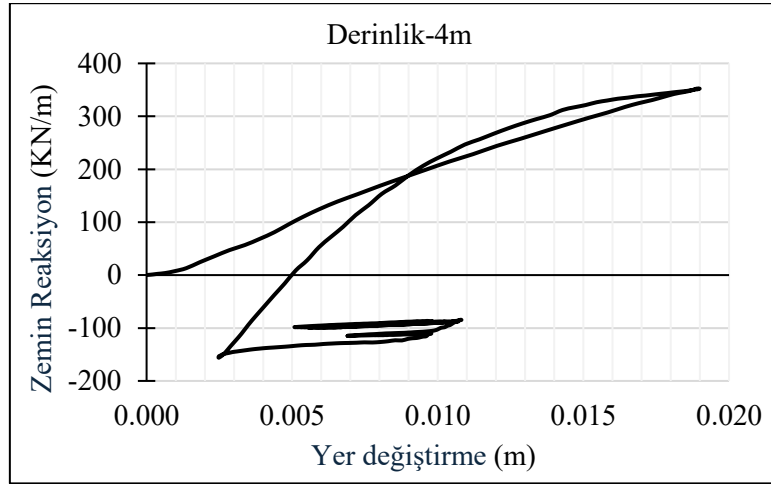
Şekil 4.65. Dinamik analizler sonucu 1m derinlikte gözlenen histerez ilmeği tarzı p-y tepkisi.



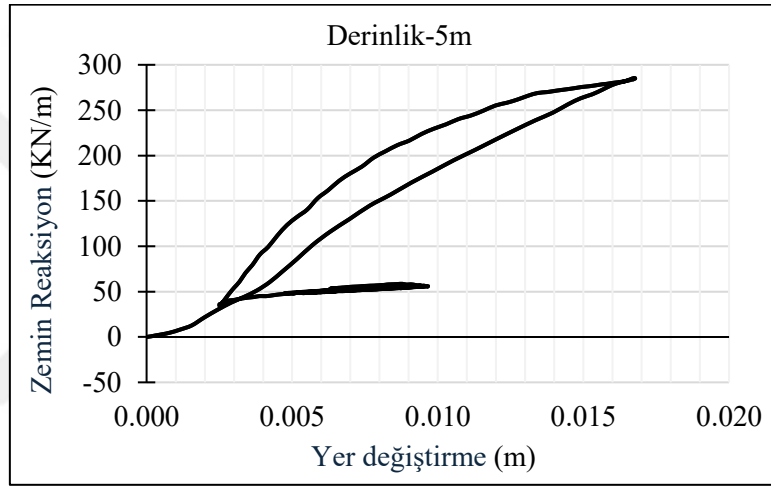
Şekil 4.66. Dinamik analizler sonucu 2m derinlikte gözlenen histerez ilmeği tarzı p-y tepkisi.



Şekil 4.67. Dinamik analizler sonucu 3m derinlikte gözlenen histerez ilmeği tarzı p-y tepkisi.



Şekil 4.68. Dinamik analizler sonucu 4m derinlikte gözlenen histerez ilmeği tarzı p-y tepkisi.



Şekil 4.69. Dinamik analizler sonucu 5m derinlikte gözlenen histerez ilmeği tarzı p-y tepkisi.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, açık deniz rüzgar türbinleri için kullanılan kazık tipi türbin temellerinin statik ve dinamik yanal yükler altındaki davranışlarını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. American Petroleum Institute tarafından önerilen API yöntemi ve FLAC3D sonlu farklar yazılımı ile gerçekleştirilen analizler ile, farklı soket boyları (20 m ve 40 m), çaplar (6 m ve 10 m), duvar kalınlıkları (8 cm ve 12 cm) ve zemin özellikleri (içsel sürtünme açısı 30° - 42°) dikkate alınarak yanal yer değiştirme profilleri, kazık rotasyonu, kazık başı eğimi, çamur hattı yer değiştirmesi, eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve p-y davranışı incelenmiştir. Statik analizlerde, API yönteminin büyük çaplı kazık tipi türbin temelleri için daha konservatif sonuçlar ürettiği, FLAC3D simülasyonlarının ise zemin-kazık etkileşimini daha gerçekçi bir şekilde modellediği gözlemlenmiştir. Parametrik analizler, zemin rijitliği, kazık boyutları ve yanal yük uygulama yüksekliğinin kazık tipi rüzgar türbin temellerinin davranışındaki etkisini ortaya koymuş; özellikle çamur hattı yer değiştirmesi ve kazık başı eğimi gibi parametrelerin tasarım açısından kritik olduğu belirlenmiştir. Dinamik analizlerde, kazık tipi rüzgar türbin temellerinin gerçekçi rüzgar ve dalga yükleri altında vereceği tepki, OpenFast yazılımı ile tipik bir rüzgar türbini için dinamik yükleme kaydı oluşturmak suretiyle değerlendirmiş ve modelin dinamik analizler için uygun bir temel sunduğu doğrulanmıştır.

Gelecekte, bu çalışmanın kapsamı daha geniş bir yapısal ve zemin parametre aralığını kapsayacak şekilde genişletilecektir. İlerleyen süreçte, geomalzemelerin modellenmesi amacıyla daha gelişkin, zemin sıvılaşması ve zeminin kompaksiyonunu dikkate alabilen karmaşık malzeme modellerine başvurulması düşünülmektedir. Daha fazla parametrik analiz yapılarak, farklı zemin koşulları ve kazık tipi türbin temeli geometrilerinin etkisi daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi planlanmaktadır. Ayrıca, bu çalışmanın bulguları üzerine regresyon analizleri gerçekleştirilerek, kazık tipi türbin temeli tasarımı için önemli denklemler geliştirilmesi öngörülmüştür. Bu denklemler, tasarım sürecini optimize etmek ve maliyet etkin çözümler sunmak açısından değerli olabilir. Dinamik davranış açısından, mevcut modelin yetkinliği doğrulanmış olsa da, farklı kaynaklardan elde edilen rüzgar ve dalga yükü zaman serileri kullanılarak döngüsel yükler altında Kazık tipi türbin temellerinin davranışı daha kapsamlı bir şekilde araştırılabilir. Bu tür analizler, kazık tipi türbin temellerinin uzun vadeli performansı ve yorulma dayanımı hakkında daha fazla bilgi sağlayabilir.

