



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tekil-Kazıklı (Mono-Pile) Açık-Deniz Enerji Türbinlerinin Deprem, Rüzgar ve
Deniz Dalgası Etkileri Altında Üç Boyutlu Zemin-Kazık Dinamik Etkileşim
Analizleri**

AHMET AZİZOĞLU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

**Şanlıurfa
2025**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tekil-Kazıklı (Mono-Pile) Açık-Deniz Enerji Türbinlerinin Deprem, Rüzgar ve
Deniz Dalgası Etkileri Altında Üç Boyutlu Zemin-Kazık Dinamik Etkileşim
Analizleri**

AHMET AZİZOĞLU

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı: HALİL MURAD ALĞIN**

**Şanlıurfa
2025**

TEŐEKKÖR

Tezimin çalışmalarımın hazırlaması, tasarlanması ve yazım sürecinde akademik bilgi ve birikimlerini benimlepaylaşan sevgili danışmanım Prof. Dr. Halil Murat ALĐIN iten teőekkÖrlerimi sunarım. Değerli hocamın çalışmalarımdaki heyecanı ve coşkusu harika bir motivasyon kaynağı oldu ve onunla çalışma mutluluğuna eriştiğim için çok mÖteőekkirim. Aynı zamandaalışmalarım esnasında bana içten ve gÖnÖllÖkle bilgilerini paylaşan değerli kardeşim Doktora Öğrencisi Faruk ELMAS'a Özel bir teőekkÖr borçluyum.

Aynı zamanda değerli ailem annem, babam ve kardeşlerimin hayat boyu her daim yanımda oldukları için teőekkÖr ederim. TeőekkÖrÖn kendisinin yanında az kaldığı ve bugÖne kadar hep yanımda olan ve bÖtÖn hedeflerimde her zaman beni destekleyen, sabır gÖsterip gÖven duyan değerli eşim FÖruzan AZİZOğLU'na ve varlıklarından huzur bulduğum bir tanecik ocuklarım Dicle ve Ali'ye çok ama çok teőekkÖr ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
SİMGELER	v
KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. GİRİŞ	1
1.1.1. Tekil Kazıklı Açık Deniz Rüzgar Türbinin Tanımlanması:	5
1.1.2. Tekil Kazıklı Açık Deniz Rüzgar Türbinin Avantajları ve Dezavantajları:	8
1.1.3. Avrupa'da Açık Deniz Rüzgar Enerjisi	9
1.1.4. Açık Deniz Rüzgar Enerjisindeki Trendler	10
1.1.5. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Tezinin Amaçları ve Kapsamı	10
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	12
2.1. Rüzgar Türbini Destek Yapılarının Tasarım Optimizasyonu	12
2.2. Tekil Kazıklı Temellerin Geoteknik Tasarıma Göre Optimum Geometrisi	12
2.3. Açık Deniz Rüzgar Türbinleri İçin Tekil Kazık Temellerin SLS ve ULS Tasarım Kriterlerine Göre Optimum Verimliliği	13
2.4. Yanal Yüklere Maruz Kalan Tekil Kazıklı Yapı Tasarımı	13
2.5. Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin Tasarımında Optimizasyon Metodolojileri	14
2.5.1. Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin Tasarımında Optimizasyon Metodolojilerinde Altyapı Çeşitleri	14
2.5.1.1. Sabit Temelli Altyapılar	15
2.5.1.2. Yüzer Temelli Altyapılar	16
2.5.1.3. Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin Sabit ve Yüzer Rüzgar Türbinlerinin Avantaj ve Dezavantajları	16
2.6. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Tasarım Yük Simülasyonları	18
2.6.1. Çevresel Yükler	19
2.6.1.1. Rüzgar yükleri	20
2.6.1.2. Hidrodinamik yükler	21
2.6.1.3. Sismik yükler	23
3. GEREÇ VE YÖNTEM	24
3.1. ANALİZ METODOJİLERİ	24
3.1.1. Metodoloji Giriş	24
3.1.1.1. Optimizasyon Metodolojisi	25
3.1.1.2. Optimizasyon Algoritması	26
3.1.1.3. Optimizasyon Değişkenleri	27
3.1.1.4. Dinamik Davranış Değerlendirmesi	28
3.2. Malzeme	28
3.2.1. Zemin Malzemeleri	29
3.2.1.1. Dogger Bank Türbin Yerinin Toprak Stratigrafisi	29
3.2.1.2. Dogger Bank Türbin Yerinin Yüzey Altı Modellemesi	31
3.3. Sonlu Eleman Modellemesi	33
3.3.1. Zemin-Kazık-Yapı Modellemesi	33
3.3.2. Dogger Bank Açık Deniz Rüzgar Türbin sisteminin SE modelleri ve analiz parametreleri	34
3.3.3. Sayısal Modellemede Midas GTS NX Genel Hususları	38
3.3.4. Sonlu Elemanın Sayısal Modellemesi	39
3.3.5. Sonlu Elemanlar Kullanılacak Zemin Parametreleri	46
3.3.6. Analizde Çıkan Sonuçlar	48
4. BULGULAR	50
4.1. BULGULAR ve ANALİZ SONUÇLARI	50

4.1.1. Genel	50
4.1.2. Tekil Kazıklarda Belirlenen Parametrelere Göre Gidelen Hedefler	50
4.1.3. Farklı Boyuttaki Tekil Kazıkların Sonuçlarının İvme, Deformasyon ve Dönme Değişimleri Sonuçları	53
4.1.4. Tekil Kazıkta Farklı Yükleme Koşullarındaki Davranış Eğrileri	57
4.1.5. Yükleme Koşullarına Göre Tekil Kazık Davranışlarının Değerlendirilmesi	58
4.1.6. Çok Hedefli Optimizasyonda Uygunluk Fonksiyonlarının Grafıksel Gösterimi	62
4.1.7. Çok Hedefli optimizasyonda Uygunluk Fonksiyonlarının Karşılaştırılması Grafıksel Analizi	64
5. TARTIŞMA	68
5.1. İstatistiksel Değerlendirme	68
5.2. Optimizasyon Verimlilik Sınırlarının Değerlendirilmesi	68
6. SONUÇLAR	70
7. ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	83

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tekil-Kazıklı (Mono-Pile) Açık-Deniz Enerji Türbinlerinin Deprem, Rüzgar ve Deniz Dalgası Etkileri Altında Üç Boyutlu Zemin-Kazık Dinamik Etkileşim Analizleri

AHMET AZİZOĞLU

**HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

Yıl: 2025, Sayfa : 80

Açık Deniz Rüzgar Türbilerinin dinamik analizlerinin belirlenmesinde önemli tasarım parametrelerinin üzerinde durulması gereken konudur. Rüzgar türbinin bağlandığı tekil kazıklı temel de hem mühendislik tasarımı açısından hemde ekonomik olarak önemli bir rol oynar. Tekil kazıklı Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin, sismik ve zamana bağlı dinamik çevresel etkiler altında, doğrusal olmayan geoteknik etkileşimleri göz önünde bulundurularak tasarlanması ve güncel enerji sektörü kapsamında ise önemli bir konudur. Tekil temelli rüzgar türbinin tasarımı üç boyutlu (3B) jeomorfolojik değişimler ve jeomorfolojik deformasyon dahil olmak üzere karmaşık zemin koşullarında inşa edilen tekil kazıklı rüzgar türbinleri ile dinamik zemin-yapı etkileşimi özellikleri ile sonlu elemanlar (SE) analizleri kullanılarak araştırılmıştır. Tekil kazıklı Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinde deprem ve dinamik çevresel kuvvetlerin etkisiyle, standart yapı sistemlerinde sıkça karşılaşılmaması güç olan, dönme ve deformasyon tepkileri ve zemin ortamı ile ilgili karmaşık davranış mekanizmaları araştırması yapıldı. Bu tarz tekil temel tekilsistemlerinde oluşan yanal deformasyon, temel rotasyonu ve eğilme moment değişimleri, birleşik etkiler altında incelendi. Bu kapsamda deprem, rüzgar ve deniz dalga etkileri kapsamında kazık tepkilerinin hangi oranda etkilendiği ve zemin-kazık etkileşimi göz önünde bulundurularak ivme ve deformasyon davranış değişimlerinin nasıl oluştuğu incelendi. Tez çalışmamızda doğrulama yöntemi olarak, simülasyon sonuçlarının optimizasyon yönteminde çıkan sonuçları karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Zeminin tekil kazık türbin etkileşim davranışı, tek taraflı sismik uyarım ve rüzgar ve dalga çevresel yükleri altında doğrusal olmayan zaman geçmişi tepkilerine dayalı olarak incelenmiştir. Tekil kazıklı sistemlerin dinamik tepkisinin ve tekil kazık türbin etkileşimlerinin jeomorfolojik yeraltı varyasyonlarından önemli ölçüde etkilendiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, 3B SE analizleri bağlamında sismik saha araştırması yoluyla belirlenen deformasyonların 3B varyasyonlarını dikkate almak kritik önem taşımaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Tekil Kazık, Açık Deniz Rüzgar Türbinleri, Sismik Yük, Doğrusal Olmayan Çevresel Yük, Dinamik Yük, Nümerik Analiz

ABSTRACT

MASTER THESIS

Three-Dimensional Soil–Pile Dynamic Interaction Analyses Of Monopile Offshore Energy Turbines Under The Effects Of Earthquake, Wind, And Ocean Waves

AHMET AZİZOĞLU

**HARRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE EDUCATION
CIVIL ENGINEERING**

Year: 2025, Page : 80

The dynamic analysis of offshore wind turbines requires careful consideration of various key design parameters, especially due to the complexity of their interaction with the marine environment. Among these, the monopile foundation—commonly used to support turbines—plays a crucial role not only in structural performance but also in terms of cost-efficiency. Designing such systems under the combined influence of seismic activity and time-dependent environmental loads demands a detailed understanding of nonlinear soil-structure interaction mechanisms. This study focuses on the behavior of monopile-supported offshore wind turbines constructed in complex soil conditions, taking into account three-dimensional geomorphological variations and deformations. Using finite element analysis, dynamic responses such as lateral displacements, rotational movements, and bending moment changes were evaluated under the combined effects of earthquakes, wind, and ocean waves. These responses, which are rarely encountered in standard structural systems, highlight the need for a more integrated design approach. Special attention was given to how seismic and environmental forces alter the acceleration and deformation behavior of the monopile system, with soil-pile interaction playing a central role. Simulation results were compared with those obtained through optimization techniques as part of the validation process. The nonlinear time-history responses under unilateral seismic excitation, combined with wind and wave loads, were used to investigate the dynamic behavior of the system. Findings indicate that the interaction between the monopile and surrounding soil is significantly affected by subsurface geomorphological variations. Therefore, incorporating three-dimensional deformation patterns derived from seismic field investigations into the analysis is essential for achieving realistic and reliable design outcomes.

KEYWORDS: Monopile, Offshore Wind Turbines, Seismic Load, Nonlinear Environmental Load, Dynamic Load, Numerical Analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Tasarım Bölümleri ve Ölçü Standartları (Bouzzid vd., 2018)	3
Şekil 1.2. 7.5 m Godewind Offshore Rüzgar Çiftliği İçin Yapılmış Tekil Kazık (Kallehave vd., 2015)	5
Şekil 1.3. Açık Deniz Rüzgar Çiftliği Geçiş Parçası (Kallehave vd., 2015)	6
Şekil 1.4. Açık Deniz Rüzgar Türbini (Kallehave vd. 2015, Schafhirt vd. 2016).	7
Şekil 1.5. Rüzgar Türbinindeki Çevresel Yükler (Ziegler, Smolka vd., 2017) ve (Bhattacharya 2014)	8
Şekil 2.1. Sabit Açık Deniz Rüzgar Türbini Türleri: (a) Tekil Kazık; (b) Tripod; (c) Ceket Alt Yapıları (Plodpradit vd., 2019)	15
Şekil 2.2. Zamana bağlı olarak (a) rüzgar ve (b) deniz dalgası yükleri (Algın vd., 2025)	19
Şekil 2.3. Açık Deniz Rüzgar Türbini İçin Kullanılan Veriler (Algın vd., 2025)	23
Şekil 3.3. Optimizasyon İş Akışı (Alcantara vd., 2020).	26
Şekil 3.1. Tekil Kazık Rüzgar Türbini İçin Çalışılan Alan ve Sismik Test Sonuçların (Algın vd., 2025)	29
Şekil 3.2. Jeomorfolojik Zemin Simülasyonu. İzlenen Görüntü İşleme Aşamaları ve Jeomorfolojik Zemin Simülasyonu 3B Görseli	31
Şekil 3.4. Dinamik Analizlerde Elde Edilen İvme, Deformasyon ve Dönme Sonuçlarının Temsili Görüntüleri	37
Şekil 3.5. Dinamik Analizlerden Elde Edilen İvme, Deformasyon ve Dönme Sonuçlarının Temsili Görüntüleri	38
Şekil 3.6. Midas GTS NX (2023) Malzeme Materyalleri Girişi	39
Şekil 3.7. Midas GTS NX (2023) Malzeme Materyallerin Atanması	40
Şekil 3.8. Midas GTS NX (2023) Dinamik Analiz Adımları Gösterimi	41
Şekil 3.9. Midas GTS NX Yazılımı İçin İşlem Akış Diyagramı	42
Şekil 3.10. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Mesh Sistem Görüntüsü	43
Şekil 3.11. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Dalga ve Deniz Yükleri Görüntüsü Midas GTS NX (2023)	44
Şekil 3.12. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Dinamik Tepki Görüntüsü	45
Şekil 3.13. Midas GTS NX (2023) Kazıkların Mesh Yapılması Görüntüsü	46
Şekil 3.14. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Kazık Türbin Çevresel Yükleme Görüntüsü Midas GTS NX (2023)	47
Şekil 3.15. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Dinamik Analiz Sonrası Zemin Tepki Görseli Midas GTS NX (2023)	48
Şekil 4.1. Tekil Kazığın Yapı Zemin Etkileşimne Göre Farklı Derinlik, Yük ve Uzunlukta Oluşan Davranış Değişimleri Grafikleri	50
Şekil 4.2. 5 m Derinlikteki Tekil Kazığın X, Y ve Z Yönlerindeki İvme-Zaman Değişimleri	54
Şekil 4.3. 5 m Derinlikteki Tekil Kazığın X, Y ve Z Yönlerindeki Deformasyon-Zaman Değişimleri	54
Şekil 4.4. 5 m Derinlikteki Tekil Kazığın X,Y Ve Z Yönlerindeki Dönme-Zaman Değişimleri	55
Şekil 4.5. 21 m Derinlikteki Tekil Kazığın X, Y ve Z Yönlerindeki İvme-Zaman Değişimleri	56
Şekil 4.6. Derinlikteki Tekil Kazığın X, Y ve Z Yönlerindeki Deformasyon-Zaman Değişimleri	56
Şekil 4.7. 21 m Derinlikteki Tekil Kazığın X, Y ve Z Yönlerindeki Dönme-Zaman Değişimleri	57
Şekil 4.8. Eşitlik (1-5)'Teki Modellerin İstatistiksel Analizi, (A1-A5) Modeller İçin Artıkların Normal Olasılık Grafikleri, (B1-B5) Gerçek ve Tahmin Edilen Değerler, (C1-C5) Box-Cox Dönüşüm Analizi, (D1-D5) Cook Mesafesinin Değişimi, (E1-E5) Tasarım Noktalarındaki Kaldıraç Değişimi, (F1-F5) Sırasıyla DFFITS Değerleri	59
Şekil 4.9. Eşitlik (1-5)'Teki Regresyon Modellerine Dayalı Olarak Bu Çalışmadaki Parametrelerin 3B Değişimleri	60
Şekil 4.10. Uygunluk Fonksiyonları İle Çok Amaçlı Optimizasyonun Görseli	62

Şekil 4.11. Rüzgar Türbinleri İçin Gerçekleştirilen Çok Amaçlı Verimlilik Yüzeyleri	65
Şekil 4.12. Rüzgar Türbini Kazık Temelleri İçin Belirlenen Uygun ve Verimli Çözüm	
Aralıkları	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Sabit Açık Deniz Sabit Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için Alt Yapıların Karşılaştırılması	17
Çizelge 3.1. Kullanılan malzeme modeli parametreleri (Algın vd ., 2025)	34
Çizelge 3.2. Kullanılan hipoplastik kurucu model parametreleri (Algın vd ., 2025)	35
Çizelge 4.1. Çok amaçlı optimizasyonda parametrelerin tanımları ve hedefleri	51
Çizelge 4.2. Çok Amaçlı Optimizasyonda Anova Sonuçları	52

SİMGELER

a	İvme (m/s^2)
c	Kohezyon (kPa)
CSR	Siklik Gerilme Oranı (Cyclic Stress Ratio)
D	Kazık çapı (m)
DoF	Serbestlik Derecesi (Degree of Freedom)
E	Elastisite modülü (Pa)
F	Kuvvet (N)
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis)
Fs	Güvenlik Katsayısı (Factor of Safety)
g	Yerçekimi İvmesi
G	Kesme modülü (Pa)
h	Tabaka kalınlığı (m)
H	Derinlik/Yükseklik (m)
I	Eylemsizlik momenti (m^4)
K	Yay katsayısı (kN/m^3)
k	Geçirgenlik katsayısı (m/s)
L	Kazık uzunluğu (m)
M	Moment (Nm)
MP	Tekil Kazık Temel (Monopile)
N	Normal kuvvet (N)
OWT	Açık Deniz Rüzgar Türbini (Offshore Wind Turbine)
P	Yük (N)
PGA	Maksimum Yer İvmesi (Peak Ground Acceleration)
q	Yayılı yük (kPa)
R	Reaksiyon kuvveti (kN)
RRSmax	Maksimum Rölatif Rijitlik Değeri
RRSmin	Minimum Rölatif Rijitlik Değeri
RSD	Rijitlik Standart Sapması
S	Gerilme (kPa)
SE	Sonlu Eleman (Simülasyonu)
T	Zaman (s)
Tmax	Maksimum Tork (Maximum Torque)
V	Kesme kuvveti (N)
W	Ağırlık (N)
x	Yatay yer değiştirme (m)

y	Düşey yer değıştirme (m)
z	Dikey konum (m)
γ	Birim hacim ağırlık (kN/m ³)
Δ	Fark/Değişim miktarı
Δu	Fazla Gözenek Suyu Basıncı (kPa)
ε	Birim Deformasyon
θ	Dönme Açısı (Radyan)
μ	Poisson oranı
ξ	Sönüm oranı
ρ	yoğunluk (kg/m ³)
σ	Normal gerilme (Pa)
Φ	İçsel sürtünme açısı (°)
ω	Açısal frekans (rad/s)

KISALTMALAR

ANOVA	Analysis of Variance (Varyans Analizi)
CSR	Siklik Gerilme Oranı (Cyclic Stress Ratio)
DOF	Serbestlik Derecesi (Degrees of Freedom)
MP	Tekil Kazık Temel (Monopile)
owt	Açık Deniz Rüzgar Türbini (Offshore Wind Turbine)
PGA	Maksimum Yer İvmesi (Peak Ground Acceleration)
SE / FEA	Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis)
Vd.	Ve diğerleri

1. GİRİŞ

1.1. GİRİŞ

Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin elde edilen rüzgar enerjisinden kara yapılarındaki referanslara göre bir çok avantaja sahiptir; bunların en önemli kısımlarında daha güçlü ve daha istikrarlı rüzgar hızları ve aynı zamanda gürültüsü daha az ve görsel etki alanı ile daha büyük enerji potansiyeli ve kıyı şehirlerine yakınlıktır. Günümüzde artmakta olan küresel enerji ihtiyacından kaynaklı olarak, Açık Deniz Rüzgar Türbininde inşaat sektöründeki teknolojik gelişmelere yön verdi. Tipik olarak toplam proje maliyetinin %30'una kadarını oluşturabilen Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin temeli, inşaat sürecinin çok önemli bir yönünü temsil etmektedir (Wu vd.,2019). Açık Deniz Rüzgar Türbinleri bölümleri Şekil 1.1.'de gösterilmiştir (Bouzid vd., 2018). Tekil Kazıklı sistemler baskın teknoloji olmaya devam etmekte ve şu anda kullanılan Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin %80'inden fazlasını temsil etmektedir (Ho vd., 2016) Tekil kazıklı temeller tipik olarak 4 ila 10 metre arasında olup büyük çaplıdır, fakat gelecekteki tasarımlar için daha büyük boyutlar düşünülmektedir . (Cheng X., 2023)

Açık deniz ortamlarında bulunana zorlu doğa koşullarına göre, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin maruz kaldığı dalga deniz ve depremlerin olduğu çevresel koşullardaki dinamik yüklerine maruz kalabilirler (Alkhoury P., 2022). Açık Deniz Rüzgar Türbini yapı sistemlerinin maruz kaldığı başlıca dinamik çevresel yükler türbinin ve kule üzerindeki kısımların üzerindeki rüzgar kuvvetleri ile kule ve tekil kazık bölümlerinin üzerinde bulunan hidrodinamik kuvvetlerdir. Ayrıca, aktif fay hatlarının bulunduğu sismik olaylarının olduğu bölgelerdeki Açık Deniz Rüzgar Türbinler de zorlu açık deniz durumlarında aynı zamanda deprem etkileri altında da kalabilir. Esas durumda yaşanan çevresel doğa etkileri sonucunda; tekil kazığın açık deniz tüzgar turbinine etkileyen dinamik yükleri güvenli bir şekilde yeraltı ortamına aktarmalıdır. Bu yüzden, Açık Deniz Rüzgar Türbininin tekil kazık temellerinin geoteknik sistem tasarımlarında, yapının boyutlandırılması ve bu tasarımın analizi gibi bilimsel araştırma konuları birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir.

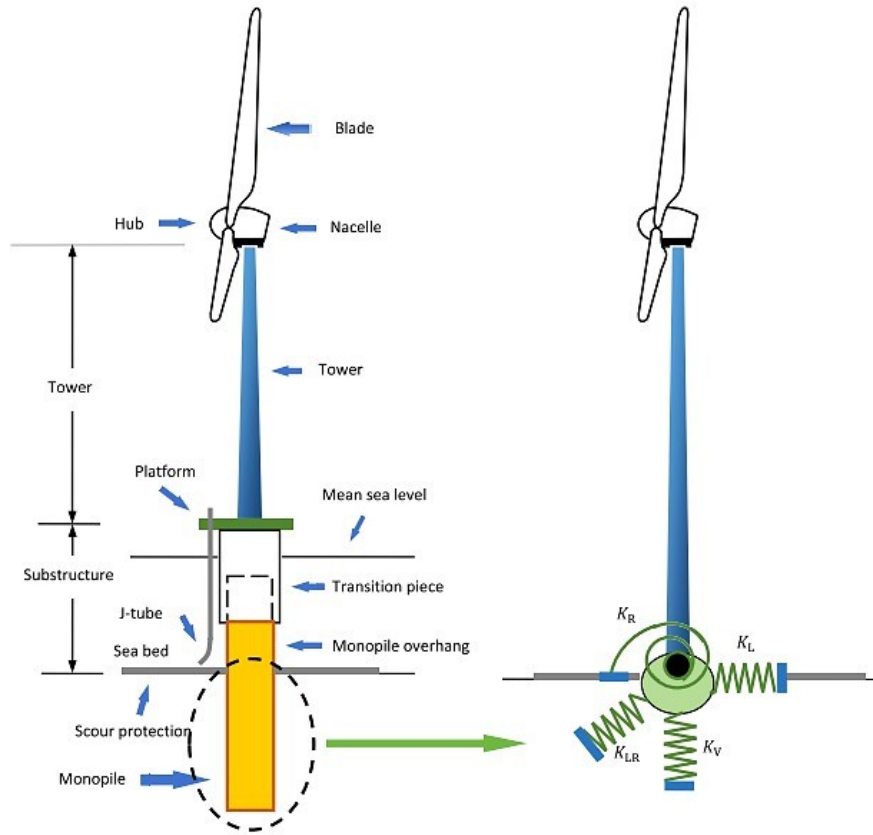
Çamur hattı seviyesinde kazık-zemin sisteminin kuvvet-deformasyon değişiminin bir fonksiyonu olarak yapının doğal frekansının belirlenmesi ve pratik tasarım uygulamasında gerekli olan diğer tasarım hesaplamaları konusunda bazı rehberlik çalışmaları bulunmaktadır. Açık Deniz Rüzgar Türbin sisteminin temel davranışını daha gerçekçi bir şekilde belirlemek için, son gelişmiş analizler olarak 3B SE modellemesi kullanılarak daha doğru sonuçlara ulaşılmıştır. Açık Deniz

Rüzgar Türbini tekil temel sistemine gelen birlikte hareket eden bütün yüklemelerinin sonuçları ile oluşan ve tekil temel kazık tarafından deneyimlenen sonuç tepkileri oldukça önem arz etmiştir. Günümüzde ilerleyen yıllarla beraber gelişen teknolojik olanakların oluşturduğu imkanlarla birlikte bu analizleri kapsamlı bir şekilde gerçekleştirmek günümüz araştırmacıları için artık imkansız değildir. Bu tez, farklı açık deniz rüzgar türbini konseptlerindeki en son teknolojiye ve bunların tasarım, maliyet ve beklenen performans açısından farklılıklarına genel bir bakışla başlamaktadır. Daha sonra Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için genel tasarım ve optimizasyon yaklaşımları gözden geçirilmektedir. Buna statik, frekans alanı ve zaman alanı analizleri dahildir. Bu optimizasyon yaklaşımlarında yer alan optimizasyon kriterleri de dahil edilmiştir. Bir Açık Deniz Rüzgar Türbin tasarımı üç boyutta da Bu tez kapsamında yapıların çalışma, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerin zemin-kazık etkileşim analizlerinin, zemin ortamının kapsamlı bir şekilde modellenmesiyle daha gerçekçi bir şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.

Genel olarak, Açık Deniz Rüzgar Türbini proje alanları boyunca ayrıntılı jeomorfolojik varyasyonları tespit etmek için deniz tabanında derin sismik yansıma jeofizik araştırmaları yapılmaktadır. Phillips ve diğerleri (2022), Kuzey Denizi'nin güneyindeki Dogger Bank (İngiltere) rüzgar çiftliği proje alanlarının jeolojik yapısını ayrıntılı olarak tanımlamak için yüksek çözünürlüklü 2D stratigrafik kesitler sağlayarak bu testlerin sonuçlarından daha fazla yararlanmıştır. Bazı çalışmalar bu bölgenin yüksek çözünürlüklü 2D stratigrafik kesitlerini de üretmiştir. Bu sayede Dogger Bank (UK) bölgesindeki jeomorfolojik birimler arasındaki ayrışma ve alterasyon, deforme olmuş ve katlanmış birimlerdeki değişimler, katlanmış bindirme birimlerindeki değişimler, alçak ve derin yataklı sedimanter havza birimleri, süreksiz tabakalar ve faylar gibi detaylar tespit edilebilmiştir. Bu nedenle, Phillips ve diğerleri (2022) Açık Deniz Rüzgar Türbinin proje alanlarının jeolojik yapısının 2 boyutlu sismik yansıma sonuçlarından ayrıntılı olarak elde edilebileceğini göstermiştir.

Dogger Bank rüzgar çiftliği saha incelemeleri sırasında 2D veri ızgarası formunda elde edilen sismik yansıma yeraltı verileri ve aynı bölgedeki çok sayıda koni penetrasyon testinden (CPT) elde edilen derinliğe bağlı koni ucu öz direnç (qc) değerleri, Dogger Bank bölgesindeki sismik yansıma verilerini ve jeomorfolojik varyasyonları kalibre etmek için kullanılmıştır. Phillips ve arkadaşlarının (2022) yüksek çözünürlüklü 2D jeomorfolojik varyasyonları ile Emery ve arkadaşlarının (2020, 2019a ve 2019b) CPT test sonuçları birleştirilmiş ve sunulan 3B SE sayısal analizlerinde kullanılan elasto-plastik ve hipoplastik modeller için gerekli malzeme özelliklerini elde etmek için kullanılmıştır. Sunulan 3B SE modelleri görüntü işleme

tekniki kullanılarak geliştirilmiştir ve bu tekniğin geoteknik tasarımda sayısal modellerin oluşturulması için ilk kullanımı literatürde yazar tarafından sunulmuştur (Algın ve diğerleri 2022). Buna göre, Phillips ve diğerleri (2022) tarafından geliştirilen jeolojik kesit görüntüleri kullanılarak sunulan 3B SE modelinde Dogger Bank bölgesindeki fay geçiş zonları, deforme olmuş ve katlanmış zemin birimleri ile 3B jeomorfolojik zemin varyasyonu dikkate alınmıştır (Emery ve diğerleri., 2019). Dolayısıyla bu çalışma, 2B sismik yansıma verileri kullanılarak Açık Deniz Rüzgar Türbinin tasarım ve analizinde daha gerçekçi ve kapsamlı 3B SE modellerinin gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 1.1. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Tasarım Bölümleri ve Ölçü Standartları (Bouzid vd., 2018)

Birleşik Krallık'ta depremler nispeten nadirdir, ancak kayıtlar Dogger Bank bölgesinde Richter ölçeğine göre 5 büyüklüğünden daha büyük depremlerin meydana geldiğini göstermektedir (Alkhour ve diğerleri, 2021). Bu makalede, Birleşik Krallık'ta 27 Ocak 2008 tarihinde meydana gelen ve Richter ölçeğine göre 5.2 büyüklüğünde olan Lincolnshire depremi için Charnwood Forest (CWF) istasyonundan alınan kayıtlar kullanılmıştır. Bu depremin merkez üssü Market Rasen (Lincolnshire) olmuştur (Abel Rajman ve Ark., 2005). Bu depremin sismik risk

kategori ISO 19901-2 (2004)'e göre üçüncü kategoriye girdiğinden Madabhushive ark., (2013), sunulan Açık Deniz Rüzgar Türbinin sistemi için zemin-yapı etkileşimli doğrusal olmayan zaman-tarih analizi yapılmıştır. Rüzgar kuvveti ve deniz dalgası etkilerinin simülasyonu için Cheng ve diğerleri (2023) tarafından kullanılan kuvvet-zaman eğrileri kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında ele alınan Açık Deniz Rüzgar Türbin sisteminde, tekil kazıklı temelin dört tarafında derinlik boyunca atalet ve kinematik zemin-kazık etkileşiminin birleşik etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bununla birlikte, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin sermaye maliyetlerinin %20'ye kadarı destek yapılarıyla ilişkilidir. Ancak tasarımdaki jeoteknik ve temel sorunları genellikle aşırı muhafazakar yaklaşımlarla çözülmektedir. Zemin-yapı etkileşiminin (SSI), özellikle de temel sertliği ve sönümlenmenin tasarım tahminleriyle ilgili olarak daha doğru modellenmesinin, temel tasarımında maliyet azaltımı için büyük potansiyeller sağlayacağına inanılmaktadır. Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin sermaye maliyetleri malzeme kullanımıyla yakından ilişkilidir, çelik tonajında %10-25 aralığında azalmalar mantıksız değildir. Bu optimizasyon potansiyeline ulaşmak için, zemin tepkisinin daha doğru modelleri, sönümlenmenin değerlendirilmesi ve doğru yorulma hasarı hesaplamaları gereklidir. Açık Deniz Rüzgar Türbin sisteminin optimizasyon yapılarak en uygun ve en ekonomik tekil kazık araştırılmıştır. Aynı zamanda, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin zemin-kazık etkileşiminin birleşik etkisi, tekil kazık temelin dört zıt tarafı için dönüşüm fonksiyonlarının ivme, dönme, deformasyon ve moment tepki bileşenleri açısından değişimi açısından incelenmiştir. Bundan dolayı, tekil kazık temelin dört karşıt tarafında farklı olan 3 boyutlu jeomorfolojik varyasyonların ve fay geçiş bölgelerindeki değişikliklerin birleşik zemin-kazık etkileşimini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Sonuçların değerlendirme açısından, sayısal doğrulama ve literatürdeki diğer sayısal çalışmalarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Dogger Bank bölgesinde kullanılan türbinler hakkında bilgi eksikliği nedeniyle, daha önce Alkhoury ve diğerleri (2022, 2021) tarafından incelenen DTU-10-MW tipi büyük ölçekli türbin, bu çalışma için referans türbin olarak seçilmiştir.

Bu bağlamda, DTU10-MW türbininin tekil kazık temeli, kulesi, kanatları, göbeği ve motor parçaları bu türbinin gerçek geometrik boyutları kullanılarak modellenmiştir. Analizlerde kullanılan hipoplastik model, daha önce Alkhoury ve diğerleri (2022) tarafından kullanılan sofistike bünye modellerinden biridir (Alkhoury ve diğerleri, 2022). Açık Deniz Rüzgar Türbin sisteminin doğrusal olmayan sismik analizlerinde, türbin yapısına etki eden aerodinamik ve hidrodinamik yükler zaman tanım alanında uygulanmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin deprem ve çevresel yükler altındaki davranışlarını daha

doğru bir şekilde modelleyerek, mühendislerin tasarımlarını daha güvenilir ve aynı zamanda dayanıklı yapmasına olanak sağlamayı amaçlanmıştır.



Şekil 1.2. 7.5 m Godewind Offshore Rüzgar Çiftliği İçin Yapılmış Tekil Kazık (Kallehave vd., 2015)

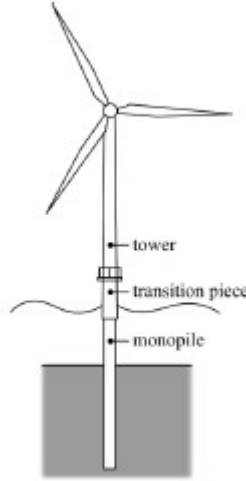
1.1.1. Tekil Kazıklı Açık Deniz Rüzgar Türbinin Tanımlanması:

Tekil kazıklı rüzgar türbinin tekil temel üstü kule motor ve rüzgar türbinin buluşu pervane sistemi vardır. Aynı zamanda tekil kazıklı temelin mevcut üstündeki bölümlerden gelen dikey ağırlıklar ve bulunduğu çevresel faktörlerden dolayı rüzgar okyanus dalga akıntı yükleri yüklenen büyük çaplı ucu açık bir geometriye sahip boru şeklindeki tekil temeldir. İlk olarak, bir Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin temelinin nasıl tasarlandığını ve yorulma limitinin nasıl hesaba katıldığını bilmek önemlidir. Bu temel tiplerinden en yaygın olanı tekil kazıklı temeldir (Ho ve Mbistrova, 2017).



Şekil 1.3. Açık Deniz Rüzgar Çiftliği Geçiş Parçası (Kallehave vd., 2015)

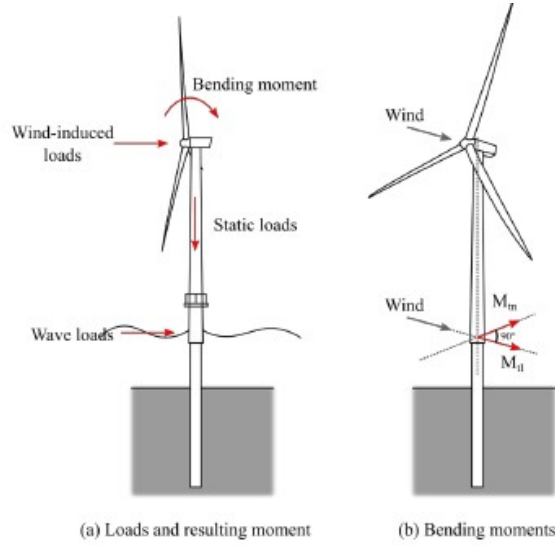
Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin kulesi, geçiş parçası ile tekil kazığa bağlanır (Şekil 1.3) (Kallehave vd., 2015). Geçiş parçası ve tekil kazık birlikte alt yapı olarak tanımlanmaktadır (Vorpahl vd., 2013). Bir alt yapıyı tasarlarken yorulma ömrünü göz önünde bulundurmak önemlidir. Yorulma, bir malzemenin belirli sayıda yük döngüsünü taşıdıktan sonra çatladığı, oysa aynı büyüklükteki tek bir yükün bir arızaya neden olmayacağı fiziksel bir olgudur (Schijve, 2003). Daha düşük maliyetler hedeflendiğinde, alt yapı için kullanılan malzemenin azaltılması ancak yine de yeterli bir yorulma ömrünün sağlanması gerekmektedir. Bir OWT'nin temeli, türbinin toplam maliyetinin %34'ünü oluşturduğundan, malzeme maliyetlerinin azaltılması toplam maliyetler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kallehave ve diğerleri (2015) ana tasarım parametrelerinden ikisinin duvar kalınlığı ve tekil kazık çapı olduğunu belirtmektedir.



Şekil 1.4. Açık Deniz Rüzgar Türbini (Kallehave vd. 2015, Schafhirt vd. 2016).

Ağırlıklı olarak yorulma ömrü hesaplamalarından etkilenmektedir. Ayrıca, İngiliz OWF (Açık Deniz Rüzgar Türbini) Walney için kullanılmayan optimizasyon potansiyeli nedeniyle kullanım ömründe %40'a varan bir uzamanın mümkün olabileceğini iddia Yapının çalışma sırasında taşınması gereken yükler bir OWT (Açık Deniz Rüzgar Türbini) 'nin yorulma ömrünü belirler. Bunlar statik ve dinamik yükler olarak sınıflandırılabilir. Statik yükler parçaların ağırlığından kaynaklanır ve tasarım sürecinde kolayca belirlenebilir. Öte yandan, yorulma ömrü üzerinde etkisi olan dört farklı dinamik yük türü vardır (Şekil 1.5). İlk yük, rotorun içinden geçen ve yanal hareketle sonuçlanan türbülanslı akıştan kaynaklanır. İkinci olarak, alt yapı deniz seviyesindeki dalgalar tarafından darbe alır. Üçüncü ve dördüncü tip dinamik yükler sırasıyla rotor ve kulenin titreşimlerinden kaynaklanır.

Statik yüklerin aksine, dinamik yükler tek bir sayı ile ifade edilemez ancak olasılık fonksiyonları ile modellenmelidir. Alt yapıda beklenen yükleri hesaplamak için farklı simülasyon modelleri ve ilgili saha için istatistiksel veriler bulunmaktadır (Bhattacharya, 2014). Ayrıca, farklı operasyonel durumlar göz önünde bulundurulduğunda simülasyonların karmaşıklığı artmaktadır. Önemli bir fark, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin dönüyor veya rölantide çalışıyor olmasıdır. Kallehave ve diğerleri (2015) gelecekteki tasarım süreçlerinde, yorulma hasarına ciddi katkıda bulunduğu için bir Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin rölanti saatlerinin miktarını tahmin etmenin daha önemli hale geleceğini öngörmektedir. Bunun nedeni, çalışma sırasında dönen rotorun ön-arka yönde aerodinamik sönümleme sağlayarak rüzgar yönü ile aynı hizada olmayan dalga yüklerinin payını sönümlemesidir. Duruş sırasında dalga yükleri herhangi bir yönde sönümlenmez (Gengenbach vd., 2015).



Şekil 1.5. Rüzgar Türbinindeki Çevresel Yükler (Ziegler, Smolka vd., 2017) ve (Bhattacharya 2014)

1.1.2. Tekil Kazıklı Açık Deniz Rüzgar Türbinin Avantajları ve Dezavantajları:

Açık Deniz Rüzgar Türbinleri, sürdürülebilir enerji üretimi bağlamında kritik bir rol oynamakta olup, bu türbinlerin temelleri yapısal stabilite ve operasyonel verimlilik açısından önem arz etmektedir. Tekil kazık (mono pile) temeller, özellikle sığ deniz alanlarında yaygın olarak kullanılan temel türlerinden biridir. Bu temel türü, genellikle çelikten mamul geniş çaplı boruların deniz tabanına çakılması suretiyle oluşturulmakta olup, hidrodinamik ve aerodinamik yüklemelere karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmaktadır.

Avantajlar:

1- Ekonomik ve Yapısal Verimlilik: Tekil kazık temeller, alternatif temel sistemleri ile kıyaslandığında düşük maliyetli ve nispeten daha kolay inşa edilebilir bir seçenek sunmaktadır. Çelik boruların seri üretime uygun olması, projelendirme ve uygulama süreçlerinde zamansal avantaj sağlamaktadır.

2- Yük Taşıma Kapasitesi: Geniş çapta tasarlanan tekil kazıklar, rüzgar ve dalga yüklerine karşı yüksek dayanım kapasitesine sahip olup, stabiliteyi önemli ölçüde arttırmaktadır.

3- Kurulum Kolaylığı: Tekil kazık temeller, göreceli olarak daha az deniz tabanı hazırlığı gerektirdiği için diğer temel tiplerine oranla daha hızlı bir şekilde

uygulanabilmektedir.

Dezavantajlar

Derinlik Sınırlamaları: Tekil kazıke temeller genellikle 40 metreye kadar olan deniz derinliklerinde etkili olmaktadır. Daha derin sularda kullanılması durumunda kazık çapının ve yapısal mukavemetin artırılması gerekmekte olup, bu durum maliyet ve teknik karmaşayı artırmaktadır.

Çevresel Etkiler: Kazık çakma işlemi esnasında oluşan gürültü, deniz ekosistemini olumsuz yönde etkileyebilmekte, özellikle basınç dalgalarına duyarlı deniz memelileri için risk oluşturmaktadır.

Zemin Koşullarına Bağlı Hassasiyet: Tekil kazıke temeller, zemin koşullarına bağlı olarak farklı performans sergileyebilmektedir. Kohezyonsuz zeminlerde, tekrarlanan dinamik yükler nedeniyle kazık başı deplasmanları meydana gelebilir. Bu durum yapısal stabiliteyi olumsuz etkileyerek, öngörülen tasarım ömrünü azaltabilir.

Oyulma (Scour) Riski: Deniz tabanında meydana gelen akıntılar, kazık çevresinde oyulmalara sebebiyet verebilir. Bu durumu önlemek için kazık etrafına zırh taşı (anroşman) gibi koruyucu önlemler uygulanması gerekmektedir.

Sonuç olarak tekil kazık temeller, belirli derinlik aralıklarında ve uygun zemin koşullarında Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için optimal bir temel seçeneği sunmaktadır. Bununla birlikte, her bir proje özelinde derinlik, zemin yapısı, hidrodinamik ve aerodinamik yükleme faktörleri göz önünde bulundurularak en uygun temel sisteminin belirlenmesi gerekmektedir.

1.1.3. Avrupa'da Açık Deniz Rüzgar Enerjisi

Dünyadaki ilk Açık Deniz Rüzgar Türbini 1990 yılında Kuzey Denizi'nin sığ ve kıyıya yakın sularında inşa edilen 300 kW'lık bir türbindi (Musial ve Butterfield, 2006). Bugüne kadar Avrupa ülkeleri 1470 MW'ın üzerinde rüzgar enerjisi kapasitesi kurmuştur (US Offshore Wind Collaborative, 2009), bu Avrupa'yı bugün açık deniz rüzgar enerjisinde lider yapmaktadır. Kuzey ve Baltık Denizleri Avrupa'ya yakındır ve sürekli olarak güçlü rüzgarlara sahiptir. Bu nedenle, açık deniz rüzgar çiftlikleri için popüler yerler haline gelmişlerdir. Avrupa'daki rüzgar çiftliklerinin neredeyse tamamı sığ sularda (30 metreden daha az derinliklerde) ve çoğunluğu 12 metreden daha az su derinliklerinde bulunmaktadır (Musial ve Butterfield, 2004).