Bu tez, açık deniz rüzgar türbinlerinin temel tasarımı için önemli bir katkı sunmuş ve sonlu farklar yöntemine dayalı FLAC3D yazılımı ile gerçekleştirilen sayısal modellemenin, geleneksel analitik yöntemlere kıyasla daha güvenilir sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Gelecekteki çalışmalar, bu bulguları temel alarak daha yenilikçi ve sürdürülebilir tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Achmus, M. and A. R. K. (2005). Finite element modelling of horizontally loaded Monopile foundations for offshore wind energy converters in Germany. *Frontiers in Offshore Geotechnics: Proceedings of the International Symposium. on Frontiers in Offshore Geotechnics (IS-FOG 2005), 19-21 Sept 2005, Perth, WA, Australia*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/NOE0415390637>
- Achmus, M., Kuo, Y.-S., & Abdel-Rahman, K. (2009). Behavior of Monopile foundations under cyclic lateral load. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 725-735. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.12.003>
- Arshad, Muhammad and B. C. O'Kelly, "Analysis and design of Monopile foundations for offshore wind-turbine structures," *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 34, no. 6, pp. 503-525, 2016.
- Augustesen, A. H., Brødbæk, K. T., Møller, M., Sørensen, S. P. H., Ibsen, L. B., Pedersen, T. S., & Andersen, L. (2009). *Numerical Modelling of Large-Diameter Steel Piles at Horns Rev*. 239. <https://doi.org/10.4203/ccp.91.239>
- Bhattacharya, S. (2019). *Design of foundations for offshore wind turbines* (1st ed.). Wiley, USA.
- 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., & Potts, D. M. (2020). PISA design model for Monopiles for offshore wind turbines: Application to a marine sand. *Géotechnique*, 70(11), 1048-1066. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.277>
- Chaloulos, Y. K., Tasiopoulou, P., Giannakou, A., Chacko, J., Aghakouchak, A., & Stergiou, T. (2024). Fully-Coupled cyclic time-history analyses of Monopile foundations in sand. *Ocean Engineering*, 298, 116691. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116691>
- Das, Braja M. (2014) *Principles of Foundation Engineering-Cengage Learning*. Cengage Learning, ISBN-13: 978-1-305-08155-0
- Diaz, J. L. T. (2011). *Experimental and Numerical Evaluation of the behaviour of laterally-loaded non slender piles*.

- Ebin, D. M. A. (2012). *The Response of Monopile Wind Turbine Foundations in Sand to Cyclic Loading*, Master's Thesis, Tufts University.
- Esfeh, P. K., & Kaynia, A. M. (2020). Earthquake response of Monopiles and caissons for Offshore Wind Turbines founded in liquefiable soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 136, 106213. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106213>
- Fard, M. M. (2021). *Numerical Analysis of Monopile Foundations for Offshore Wind Turbines*, [Doctoral dissertation], İstanbul Teknik Üniversitesi.
- He, R., Kaynia, A. M., Zhang, J. and Chen, W. (2020). "Seismic response of Monopiles to vertical excitation in offshore engineering." *Ocean Engineering*, 216, 108120.
- Itasca. (2025). FLAC3D 9.0 Documentation. <https://docs.itascacg.com/itasca900/flat3d/docproject/source/flat3dhome.html>
- Kaynia, A. M. (2019). "Seismic considerations in design of offshore wind turbines." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 124, 399-407.
- Kallehave, D., B. W. Byrne, C. LeBlanc Thilsted and K. Kousgaard Mikkelsen, "Optimization of Monopiles for offshore wind turbines.," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 373, no. (2015), pp. 1-16, 2015.
- Knudsen, B. S., Østergaard, M. U., Ibsen, L. B., & Clausen, J. (2013). *Determination of p-y Curves for Bucket Foundations in Sand Using Finite Element Modeling*.
- Krishnaveni, B., Satya Kiran, R. A., & Murthy, M. V. R. (2016). Generation of p-y Curves for Large Diameter Monopiles through Numerical Modelling. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 05(07), 379-388. <https://doi.org/10.15623/ijret.2016.0507060>
- Mansour, M. M., Morsi, M. M., & Fayed, A. L. (2021). P-y Curves of laterally loaded barrettes. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(3), 140. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00511-2>
- Matlock, H., & Reece, L.C. (1960) "Generalized solutions for laterally loaded piles.," *Journal of the Soil Mechanics and foundations Division*, vol. 86, no. 5, pp. 63-92, 1960. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000303>

- Murphy, G., Igoe, D., Doherty, P., & Gavin, K. (2018). 3D FEM approach for laterally loaded Monopile design. *Computers and Geotechnics*, 100, 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.03.013>
- NREL. (2023) OpenFAST Documentation. <https://openfast.readthedocs.io/>
- Ramírez L. and Brindley, G. (2021). Offshore wind energy: 2021 mid-year statistics. Wind Europe Org. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/offshore-wind-energy-2021-mid-year-statistics/>
- Costanzo, G., Brindley, G., & Tardieu, P. 2024 Statistics and the outlook for 2025-2030. Wind Europe Org. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2024-statistics-and-the-outlook-for-2025-2030/#overview>
- Sun, Y., Xu, C., Naggar, M. H. E., Du, X., & Dou, P. (2023). Cumulative cyclic response of offshore Monopile in sands. *Applied Ocean Research*, 133, 103481. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103481>
- Williams, R. and Zhao F. (2024). Global Wind Energy Council (GWEC). Global Offshore Wind Energy Report 2024. Brussels, Belgium.
- Wolf, T. K., Rasmussen, K. L., Hansen, M., Roesen, H. R., & Ibsen, L. B. (2013). *Assessment of p-y Curves from Numerical Methods for a Non- Slender Monopile in Cohesionless Soil*.