Avrupa ülkeleri rüzgar kaynaklarından daha fazla elektrik üretmeye devam ediyor. Hükümetler yenilenebilir enerji kullanımı konusunda zorunluluklar getirmeye başlamıştır ve rüzgar şu ana kadar en gelişmiş olanıdır. Örneğin, Birleşik Krallık 2010 yılına kadar ülke elektriğinin %10'unun yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesini zorunlu kılmıştır ki bu da 12.000 MW rüzgar kapasitesi gerektirmektedir. 2020 yılına kadar enerjilerinin %20'sini yenilenebilir kaynaklardan elde etmeyi hedeflemektedirler (Byrne ve Houlsby, 2003).

Bu miktarlarda rüzgar enerjisi etmek için geliştiriciler daha derin rüzgar çiftliklerine

yönelmektedir. Birçok Avrupa ülkesi, açık denizde petrol arama teknolojisini açık deniz rüzgar çiftlikleri için modifiye etmektedir ve teknoloji uygun maliyetli hale geldikçe, açık deniz rüzgar çiftlikleri derin sularda inşa edilecektir.

1.1.4. Açık Deniz Rüzgar Enerjisindeki Trendler

Teknoloji geliştikçe ve rüzgar enerjisine olan talep arttıkça, rüzgar türbinlerinin boyutları ve kıyıdan uzaklıkları da artmaktadır. Avrupa Birliği 20MW' kadar türbinlerin geliştirilmesini desteklemiştir [Rüzgar Türbini Boyutunun Büyümesi]. Kapasite ne kadar büyük olursa, yüksek rüzgar hızlarını yakalayabilmek için bu rüzgar çiftliklerinin kıyıdan o kadar uzakta olması gerekir. Rüzgar çiftlikleri artık "Geçiş Suyu" derinliklerinde, 30 ila 60 metre arasında önerilmektedir. 15 metre, Şekil 1-3'te görülebileceği gibi. Su derinliği türbin tasarımı için kritik bir bileşendir, çünkü büyük maliyet etkileri olabilir. "Derin Su" rüzgar santralleri geliştirmek için teknoloji mevcut olsa da, bunlar henüz ekonomik olarak uygulanabilir değildir.

1.1.5. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Tezinin Amaçları ve Kapsamı

Bu tezin temel amaçları şunlardır:

Açık Deniz Rüzgar Türbini sahalarında gerçekleştirilen uygulamalardan elde edilen iki boyutlu (2B) sismik yansıma verileri ve Konik Penetrasyon Testi (CPT) sonuçları, üç boyutlu (3B) Sonlu Eleman (SE) simülasyonlarında önemli bir veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma, söz konusu verilerin, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin temellerinin dinamik ve statik davranışlarını daha gerçekçi bir şekilde analiz edebilmek için nasıl entegre edileceğini göstermeyi amaçlamaktadır. Özellikle, 2B sismik yansıma verileri kullanılarak zemin tabakalarının süreksizlikleri, deformasyon bölgeleri ve jeolojik yapı özellikleri modellenenirken, CPT sonuçları ile mühendislik parametreleri doğrudan belirlenerek kazık-zemin

etkileşimi için hassas giriş verileri sağlanmaktadır. Bu teknikler bir araya getirildiğinde, yerel zemin koşullarındaki 3B varyasyonlar daha iyi temsil edilmekte ve bu sayede tekil kazık davranışının daha gerçekçi bir analizine olanak tanınmaktadır. Böylece, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin tasarımında daha güvenilir ve optimize edilmiş mühendislik çözümleri geliştirilmesi mümkün olmaktadır.

Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin temelleri, zeminlerde karşılaşılan üç boyutlu (3B) jeomorfolojik düzensizliklerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu düzensizlikler arasında deformasyon geçirmiş, kıvrılmış ve buruşmuş birimlerin yanı sıra tabakalı tortul havzalar, süreksiz jeolojik deformasyonlar ve fay dönüşümleri gibi yapılar yer almaktadır. Bu çalışmada, söz konusu jeomorfolojik düzensizliklerin Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin dinamik davranışı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Özellikle, farklı zemin yapılarının, kazık-zemin etkileşimi yoluyla türbinin titreşim özelliklerine, doğal frekansına ve genel stabilitesine nasıl katkı sağladığı değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu düzensizliklerin, yük aktarımı ve temel performansı üzerindeki olası olumsuz etkileri analiz edilerek, güvenli ve dayanıklı tasarım kriterlerine yönelik çıkarımlar yapılmıştır.

Analizlerde elde edilen 3B Sonlu Eleman (SE) sonuçları kullanılarak, zemindeki tekil kazık etkileşiminin birleşik etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu inceleme kapsamında, tekil kazığın zemine olan etkisi ve kazık boyunca meydana gelen yapısal tepkiler değerlendirilmiştir. Özellikle, kazığın dört farklı yönündeki deformasyon, dönme, moment ve ivme tepki bileşenleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kazığın uzunluğu boyunca eylemsizlik ve kinematik etkiler de analiz edilerek, farklı noktalardaki hareketin nasıl değiştiği belirlenmiştir. Bu süreçte, kazığın zeminde yarattığı gerilme dağılımı, deplasman profilleri ve dinamik tepkiler göz önüne alınarak kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır. Sonuçlar, kazık-zemin etkileşiminin sistemin genel stabilitesine ve yük taşıma kapasitesine olan etkisini ortaya koymak amacı ile detaylandırılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Rüzgar Türbini Destek Yapılarının Tasarım Optimizasyonu

Rüzgar türbinlerinin destek yapılarının yapısal optimizasyonu üzerine kapsamlı bir inceleme yapılmaktadır. Rüzgar türbinleri, dinamik ve doğrusal olmayan yüklerin etkisi altında çalışan karmaşık mühendislik sistemleri olup, bu yapıların optimizasyonu hem ekonomik hem de yapısal verimlilik açısından kritik bir konudur. Çalışmalar, yapısal optimizasyon alanındaki mevcut yaklaşımlar ve teknikler ele alınarak, özellikle açık deniz türbinleri için optimizasyon süreçlerinin karşılaştığı temel zorluklar detaylandırılmaktadır. Optimizasyonun temel zorlukları arasında Şekil 2.2.de görüldüğü gibi doğrusal olmayan etkiler, karmaşık çevresel koşullar, yorulma kaynaklı hasarlar, özelleşmiş analiz yazılımlarına duyulan ihtiyaç, çoklu tasarım değişkenleri ve sistemler arası etkileşimler yer almaktadır. Statik ve dinamik yükler altında yapısal optimizasyon teknikleri incelenerek, analitik ve sayısal yöntemlerin etkinliği tartışılmıştır. Çalışmada, optimizasyon süreçlerinde simülasyon tabanlı yaklaşımlar, olasılıksal optimizasyon ve çok disiplinli tasarım çerçeveleri gibi ileri tekniklerin uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, rüzgar türbini yapılarının daha verimli, dayanıklı ve maliyet etkin hale getirilmesi için yapısal optimizasyon yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Çalışma, gelecekteki araştırmalar için öneriler sunarak, rüzgar enerjisi sektöründe yapısal optimizasyonun kritik rolüne dikkat çekmektedir. (Muskulus ve ark., 2014).

2.2. Tekil Kazıklı Temellerin Geoteknik Tasarıma Göre Optimum Geometrisi

Bu çalışma, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin tekil kazık temelleri için optimum geometriyi belirlemeye odaklanmaktadır. Tekil kazık tasarımında, Hizmet Verebilirlik Limit Durumu (SLS) ve Nihai Sınır Durumu (ULS) kriterleri göz önünde bulundurulurken, özellikle kalıcı rotasyonların sınırlandırılması temel tasarım belirleyici olmaktadır. Araştırmada, kazık çapı (D) ve gömme uzunluğu (L) arasındaki en uygun oran (L/D) belirlenerek minimum çelik kütlesi ve ekonomik kurulum kriterlerine uygun çözümler geliştirilmiştir. Döngüsel yüklerin etkisi analiz edilerek, kazık başı rotasyonunu en aza indiren Stiffness Degradation Method (SDM) kullanılmış ve farklı yükleme koşulları altında en iyi sonuç veren geometriler değerlendirilmiştir.

Sonuçlara baktığımızda optimum L/D oranının 4.2 ile 8.1 arasında değiştiğini göstermiştir. Daha büyük çaplı kazıkların daha iyi yük taşıma kapasitesine sahip olduğu ve kazık uzunluğunun belirli bir sınırın ötesinde artırılmasının etkisinin azaldığı tespit edilmiştir. Pareto optimizasyonu ile hem minimum kazık kütlesi hem

de minimum kurulum maliyeti sağlayan tasarımlar belirlenmiş, böylece rüzgar türbini temelleri için hem güvenli hem de ekonomik bir çözüm sunulmuştur. Çalışmada elde edilen formüller, mühendislerin optimum tekil kazık tasarımını belirlemelerine yardımcı olacak rehber niteliğindedir (Schmoor ve ark.,2015).

2.3. Açık Deniz Rüzgar Türbinleri İçin Tekil Kazık Temellerin SLS ve ULS Tasarım Kriterlerine Göre Optimum Verimliliği

Deniz Rüzgar Türbinleri için tekil kazık temellerin tasarımı, mühendislik açısından hem yapısal güvenlik hem de ekonomik verimlilik gerektiren karmaşık bir optimizasyon problemidir. Geleneksel deneme-yanılma yöntemi, kazık boyutlarının belirlenmesi, performans analizlerinin yapılması ve tasarım kriterleriyle karşılaştırılması süreçlerini içeren tekrarlı ve zaman alıcı bir yaklaşım olup, yüksek malzeme tüketimi ve iş gücü maliyetlerine yol açabilmektedir. Bu çalışmada, tekil kazık temellerin Hizmet Verilebilirlik Sınır Durumu (SLS) ve Nihai Sınır Durumu (ULS) kriterlerine uygun şekilde optimize edilmesini sağlayan otomatik bir tasarım yöntemi önerilmektedir.

Önerilen yöntem, kazık-zemin etkileşimini modelleyerek farklı zemin ve yükleme koşullarını dikkate almakta, böylece geleneksel süreçlerde insan öznelliğine bağlı değişkenliği ortadan kaldırarak daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, döngüsel yükleme etkileri de analiz sürecine entegre edilerek, uzun vadeli yapısal performans değerlendirilmekte ve deformasyon birikimi minimize edilmektedir. Bu yaklaşım, kazık çapı ve uzunluğunun optimum düzeyde belirlenmesi yoluyla gereksiz çelik tüketimini azaltarak hem malzeme hem de nakliye ve kurulum maliyetlerini düşürmekte, aynı zamanda sahaya özgü koşullara duyarlı mühendislik çözümleri sunmaktadır (Doherty ve ark., 2018). Tasarım sürecinin otomatikleştirilmesi sayesinde mühendislik süreçleri hızlandırılmakta, hesaplama süresinden tasarruf sağlanmakta ve çok sayıda alternatif çözüm kısa sürede değerlendirilebilmektedir. Sonuç olarak, önerilen optimizasyon yöntemi, Açık Deniz Rüzgar Türbini temellerinin tasarımında hem teknik hem de ekonomik açıdan önemli iyileştirmeler sağlayarak sürdürülebilir mühendislik çözümlerine katkıda bulunmaktadır.

2.4. Yanal Yüklere Maruz Kalan Tekil Kazıklı Yapı Tasarımı

Mühendislik tasarım süreçlerinde otomasyonun önemini vurgulamakta ve geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını aşan bir çözüm sunmaktadır. Yanal yüklere maruz kalan tekil kazık temellerin optimizasyonu, hem ekonomik hem de yapısal

bütünlük açısından kritik bir gereklilik olup, önerilen yöntem bu iki faktörü dengeli bir şekilde ele almaktadır. Sayısal optimizasyonun kullanılması, tasarım sürecinin daha hızlı ve hassas hale gelmesini sağlarken, manuel iteratif süreçlerde karşılaşılan insan kaynaklı hataları minimize etmektedir. Çalışmada döngüsel yüklemenin etkilerinin de dikkate alınması, uzun vadeli performans açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, kullanılan modelin saha koşullarına duyarlılığı ve farklı zemin özelliklerine uyarlanabilirliği, yöntemin gerçek dünya uygulamalarında ne kadar esnek ve güvenilir olduğunu belirleyen kritik faktörlerdir. Gelecekte, modelin farklı zemin tipleri ve yükleme koşullarıyla genişletilmesi, yöntemin genel geçerliliğini artırabilir. Sonuç olarak, bu çalışma, açık deniz mühendisliğinde daha verimli ve sürdürülebilir tasarım yaklaşımlarının benimsenmesi yönünde önemli bir adım olup, mühendislik karar alma süreçlerinde veri odaklı yaklaşımların rolünü güçlendirmektedir.

Açık Deniz Rüzgar Türbini tasarımında karşılaşılan zorluklara ve optimizasyon metodolojilerine odaklanmaktadır. İklim değişikliğiyle mücadele kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artması, açık deniz rüzgar enerjisinin önemini giderek artırmıştır. Bununla birlikte, Açık Deniz Rüzgar Türbini yapılarının tasarımı, geniş parametre uzayı, değişken çevresel koşullar ve operasyonel gereksinimler nedeniyle karmaşık mühendislik problemleri içermektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla, modern optimizasyon algoritmaları ve hesaplama teknikleri kritik bir rol oynamaktadır.

2.5. Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin Tasarımında Optimizasyon Metodolojileri

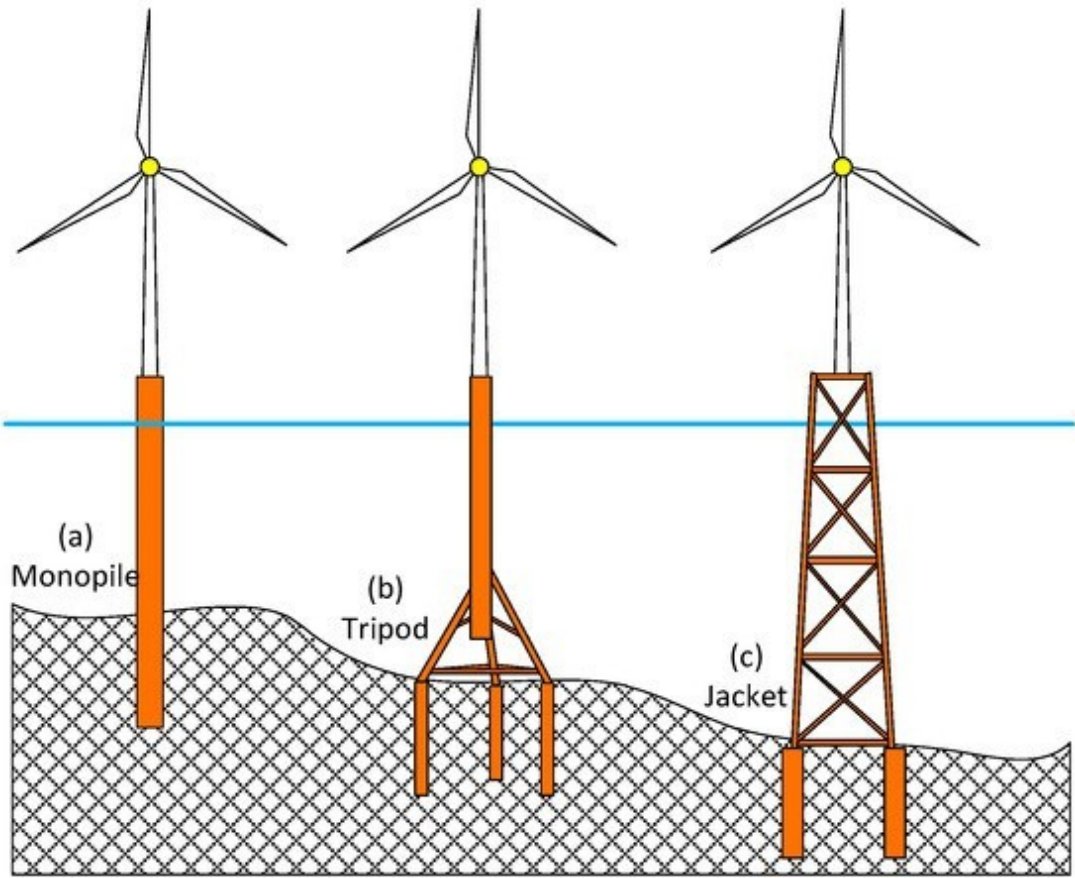
Açık Deniz Rüzgar Türbini tasarımında karşılaşılan zorluklara ve optimizasyon metodolojilerine odaklanmaktadır. İklim değişikliğiyle mücadele kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artması, açık deniz rüzgar enerjisinin önemini giderek artırmıştır. Bununla birlikte, Açık Deniz Rüzgar Türbini yapılarının tasarımı, geniş parametre uzayı, değişken çevresel koşullar ve operasyonel gereksinimler nedeniyle karmaşık mühendislik problemleri içermektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla, modern optimizasyon algoritmaları ve hesaplama teknikleri kritik bir rol oynamaktadır.

2.5.1. Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin Tasarımında Optimizasyon Metodolojilerinde Altyapı Çeşitleri

Açık Deniz Rüzgar Türbini alt yapılarının Şekil 2.1. Plodpradit vd., (2019)

görüldüğü gibi (tekil kazık, tripod, ceket gibi sabit temel sistemleri ve spar, yarı dalgıç, TLP gibi yüzer platformlar) yapısal karakteristiklerini detaylı bir şekilde incelemekte ve her birinin avantajları ve dezavantajlarını karşılaştırmaktadır. Derin sularda kullanılan yüzer rüzgar türbinleri, geleneksel sabit temelli türbinlere kıyasla daha esnek bir çözüm sunarken, dinamik stabilite ve maliyet etkinliği açısından optimizasyon gerektiren birçok parametreye sahiptir.

Açık Deniz Rüzgar Türbinleri, sabit temelli ve yüzer platformlu altyapılar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır:



Şekil 2.1. Sabit Açık Deniz Rüzgar Türbini Türleri: (a) Tekil Kazık; (b) Tripod; (c) Ceket Alt Yapıları (Plodpradit vd., 2019)

2.5.1.1. Sabit Temelli Altyapılar

Bu yapılar, **sığ sularda (<50 m)** kullanılmakta olup doğrudan deniz tabanına monte edilir:

1- Tekil kazık (Monopile): En yaygın kullanılan sabit altyapıdır, çelik boru formunda olup sığ sularda ekonomik ve hızlı kurulum avantajına sahiptir.

2- Tripod: Daha derin sular ve büyük türbinler için geliştirilmiş, üç kazık ile desteklenen rijit bir yapıdır.

3- Ceket: Kafes yapılı sistem olup 60-80 m derinliklerde yüksek rijitlik ve stabilite sunar, ancak üretim ve kurulum maliyetleri yüksektir.

2.5.1.2. Yüzer Temelli Altyapılar

Derin sularda (>50 m) tercih edilen bu sistemler, deniz tabanına bağlama sistemleriyle sabitlenir:

Spar-Buoy: Derin su çekimli dikey silindirik bir yapı olup stabilite açısından avantajlıdır ancak liman montajı sınırlıdır.

Yarı Dalgıç: Nispeten düşük draftlı olup liman montajına ve ıslak çekmeye uygundur, ancak dalga yüklerine karşı hassastır.

Gergi Bacaklı Platform (TLP): Küçük hareket genliği ve düşük dinamik yük avantajı sunar, ancak bağlama sistemleri pahalı ve karmaşıktır.

Mavna: Geniş su düzlemi alanına sahip olup stabilite açısından avantajlıdır, ancak dalga kaynaklı büyük hareketlere karşı hassastır.

2.5.1.3. Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin Sabit ve Yüzer Rüzgar Türbinlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Tasarım optimizasyonu için statik, frekans alanı ve zaman alanı analizleri uygulanmakta olup, farklı mühendislik yaklaşımlarıyla enerji verimliliği artırılmaktadır:

Statik Analiz: Yapısal rijitlik, yük taşıma kapasitesi ve burkulma direnci değerlendirilir.

Frekans Alanı Analizi: Yapı titreşimlerinin, doğal frekans ile rezonans etkisinin minimize edilmesi hedeflenir.

Zaman Alanı Analizi: Dalga ve rüzgar yükleri gibi zamana bağlı etkilerin modellenmesini sağlar.

Modern optimizasyon yöntemleri arasında Genetik Algoritmalar (GA), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Sıralı Kuadratik Programlama (SQP) gibi

teknikler öne çıkmaktadır. Bu algoritmalar, türbin tasarımını geliştirerek maliyetleri azaltmayı, aerodinamik ve hidrodinamik performansı artırmayı hedeflemektedir.

Tasarım optimizasyonu kapsamında, makalede farklı analiz yöntemleri ele alınmaktadır. Statik analizler, rüzgar türbini yapılarının yük taşıma kapasitesini ve rijitliğini değerlendirirken, frekans alanı analizleri yapısal titreşimleri ve dinamik tepkiyi incelemektedir. Zaman alanı analizleri ise rüzgar ve dalga yüklerinin yapısal bileşenlere etkisini belirleyerek daha hassas optimizasyon stratejileri geliştirmeye olanak tanımaktadır.

Çizelge 2.1. Sabit Açık Deniz Sabit Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için Alt Yapıların Karşılaştırılması

Kriter	Avantajlar	Dezavantajlar
Genel	- Yenilenebilir ve temiz enerji kaynağıdır. - Yüksek rüzgar hızları sayesinde enerji üretimi daha verimlidir. - Gürültü ve görsel kirlilik açısından kara türbinlerine kıyasla daha az etkiye sahiptir.	- Kurulum ve bakım maliyetleri yüksektir. - Zorlu çevresel koşullara maruz kaldığı için mühendislik açısından karmaşıktır.
Sabit Temelli	- Yapısal stabilitesi yüksektir. - Yüksek enerji üretim kapasitesi sunar.	- Su derinliği arttıkça maliyet etkinliği azalır. - Deniz tabanı uygun değilse uygulanabilirliği düşer.
Yüzer Platformlu	- Derin sular için uygundur, deniz tabanı şartlarına bağımlı değildir. - Kıyı ekosistemine daha az zarar verir.	- Dalga ve rüzgar yüklerine karşı daha hassastır. - Bağlama sistemleri ve dinamik yük dengeleme gereksinimleri maliyeti artırır.

Optimizasyon algoritmaları açısından, genetik algoritmalar, parçacık sürüsü optimizasyonu ve sıralı kuadratik programlama gibi ileri düzey yöntemler, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin aerodinamik ve hidrodinamik performansını iyileştirmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu algoritmalar, türbin bileşenlerinin ağırlığını minimize ederken, yorulma dayanımını artırmakta ve toplam maliyetleri optimize etmektedir.

Sonuç olarak, Açık Deniz Rüzgar Türbini teknolojilerinin gelişimi, yenilikçi optimizasyon teknikleriyle desteklenmekte olup, hesaplamalı mühendislik yaklaşımlarının ilerlemesiyle daha verimli ve dayanıklı türbin sistemlerinin tasarlanması mümkün hale gelmektedir. Gelecekteki araştırmaların, yapay zeka tabanlı optimizasyon stratejilerine, belirsizlik analizi içeren güvenilirlik tabanlı tasarım metodolojilerine ve sayısal simülasyonların hesaplama verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalara odaklanması önerilmektedir.

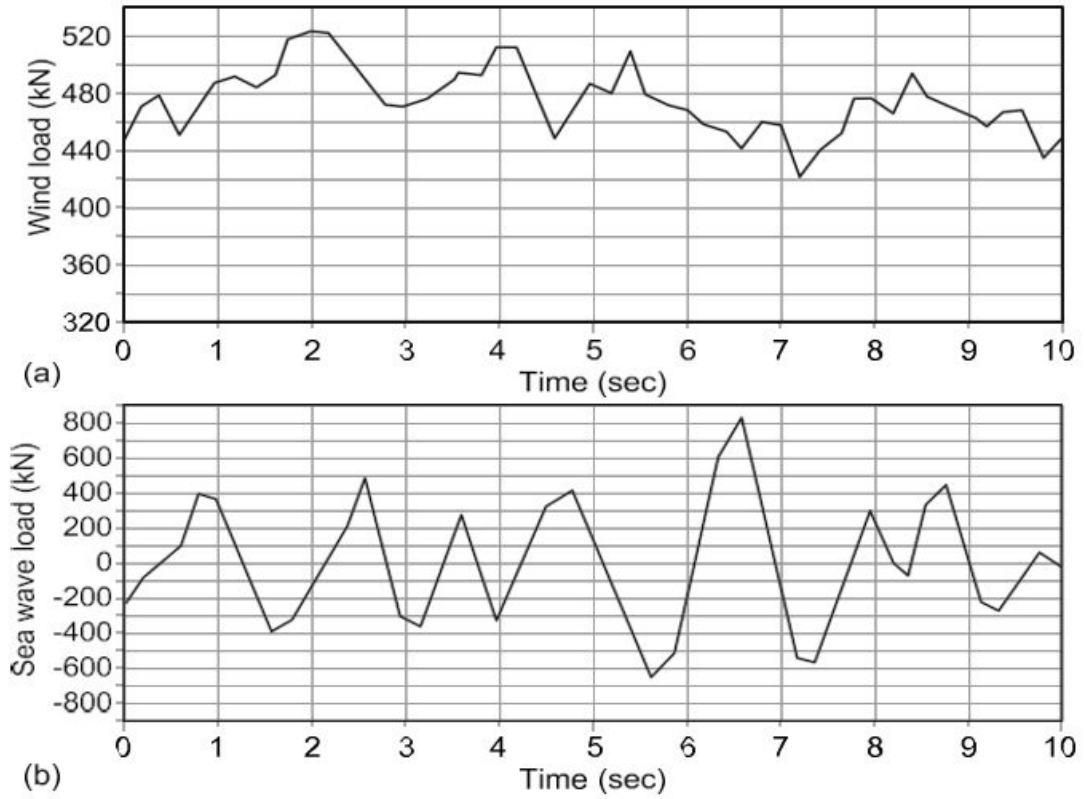
2.6. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Tasarım Yük Simülasyonları

Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin ve destek yapılarının güvenli, güvenilir ve verimli bir şekilde çalışabilmesi, tasarım aşamasında yük analizlerinin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesine bağlıdır. Bu tür sistemler, rüzgar, akıntı, dalgalar ve buz gibi çevresel etkilerle birlikte rüzgar türbininin çalışma moduna bağlı olarak değişen dinamik yüklerin karmaşık bir birleşimine maruz kalmaktadır. Rüzgar, hız, yön ve türbülans gibi değişkenlere bağlı olarak rüzgar türbinlerine farklı büyüklükte aerodinamik kuvvetler uygular. Benzer şekilde, dalgaların yarattığı hidrodinamik kuvvetler ve deniz akıntılarının neden olduğu statik yükler, destek yapılarının dayanıklılığını doğrudan etkileyebilir. Soğuk iklimlerde ise buz yükleri, sistemin yapısal bütünlüğü açısından ciddi bir risk oluşturabilir. Bu yükler, rüzgar türbinlerinin güvenilirliğini ve yapısal bütünlüğünü değerlendirmek amacıyla dikkatle incelenmelidir.

Açık Deniz Rüzgar Türbinleri üzerindeki yükleri analiz etmek için analitik yöntemler, fiziksel testler ve bilgisayar simülasyonları gibi çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Analitik yöntemler, basit durumlarda kabul edilebilir sonuçlar sunarken, karmaşık yükleme koşullarının analizinde yetersiz kalabilir. Fiziksel testler ise rüzgar tünelleri ve dalga havuzları gibi deneysel düzeneklerle gerçekleştirilerek, yeni tasarımlar için önemli bir doğrulama aracı sağlar. Bununla birlikte, bilgisayar simülasyonları, özellikle karmaşık geometrilere sahip yapıların değerlendirilmesi ve zamanla değişen yüklerin analizi açısından büyük avantajlar sunar. Sonlu elemanlar (SE) yöntemi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ve benzeri sayısal teknikler, mühendislerin rüzgar türbini ve destek yapısının farklı yük koşulları altındaki davranışını ayrıntılı bir şekilde incelemelerine olanak tanır.

Yük analizlerinin sonuçları, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin güvenilirlik değerlendirmelerinde kritik bir rol oynar. Güvenilirlik analizleri, türbinin ömrü boyunca karşılaşılabileceği farklı yükleme koşullarını dikkate alarak, sistemin güvenli bir şekilde çalışıp çalışmayacağını belirlemeye yardımcı olur. Özellikle yorgunluk

analizleri, statik ve dinamik analizler gibi yöntemler, destek yapılarının uzun vadeli dayanıklılığını değerlendirmek için kullanılır. Gelecekteki araştırmalar, bu simülasyonların doğruluğunu ve hesaplama verimliliğini artırmaya yönelik yeni yöntemlerin geliştirilmesine odaklanmalıdır. Sonuç olarak, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin güvenli ve verimli bir şekilde tasarlanabilmesi, yüklerin doğru bir şekilde simüle edilmesine ve analiz edilmesine bağlıdır.



Şekil 2.2. Zamana bağlı olarak (a) rüzgar ve (b) deniz dalgası yükleri (Algın vd., 2025)

2.6.1. Çevresel Yükler

Kiyomiya ve diğerleri (2002) tarafından önerildiği üzere, Açık Deniz Rüzgar Türbinleri tasarımının nihai sınır durumlarında (ULS) sismik ve çevresel yüklerin birlikte uygulanma olasılığının düşük olmasına rağmen, bu entegre etkilerin dikkate alınması yine de kritik önem taşımaktadır. Cheng ve diğerleri (2023) tarafından belirtildiği üzere, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin dinamik deformasyonlarını analiz ederken rüzgar, hidrodinamik ve sismik yüklerin entegre etkilerini dikkate almak büyük önem taşımaktadır. Bu, SLS tasarım koşulları bağlamında güçlü sismik olayları incelerken özellikle önemlidir. Bu bağlamda, bu çalışma SLS koşulları çerçevesinde sismik yüklere ek olarak zamana bağlı rüzgar ve hidrodinamik çevresel

yükleri de dikkate almaktadır. Cheng ve diğerleri (2022) tarafından önerilen metodolojiye uygun olarak, rüzgar ve dalga çevresel yükleri çeşitli referans noktalarında tek bir yönde uygulanmaktadır (Şekil 1.5) (Ziegler, Smolka vd., 2017 ve Bhattacharya 2014). Bu tez kapsamında yer alan çevresel yükler deniz, dalga ve rüzgar yükleri Şekil 2.2. gösterilmiştir. (Aydın vd., 2025)

2.6.1.1. Rüzgar yükleri

Binh ve diğerleri (2008) tarafından ortaya konan öneriye uygun olarak, türbinin rüzgar yükü iki temel bileşen içerir: türbin kanadı üzerindeki rüzgar yükü ve kule üzerindeki rüzgar yükü. Kule üzerindeki rüzgar yükü (F_{sk} , kN) aşağıdaki denklem ile verilmektedir.

$$F_{sh}(z) = 0.5\rho_a C_D D(V + v)^2 \quad (2.1)$$

Burada p_a 15°C ve 1 atm'de 1.23 kg/m³ olarak alınan hava yoğunluğudur. Rüzgar kulesi çapı D'dir. $v(z,t)$ ve $V(z)$ sırasıyla kule boyunca değişken ve ortalama rüzgar hızı değerlerini temsil etmektedir. yüzey pürüzlülüğü ve Reynolds sayısı ile ilgili sürüklenme katsayısını tanımlamaktadır ve bu katsayı 1.2 olarak alınmıştır Cheng ve diğerleri (2023). Kule boyunca rüzgar yükü değişkenliğini pratik bir şekilde hesaba katmak için kule en fazla 10 m uzunluğunda segmentlere bölünmüş ve sürüklenme kuvvetinin her segmente eşit olarak etki ettiği varsayılmıştır. Cheng ve diğerleri (2023) tarafından önerilen yöntemeye uygun olarak, rüzgar yükleri SE modelindeki segmentlerin orta noktalarında tanımlanan referans noktalarına uygulanmıştır

Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin kanatları üzerindeki dönme etkisiyle oluşan itme kuvveti Lee ve diğerleri (2010) tarafından Bernoulli denklemine uygun olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Eşitlik 2.1). Eşitlik 2.2'teki boylamasına itme yükü (F_T , kN) Cheng ve diğerleri (2023) tarafından önerildiği gibi türbin göbeği merkezine uygulanmıştır.

$$F_T = 0.5\rho_d \pi R^2 V_s^2 \left(1 + \frac{2V_s}{V_d}\right) C_T \quad (2.2)$$

Bu denklemde v_s ve V_s sırasıyla göbek yüksekliğindeki dalgalı ve ortalama rüzgar hızlarını temsil etmektedir. Rotor yarıçapı ile temsil edilir ve itme katsayısı olarak tanımlanır (yani $C_T=4\alpha(1-\alpha)$, burada eksenel indüksiyon faktörü olarak tanımlanan α , 0-1 aralığında değişir ve C_T 'nin maksimum değerini elde etmek için 0.5 olarak alınır). Şekil 2.2, Algin ve diğerleri (2025) kullanılarak tanımlanan bağlı rüzgar yükü değişimini göstermektedir.

2.6.1.2. Hidrodinamik yükler

Pierson ve Moskowitz (1964) tarafından önerilen yaklaşıma uygun olarak, stokastik dalga yüksekliği ($S_{\eta\eta}$, m^2s) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$S_{\eta\eta}(\omega) = 0.78\omega^{-5} \exp\left(-3.11\omega^{-4}H_{1/3}^{-2}\right) \quad (2.3)$$

Bu denklemde, önemli kabul edilen dalga yüksekliği $H_{1/3}$ sembolü ile gösterilir ve bu sembol 5 m olarak alınır. ω açısal frekansı temsil eder. Deniz yüzeyi yüksekliği ($\eta(t)$, m) Zhao ve Hu (2012) tarafından aşağıdaki ifade ile tanımlanmıştır (Eşitlik 2.4).

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \quad (2.4)$$

Bu denklemde, statik su yüzeyine bağlı olarak deniz dalgasının anlık yüksekliği $\eta(t)$ şeklinde gösterilir. Konum x ile temsil edilmektedir. ω_i, k_i ve α_i sırasıyla ve açısal frekansı, dalga sayısını ve dalga genliğini temsil etmektedir. Zaman t , ve bağımsız rastgele değişken ε_i , $(0, 2\pi)$ aralığında düzgün dağıldığı varsayılan her bir dalga bileşeninin fazı ile temsil edilir. Ren ve Wang (2004) tarafından tanımlandığı üzere, (α_i, m) aşağıdaki gibi ifade edilir (Eşitlik 2.5). $\bar{\omega}_i$ ve $\Delta\omega_i$ terimlerinin kapsamlı bir açıklaması Yu ve diğerleri (1981) 'de bulunabilir.

$$\alpha_i = \sqrt{2S_{\eta\eta}(\bar{\omega}_i)\Delta\omega_i} \quad (2.5)$$

(d_z) uzunluğundaki türbin kulesi üzerindeki deniz dalgası yükü (df , m^2/s^3), Cao ve diğerleri (2020) tarafından Morison formülüne dayalı olarak aşağıdaki bağıntı (Eşitlik 6) ile hesaplanabilir.

$$df = df_D + df_I = \frac{1}{2}\rho C_D D v_x |v_x| dz + \frac{\pi}{4}\rho C_M D^2 a_x dz \quad (2.6)$$

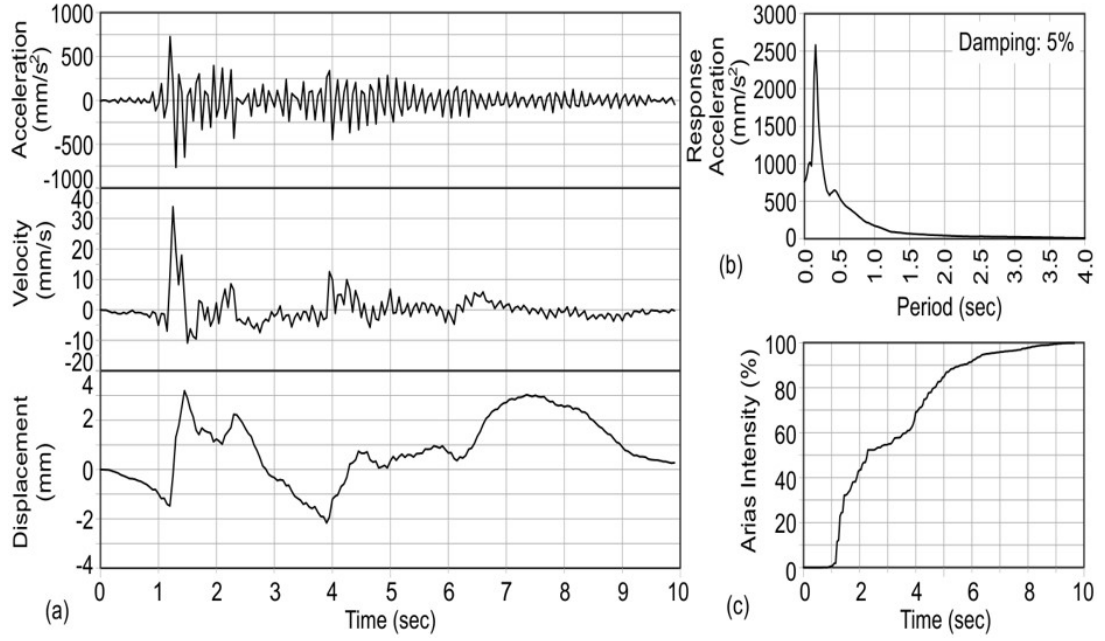
Bu denklemde df_D ve df_I C_M ve C_D terimleri sırasıyla eylemsizlik ve sürüklenme kuvvetlerini ve bunların katsayılarını temsil etmektedir. Simülasyonda C_M ve C_D değerleri sırasıyla 2 ve 1.2 olarak alınmıştır. Bu bağlamda, ρ değişkeni suyun yoğunluğunu temsil etmektedir. Simülasyonda suyun yoğunluğunun 1030 kg/m^3 olduğu varsayılmıştır. D değişkeni ise kulenin çapını temsil etmektedir. Zuo ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada, suyun yatay yönde dalga kaynaklı hızı ve ivmesi sırasıyla v_x ve a_x sembolleri ile temsil edilmiştir.

Çamur çizgisi ile ortalama deniz seviyesi (MSL) arasında kalan su, Cheng ve diğerleri (2023) tarafından önerildiği gibi yaklaşık 10 m'lik segmentlere ayrılmıştır. Daha sonra, deniz dalgası yükleri merkezde tanımlanan referans noktaları kullanılarak bu segmentlere uygulanmıştır. Cheng ve diğerleri (2023) tarafından önerilen hidrodinamik yük-zaman değişimi Şekil 2.2. (b) bu çalışmada da kullanılmıştır.

Ayrıca, Liaw ve Chopra (1974) kulenin sismik etkilerden kaynaklanan ekstra bir hidrodinamik kuvvete maruz kalacağını belirtmiştir. Bu titreşim kuvveti etkisi aşağıdaki ek kütle terimi ile simüle edilebilir.

$$m_a = C_d A_p \rho_w \quad (2.7)$$

Bu denklemde kütle katsayısı, Cao ve diğerleri (2020) tarafından önerildiği gibi simülasyonda 1 olarak ayarlanan C_a ile temsil edilir. A_p kesit alanını ve ρ_w su yoğunluğunu tanımlar. Ek kütle, dinamik analizler sırasında bileşenin su içindeki kütlesine dahil edilmiştir.



Şekil 2.3. Açık Deniz Rüzgar Türbini İçin Kullanılan Veriler (Algın vd., 2025)

2.6.1.3. Sismik yükler

Sismik kayıtlar Dogger Bank bölgesinde 5 büyüklüğünün üzerinde sismik olayların meydana geldiğini göstermektedir (Alkhoury ve diğerleri 2021). Sunulan analizlerde, 27 Ocak 2008 tarihinde Birleşik Krallık'ın Lincolnshire kentinde bulunan Charn Wood Forest (CWF) istasyonundan alınan 5.2 büyüklüğündeki ve merkez üssü Lincolnshire'ın Market Rasen kasabası olan deprem kaydı kullanılmıştır Abel Rahman ve diğerleri(2005). Şekil 2.3'de zaman ivmesi kaydı ve buna karşılık gelen tepki spektrumu gösterilmektedir. Ortogonal kayıt, ivme-zaman kaydının 0,5 kat azaltılmasıyla elde edilmiş ve ortogonal yöndeki her iki deprem kaydı da model tabanına uygulanmıştır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu bölümde tekil kazık temellerin, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerini deniz tabanına sabitlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan, genellikle çelikten imal edilen büyük çaplı silindirik yapılardır. Bu temeller, yüksek mukavemetleri ve dayanıklılıkları nedeniyle açık deniz uygulamalarında tercih edilmekte olup, deniz tabanına özel ekipmanlar kullanılarak çakılmaktadır. Tekil kazık temellerin davranışı, yalnızca kullanılan çelik malzemenin elastisite modülü, akma dayanımı ve sünekliği gibi mekanik özelliklerine değil, aynı zamanda kurulumun gerçekleştirildiği deniz tabanının zemin özelliklerine de bağlıdır. Özellikle, yoğun kum tabakalarının sıkışabilirlik, drenaj koşulları, kayma mukavemeti ve zemin tepkisi gibi parametreleri, temelin yatay ve düşey yükler altındaki performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

Bu çalışmada, tekil kazık temellerin yanal yük taşıma kapasitesini değerlendirmek amacıyla Winkler yaklaşımı ve sonlu elemanlar (SE) yöntemi gibi çeşitli analiz yöntemleri kullanılmıştır. Basitleştirilmiş tasarım prosedürü, metamorfolojik veriler, zemin özellikleri ve yapısal parametreler gibi çeşitli faktörleri dikkate alarak ekonomik ve güvenilir bir analiz sunmaktadır. Winkler yaklaşımı, zemin-kazık etkileşimini bir dizi yay ve sönümleyici eleman kullanarak modelleyen bir yöntemdir; zemin tepki modülü kavramını kullanarak, yapıların yatay yükler altındaki davranışlarını anlamaya yardımcı olur. Sonlu elemanlar yöntemi ise Abaqus yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen sayısal analizler yoluyla karmaşık yapıların farklı yükler altındaki davranışını detaylı bir şekilde incelemeye olanak tanımaktadır. Bu yöntem, yapının elastik ve plastik davranışlarının yanı sıra, zemin ile olan etkileşimlerinin de doğru bir şekilde değerlendirilmesini mümkün kılar.

Farklı analiz yöntemlerinin birlikte kullanılması, tekil kazık temelin çeşitli yük koşulları altındaki davranışının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Bu yaklaşımların kombinasyonu, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin güvenli, dayanıklı ve uzun vadeli kullanımına olanak sağlayacak şekilde doğru ve güvenilir tasarım yapılmasına imkan tanımaktadır. Özellikle, zemin özelliklerinin doğru modellenmesi ve analiz edilmesi, tekil kazık temellerin operasyonel güvenliğini ve uzun vadeli performansını artırmak açısından kritik öneme sahiptir.