EKLER**1. Görelî Rijitlik Oranı λ**

Analiz Seri	Kazık Gömülü Derinliği Lp (m)	Kazık Dış Çapı D (m)	Kazık Et Kalınlığı t (mm)	Zemin Young Modülü Es (MPa)	Sürtünme Açısı ϕ (°)	Kazık atalet Katsayısı Ip (m4)	Kazık Young Modülü, Ep (Pa)	Zemin Young Modülü Es (Pa)	D ⁴	Görelî Rijitlik Oranı λ
1	20	6	80	40	30	6.523004191	2.10E+11	4.00E+07	1296	26.42
2	20	6	80	40	36	6.523004191	2.10E+11	4.00E+07	1296	26.42
3	20	6	80	40	42	6.523004191	2.10E+11	4.00E+07	1296	26.42
4	20	6	80	80	30	6.523004191	2.10E+11	8.00E+07	1296	13.21
5	20	6	80	80	36	6.523004191	2.10E+11	8.00E+07	1296	13.21
6	20	6	80	80	42	6.523004191	2.10E+11	8.00E+07	1296	13.21
7	20	6	80	120	30	6.523004191	2.10E+11	1.20E+08	1296	8.81
8	20	6	80	120	36	6.523004191	2.10E+11	1.20E+08	1296	8.81
9	20	6	80	120	42	6.523004191	2.10E+11	1.20E+08	1296	8.81
10	20	10	120	40	30	45.48253163	2.10E+11	4.00E+07	10000	23.88
11	20	10	120	40	36	45.48253163	2.10E+11	4.00E+07	10000	23.88
12	20	10	120	40	42	45.48253163	2.10E+11	4.00E+07	10000	23.88
13	20	10	120	80	30	45.48253163	2.10E+11	8.00E+07	10000	11.94
14	20	10	120	80	36	45.48253163	2.10E+11	8.00E+07	10000	11.94
15	20	10	120	80	42	45.48253163	2.10E+11	8.00E+07	10000	11.94
16	20	10	120	120	30	45.48253163	2.10E+11	1.20E+08	10000	7.96
17	20	10	120	120	36	45.48253163	2.10E+11	1.20E+08	10000	7.96
18	20	10	120	120	42	45.48253163	2.10E+11	1.20E+08	10000	7.96
19	40	6	80	40	30	6.523004191	2.10E+11	4.00E+07	1296	26.42
20	40	6	80	40	36	6.523004191	2.10E+11	4.00E+07	1296	26.42
21	40	6	80	40	42	6.523004191	2.10E+11	4.00E+07	1296	26.42
22	40	6	80	80	30	6.523004191	2.10E+11	8.00E+07	1296	13.21
23	40	6	80	80	36	6.523004191	2.10E+11	8.00E+07	1296	13.21
24	40	6	80	80	42	6.523004191	2.10E+11	8.00E+07	1296	13.21
25	40	6	80	120	30	6.523004191	2.10E+11	1.20E+08	1296	8.81
26	40	6	80	120	36	6.523004191	2.10E+11	1.20E+08	1296	8.81
27	40	6	80	120	42	6.523004191	2.10E+11	1.20E+08	1296	8.81
28	40	10	120	40	30	45.48253163	2.10E+11	4.00E+07	10000	23.88
29	40	10	120	40	36	45.48253163	2.10E+11	4.00E+07	10000	23.88
30	40	10	120	40	42	45.48253163	2.10E+11	4.00E+07	10000	23.88
31	40	10	120	80	30	45.48253163	2.10E+11	8.00E+07	10000	11.94
32	40	10	120	80	36	45.48253163	2.10E+11	8.00E+07	10000	11.94
33	40	10	120	80	42	45.48253163	2.10E+11	8.00E+07	10000	11.94
34	40	10	120	120	30	45.48253163	2.10E+11	1.20E+08	10000	7.96
35	40	10	120	120	36	45.48253163	2.10E+11	1.20E+08	10000	7.96
36	40	10	120	120	42	45.48253163	2.10E+11	1.20E+08	10000	7.96

2. TurbSim input dosyası

-----TurbSim v2.* Input File-----

Example file that can be used with simulations for the NREL 5MW Baseline Turbine; note that UsableTime has been decreased in this file so that the file distributed with the FAST CertTest isn't as large

-----Runtime Options-----

False Echo - Echo input data to <RootName>.ech (flag)
 13428 RandSeed1 - First random seed (-2147483648 to 2147483647)
 "RanLux" RandSeed2 - Second random seed (-2147483648 to 2147483647) for intrinsic pRNG, or an alternative pRNG: "RanLux" or "RNSNLW"
 False WrBHHTP - Output hub-height turbulence parameters in binary form? (Generates RootName.bin)
 False WrFHHTP - Output hub-height turbulence parameters in formatted form? (Generates RootName.dat)
 False WrADHH - Output hub-height time-series data in AeroDyn form? (Generates RootName.hh)
 True WrADFF - Output full-field time-series data in TurbSim/AeroDyn form? (Generates RootName.bts)
 False WrBLFF - Output full-field time-series data in BLADED/AeroDyn form? (Generates RootName.wnd)
 True WrADTWR - Output tower time-series data? (Generates RootName.twr)
 False WrHAWCFF - Output full-field time-series data in HAWC form? (Generates RootName-u.bin, RootName-v.bin, RootName-w.bin, RootName.hawc)
 False WrFMFFF - Output full-field time-series data in formatted (readable) form? (Generates RootName.u, RootName.v, RootName.w)
 False WrACT - Output coherent turbulence time steps in AeroDyn form? (Generates RootName.cts)
 0 ScaleIEC - Scale IEC turbulence models to exact target standard deviation? [0=no additional scaling; 1=use hub scale uniformly; 2=use individual scales]

-----Turbine/Model Specifications-----

31 NumGrid_Z - Vertical grid-point matrix dimension
 31 NumGrid_Y - Horizontal grid-point matrix dimension
 0.05 TimeStep - Time step [seconds]
 30 AnalysisTime - Length of analysis time series [seconds] (program will add time if necessary: AnalysisTime = MAX(AnalysisTime, UsableTime+GridWidth/MeanHHWS))
 30 UsableTime - Usable length of output time series [seconds] (program will add GridWidth/MeanHHWS seconds unless UsableTime is "ALL")
 90 HubHt - Hub height [m] (should be > 0.5*GridHeight)
 145 GridHeight - Grid height [m]
 145 GridWidth - Grid width [m] (should be >= 2*(RotorRadius+ShaftLength))
 0 VFlowAng - Vertical mean flow (uplift) angle [degrees]
 0 HFlowAng - Horizontal mean flow (skew) angle [degrees]

-----Meteorological Boundary Conditions-----

"IECKAI" TurbModel - Turbulence model ("IECKAI", "IECVKM", "GP_LLJ", "NWTUP", "SMOOTH", "WF_UPW", "WF_07D", "WF_14D", "TIDAL", "API", "USRINP", "TIMESR", or "NONE")
 "TurbSim_User.spectra" UserFile - Name of the file that contains inputs for user-defined spectra or time series inputs (used only for "USRINP" and "TIMESR" models)
 "1-ed3" IECstandard - Number of IEC 61400-x standard (x=1,2, or 3 with optional 61400-1 edition number (i.e. "1-Ed2"))
 "B" IECturb - IEC turbulence characteristic ("A", "B", "C" or the turbulence intensity in percent) ("KHTST" option with NWTUP model, not used for other models)
 "NTM" IEC_WindType - IEC turbulence type ("NTM"=normal, "xETM"=extreme turbulence, "xEWM1"=extreme 1-year wind, "xEWM50"=extreme 50-year wind, where x=wind turbine class 1, 2, or 3)
 "default" ETMc - IEC Extreme Turbulence Model "c" parameter [m/s]
 "PL" WindProfileType - Velocity profile type ("LOG"; "PL"=power law; "JET"; "H2L"=Log law for TIDAL model; "API"; "USR"; "TS"; "IEC"=PL on rotor disk, LOG elsewhere; or "default")
 "TurbSim_User.profiles" ProfileFile - Name of the file that contains input profiles for WindProfileType="USR" and/or TurbModel="USRVKM" [-]
 90 RefHt - Height of the reference velocity (URef) [m]
 12 URef - Mean (total) velocity at the reference height [m/s] (or "default" for JET velocity profile) [must be 1-hr mean for API model; otherwise is the mean over AnalysisTime seconds]
 "default" ZJetMax - Jet height [m] (used only for JET velocity profile, valid 70-490 m)
 "default" PLExp - Power law exponent [-] (or "default")
 "default" Z0 - Surface roughness length [m] (or "default")