3.1. ANALİZ METODOJİLERİ

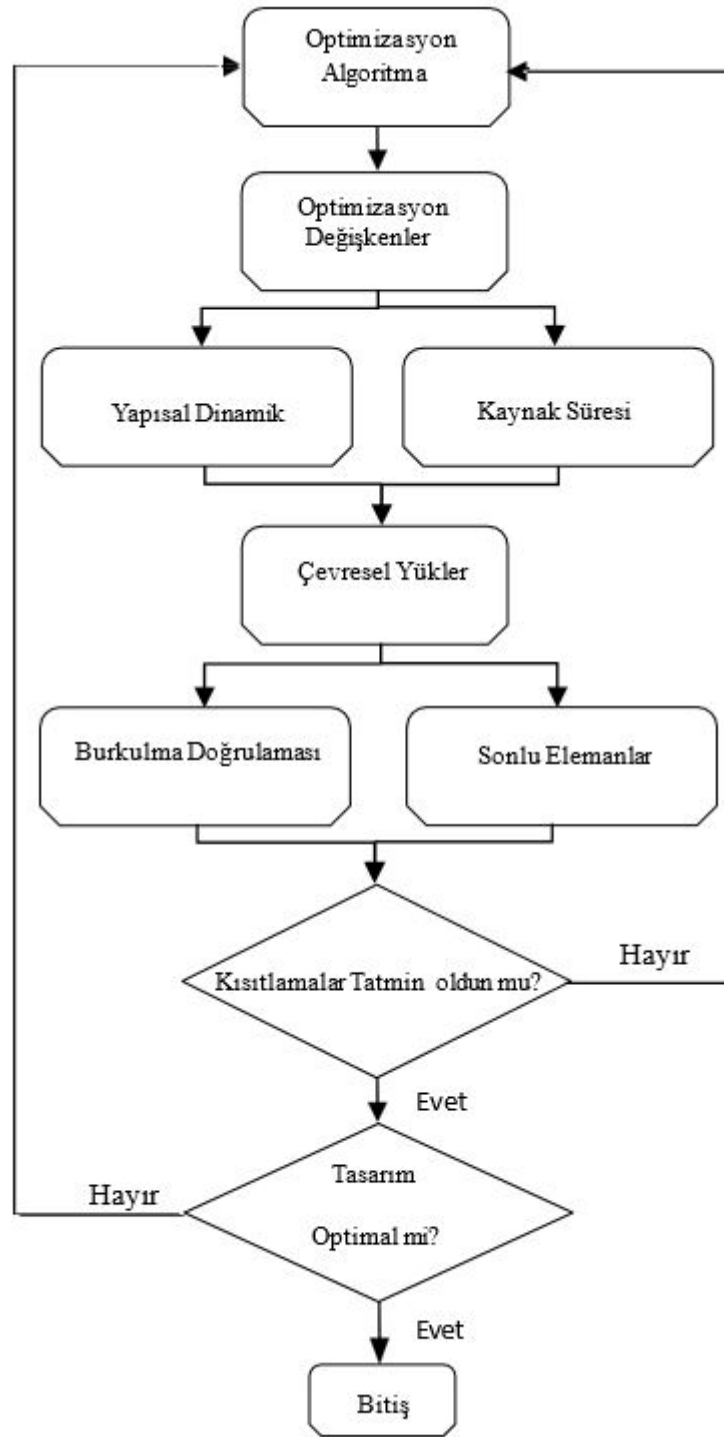
3.1.1. Metodoloji Giriş

Deniz tabanı zemin parametrelerinin olasılıksal analizde istatistiksel

dağılımlar tarafından ele alınan değişkenliğe sahip olduğu varsayılmaktadır. Daha önce açıklandığı gibi, bir p-y analizi için gerekli Kumlu bir zemin profili için parametreler sürtünme açısı, birim ağırlık ve alt zemin reaksiyon modülüdür (L.C. Reese ve vd., (2000)). Bu çalışmada, sürtünme açısı, birim ağırlık ve alt zemin reaksiyon modülü ile ilişkili farklı zemin katmanları oluşturulmuştur. Daha sonra, tekil kazık her simülasyonda performansı açısından değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, aynı tekil kazığın genel performansı tüm simülasyonlar göz önünde bulundurularak hesaplanır.

3.1.1.1. Optimizasyon Metodolojisi

Optimizasyonda süreç algoritma tarafından değiştirilen tasarım değişkenlerinin tanıtılmasıyla başlar. Elde edilen bu bilgilerle, yapısal dinamik tepki değerlendirilir ve Kaynak süresi plakaların kalınlığına ve yapının geometrisine bağlı olarak hesaplanır. Bu yapıldıktan sonra, bir sonraki adım, gelen akıntı, dalga, rüzgar ve yapı geometrisinin bir fonksiyonu olan yapıya etki eden çevresel yüklerin değerlendirilmesidir. Ardından, yapının burkulma mukavemeti doğrulanır ve sonlu elemanlar yapısal modeli aerodinamik, hidrodinamik ve hidrostatik yüklerden kaynaklanan basınç ve enerji jeneratörünün varlığı nedeniyle kule tepesinin maruz kaldığı kuvvetler ve momentlerle yüklenir. Yapısal analiz tamamlandığında, Von Mises (VM) gerilmesi, kule tepesinin dönmesi ve yer değiştirmesi hesaplanır. Son olarak, yapı mod şekil frekansları, VM gerilmesi, kule tepesindeki dönme ve yer değiştirme, optimizasyon kısıtlamalarına karşı doğrulanır ve yapısal kütle ve kaynak süresi, optimum değerler bulunana kadar daha önce analiz edilen tasarımlarla karşılaştırılır (Petrini, F ve vd., (2010)).



Şekil 3.3. Optimizasyon İş Akışı (Alcantara vd., 2020).

3.1.1.2. Optimizasyon Algoritması

Bu çalışmada, fonksiyon yaklaşımı konseptini temel alan bir optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Bu yöntem, izole edilmiş sıfırıncı dereceden yönteme

kıyasla, optimizasyon sürecinde gerekli olan tasarım iterasyonlarının sayısını azaltarak süreci daha verimli hâle getirmektedir. Fonksiyon yaklaşımı yöntemi, tasarımları oluşturmak için kullanılan gerçek fonksiyon yerine, çok daha hızlı değerlendirilebilen bir fonksiyonun kullanılması prensibine dayanmaktadır. Bu yeni fonksiyon, sıfıncı dereceden optimizasyon yöntemi ile birlikte kullanılarak, gerçek fonksiyon üzerinde doğrulanan optimum çözümün ilk iyi tahminine ulaşılmasını sağlar. Böylece, elde edilen en iyi tasarımın doğruluğu test edilir ve yeni verilerle yaklaşık fonksiyonun iyileştirilmesi sağlanır. Sıfıncı dereceden yöntem, rastgele değişkenler oluşturarak tasarımları değerlendiren bir yaklaşımdır. Bu yöntemin adı, bir gradyan fonksiyonunun değerlendirilmesine ihtiyaç duymamasından gelmektedir; yalnızca optimizasyon değişkenleri üzerinden sonuç tasarımının hesaplanmasına dayanır. Bu yöntemi kullanan en bilinen optimizasyon algoritmalarından biri genetik algoritmalar. Genetik algoritmalar, en uygun bireyin doğal seçimi ve genetik prensiplerine dayalı olarak çalışmaktadır (Şekil 3.3.) (Alcantara vd., 2020).

Genetik algoritmaların işleyişinde, ilk olarak bir başlangıç popülasyonu oluşturularak çeşitli olası çözümler üretilir. Daha sonra, her birey optimizasyon hedefi doğrultusunda bir uygunluk indeksine sahip olur. Daha yüksek indekse sahip bireyler, diğer bireylerle birleşme şansını artırarak daha uygun bireylerin oluşmasına katkı sağlar. Buna karşın, düşük uygunluk indeksine sahip bireyler genlerini aktaramaz ve elenir. Ayrıca, mutasyon süreci sayesinde bazı bireylerde rastgele değişimler meydana gelerek farklı tasarım uzayı bölgelerine yönelim sağlanır. Bu mekanizma, algoritmanın olası bir yerel minimumdan kaçmasına yardımcı olur.

Fonksiyon yaklaşımı yöntemini kullanan verimli bir optimizasyon algoritması geliştirebilmenin temel sırrı, yaklaşık fonksiyonun üretilmesi ve geliştirilmesinde güvenilir bir mekanizma oluşturmaktır. Bu çalışmada, genetik algoritmayı yapay sinir ağları ile destekleyerek yaklaşık fonksiyon yaklaşımını yöneten Xtreme yazılımının Hızlı Genetik Algoritması uygulanmıştır.

3.1.1.3. Optimizasyon Değişkenleri

Yapısal optimizasyon sürecinde, belirli boyutlar değiştirilmek üzere seçilerek yapı üzerinde manipülasyon yapılmaktadır. Çalışmada, kule yüksekliği sabit kabul edilmiş ve destek yapısı ile birlikte boyuna veya enine takviyelerin bulunmadığı varsayılmıştır. Bu bağlamda, optimizasyon değişkenleri olarak yapı kesit yarıçapı ve levha kalınlığı belirlenmiştir (Haghi R ve vd., 2012).

Bu değişkenlerin aralıklarının belirlenmesinde dikkate alınması gereken

başlıca faktörler, inşaat yöntemleri ve rüzgar türbini kurulumu için mevcut altyapıdır. Ayrıca, kaynak süresini minimize etmek amacıyla optimizasyon sürecinde alın kaynağı bağlantıları da değiştirilmiştir.

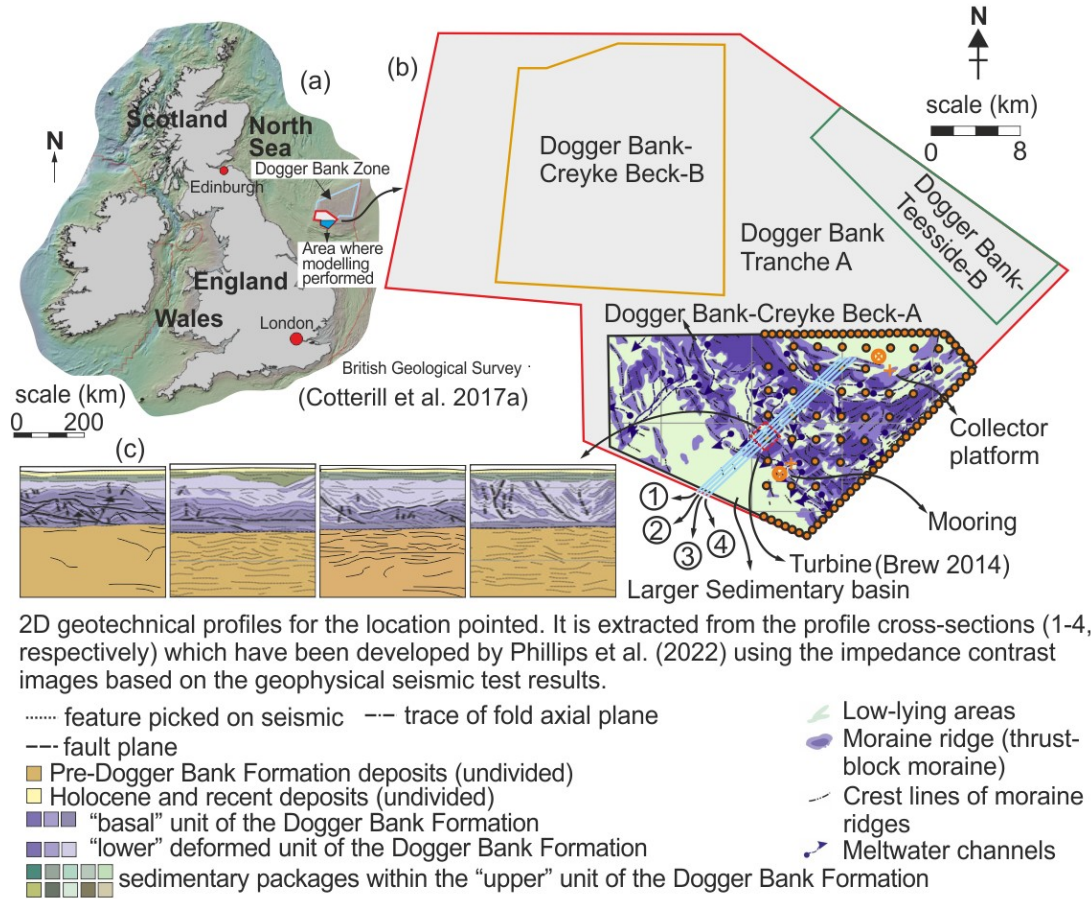
3.1.1.4. Dinamik Davranış Değerlendirmesi

Bir rüzgar türbini tasarımında en önemli unsurlardan biri de dinamik davranıştır. Rezonansın meydana gelmesi, destek yapısının aşırı zorlanmasına yol açarak yapısal başarısızlık veya yorulma ömrünün önemli ölçüde azalmasına sebep olabilir. Bu nedenle, birinci ve ikinci doğal modlardaki yapı titreşim frekansları, National Renewable Energy Laboratory (NREL) tarafından geliştirilen Modes v2.22 yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu yazılım, yapıyı; dağıtılmış kütle, kule üst kütlesi, ön-arka ve yan-yan rijitliklerini içeren basitleştirilmiş bir model ile temsil etmektedir. Yapının dinamik tepkisi, bu model çerçevesinde analiz edilerek optimizasyon sürecinde dikkate alınmıştır.

3.2. Malzeme

Bu tez çalışmasında modellemelerin sayısal kısmında, tekil kazık gövdesi yüksek mukavemetli çeliğin mekanik özellikleri kullanılarak ele alınırken, tekil kazığın gömülü olduğu deniz tabanı malzemesi granüler malzemenin parametreleri kullanılarak boyutlandırılmıştır. Genel olarak, açık deniz sahalarının alt katmanlarında yer alan kumlu zeminler bulunur. Yapı etkileşimi tasarım analizlerimizde, tekil kazık gövdesi, tekil kazığın üstüne gerekli kuvvetler eklenerek dikkate alınmış aynı zamanda rüzgar türbinin kule yapısı, geçiş kısmı malzemesi ve türbinin ünitesi modellenmiştir. Bu elemanların varlığı modelin karmaşıklığını artırırken modellerin çalışma süresini de önemli ölçüde artıracaktır.



Şekil 3.1. Tekil Kazık Rüzgar Türbini İçin Çalışılan Alan ve Sismik Test Sonuçlarının (Ağın vd., 2025)

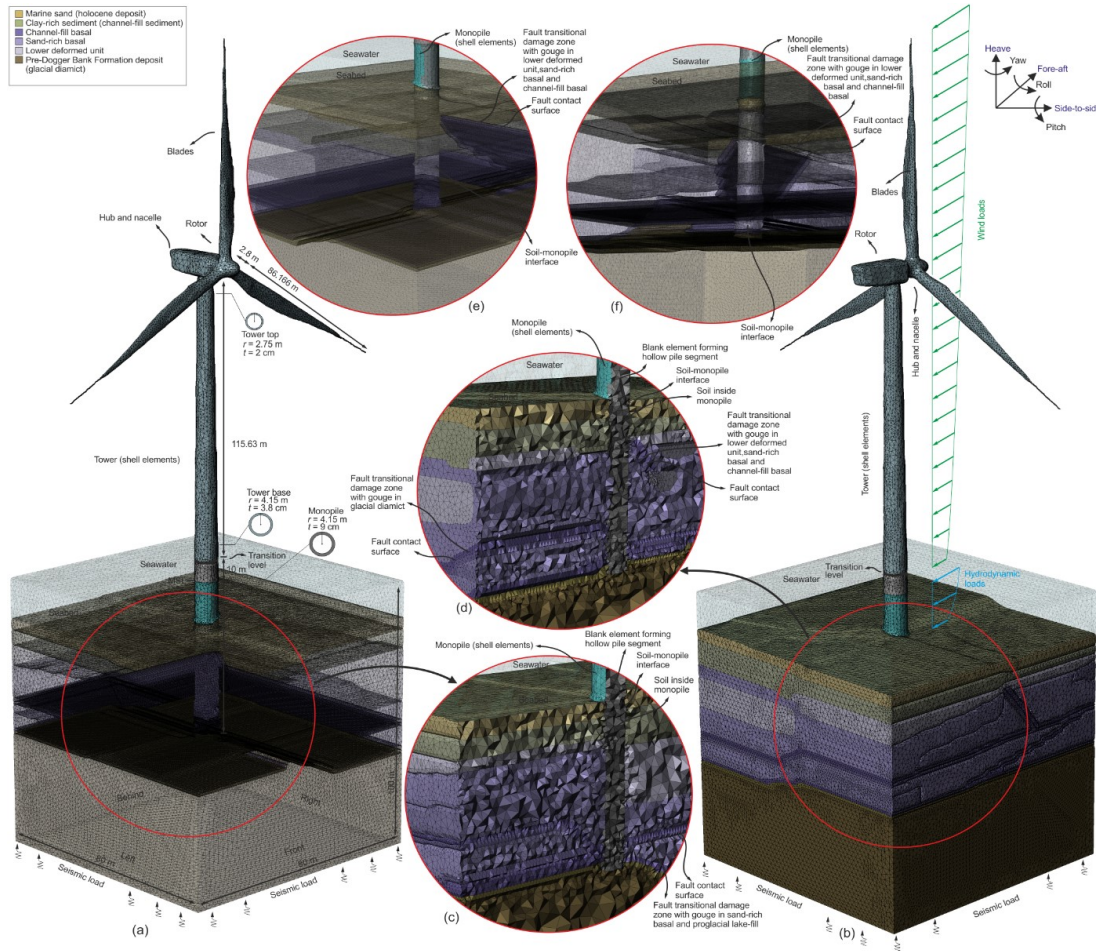
3.2.1. Zemin Malzemeleri

3.2.1.1. Dogger Bank Türbin Yerinin Toprak Stratigrafisi

Sismik yansıma verileri, Dogger Bank'ın güneydoğu kanadındaki vibroforlarda araziye oyulmuş önemli bir moren kompleksinin varlığını ortaya koymuştur. Ayrıca, buz tabakasının Dogger Bank'ın çevresine kadar uzandığı tespit edilmiştir (Emery AR. ve vd., (2019)). Şekil 2.3.(b), tez çalışmamızda yüzey altı modellemesi için kullanılan ve Phillips ve vd., (2022) tarafından daha ayrıntılı olarak incelenen sismik yansıma tarama hatlarını göstermektedir (Phillips ve vd., (2022)). Phillips ve vd., (2022) tarafından yukarıda bahsedilen hatlar boyunca çalışma kesiti için geliştirilen iki boyutlu yüksek çözünürlüklü yeraltı görüntüleri Şekil 2.3.(c)'de sunulmuştur. Şekil 2.3.(c)'de gösterildiği gibi, çalışma alanının 2 boyutlu yer profili görüntüleri Dogger Bank bölgesinde oldukça karmaşık bir jeomorfolojik yapıyı ortaya koymaktadır (Emery AR. ve vd., (2019)). Fay düzlemleri, eksenel kıvrımlar ve jeolojik deformasyonlara ek olarak, Dogger öncesi formasyon üzerinde bazal ve

alt formasyonun üç alt birimi tanımlanmış ve bunların üzerinde Holosen çökelleri gösterilmiştir (Şekil 2.3.c). Bu alt zemin varyasyonları, Emery ve vd., (2020, 2019a ve 2019b) ve Cotterill ve ark., (2017a ve 2017b) dahil olmak üzere çeşitli araştırmacılar tarafından yürütülen çalışmalara dayanmaktadır. Ayrıca, Emery ve vd., (2020, 2019a ve 2019b) tarafından sunulan CPT test sonuçları ile Phillips ve vd., (2022) tarafından geliştirilen 2D yüksek çözünürlüklü yeraltı görüntüleri aynı bölge için birleştirilmiştir.

Dogger Bank Formasyonu'nun (DBF) karmaşık bir Pleistosen sedimanter yapısından oluştuğu ve Holosen sedimanlarının DBF'nin alçak kesimlerinde 50 m'ye kadar kalınlığa sahip olduğu bildirilmiştir (Emery AR ve vd. 2019)). Kil bakımından zengin diamikton litolojisi gözlenmiştir ve süreksiz kum mercekleri de mevcuttur (Emery AR ve vd., 2019)). DBF'nin altında yatan Pleistosen formasyonlarının karasal, denizel, gelgit ve periglasyal gibi bir dizi çevresel etki sonucunda çökelmiş tortulardan oluştuğu bildirilmektedir (Emery AR ve vd. 2019)). Dogger Bank bölgesinin bölgesel araştırmasının bir parçası olarak yapılan sondaj sonuçları, siltli kumdan ince taneli kuma kadar çeşitli yoğunluklar sergileyen birimler içinde kil ve siltli kum yataklarının varlığına işaret etmektedir (Emery AR ve vd., 2019)). Cotterill ve ark., (2017a), DBF'den alınan sondaj örneklerinin kesme mukavemeti ve sürtünme değerlendirmelerine dayanarak, DBF birimlerinin üç farklı birime sınıflandırılmasını önermiş ve bu daha sonra Phillips ve vd., (2022) tarafından benimsenmiştir (Şekil 3c). Dogger Bank'ın güneyine doğru üst 60 metrede deforme olmuş tortul birimler yerel olarak baskındır. Sonuç olarak, buzul tektonik deformasyonları zeminde tespit edilmiş ve Dogger 'taki rüzgar çiftliği için kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır (Emery AR ve vd. (2019)). Bu nedenle Dogger Bank Açık Deniz Rüzgar Türbin sistemlerinin tasarımında faylar ve kıvrımlar gibi bu buzul tektonik deformasyonlarının yanı sıra alt zeminin karmaşık jeomorfolojik yapısının ve dinamik etkilerin de dikkate alınması gerektiği açıktır.



Şekil 3.2. Jeomorfolojik Zemin Simülasyonu. İzlenen Görüntü İşleme Aşamaları ve Jeomorfolojik Zemin Simülasyonu 3B Görseli

3.2.1.2. Dogger Bank Türbin Yerinin Yüzey Altı Modellemesi

Phillips ve vd.,(2022) tarafından sunulan dört sismik yansıma tarama hattı ve Brew (2014) tarafından bildirilen türbinlerin konumları Şekil 3.1.(b)'de gösterilmektedir. Belirli bir türbin sahası, Dogger Bank-Creyke Beck-A alanının güneybatı bölgesinde, merkeze yakın sismik yansıma hatları üzerindeki konumu nedeniyle seçilmiştir (Şekil 3.1.(b)). Bu dört sismik yansıma hattı için geliştirilen yüksek çözünürlüklü iki boyutlu jeoteknik profiller Phillips ve vd., (2022) tarafından sunulmuştur. Şekil 3.1.(b)'de gösterildiği gibi seçilen bölgenin profilleri, Şekil 3.2. de Abaqus (2013) programından yapılan ve sağlanan yüksek çözünürlüklü kesit görüntülerinden çıkarılmış ve sunulmuştur. Şekil 3.2.(c)'de sunulan profili görüntüleri yaklaşık 400 metrelik bir mesafeyi kapsamaktadır ve modelleme sürecinde belirlendiği üzere türbinin konumu için gerekli görülen modelleme bölgesinin genişliğine dayalı olarak gerekli boyutlara ölçeklendirilmiştir. Seçilen türbin alanının yüzey altı modellemesi, yazar tarafından daha önce açıklanan

metodolojiye uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Algın HM ve vd., (2022); Christian B., (2013)). Geoteknik tasarımlarda dijital modellerin oluşturulması için görüntü işleme tekniklerinin uygulanması ilk olarak yazar tarafından literatürde önerilmiştir (Algın HM ve vd.,(2022);Christian B., (2013)). Bu teknik, Şekil 3(c)'de sunulan kesit görüntüleri kullanılarak Şekil 4'de gösterilen yeraltı modellerinin geliştirilmesi için kullanılmıştır. Daha sonra görüntüler gri tonlamalı piksel değerlerine dönüştürülmüş ve modellenmiştir. Şekil 3.2.(c)'de ve Şekil 3.2.(b-g) gösterilen tüm jeoteknik malzeme varyasyonlarını ve fayları dahil etmek için kapsamlı bir modelleme süreci yürütülmüştür. Şekil 3.2. (b-g)'de gösterildiği gibi, modeldeki jeolojik oluşumları kategorize etmek için Emery ve vd., (2020, 2019a ve 2019b) tarafından tanımlanan jeolojik birimler kullanılmıştır. Bunlar arasında deniz kumu (Holosen tortusu), kil bakımından zengin tortu (kanal dolgusu tortusu), kanal dolgusu bazal kum bakımından zengin bazal, alt deforme olmuş birim ve Dogger Bank oluşumu öncesi tortu (buzul diamiği) bulunmaktadır (bkz. Şekil 3.2.(b-g)). Şekil 3.2.(c)'de gösterildiği gibi, sınırlı sayıda görüntü kullanıldığı için, görüntüler arasındaki ani geçişleri önlemek amacıyla bir yumuşatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, elde edilen çıktının kalitesini artırmak amacıyla bir dizi görüntü üretilmiştir. Görüntü işleme aşamalarında, jeoteknik modelleme özel amacı için geliştirilmiş Matlab algoritmaları ve açık kaynak kodlama kullanılmıştır. Görüntüler belirli bir şekilde düzenlendiği için herhangi bir filtreleme uygulanmamıştır.

3B yeraltı modelleri, jeolojik saha araştırmasından elde edilen zeminlerdeki çeşitlilik ile uyumlu olarak tasarlanmıştır. (Emery AR ve vd., (2019); Algın HM(2018)). Şekil 2'de sunulan 3B jeomorfolojik modeller, Phillips ve vd.,(2022) ve Emery ve vd.,(2019a) tarafından sunulan zemin bilgileri kullanılarak yeterli doğrulukta geliştirilmiş olsa da, 3B yeraltı modelinin doğruluğunun, bilinen zemin profillerinin ve stratigrafik kesit görüntülerinin sayısının artmasıyla arttığı kabul edilmiştir. Bu nedenle, gelecekteki açık deniz türbin çiftliği projeleri için sismik yansıma tarama hatları üzerinde ve arasında sondaj çalışmalarının yoğunlaştırılması tavsiye edilmiştir. Bu nedenle, daha kapsamlı ve kolayca kalibre edilebilen 3B jeomorfolojik modellerin oluşturulmasının uygulanabilir bir öneri olduğu açıktır. Sondaj planlaması bağlamında, model sınırlarıyla uyumlu konumların seçilmesinde dikkatli olunması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada kullanılan algoritma, ortogonal eksenlerde ters mesafe enterpolasyonu ve dikey ekseninde spline enterpolasyonu ile kodlanmıştır. Bu nedenle, modellenecek alandan elde edilen toprak profili verilerinin miktarı ne kadar fazla olursa, ortaya çıkan çözümler de o kadar gerçekçi olacaktır.

Bu enterpolasyon teknikleri yaygın olarak kullanılmakta ve sınırlı sayıda sondaj veri noktası ile zeminin üç boyutlu modellerinin oluşturulmasını kolaylaştırmaktadır. Şekil 3.2.(a)'da gösterildiği gibi hacimsel nokta bulutu, gri ölçekli piksel verileri dikkate alınarak elde edilir. Ardından, gözlemsel değerlendirmeler kullanılarak jeolojik yapı bölgeleri oluşturulur ve orijinal kesit profili değişikliklerine ve sondaj verilerine sadık kalınması sağlanır. Bu noktada, girişimin karmaşıklığı göz önüne alındığında, otomatik bir sayısal doğrulama yapılmamaktadır; bunun yerine, modelleme gözlemsel uyum temelinde gerçekleştirilmektedir. Ana toprak profili görüntüleri ile sondaj kuyusu toprak stratigrafileri arasındaki geçişlere dayanan bu görsel değerlendirmeler, model eşleşmesinin uygun olduğunu göstermektedir. Daha sonra, jeomorfolojik modellemenin tamamlanmasının ardından, Açık Deniz Rüzgar Türbininde tüm yapısal unsurları kullanılmış ve Abaqus (2013) kullanılarak hacimsel modele dahil edilmiştir. Ayrıca, Açık Deniz Rüzgar Türbin sisteminin kabuk yapıları ve temas arayüzleri bu aşamada sonlu elemanlar (SE) analizleri için tanımlanmıştır.

3.3. Sonlu Eleman Modellenmesi

3.3.1. Zemin-Kazık-Yapı Modellemesi

Genel olarak, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerin pratik tasarımı, zemin ortamının bir giriş ile karakterize edilen uzunluk boyunca tekil kazık ile bağlı yaylar tarafından tanımlandığı doğrusal olmayan Winkler yay p-y yöntemine dayanmaktadır. Bu yay konfigürasyonu doğrusal olmayan kuvvet-deformasyon ilişkileri ile tanımlanır ve p-y eğrileri olarak ifade edilir. Bunlar derinlikle birlikte zeminin özellikleriyle ilişkilidir. Ancak bu yöntem, zemin ortamının karmaşık 3B jeomorfolojik yapısını aşırı basitleştirdiği, 3B gerilme değişimini yeterince yansıtmadığı ve 3B zemin-kazık etkileşimini yeterli doğrulukta dikkate almadığı için eleştirilmektedir. Bu bağlamda, araştırmacılar Açık Deniz Rüzgar Türbinleri tasarımı ve analizinde 3B SE yöntemini yaygın olarak kullanmaktadır. Tekil Kazıklar için 3B FE analizlerinde zemin genellikle elasto-plastik modellerle tanımlanır, Gupta ve Basu (2020) bu modellemenin uygulama zorluklarına dikkat çekmiş ve son çalışmalarda bu davranışın SLS kriterini etkilediği açıklanmıştır. Bu bağlamda, farklı zemin davranışları için doğrusal olmayan elastik olmayan özel bünye modelleri kullanılmıştır.

Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin doğal frekansını hesaplamak için zemin ve kazık rijitliğinin de tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, yay rijitlikleri genellikle ya sayısal analizlerden ya da analitik denklemlerle tanımlanan süreklilik

tabanlı araştırmalardan elde edilir. Gupta ve Basu (2020) tarafından belirtildiği gibi, literatürde dinamik rijitlik için çalışma eksikliği vardır ve tekil kazık temelini 1 Hz'den daha düşük frekanslarla dinamik yük aktarır. Mevcut tasarım kılavuzları, dinamik yükler altında zemin-tekil kazık etkileşiminin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektirmektedir. Birçok çalışma Açık Deniz Rüzgar sistemindeki tekil kazık ve zemin arasındaki dinamik etkileşimlerin türbin ve temel sisteminin davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve zemin simülasyonlarının yeterince doğru bir seviyede yapılması gerektiğini göstermiştir. Kazık sistemlerinin dinamik tepkisinin, çevredeki topraktaki 3B jeomorfolojik varyasyonların hassas bir şekilde modellenmesinden önemli ölçüde etkilendiği kabul edilmektedir. Bu tez çalışmasında, bir Açık Deniz Rüzgar Türbin sisteminin kapsamlı 3B SE toprak-tekil kazık-türbin etkileşim modelleri oluşturulmuş ve çevresel dinamik yükler ve sismik etkiler altında doğrusal olmayan zaman-tarih analizleri yapılmıştır. Burada sunulan zemin-kazık etkileşim modellemesi, sahaya özgü zemin koşullarının gerçekçi 3B yapısal ve 3B jeomorfolojik varyasyonlarını dikkate almaktadır. Buna göre, zemin-monopol-yapı etkileşiminin yönsel dinamik değişimi SSI analizlerinde daha kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan malzeme modeli parametreleri (Algın vd ., 2025)

Malzemeler	γ_{sat} (kN/m ³)	E(MPa)	G(MPa)	ν	c(MPa)	ϕ (°)	V_s (m/s)
Deniz kumu	19	220.27	93.33	0.18	7.7	50	221.64
Kil bakımından zengin tortu	20	396.57	158.62	0.25	21.35	50	281.6
Kanal dolgusu bazal	17	102.05	45.56	0.12	2.45	22	163.7
Kumca zengin bazal	18	226.43	101.08	0.12	8.75	27	237
Alt deforme birim	18	360	150.00	0.20	15.75	38	288.7
Dogger Bank öncesi oluşum depozitosu	19.5	638.46	231.33	0.38	14.00	43	344.4
Kumca zengin tabanda oyuklu fay geçiş hasar zone	18	113.215	50.54	0.12	4.375	13.5	118.5
Kanal dolgusu tabanında oyuklu fay geçiş hasar zone	17	51.25	22.78	0.12	1.225	11	81.85
Buzul diyamiginde oyuklu fay geçişli hasar zone	19.5	319.23	115.67	0.38	7	21.5	172.2

3.3.2. Dogger Bank Açık Deniz Rüzgar Türbin sisteminin SE modelleri ve analiz parametreleri

Açık Deniz Rüzgar Türbininde değişen takıl kazı çapı, kalınlığı ve uzunluğu dahil olmak üzere türbinin genel geometrik boyutları Şekil 3.2.'da sunulmuştur. Çizelge 3.1.'de türbine ve saha zemin koşullarına göre ilgili parametreler yer almış ve değerler Midas GTS NX (2023) ve Abaqus (2013) analizlerinde kullanılmıştır. Aynı zamanda türbin tasarımlarımızda optimizasyon çalışmaları için 36 adet analiz

yapılmış olup bu analizler için kullanılan boyutlar tekil kazıka ait geometrik görseller ve mesh sitemide Şekil 3.10.'da gösterilmektedir. Tekil kazıkların toplam uzunlukları 55 m ile 70 m arasında olup, 45 m'si ve 45 metreden fazlası olan uzunluklar zeminde, 20 m'si deniz suyu içinde ve 10 m'si deniz suyunun üzerinde bulunmaktadır. Tekil Kazıkların kalınlıkları Alkhoury ve ark., (2022, 2021) tarafından API (2014) tavsiyelerine uygun olarak belirlenmiş ve Şekil 3.1.(a)'da gösterilmiştir. Şekil 3.2., hacimsel dört yüzlü elemanlar kullanan 3B SE modellerinden elde edilen SE ağ görüntülerini göstermektedir. Watanabe ve ark.,(2017) tarafından geliştirilen maksimum eleman boyutlandırma yaklaşımları ile kullanılmıştır. Bu örnekte, maksimum frekansın 15 Hz olduğu göz önüne alındığında, kayma dalgası hızının 81,85 m/s'ye düştüğü en kritik bölge için ızgara boyutu 0,55 m olarak hesaplanmıştır ($V_s/10f_{max}=0,55m$). Sonuç olarak, bu kritik bölgelerde bu ızgara boyutu kullanılarak eleman ayrıklaştırması yapılmış ve analizler toplamda yaklaşık 2 milyon eleman kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 3B SE modelleri Midas GTS NX (2022) kullanılarak analiz edilmiştir. Şekil 3.2'te Abaqus programından tasarlanan 3B zemin alanı için tekil kazık, türbin kulesi, hub/nacelle bölümü ve kanat parçaları gösterilmektedir. Ortam zemini, modelin tekil kazığının zemine gömülü olduğu kısımlarında tekil kazığının iç bölgesinde tanımlanmıştır.

Çizelge 3.2. Kullanılan hipoplastik kurucu model parametreleri (Algin vd ., 2025)

$\phi_c (^\circ)$	λ^*	κ^*	N	ν_{pp}	α_G	R	β_r	χ	Ag	ng	mrat	$K_w(K/m^2)$	e
21.9	0.095	0.015	1.190	0.1	2	0.00005	0.08	0.9	270	1	0.5	10^6	0.7

Tekil kazığının içindeki zemin özelliklerinin kazığının hemen dışındakilerle aynı olduğu varsayılır. Bu analizde çelik, doğrusal-elastik izotropik malzeme olarak tanımlanmıştır. Kütle etkisi, yapısal elemanlar için ilgili yoğunluk değerlerinin kullanılması yoluyla 3B SE modellemesine dahil edilmiştir. Ayrıca, kütle yerine gerçek geometrik model kullanılmıştır. Buna göre, hem eksantrikliğin hem de dönme ataletinin çevresel dinamik yüklere ve sismik etkilere göre değişimi, zaman alanı içinde daha gerçekçi bir şekilde modellenmiştir. Sismik sayısal analizlerde, yerçekimi ivmesi Algin (2022) tarafından önerildiği gibi aşamalı olarak uygulanmış ve modelin yerçekimi altında kararlı bir durumda kalmasını sağlamak için süreç boyunca korunmuştur. Bir önceki aşamada hesaplanan tepkiler, bir sonraki aşamada başlangıç koşulları olarak kullanılmıştır.

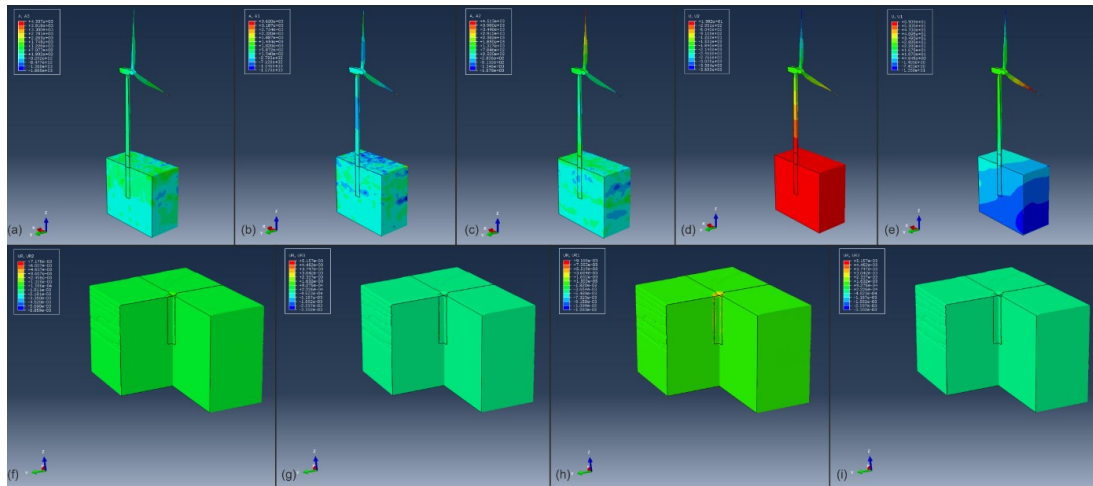
Sınırların sonuçlar üzerindeki etkisini en aza indirmek ve modelin etkin boyutlarını belirlemek için bir yakınsama çalışması yapılmıştır. Yanal sınırlarda

sismik sönümleyiciler kullanılmış ve kayma dalgası ve yoğunluk değişimleri Algin ve arkadaşları (2022) tarafından ortaya konan öneriler referans alınarak dikkate alınmıştır. Tekil kazığın iç ve dış zemin temas arayüzlerinde, tekil kazık kısıtlanmış yüzeyler olarak kullanılırken, zemin arayüzleri kısıtlanmış yüzeyler ile tanımlanmıştır. Klasik Coulomb sürtünme modeli kullanılmış olup sürtünme katsayıları Wichtmann ve Triantafyllidis (2016) tarafından geliştirilen ve Alkhoury ve arkadaşları (2022) tarafından önerilen ilişkiye göre zeminin sürtünme açlarına bağlıdır. Zemin ve tekil kazık kabuk yapısı arasındaki yüzey sürtünmesi etkileşimi ve fay geçişi ile hasar bölgeleri arasındaki arayüzey sürtünmesi, temas çifti tanımlamaları (yani Coulomb sürtünme modeli) kullanılarak Abaqus (2013) programında Çizelge 2.'de verilen değerler girilerek analizler yapılmış olup çıkan sonuçlar dikkate alınmıştır.

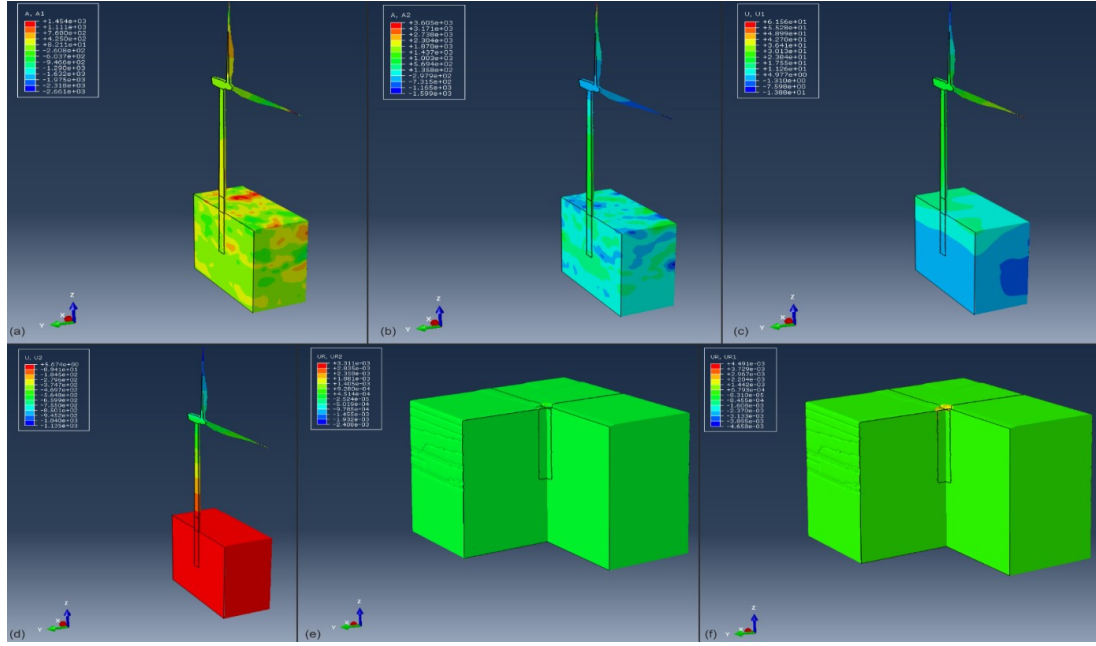
Sonsuz bir zemin ortamını simüle etmek ve sismik dalgaların yansımaları en aza indirmek için uygun sınır koşullarının uygulanması büyük önem taşımaktadır. Lysmer ve Kuhlemeyer (1969) tarafından tanıtılan ve dashportlarda kullanılan viskoz sınırlar da dahil olmak üzere bir dizi yapay sınır tekniği geliştirilmiştir. 3B SE modelinin sınır koşulları, yansımaları önleyerek sismik dalgaları sönümlemeye yarayan dashpotlar kullanılarak geliştirilmiştir. Dashpot katsayıları, modelin ortogonal düzlemine dik dış yüzeylerdeki her bir düğüme yatay ve dikey olarak uygulanmıştır. Dashpot sönümleme katsayıları model zemin sınırındaki her bir düğüme hem yatay hem de dikey yönde uygulanmıştır. Modelin tabanında, yatay yönde emici bir sınır kullanılırken, dikey yön birkaç 3B SE çalışmasının bulgularına uygun olarak sabitlenmiştir.

Toprak modeline özgü jeomorfolojik değişkenlik göz önünde bulundurularak, her bir düğüm için etki alanı Algin (2022) tarafından tanımlanan metodolojiye uygun olarak hesaplanmıştır. Bu, aynı toprak tipine sahip model yüzeyinin alanındaki ortalama eleman boyutunun ve seçilen alandaki düğüm sayısının dikkate alınmasını gerektirir. Bu atamalarda, dashpot katsayıları, söz konusu malzemeye özgü kayma dalgası hızı ve yoğunluk değerleri ile malzeme bazında tanımlanmaktadır. Küçük kayma gerilmesi değerleri için (%0,001'e kadar) toprağın kayma modülü doğrudan kayma dalgası hızı ile ilişkilendirilebilse de, daha yüksek kayma gerilmesi seviyeleri için ampirik korelasyonlar kullanılabilir. Buna göre, bu ilişki sismik yansıma veya koni ucu direnci gibi saha verileri temelinde kurulabilir. Daha sonra, kayma modülü ve yoğunluğun değişimini daha doğru bir şekilde yansıtmak için derinliğe bağlı kayma dalgası hızı değerleri kullanılabilir.