-----Non-IEC Meteorological Boundary Conditions-----

"default" Latitude - Site latitude [degrees] (or "default")
 0.05 RICH_NO - Gradient Richardson number [-]
 "default" UStar - Friction or shear velocity [m/s] (or "default")
 "default" ZI - Mixing layer depth [m] (or "default")
 "default" PC_UW - Hub mean u'w' Reynolds stress [m²/s²] (or "default" or "none")
 "default" PC_UV - Hub mean u'v' Reynolds stress [m²/s²] (or "default" or "none")
 "default" PC_VW - Hub mean v'w' Reynolds stress [m²/s²] (or "default" or "none")

-----Spatial Coherence Parameters-----

"default" SCMod1 - u-component coherence model ("GENERAL", "IEC", "API", "NONE", or "default")
 "default" SCMod2 - v-component coherence model ("GENERAL", "IEC", "NONE", or "default")
 "default" SCMod3 - w-component coherence model ("GENERAL", "IEC", "NONE", or "default")

"default" InCDec1 - u-component coherence parameters for general or IEC models [-, m⁻¹] (e.g. "10.0 0.3e-3" in quotes) (or "default")
 "default" InCDec2 - v-component coherence parameters for general or IEC models [-, m⁻¹] (e.g. "10.0 0.3e-3" in quotes) (or "default")
 "default" InCDec3 - w-component coherence parameters for general or IEC models [-, m⁻¹] (e.g. "10.0 0.3e-3" in quotes) (or "default")
 "default" CohExp - Coherence exponent for general model [-] (or "default")

-----Coherent Turbulence Scaling Parameters-----

"M:\coh_events\eventdata" CTEventPath - Name of the path where event data files are located
 "Random" CTEventFile - Type of event files ("LES", "DNS", or "RANDOM")
 true Randomize - Randomize the disturbance scale and locations? (true/false)
 1 DistScL - Disturbance scale [-] (ratio of event dataset height to rotor disk). (Ignored when Randomize = true.)
 0.5 CTly - Fractional location of tower centerline from right [-] (looking downwind) to left side of the dataset. (Ignored when Randomize = true.)
 0.5 CTlz - Fractional location of hub height from the bottom of the dataset. [-] (Ignored when Randomize = true.)
 10 CTStartTime - Minimum start time for coherent structures in RootName.cts [seconds]

=====

! NOTE: Do not add or remove any lines in this file!

3. TurbSim summary dosyası

This summary file was generated by TurbSim (v2.00.07a-bjj, 14-Jun-2016) on 12-Jun-2025 at 12:15:50.

Runtime Options:

13428 Random seed #1
 RANLUX Type of random number generator
 F Output binary HH turbulence parameters?
 F Output formatted turbulence parameters?
 F Output AeroDyn HH files?
 T Output AeroDyn FF files?
 F Output BLADED FF files?
 T Output tower data?
 F Output formatted FF files?
 F Output coherent turbulence time step file?
 F Clockwise rotation when looking downwind?
 0 - NONE IEC turbulence models scaled to exact specified standard deviation

Turbine/Model Specifications:

31 Vertical grid-point matrix dimension
 31 Horizontal grid-point matrix dimension
 0.050 Time step [seconds]
 30.000 Analysis time [seconds]
 30.000 Usable output time [seconds]
 90.000 Hub height [m]
 145.000 Grid height [m]
 145.000 Grid width [m]
 0.000 Vertical flow angle [degrees]
 0.000 Horizontal flow angle [degrees]

Meteorological Boundary Conditions:

IECKAI IEC Kaimal spectral model
 1 IEC standard: IEC 61400-1 Ed. 3: 2005
 B IEC turbulence characteristic
 NTM IEC Normal Turbulence Model
 N/A IEC Extreme Turbulence Model (ETM) "c" parameter [m/s]
 PL Wind profile type
 90.000 Reference height [m]
 12.000 Reference wind speed [m/s]
 N/A Jet height [m]
 0.200 Power law exponent
 0.030 Surface roughness length [m]

Non-IEC Meteorological Boundary Conditions:

N/A Site latitude [degrees]
 N/A Gradient Richardson number
 N/A Friction or shear velocity [m/s]

N/A Mixing layer depth [m]
 N/A Mean hub u'w' Reynolds stress
 N/A Mean hub u'v' Reynolds stress
 N/A Mean hub v'w' Reynolds stress

Spatial Coherence Models:

IEC u-component coherence model
 NONE v-component coherence model
 NONE w-component coherence model
 (12.000, 0.353E-03) u-component coherence parameters
 N/A v-component coherence parameters
 N/A w-component coherence parameters
 N/A Coherence exponent

You have requested that the following file(s) be generated:

D:\openfast\TurbSim\TurbSim_v2.00.07a-bjj\90m_12mps_twr.bts (AeroDyn/TurbSim full-field wind file)

Turbulence Simulation Scaling Parameter Summary:

Turbulence model used = IEC Kaimal
 Turbulence characteristic = B
 IEC turbulence type = Normal Turbulence Model
 IEC standard = IEC 61400-1 Ed. 3: 2005
 Mean wind speed at hub height = 12.000 m/s
 Expected value of turbulence intensity at 15 m/s = 14.000%
 Characteristic value of standard deviation = 2.044 m/s
 Turbulence scale = 42.000 m
 u-component integral scale = 340.200 m
 Coherency scale = 340.200 m
 Characteristic value of hub turbulence intensity = 17.033%
 Gradient Richardson number = 0.000

Wind profile type = Power law
 Power law exponent = 0.200
 Mean shear across rotor disk = 0.033 (m/s)/m
 Assumed rotor diameter = 145.000 m
 Surface roughness length = 0.030 m

Nyquist frequency of turbulent wind field = 10.000 Hz

Number of time steps in the FFT = 850
 Number of time steps output = 842
 Number of points simulated = 964

Mean Flow Angles:

Vertical = 0.0 degrees
 Horizontal = 0.0 degrees

Mean Wind Speed Profile:

Height (m)	Wind Speed (m/s)	Horizontal Angle (degrees)	Vertical Angle (degrees)	U-comp (X) (m/s)	V-comp (Y) (m/s)	W-comp (Z) (m/s)
162.5	13.51	0.00	0.00	13.51	0.00	0.00
157.7	13.42	0.00	0.00	13.42	0.00	0.00
152.8	13.34	0.00	0.00	13.34	0.00	0.00
148.0	13.26	0.00	0.00	13.26	0.00	0.00
143.2	13.17	0.00	0.00	13.17	0.00	0.00
138.3	13.08	0.00	0.00	13.08	0.00	0.00
133.5	12.98	0.00	0.00	12.98	0.00	0.00
128.7	12.89	0.00	0.00	12.89	0.00	0.00
123.8	12.79	0.00	0.00	12.79	0.00	0.00
119.0	12.69	0.00	0.00	12.69	0.00	0.00
114.2	12.58	0.00	0.00	12.58	0.00	0.00
109.3	12.48	0.00	0.00	12.48	0.00	0.00
104.5	12.36	0.00	0.00	12.36	0.00	0.00
99.7	12.25	0.00	0.00	12.25	0.00	0.00
94.8	12.13	0.00	0.00	12.13	0.00	0.00
90.0	12.00	0.00	0.00	12.00	0.00	0.00