Derinliğe bağlı kayma dalgası hızı değişimleri daha sonra 3B SE model sınır bölgelerindeki çizgi noktalarına sönümleme katsayısı olarak (her bir düğüme ayrı ayrı) uygulanabilir. Bu yaklaşım, sınır koşullarındaki 3B kayma modülü değişikliklerinin daha yüksek doğrulukla simüle edilmesini sağlar. Ancak bunu başarmak için proje alanında detaylı bir çalışma yapılması gerekmektedir. Dogger Bank bölgesi için gerekli veriler mevcut olmadığından, sönümleme katsayıları sunulan 3B SE modelindeki dashpot'lara malzeme bazında uygulanmıştır. Bu bağlamda, etkin alan, seçilen sınır alanı değerinin bu alandaki toplam düğüm sayısına oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Daha sonra, bu değer malzeme yoğunluğu ve hesaplamanın yapıldığı dashpot yönündeki kayma dalgası hızı ile derinlik dikkate alınarak çarpılır. Elde edilen değer daha sonra her bir jeomorfolojik sınır yüzeyi için dashpot katsayılarının hesaplanmasında kullanılır. Modal analizlerden elde edilen Rayleigh sönümlemesi, hem kütle hem de sertlik terimlerini etkili bir şekilde birleştiren basit formülasyonu nedeniyle dinamik analizlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Türbinin Rayleigh sönümlemesinin frekansa bağlı değişimi Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu değişim, kütle orantılı sönümleme teriminin düşük frekanslarda daha önemli bir etkiye sahip olduğunu, sertlik orantılı terimin ise daha yüksek frekanslarda baskın olduğunu vurgulamaktadır. Bu makalede, Rayleigh sönümleme pratik bir yaklaşım olarak kullanılmış ve katsayılar modal analizler yoluyla elde edilmiştir. Cheng ve vd., (2023) ayrıca kule ve türbinin üst kısmı için %2 sönümleme oranı kullanmıştır. Algin ve vd., (2022) ve Cheng ve vd., (2023) tarafından yapılan çalışmalara benzer şekilde bu makalede zemin için %5 sönüm oranı kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Dinamik Analizlerde Elde Edilen Ivme, Deformasyon ve Dönme Sonuçlarının Temsili Görüntüleri

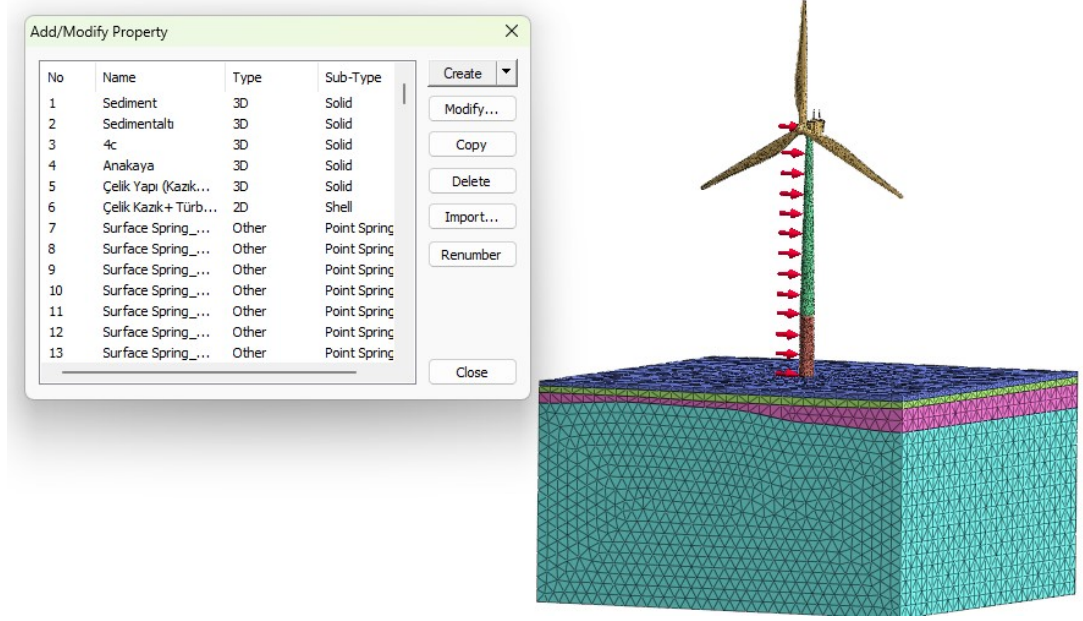


Şekil 3.5. Dinamik Analizlerden Elde Edilen Ivme, Deformasyon ve Dönme Sonuçlarının Temsili Görüntüleri

3.3.3. Sayısal Modellemede Midas GTS NX Genel Hususları

Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin tasarımı için Midas GTS NX (2023) sonlu elemanlar programı tercih edilmiştir. Tasarımda üzerinde oluşturulan 3B SE modeli kıydan uzakta şekil 3.11. görseldeki gibi denizde çevresel yükler olan dalga, rüzgar ve deprem etkilerine maruz bırakılarak optimizasyon yöntemine dayalı olarak çalışılmıştır. Ayrıca, analizlerinde bazı modelleme zorluklarıyla karşılaşmış ve bu çalışmada geliştirilen modelde bu zorluklar giderilmiştir. Bu araştırma esas olarak düzensiz zeminlerin dinamik davranışları ve Açık Deniz Rüzgar Türbini tekil kazıkta oluşan etkilerin hesaplaması yapılmıştır.

Midas GTS NX (2023) bünye modellerinin analizini gerçekleştirmek için, üç eksenli testler, Casagrande testi, Atterberg Limitleri testi gibi laboratuvar testleri de dahil olmak üzere SPT, CPT gibi saha çalışmalarından mümkün olduğunca fazla bilgi toplanmalı ve kayma testi ve zemin konsolidasyon testi dahil edilmelidir, bu şekilde araştırılacak zeminler eksik verileri elde etmek için korelasyonların kullanımını azaltacak ve böylece yanıl yük testleriyle ilgili model sonuçlarındaki büyük farklılıkları azaltacaktır.

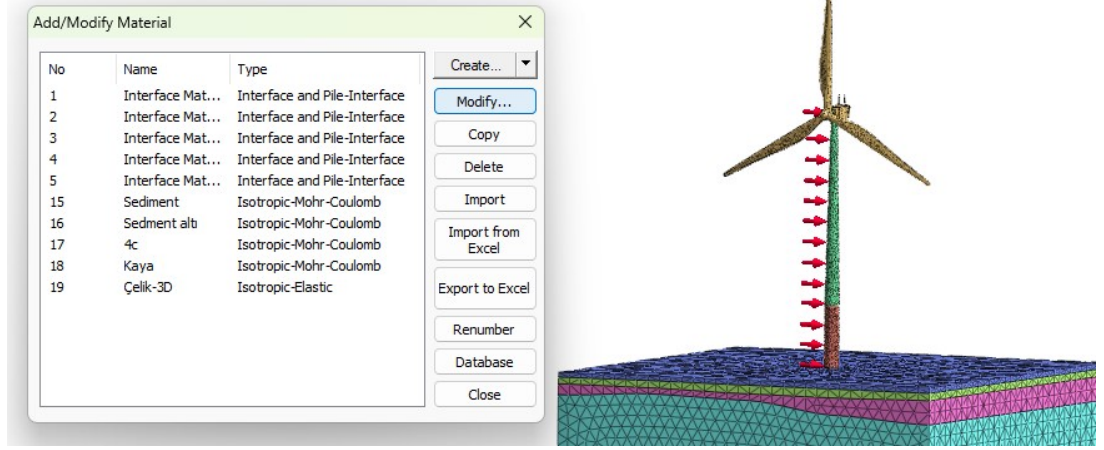


Şekil 3.6. Midas GTS NX (2023) Malzeme Materyalleri Girişi

Kazıkların incelenmesi sırasında, Young modülü (E), sürtünme açısı (ϕ), dilatasyon açısı (ψ), bu parametrelerin Midas GTS NX (2023) programında kullanılan bünye modellerinden elde edilen sonuçlar üzerindeki büyük etkisi nedeniyle, referanslarda verilen kabul edilebilir aralıklar içinde olduğu düşünülmelidir. Modelleme sürecinde, zemin-kazık ağ oluşturma aşamasında, kazık merkezinden modelin sınırlarına kadar gerilme dağılımını ve geometrik simetriyi iyileştirmek için planda ve yükseklikte geometrik bir uyum göz önünde bulundurularak zemin ve kazık için önerilen genel bir ağ düşünülmelidir. İster kil, ister kum veya karışık olsun, her bir toprağın analizini gerçekleştirirken, Mohr Coulomb, Kili ve Sertleşen Toprak modellerinin özelliklerini dikkate alarak, daha sonra etkili veya etkisiz parametreleri girmek için, drene edilmiş veya edilmemiş her bir toprağın koşulları önceden dikkate alınmalıdır.

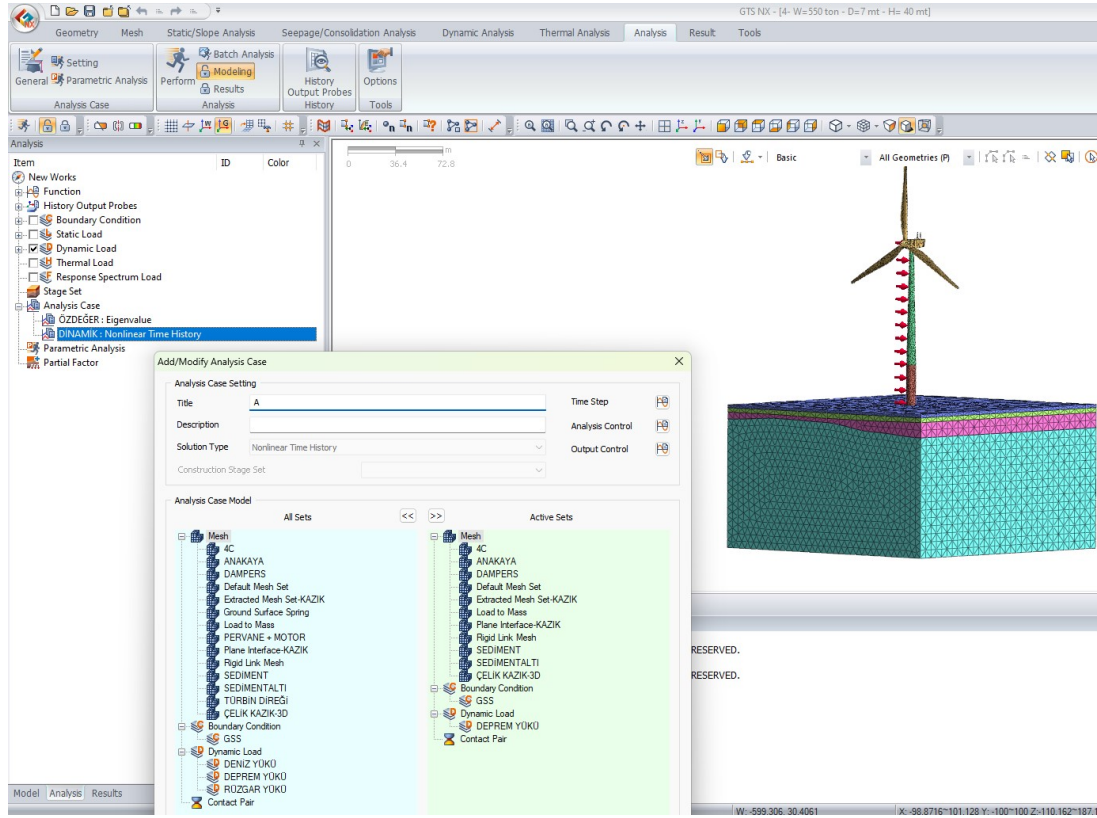
3.3.4. Sonlu Elemanın Sayısal Modellemesi

Bu çalışmada, Midas GTS NX (2023) yazılımı kullanılarak Açık Deniz Rüzgar Türbini tasarımı planlanmış olup türbinde 90 metre türbin direk yüksekliği değişken motor ve optimizasyon için değişken türbin motor ve pervane ağırlığı ile yüksekliği ve çapı ile değişken tekil kazıkların inşaat süreci ve çevresindeki değişken toprak kütlelerinin 3B sayısal modeli şekil 3.6. ve şekil 3.7. de oluşturulmuştur.



Şekil 3.7. Midas GTS NX (2023) Malzeme Materyallerin Atanması

Modelin tasarımını oluşturmak için gerekli işlem adımları aşağıdaki gibi yapılmıştır. İlk adımda yapı sisteminin tüm zemine ait materyaller ve katmanlarının oluşturulmasıdır. Zemini katmanlarına ayırırız. Daha sonra, Tekil Kazıgın 3 boyutlu meshleyip moment ve eksenel sonuçları almak için 2B boyutlandırılmasında sisteme eklenip yükleme koşullarına göre bölünür ve birleşik durum modeli oluşturmak için zaman içinde Boole işlemleri kullanılır; dinamik etkilerin modelin tahmin doğruluğu üzerindeki etkisini azaltmak için harmonik yük eklenir.



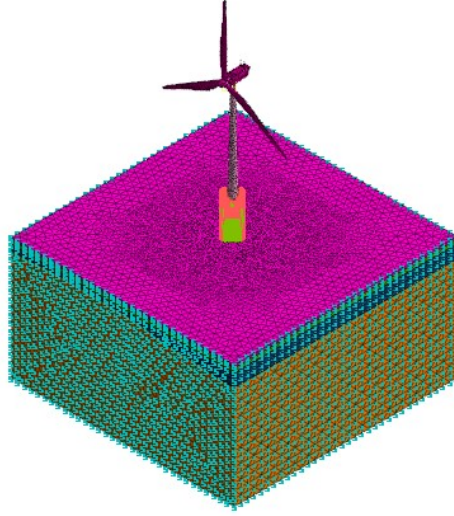
Şekil 3.8. Midas GTS NX (2023) Dinamik Analiz Adımları Gösterimi

Bir sonraki adım, zemin ızgarasını bölerek modeli daha ayrıntılı hale getirmektir. Ardından, tekil kazığın inşaat aşamalarını bölmek için modelin kenarlarına, tabanına ve sütunlarına sırasıyla elastik kısıtlamalar, sabit kısıtlamalar ve rotasyon kısıtlamaları uygulanmıştır. Daha sonra, model farklı inşaat koşullarına göre simüle ve analiz edilmiş ve modelin nihai şekiller Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Midas GTS NX Yazılımı İçin İşlem Akış Diyagramı

Çalışma için modelin tasarımı olarak tarafından kavramsallaştırılan Açık Deniz Rüzgar Türbinin Tekil Kazık yapısı dikkate alınmıştır. Açık Deniz Rüzgar Türbinin 20 m su derinliğinde 10 metresi su üstünde olacak şekilde sistemi destekleyen bir tekil kazık modeli Midas GTS NX (2023)'te geliştirilmiştir. Türbinin üst yapısı, silindirik bir geçiş parçası ile tekil kazık bağlanan türbin malzemeleri motor, pervane ve türbin direği çelik kuleden oluşmaktadır. Modeldeki cıvata, flanş ve kaynakların yokluğunu hesaba katmak için yoğunluk değeri çelik için daha yüksek kabul edilmiştir. Tekil kazığı 4 m, 5 m ve 6 m ve kalınlığı 0,06 m olarak tasarlanması yapılmıştır. Kazıklar giriş elemanları kullanılarak modellenmiştir. Tekil kazıkların et kalınlığı (t), API (2000) tarafından, denklem tarafından verilen çapına (D) dayanarak tanımlanmıştır.

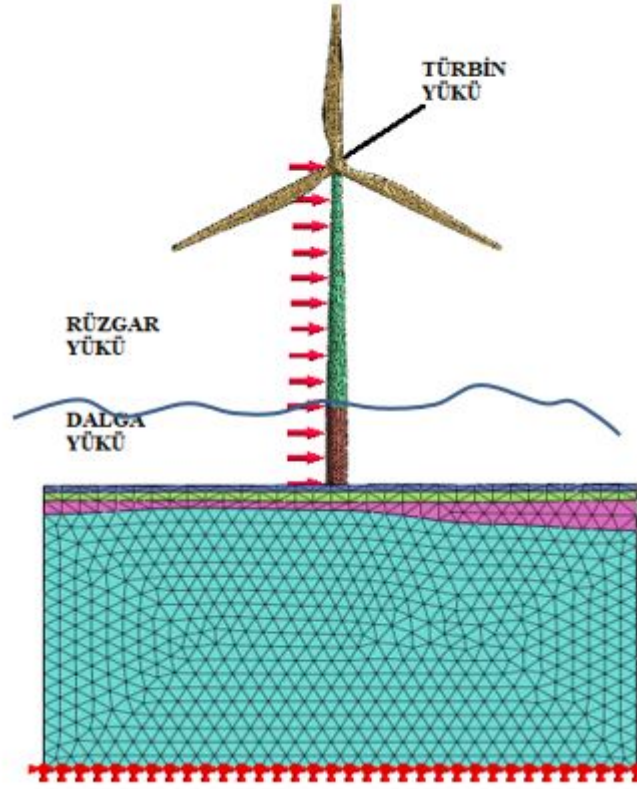


Şekil 3.10. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Mesh Sistem Görüntüsü

Programda düzensiz zemin üzerine Açık Deniz Rüzgar Türbini oturtulmuş yapı zemin etkileşimi oluşturulup mesh'ler arası etkileşimde kurulmuştur. Bu sisteme öncelikle dinamik analiz için gereken özdeğer analizi (free-field) analizi yapılmış olup özdeğer analizinden çıkan 36 adet özdeğer analizi zamana bağlı dinamik analiz (non-linear time history) için kullanılmış ve 36 adet dinamik analiz yapılmış olup farklı yükleme koşulları ve farklı kazık materyalleri ile birlikte göz önünde bulundurulmuştur. Zemin malzemeleri ve kazık malzemeleri için Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de geçerli olan değerler kullanılmıştır. Deniz ve rüzgar yüklemelerinde Şekil 2.2 deprem içinse Şekil 2.3. yer alan grafik değerleri dikkate alınmıştır. (Algın vd., 2025)

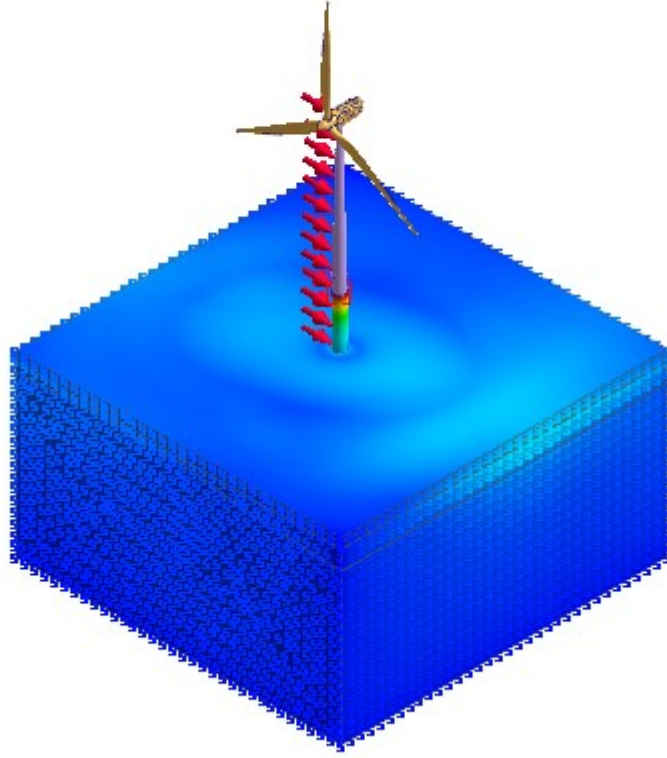
Bu tür testlerin sonlu eleman modellemesi zorlu bir iştir. 3B sistemin geometrisi temelde eksenel simetrik olduğundan, gerçekçi bir 3B model yalnızca eksenel simetrik koordinat sistemlerini işleyebilen bir yazılım tarafından oluşturulabilir. Genişletilmiş bir 2D eksenel simetrik model kullanılamaz sadece kazıklarda yükleme sonucunda moment, kesme açısı değerlerini almak için tekil kazıklar etrafında 3B kazıktan türetilerek 2B kabuk yapılmıştır. Midas GTS NX'te eksenel simetrik 3B modelleme ya global bir silindirik koordinat sistemi tanımlanarak ya da silindirik eleman koordinat sistemi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu çalışma için ikincisi kullanılmıştır. Şekil 3.10, modelin sonlu eleman ağına sahip bir bölümünü göstermektedir. Silindirik yüksek dereceli elemanlar ortalama 4, 5 ve 6 metre çaplarında kazıklar olarak tasarlanmıştır.