85.2	11.87	0.00	0.00	11.87	0.00	0.00
80.3	11.73	0.00	0.00	11.73	0.00	0.00
75.5	11.59	0.00	0.00	11.59	0.00	0.00
70.7	11.43	0.00	0.00	11.43	0.00	0.00
65.8	11.27	0.00	0.00	11.27	0.00	0.00
61.0	11.10	0.00	0.00	11.10	0.00	0.00
56.2	10.92	0.00	0.00	10.92	0.00	0.00
51.3	10.73	0.00	0.00	10.73	0.00	0.00
46.5	10.52	0.00	0.00	10.52	0.00	0.00
41.7	10.29	0.00	0.00	10.29	0.00	0.00
36.8	10.04	0.00	0.00	10.04	0.00	0.00
32.0	9.76	0.00	0.00	9.76	0.00	0.00
27.2	9.44	0.00	0.00	9.44	0.00	0.00
22.3	9.08	0.00	0.00	9.08	0.00	0.00
17.5	8.65	0.00	0.00	8.65	0.00	0.00
12.7	8.11	0.00	0.00	8.11	0.00	0.00
7.8	7.36	0.00	0.00	7.36	0.00	0.00
3.0	6.08	0.00	0.00	6.08	0.00	0.00

Harvested Random Seeds after Generation of the Random Numbers:

11420288 K 1
0 K 2

Hub-Height Simulated Turbulence Statistical Summary:

Type of Wind	Min (m/s)	Mean (m/s)	Max (m/s)	Sigma (m/s)	TI (%)
Longitudinal (u)	8.76	12.00	15.35	1.215	10.123
Lateral (v)	-3.90	0.00	2.68	1.347	11.224
Vertical (w)	-2.51	0.00	2.26	0.950	7.915
U component	8.76	12.00	15.35	1.215	10.123
V component	-3.90	0.00	2.68	1.347	11.224
W component	-2.51	0.00	2.26	0.950	7.915
Horizontal (U&V)	8.92	12.08	15.35	1.216	10.067
Total	8.97	12.11	15.37	1.212	10.006

Product	Min Reynolds Stress (m/s) ²	Mean Reynolds Stress (m/s) ²	Max Reynolds Stress (m/s) ²	Correlation Coefficient
u'w'	-3.645	0.138	4.041	0.120
u'v'	-5.481	-0.314	5.345	-0.192
v'w'	-4.669	0.237	8.532	0.185

Friction Velocity (Ustar) = 0.372 m/s
Maximum Instantaneous TKE = 10.042 (m/s)²
Maximum Instantaneous CTKE = 4.328 (m/s)²

Grid Point Variance Summary:

Y-coord -72.50 -67.67 -62.83 -58.00 -53.17 -48.33 -43.50 -38.67 -33.83 -29.00 -24.17 -19.33 -14.50 -9.67 -4.83 0.00 4.83
9.67 14.50 19.33 24.17 29.00 33.83 38.67 43.50 48.33 53.17 58.00 62.83 67.67 72.50

Height Standard deviation at grid points for the u component:

162.50 1.533 1.221 1.419 1.238 1.130 1.085 1.361 1.259 1.313 1.560 1.246 1.298 1.657 1.426 1.802 1.828 1.587 1.401
1.254 1.185 1.340 1.204 1.156 1.236 0.969 0.892 1.021 1.044 1.317 0.942 1.174
157.67 1.527 1.242 1.085 1.225 1.370 1.273 1.430 1.179 1.172 1.271 1.365 1.576 1.430 1.635 1.593 1.750 1.485 1.382
1.510 1.058 1.075 1.157 1.273 1.193 1.043 0.871 0.911 1.157 1.107 1.221 1.454
152.83 1.496 1.260 1.028 1.307 1.156 1.301 1.306 1.218 1.031 0.975 1.069 1.503 1.342 1.657 1.637 1.573 1.431 1.254
1.205 1.039 1.133 1.085 1.177 1.475 1.088 0.964 1.221 0.922 1.022 1.076 1.298
148.00 1.458 1.171 1.296 1.328 1.503 1.400 1.304 1.052 1.093 1.152 1.273 1.283 1.590 1.476 1.552 1.222 1.226 1.200
1.040 1.194 1.146 0.897 0.901 1.340 1.320 1.102 1.156 1.032 0.914 1.272 1.228
143.17 1.481 1.307 1.317 1.479 1.231 1.389 1.438 1.163 1.290 1.285 1.254 1.290 1.557 1.567 1.323 0.989 0.959 1.060
1.178 1.084 1.328 1.284 1.290 1.370 1.448 1.285 1.403 1.043 1.262 1.333 1.234
138.33 1.656 1.361 1.546 1.853 1.833 1.384 1.360 1.090 1.147 1.347 1.322 1.563 1.683 1.702 1.034 1.073 1.161 1.265
1.137 1.377 1.516 1.266 1.443 1.221 1.217 1.153 0.968 1.091 1.215 1.427 1.302
133.50 1.272 1.459 1.635 1.792 1.710 1.669 1.240 0.986 1.035 1.419 1.537 1.697 1.374 1.522 1.176 1.241 1.301 1.102
1.008 1.481 1.605 1.522 1.302 1.222 1.248 1.058 1.212 0.886 1.168 1.454 1.273
128.67 1.098 1.052 1.289 1.515 1.403 1.542 1.057 1.115 1.232 1.491 1.319 1.419 1.458 1.260 1.090 0.888 1.158 1.111
1.266 1.332 1.199 1.408 1.370 1.119 1.081 0.999 0.995 1.016 0.948 1.238 1.287
123.83 1.046 0.958 1.277 1.346 1.272 1.417 1.328 0.817 0.979 1.341 1.069 1.154 1.306 1.227 1.194 1.097 1.324 1.376
1.333 1.341 1.119 1.164 1.070 1.055 0.883 1.003 1.112 1.239 1.059 1.007 1.055

119.00 1.305 1.372 1.440 1.067 1.187 1.442 1.253 1.040 0.839 1.115 1.215 1.134 1.220 1.078 1.258 1.291 1.459 1.502
1.143 1.205 1.136 1.174 1.094 0.986 0.820 0.846 0.888 1.222 1.132 0.943 0.812
114.17 1.464 1.558 1.291 1.444 1.595 1.676 1.363 1.155 1.058 1.044 1.168 1.157 0.960 1.121 1.420 1.679 1.681 1.292
1.040 1.373 1.356 1.264 1.115 1.229 1.178 1.155 1.110 1.072 1.243 1.174 1.155
109.33 1.154 1.285 1.524 1.233 1.523 1.219 1.043 1.090 1.037 1.232 0.984 1.047 1.217 1.172 1.437 1.319 1.359 1.123
0.955 1.245 1.302 1.217 1.284 1.384 1.403 1.249 1.251 0.968 1.342 1.170 1.438
104.50 0.982 1.144 1.325 1.618 1.462 1.342 1.122 1.313 1.117 1.183 0.867 0.919 0.876 0.936 1.084 1.100 1.224 1.067
1.184 1.369 1.310 1.595 1.539 1.488 1.419 1.153 1.023 1.096 1.327 1.358 1.276
99.67 1.117 1.425 1.680 1.866 1.784 1.278 1.190 1.280 1.172 1.130 0.924 0.871 1.027 0.968 0.960 0.922 1.027 0.966
1.019 1.230 1.398 1.605 1.411 1.157 1.239 0.939 1.113 1.211 1.041 1.258 1.012
94.83 1.354 1.436 1.663 1.765 1.535 1.485 1.354 1.259 1.060 0.757 1.105 0.931 0.990 1.307 1.193 1.101 1.124 1.033
1.199 1.013 1.103 1.287 1.284 1.209 1.145 1.000 0.850 1.069 0.996 1.243 1.204
90.00 1.213 1.669 1.683 1.504 1.565 1.242 1.137 1.096 0.989 1.038 0.925 1.109 1.386 1.050 1.185 1.215 1.178 1.063
1.118 1.362 1.088 1.219 1.524 1.221 0.881 0.982 0.979 1.076 0.917 1.004 1.330
85.17 1.112 1.597 1.709 1.730 1.821 1.286 1.311 0.874 0.852 0.910 1.054 1.043 1.367 1.127 1.361 1.235 1.329 1.226
1.238 1.222 1.328 1.164 1.446 1.323 1.069 0.824 1.121 1.029 0.904 0.924 1.391
80.33 1.378 1.520 1.596 1.847 1.722 1.435 1.112 1.272 1.335 1.326 1.229 1.201 1.326 1.176 1.271 1.196 1.088 0.903
1.048 1.208 1.551 1.499 1.625 1.193 1.086 1.079 1.300 1.087 1.114 1.483 1.373
75.50 1.446 1.638 1.626 1.574 1.440 1.722 1.575 1.722 1.408 1.120 1.230 1.402 1.392 1.328 1.258 1.304 1.437 1.615
1.386 1.325 1.188 1.436 1.564 1.112 1.045 1.231 1.338 0.908 0.917 1.161 1.623
70.67 1.268 1.535 1.666 1.141 1.188 1.326 1.687 1.776 1.574 1.128 0.957 1.197 1.271 1.176 1.193 1.483 1.414 1.386
1.403 1.347 1.185 1.408 1.395 1.392 1.119 1.089 1.083 0.997 1.108 1.248 1.357
65.83 1.306 1.579 1.558 1.191 1.202 1.439 1.584 1.519 1.134 1.302 1.070 1.260 0.979 1.078 1.490 1.665 1.429 1.403
1.310 1.106 1.001 1.319 1.289 1.248 1.199 1.313 0.918 0.951 1.071 1.043 1.214
61.00 1.824 1.732 1.464 1.794 1.402 1.742 1.488 1.535 1.367 1.524 1.073 1.282 1.450 1.093 1.311 1.333 1.393 1.604
1.565 1.277 1.320 1.161 1.234 1.371 1.443 1.191 0.937 1.007 1.157 0.898 1.103
56.17 1.661 1.531 1.863 1.936 1.460 1.762 1.504 1.387 1.360 1.497 1.158 1.549 1.694 1.189 1.393 1.046 1.309 1.332
1.444 1.216 1.260 1.488 1.375 1.330 1.247 1.198 1.239 1.336 1.094 0.944 0.930
51.33 1.500 1.655 1.970 1.593 1.804 1.748 1.478 1.254 1.024 1.342 1.321 1.524 1.434 1.623 1.267 1.663 1.384 1.151
1.032 1.172 1.066 1.385 1.294 1.018 1.113 1.290 1.162 1.157 1.373 1.115 1.307
46.50 1.629 1.865 1.591 1.627 1.777 1.441 1.355 1.493 1.352 1.430 1.301 1.253 1.423 1.683 1.669 1.394 1.668 1.603
1.471 1.440 1.203 1.238 1.272 1.121 1.414 1.441 1.125 1.282 1.354 1.211 1.324
41.67 1.583 1.622 1.694 1.758 1.733 1.393 1.260 1.255 1.199 1.446 1.401 1.260 1.362 1.189 1.474 1.380 1.637 1.495
1.426 1.649 1.321 1.208 1.535 1.536 1.483 1.187 1.167 1.008 1.064 0.938 1.296
36.83 1.424 1.715 1.481 1.543 1.450 1.325 1.198 1.232 1.336 1.137 1.185 1.161 1.202 1.568 1.516 1.666 1.469 1.472
1.354 1.428 1.303 1.306 1.461 1.419 1.313 1.421 1.175 1.013 0.916 0.918 1.098
32.00 1.507 1.598 1.544 1.431 1.429 1.107 1.163 1.013 1.049 0.967 1.229 1.311 1.426 1.514 1.328 1.461 1.108 1.383
1.591 1.274 1.485 1.489 1.270 1.133 1.187 1.343 1.293 1.120 1.013 0.983 1.113
27.17 1.525 1.442 1.527 1.239 1.130 1.450 1.119 1.153 1.138 1.509 1.296 1.098 1.154 1.371 1.403 1.222 1.000 1.053
1.180 1.088 1.203 1.192 1.436 1.138 1.348 1.313 1.274 1.148 1.116 1.051 1.046
22.33 1.417 1.346 1.289 1.272 1.400 1.391 1.399 1.158 1.288 1.326 1.345 1.531 1.663 1.452 1.240 1.002 0.899 1.093
1.250 0.931 1.025 1.059 1.407 1.393 1.402 1.380 1.285 1.183 1.464 1.090 1.058
17.50 1.363 1.227 1.101 1.123 1.348 1.594 1.276 1.351 1.318 1.100 1.396 1.511 1.692 1.626 1.304 1.358 1.099 1.185
1.241 1.257 1.205 1.045 1.313 1.495 1.627 1.439 1.181 1.225 1.392 1.114 1.006

Height Standard deviation at grid points for the v component:

162.50 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
157.67 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
152.83 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
148.00 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
143.17 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
138.33 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
133.50 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
128.67 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
123.83 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
119.00 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
114.17 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
109.33 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
104.50 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
99.67 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
94.83 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347
1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347 1.347


```

61.00 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
56.17 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
51.33 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
46.50 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
41.67 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
36.83 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
32.00 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
27.17 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
22.33 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
17.50 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950
0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950 0.950

```

Mean standard deviation across all grid points:

```

u component: 1.280 m/s
v component: 1.347 m/s
w component: 0.950 m/s

```

U-component (X) statistics from the interpolated hub point:

```

Mean = 12.0000 m/s
TI = 10.1232 %

```

Processing complete. 32.281 CPU seconds used.

4. InflowWind input dosyası

```

----- InflowWind INPUT FILE -----
3.96 m/s turbulent winds on 31x31 FF grid and tower for FAST CertTests #18, #19, #21, #22, #23, and #24
-----
False      Echo      - Echo input data to <RootName>.ech (flag)
3 WindType - switch for wind file type (1=steady; 2=uniform; 3=binary TurbSim FF; 4=binary Bladed-style FF; 5=HAWC format;
6=User defined; 7=naive Bladed FF)
0 PropagationDir - Direction of wind propagation (meteorological rotation from aligned with X (positive rotates towards -Y) -- degrees)
(not used for native Bladed format WindType=7)
0 VFlowAng      - Upflow angle (degrees) (not used for native Bladed format WindType=7)
False VelInterpCubic - Use cubic interpolation for velocity in time (false=linear, true=cubic) [Used with WindType=2,3,4,5,7]
1 NWindVel      - Number of points to output the wind velocity (0 to 9)
0 WindVxiList   - List of coordinates in the inertial X direction (m)
0 WindVyiList   - List of coordinates in the inertial Y direction (m)
90 WindVziList  - List of coordinates in the inertial Z direction (m)
===== Parameters for Steady Wind Conditions [used only for WindType = 1] =====
0 HWindSpeed    - Horizontal wind speed (m/s)
90 RefHt        - Reference height for horizontal wind speed (m)
0.2 PLExp       - Power law exponent (-)
===== Parameters for Uniform wind file [used only for WindType = 2] =====
"unused" Filename_Uni - Filename of time series data for uniform wind field. (-)
90 RefHt_Uni    - Reference height for horizontal wind speed (m)
125.88 RefLength - Reference length for linear horizontal and vertical sheer (-)
===== Parameters for Binary TurbSim Full-Field files [used only for WindType = 3] =====
"Wind/90m_12mps_twr.bts" FileName_BTS - Name of the Full field wind file to use (.bts)
===== Parameters for Binary Bladed-style Full-Field files [used only for WindType = 4 or WindType = 7] =====
"unused" FileNameRoot - WindType=4: Rootname of the full-field wind file to use (.wnd, .sum); WindType=7: name of the intermediate
file with wind scaling values
False TowerFile  - Have tower file (.twr) (flag) ignored when WindType = 7
===== Parameters for HAWC-format binary files [Only used with WindType = 5] =====
"wasp\Output\basic_5u.bin" FileName_u - name of the file containing the u-component fluctuating wind (.bin)
"wasp\Output\basic_5v.bin" FileName_v - name of the file containing the v-component fluctuating wind (.bin)
"wasp\Output\basic_5w.bin" FileName_w - name of the file containing the w-component fluctuating wind (.bin)
64 nx          - number of grids in the x direction (in the 3 files above) (-)
32 ny          - number of grids in the y direction (in the 3 files above) (-)
32 nz          - number of grids in the z direction (in the 3 files above) (-)
16 dx          - distance (in meters) between points in the x direction (m)

```

```

3 dy      - distance (in meters) between points in the y direction (m)
3 dz      - distance (in meters) between points in the z direction (m)
90 RefHt Hawc - reference height; the height (in meters) of the vertical center of the grid (m)
----- Scaling parameters for turbulence -----
2 ScaleMethod - Turbulence scaling method [0 = none, 1 = direct scaling, 2 = calculate scaling factor based on a desired standard
deviation]
1 SFx      - Turbulence scaling factor for the x direction (-) [ScaleMethod=1]
1 SFy      - Turbulence scaling factor for the y direction (-) [ScaleMethod=1]
1 SFz      - Turbulence scaling factor for the z direction (-) [ScaleMethod=1]
1.2 SigmaFx - Turbulence standard deviation to calculate scaling from in x direction (m/s) [ScaleMethod=2]
0.8 SigmaFy - Turbulence standard deviation to calculate scaling from in y direction (m/s) [ScaleMethod=2]
0.2 SigmaFz - Turbulence standard deviation to calculate scaling from in z direction (m/s) [ScaleMethod=2]
----- Mean wind profile parameters (added to HAWC-format files) -----
3.96 URef   - Mean u-component wind speed at the reference height (m/s)
2 WindProfile - Wind profile type (0=constant;1=logarithmic;2=power law)
0.2 PLExp_Hawc - Power law exponent (-) (used for PL wind profile type only)
0.03 Z0     - Surface roughness length (m) (used for LG wind profile type only)
0 XOffset   - Initial offset in +x direction (shift of wind box)
=====
                                LIDAR
=====
0 SensorType - Switch for lidar configuration (0 = None, 1 = Single Point Beam(s), 2 = Continuous, 3 = Pulsed)
0 NumPulseGate - Number of lidar measurement gates (used when SensorType = 3)
30 PulseSpacing - Distance between range gates (m) (used when SensorType = 3)
0 NumBeam - Number of lidar measurement beams (0-5)(used when SensorType = 1)
-200 FocalDistanceX - Focal distance co-ordinates of the lidar beam in the x direction (relative to hub height) (only first coordinate
used for SensorType 2 and 3) (m)
0 FocalDistanceY - Focal distance co-ordinates of the lidar beam in the y direction (relative to hub height) (only first coordinate
used for SensorType 2 and 3) (m)
0 FocalDistanceZ - Focal distance co-ordinates of the lidar beam in the z direction (relative to hub height) (only first coordinate used
for SensorType 2 and 3) (m)
0.0 0.0 0.0 RotorApexOffsetPos - Offset of the lidar from hub height (m)
17 URefLid - Reference average wind speed for the lidar[m/s]
0.25 MeasurementInterval - Time between each measurement [s]
False LidRadialVel - TRUE => return radial component, FALSE => return 'x' direction estimate
1 ConsiderHubMotion - Flag whether to consider the hub motion's impact on Lidar measurements
=====
                                OUTPUT
=====
False SumPrint - Print summary data to <RootName>.IfW.sum (flag)
OutList - The next line(s) contains a list of output parameters. See OutListParameters.xlsx for a listing of available output channels,
(-)
"Wind1VelX" X-direction wind velocity at point WindList(1)
"Wind1VelY" Y-direction wind velocity at point WindList(1)
"Wind1VelZ" Z-direction wind velocity at point WindList(1)
END of input file (the word "END" must appear in the first 3 columns of this last OutList line)
=====

```

5. OpenFAST input dosyası

```

----- OpenFAST EXAMPLE INPUT FILE -----
FAST Certification Test #19: NREL 5.0 MW Baseline Wind Turbine with OC3 Monopile RF Configuration, for use in offshore analysis
----- SIMULATION CONTROL -----
True Echo - Echo input data to <RootName>.ech (flag)
"FATAL" AbortLevel - Error level when simulation should abort (string) {"WARNING", "SEVERE", "FATAL"}
30 TMax - Total run time (s)
0.005 DT - Recommended module time step (s)
2 InterpOrder - Interpolation order for input/output time history (-) {1=linear, 2=quadratic}
0 NumCrctn - Number of correction iterations (-) {0=explicit calculation, i.e., no corrections}
99999 DT_UJac - Time between calls to get Jacobians (s)
1E+06 UJacScfFact - Scaling factor used in Jacobians (-)
----- FEATURE SWITCHES AND FLAGS -----
1 CompElast - Compute structural dynamics (switch) {1=ElastoDyn; 2=ElastoDyn + BeamDyn for blades}
1 CompInflow - Compute inflow wind velocities (switch) {0=still air; 1=InflowWind; 2=external from OpenFOAM}
2 CompAero - Compute aerodynamic loads (switch) {0=None; 1=AeroDyn v14; 2=AeroDyn v15}
1 CompServo - Compute control and electrical-drive dynamics (switch) {0=None; 1=ServoDyn}
1 CompHydro - Compute hydrodynamic loads (switch) {0=None; 1=HydroDyn}
1 CompSub - Compute sub-structural dynamics (switch) {0=None; 1=SubDyn; 2=External Platform MCKF}
0 CompMooring - Compute mooring system (switch) {0=None; 1=MAP++; 2=FEAMooring; 3=MoorDyn; 4=OrcaFlex}
0 CompIce - Compute ice loads (switch) {0=None; 1=IceFloe; 2=IceDyn}
0 MHK - MHK turbine type (switch) {0=Not an MHK turbine; 1=Fixed MHK turbine; 2=Floating MHK turbine}
----- ENVIRONMENTAL CONDITIONS -----
9.80665 Gravity - Gravitational acceleration (m/s^2)
1.225 AirDens - Air density (kg/m^3)
1027 WtrDens - Water density (kg/m^3)
1.464E-05 KinVisc - Kinematic viscosity of working fluid (m^2/s)
335 SpdSound - Speed of sound in working fluid (m/s)

```

103500 Patm - Atmospheric pressure (Pa) [used only for an MHK turbine cavitation check]
 1700 Pvap - Vapour pressure of working fluid (Pa) [used only for an MHK turbine cavitation check]
 20 WtrDpth - Water depth (m)
 0 MSL2SWL - Offset between still-water level and mean sea level (m) [positive upward]

----- INPUT FILES -----

"NREOffshrBslne5MW_OC3Monopile_ElastoDyn.dat" EDFile - Name of file containing ElastoDyn input parameters (quoted string)
 "../5MW_Baseline/NREOffshrBslne5MW_BeamDyn.dat" BDBldFile(1) - Name of file containing BeamDyn input parameters for blade 1 (quoted string)
 "../5MW_Baseline/NREOffshrBslne5MW_BeamDyn.dat" BDBldFile(2) - Name of file containing BeamDyn input parameters for blade 2 (quoted string)
 "../5MW_Baseline/NREOffshrBslne5MW_BeamDyn.dat" BDBldFile(3) - Name of file containing BeamDyn input parameters for blade 3 (quoted string)
 "../5MW_Baseline/NREOffshrBslne5MW_InflowWind_12mps.dat" InflowFile - Name of file containing inflow wind input parameters (quoted string)
 "NREOffshrBslne5MW_OC3Monopile_AeroDyn15.dat" AeroFile - Name of file containing aerodynamic input parameters (quoted string)
 "NREOffshrBslne5MW_OC3Monopile_ServoDyn.dat" ServoFile - Name of file containing control and electrical-drive input parameters (quoted string)
 "NREOffshrBslne5MW_OC3Monopile_HydroDyn.dat" HydroFile - Name of file containing hydrodynamic input parameters (quoted string)
 "NREOffshrBslne5MW_OC3Monopile_SubDyn.dat" SubFile - Name of file containing sub-structural input parameters (quoted string)
 "unused" MooringFile - Name of file containing mooring system input parameters (quoted string)
 "unused" IceFile - Name of file containing ice input parameters (quoted string)

----- OUTPUT -----

True SumPrint - Print summary data to "<RootName>.sum" (flag)
 1 SttsTime - Amount of time between screen status messages (s)
 99999 ChkptTime - Amount of time between creating checkpoint files for potential restart (s)
 0.05 DT_Out - Time step for tabular output (s) (or "default")
 0 TStart - Time to begin tabular output (s)
 0 OutFileFmt - Format for tabular (time-marching) output file (switch) {0: uncompressed binary [<RootName>.outb], 1: text file [<RootName>.out], 2: binary file [<RootName>.outb], 3: both 1 and 2}
 True TabDelim - Use tab delimiters in text tabular output file? (flag) {uses spaces if false}
 "ES10.3E2" OutFmt - Format used for text tabular output, excluding the time channel. Resulting field should be 10 characters. (quoted string)

----- LINEARIZATION -----

False Linearize - Linearization analysis (flag)
 False CalcSteady - Calculate a steady-state periodic operating point before linearization? [unused if Linearize=False] (flag)
 3 TrimCase - Controller parameter to be trimmed {1: yaw; 2: torque; 3: pitch} [used only if CalcSteady=True] (-)
 0.001 TrimTol - Tolerance for the rotational speed convergence [used only if CalcSteady=True] (-)
 0.01 TrimGain - Proportional gain for the rotational speed error (>0) [used only if CalcSteady=True] (rad/(rad/s) for yaw or pitch; Nm/(rad/s) for torque)
 0 Twr_Kdmp - Damping factor for the tower [used only if CalcSteady=True] (N/(m/s))
 0 Bld_Kdmp - Damping factor for the blades [used only if CalcSteady=True] (N/(m/s))
 2 NLinTimes - Number of times to linearize (-) [>=1] [unused if Linearize=False]
 30, 60 LinTimes - List of times at which to linearize (s) [1 to NLinTimes] [used only when Linearize=True and CalcSteady=False]
 1 LinInputs - Inputs included in linearization (switch) {0=none; 1=standard; 2=all module inputs (debug)} [unused if Linearize=False]
 1 LinOutputs - Outputs included in linearization (switch) {0=none; 1=from OutList(s); 2=all module outputs (debug)} [unused if Linearize=False]
 False LinOutJac - Include full Jacobians in linearization output (for debug) (flag) [unused if Linearize=False; used only if LinInputs=LinOutputs=2]
 False LinOutMod - Write module-level linearization output files in addition to output for full system? (flag) [unused if Linearize=False]

----- VISUALIZATION -----

3 WrVTK - VTK visualization data output: (switch) {0=none; 1=initialization data only; 2=animation; 3=mode shapes}
 3 VTK_type - Type of VTK visualization data: (switch) {1=surfaces; 2=basic meshes (lines/points); 3=all meshes (debug)} [unused if WrVTK=0]
 false VTK_fields - Write mesh fields to VTK data files? (flag) {true/false} [unused if WrVTK=0]
 15 VTK_fps - Frame rate for VTK output (frames per second){will use closest integer multiple of DT} [used only if WrVTK=2 or WrVTK=3]