Yaklaşık olarak 36 adet oluşturulan Açık Deniz Rüzgar Türbinin mesh sisteminde 500 bin ile 700 bin arasında değişen mesh ağı sistemi kurulmuştur. Zeminimiz 4 katmandan oluşmuştur. (Szilvágyi, Z., & Ray, R. P. 2018)



Şekil 3.11. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Dalga ve Deniz Yükleri Görüntüsü Midas GTS NX (2023)

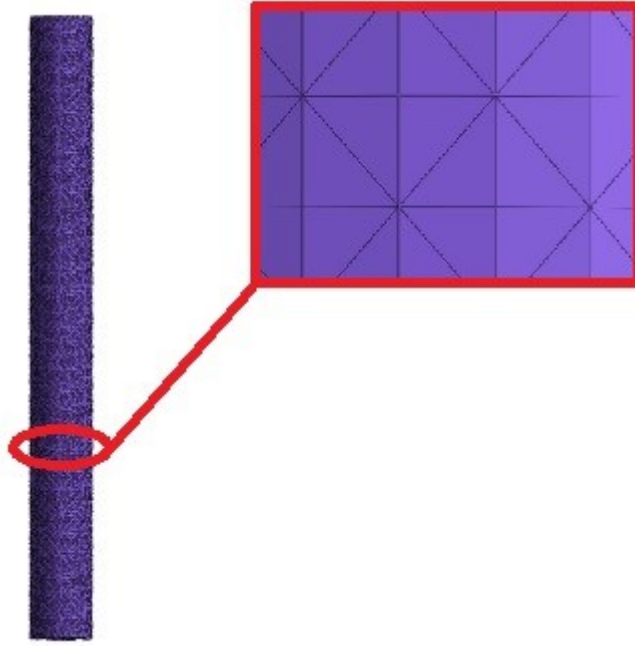
Şekil 3.11.'da ayrıca zeminin içi boş silindirik çelik kazığa gelen türbin yükünü Şekil 1.3. de yer alan geçiş parçası ile kazığa aktarılıp çelik halkayı temsil eden sarı elemanlar gösterilmektedir. Toprak elemanlarını daha iyi göstermek için bu halkanın bir kısmı kapatılmıştır. Uygulanan burulma yükü, eksenel simetrik eleman koordinat sisteminin dönme yönünde etki eden yüzey gerilimi olarak modellenir. Bu seçenek olmadan, uygulanan bir düğüm yükü, bu durumda gerçek davranışı yansıtmayan sürekli bir teğetsel yönde hareket edecektir. Dinamik analizlerde ilk gerilme üretimi, sınırlama aktivasyonu (eleman yüzeylerinin normal yönünde hareket eden serbest yüzey basıncı ile burulma yüklemesi aşamalarından oluşmaktadır.



Şekil 3.12. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Dinamik Tepki Görüntüsü

Bu, yazılımda inşaat aşaması setleri tanımlanarak ve inşaat aşaması analiz durumları oluşturularak yapıldı. Ağın küçük alt kümeleri stres, gerilme vb. durumları belgelemek için seçilebilir. Süre hesaplamada tüm ağ sistemi için yapılacaktır, sonuçlar yalnızca bu seçilen elemanlar için kaydedilecek ve çıktı veri depolama gereksinimlerini önemli ölçüde azaltacaktır. Analiz sonuçları yüklü bir miktar depolama alanı kaplayabileceğinden, bu durum 3B SE hesaplamaları için hala çok önemli olabilir. Bu kadar büyük bir veri seti ile sonuçların analiz edilmesi önemli ölçüde yavaşlamış ve kaçınılmaz olarak sabit disk kapasitesi sorunlarına yol açmıştır. Sonuç türleri (deformasyon, gerilme, gerinim) de analizden önce ayarlanabilir. Midas GTS NX (2023) yazılımı için malzeme modelinin formülasyonu Çizelge 3.1.'te sunulmuştur.

Midas GTS NX'de ek bir modelleme detayıda, kullanıcının modeli olarak kazık yüzünde belirlenen noktalarda deplasman, ivme, dönme ve moment değerleri okunmuştur. Her bir kazık için 4 farklı (deplasman, ivme, dönme ve moment) değerler ve bu değerler için 4 farklı yönden (+X, -X, +Y, -Y) okuma yapılmıştır.

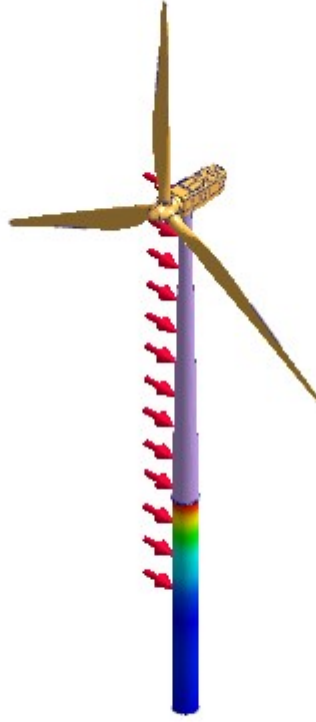


Şekil 3.13. Midas GTS NX (2023) Kazıkların Mesh Yapılması Görüntüsü

3.3.5. Sonlu Elemanlar Kullanılacak Zemin Parametreleri

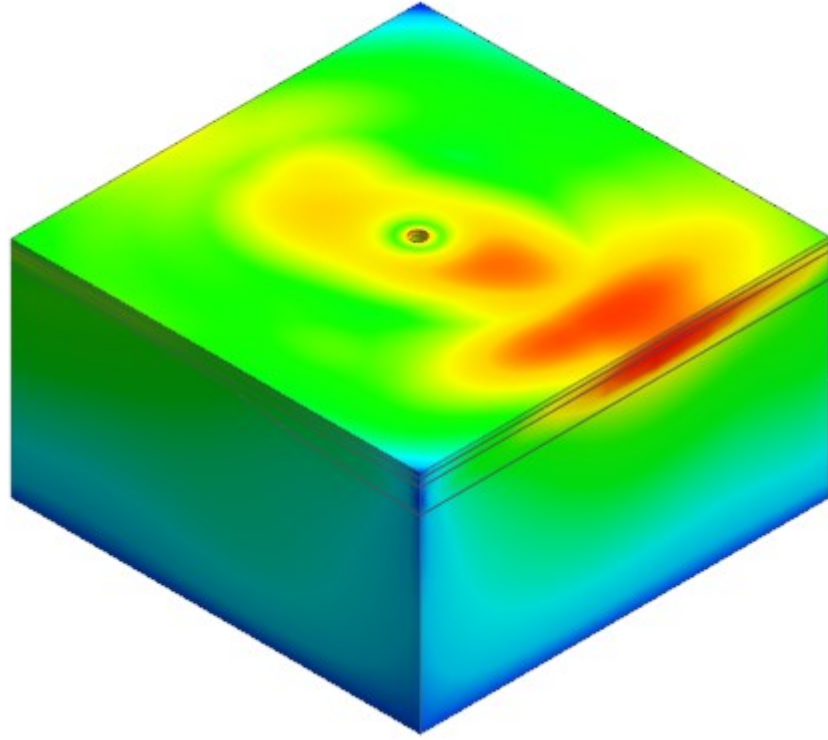
Çeşitli laboratuvar ve saha deneylerinden SE modelleri için zemin parametrelerinin elde edilmesi de zorlu bir görevdir çünkü ters bir problemin çözümünü içerir. Bazı geoteknik SE yazılımları, yaygın olarak kullanılan laboratuvar testlerinin eğrilerini uydurmak için yerleşik program modülleri sunar (örneğin Plaxis'teki Soil Test modülü), böylece kullanıcı tek bir parametreyi değiştirmenin etkilerini değerlendirebilir ve belirli bir proje için en uygun parametresetini seçebilir.

Bu çalışmada Dogger Bank (İngiltere) bölgesindeki jeomorfolojik birimler arasındaki ayrışma ve alterasyon, deforme olmuş ve katlanmış birimlerdeki değişimler, katlanmış bindirme birimlerindeki değişimler, alçak ve derin yataklı sedimanter havza birimleri, süreksiz tabakalar ve faylar gibi detaylar tespit edilebilmiştir. Dogger Bank bölgesinde kullanılan türbinler hakkında bilgi eksikliği nedeniyle, daha önce Alkhoury ve diğerleri (2022) tarafından incelenen DTU-10-MW tipi büyük ölçekli türbin, bu çalışma için referans türbin olarak seçilmiştir. Çalışma, temel olarak zemin yapısı etkileşimi nedeniyle çeşitli zemin profiline odaklanmaktadır ve Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir ve analizlerde kullanılmıştır.



Şekil 3.14. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Kazık Türbin Çevresel Yükleme Görüntüsü
Midas GTS NX (2023)

Kazık sistemlerinin dinamik tepkisinin, çevredeki topraktaki 3D jeomorfolojik varyasyonların hassas bir şekilde modellenmesinden önemli ölçüde etkilendiği kabul edilmektedir (Von Wolffersdorff vd., 1996). Çalışmada sisteminin kapsamlı 3B SE toprak-tekil kazık - türbin etkileşim modelleri oluşturulmuş ve çevresel dinamik yükler ve sismik etkiler altında doğrusal olmayan zaman-tarih analizleri yapılmıştır. Burada sunulan toprak-kazık etkileşim modellemesi, sahaya özgü zemin koşullarının gerçekçi 3B yapısal ve 3B jeomorfolojik varyasyonlarını dikkate almaktadır. Buna göre, zemin-tekil kazık-yapı etkileşiminin dinamik değişimi dinamik analizlerinde daha kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 3.15. Açık Deniz Rüzgar Türbinin Dinamik Analiz Sonrası Zemin Tepki Görseli Midas GTS NX (2023)

Sertleşen Zemin modeli zemin simülasyonunda daha doğru sonuçlar vermektedir, bunun nedeni testlerin çoğunda sağlanan büyük miktardaki veridir. Zemin koşullarının yaklaşık olarak temsil edilmesi, her bir yanal yük testi için yük ve yer değiştirme grafiklerinin doğruluğunu da artırır. Bununla birlikte, zemin özelliklerini daha iyi temsil etmek için, laboratuvar testlerinden elde edilen etkili kesme mukavemeti ve konsolidasyon parametreleri mevcut olmalıdır. Mohr Coulomb Modeli, zemin modellemesi için daha az parametreyi ele alırken, bazı durumlarda modellemeden belirlenen yük-deplasman eğrisi deneysel olandan uzaktır. Farklı zeminler için yapılan korelasyonlar Diego (2019) ve Nieto (2009) referanslarına göre yorumlanmıştır.

3.3.6. Analizde Çıkan Sonuçlar

Çalışma, düzensiz yükleme modellerine maruz kaldığında zeminlerin dinamik davranışına odaklanmaktadır. Açık Deniz Rüzgar Türbini deneyleri analiz edilmiş ve sonuçları Abaqus (2013) programında çıkan sonuçlarla beraber doğrulaması yapılmıştır. Yumuşak hesaplama tabanlı analiz modeli, halka kanatlı-açık uçlu boru

kazık ile temsil edilen yeni bir boru kazık modelinin davranışını değerlendirmek ve nihai yük kapasitesini tahmin etmek için Midas GTS NX (2023) sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Sayısal analiz ve laboratuvar testleri arasındaki karşılaştırma sonucunda, aynı model kazığın taşıma kapasitesine ilişkin sonuçlar arasında uyum ve yakınsama olduğu, dolayısıyla önerilen yaklaşıma güven sağladığı belirtilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki maksimum hata yüzdesi %5'i aşmamaktadır. Bu durum, Midas GTS NX (2023) sonlu elemanlar yazılımını kullanan yumuşak hesaplamanın, tam ölçekli bir kazık modeli için gelişmiş bir değerlendirme aracı olarak kullanılabileceğini doğrulamaktadır. Midas GTS NX (2023) sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılan yumuşak hesaplama, Tekil kazık içindeki kısıtlı zeminin simülasyonunu açıklamıştır. Ayrıca, Tekil kazık modeli içindeki kemerlenme olayının gelişimi ve oluşumunun iyi bir gösterimini sağlamış ve kazık ucunun altındaki zemin için deformasyon şeklini göstermiştir.

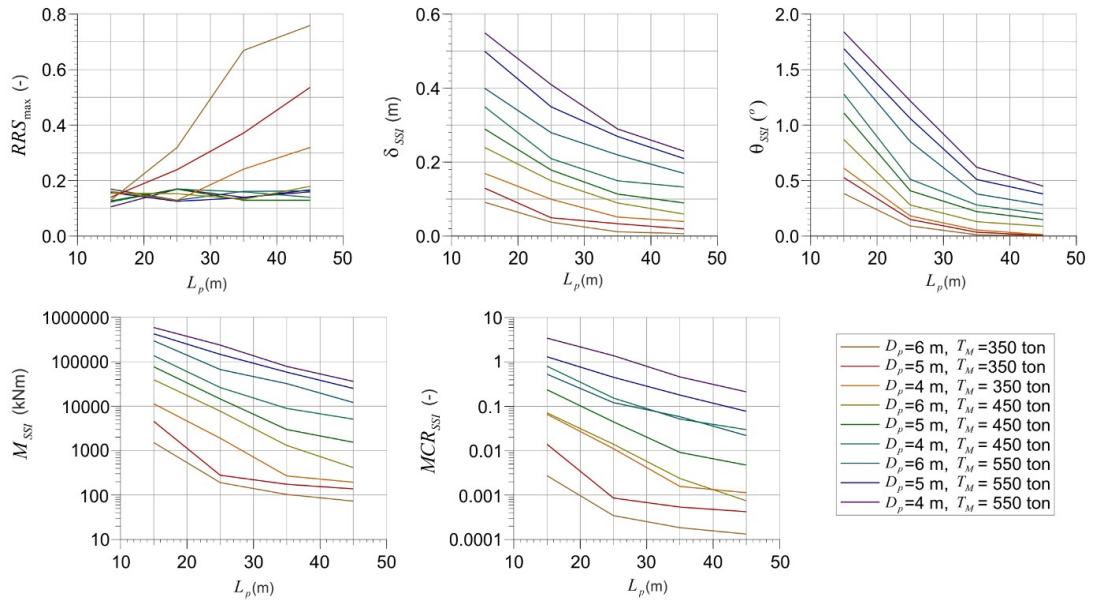
Zemin modellerinin bu tür yükler altında kayma gerilmesi-şekil değiştirme eğrilerini tahmin etme kabiliyetini değerlendirmek için çıkan sonuçlar referans olarak kullanılmıştır. Midas GTS NX (2023) üzerine inşa edilen model geliştirilmiş ve modelin deprem yük geçmişleri için daha karmaşık histeretik eğrileri doğru bir şekilde üretebilmesi için önceki modeldeki bazı modelleme zorlukları çözülmüştür. Bu modelin, özellikle Ramberg-Osgood modeli için testteki zeminin modül bozulması ve histeretik davranışı ile iyi bir uyum gösterdiği için TOSS test koşullarını taklit etme kabiliyetine sahip olduğu doğrulanırken, Hardin-Drnevich modelinin kayma gerilmesi-şekil değiştirme eğrisinin doğrusal olmadığı doğru bir şekilde eşleştirmekte zorlandığı açıktı. Sonuç olarak, denkleme eklenen eğrilik katsayısının daha iyi sonuçlar için Sonlu Elemanlar yazılımı tarafından kullanılması önerilmektedir. Bu model, basit bir döngüsel veya hatta tek yönlü teste dayalı düzensiz yük geçmişleri için TOSS testini simüle etmek ve ardından parametreyi daha karmaşık geoteknik problemler için kullanmak için yararlı ve kullanışlı bir araçtır.

4. BULGULAR

4.1. BULGULAR ve ANALİZ SONUÇLARI

4.1.1. Genel

Bu çalışmada kullanılan çapı, uzunluğu ve türbinin oluşturduğu yükten kaynaklanan 36 farklı tekil kazığın çevresel etkilerdeki yüklere göre rüzgar, deprem ve dalga yükleri kaynaklı dinamik analizleri yapılarak ivme (g), deformasyon (δ_{SSI}) ve dönme (θ_{SSI}) için çıkan sonuçlar bu bölümde tartışılmış ve sunulmuştur. Uygulanan yöntemlere göre zemin parametrelerinin temel kapasitesi, doğal frekans, yer değiştirme ve tekil kazığın deprem etkisi altında ivme, deformasyon ve dönmesi üzerindeki etkisi de tartışılmıştır. Diğer taraftan tekil kazıkların çok amaçlı analizlerinden regresyon sonuçları için elde edilen denklemleri ve grafikleri 2B ve 3B olarak sunulmuştur.



Şekil 4.1. Tekil Kazığın Yapı Zemin Etkileşimine Göre Farklı Derinlik, Yük ve Uzunlukta Oluşan Davranış Değişimleri Grafikleri

4.1.2. Tekil Kazıklarda Belirlenen Parametrelere Göre Gidelen Hedefler

Çizelge 4.1.'te, rüzgar türbini temelleri için geliştirilen kazık sisteminin optimizasyon sürecinde dikkate alınan temel tasarım değişkenleri (faktörler) ile sistem tepkileri ve bu parametrelerin hedefleri sunulmaktadır. Her bir parametre için, fiziksel anlamı doğrultusunda uygun bir hedef belirlenmiş; bu hedefin sağlanabilmesi amacıyla alt ve üst sınır değerleri oluşturulmuştur.

Faktörler:

Kazık çapı (D_p) ve kazık uzunluğu (L_p), temel geometrisinin ana belirleyicileridir. Bu parametreler, hem yapısal rijitliği hem de zemin ile etkileşimi doğrudan etkilediğinden belirli aralıkta tutulmakta ve minimize edilmeleri hedeflenmektedir. Böylece hem güvenlik sağlanmakta hem de malzeme kullanımında ekonomik bir tasarım amaçlanmaktadır.

Türbin kütlesi (T_M) ise sistemin üzerine etkileyen yükleri temsil eder. Hedeflenmiş bir değer aralığında maksimize edilmesi, türbinin enerji üretim kapasitesi açısından önemlidir. Ancak artan kütle, temel sistemini zorlayabileceğinden bu parametrenin sınırları dikkatle belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Çok amaçlı optimizasyonda parametrelerin tanımları ve hedefleri

	Parametre Adı	Hedef	Alt Sınır	Üst Sınır	Birim
Faktörler	D_p	belirli aralık/ minimize edilecek	4	6	m
	L_p	belirli aralık/ minimize edilecek	15	45	m
	T_M	hedeflenmiş/ maksimize edilecek	350	550	ton
Tepkiler	RRS_{max}	belirli aralık	0.106	0.76	-
	δ_{SSI}	Minimize edilecek	0.007	0.55	m
	θ_{SSI}	belirli aralık/hedeflenmiş	0.0018	1.84	o
	M_{SSI}	belirli aralık	73	594999	kNm
	MCR_{SSI}	belirli aralık/ minimize edilecek	0.0001	3.48	-

Tepkiler:

RRS_{max} , sistemin yatay rijitliğini temsil eder. Belirli bir aralıkta kalması, yapı davranışının kontrol altında tutulması açısından gereklidir. δ_{SSI} , zemin-yapı etkileşimi kapsamında oluşan yer değiştirmedir. Minimize edilmesi, temel stabilitesi ve servis sınır durumları açısından kritik öneme sahiptir. θ_{SSI} , kazık başı dönme açısıdır. Bu parametreye ait sınırlar, hem servis hem de nihai durumları karşılayacak şekilde optimize edilmiş ve belirli bir aralıkta hedeflenmiştir. M_{SSI} , sistemin maruz

kaldığı moment değerini ifade eder. Momentin geniş bir aralıkta kontrol altında tutulması, yapısal bütünlüğü koruma açısından önemlidir. MCR_{SSI} , rijitlik oranını temsil eder. Bu değer belirlenen aralıkta kalması ve mümkünse minimize edilmesi, deformasyonun sınırlı kalmasını sağlar.

Genel Değerlendirme:

Çizelge 4.1'de çok hedefli optimizasyon yaklaşımıyla oluşturulmuş bir rüzgar türbini temel tasarımı sistemine yön vermektedir. Her bir parametre, performans ve ekonomik verimlilik dengesini gözeterek seçilmiş ve sınırlandırılmıştır. Sistem, hem servis limit durumu (SLS) hem de nihai limit durumu (ULS) kriterlerini karşılayacak şekilde bütüncül bir optimizasyon süreciyle ele alınmıştır.

Çizelge 4.2. Çok Amaçlı Optimizasyonda Anova Sonuçları

Tepkiler	Varyasyonlar	Parametreler					Önemi	PCx (%)	Tepkiler	Varyasyonlar	Parameters					Önemi	PCx (%)
		df	SSx	MSx	F	P-value					df	SSx	MSx	F	P-value		
RRS_{mm}	D_p	2	0.052	0.026	2.05	0.148	No	6.56	M_{SSI}	D_p	2	1.9E+10	9.7E+09	1.23	0.309	No	3.28
	L_p	3	0.108	0.036	2.85	0.056	No	13.62		L_p	3	1.6E+11	5.3E+10	6.69	<0.001	Yes	26.84
	T_M	2	0.279	0.14	11.02	<0.001	Yes	35.18		T_M	2	1.9E+11	9.6E+10	12.13	<0.001	Yes	32.44
	Error	28	0.354	0.013				44.64		Error	28	2.2E+11	7.9E+09				37.44
δ_{SSI}	D_p	2	0.036	0.018	15.27	<0.001	Yes	5.271	MCR_{SSI}	D_p	2	1.529	0.765	2.98	0.067	No	10.46
	L_p	3	0.201	0.067	57.36	<0.001	Yes	29.43		L_p	3	2.659	0.886	3.45	<0.001	Yes	18.18
	T_M	2	0.413	0.207	176.6	<0.001	Yes	60.47		T_M	2	3.238	1.619	6.3	<0.001	Yes	22.14
	Error	28	0.033	0.001				4.832		Error	28	7.196	0.257				49.21
θ_{SSI}	D_p	2	0.228	0.114	4.06	<0.001	Yes	2.534	Not: df: Serbestlik Derecesi, SSx: Kareler Toplamı, MSx: Ortalama, PCx: Katkı Oranı								
	L_p	3	4.73	1.577	56.21	<0.001	Yes	52.57									
	T_M	2	3.253	1.626	57.98	<0.001	Yes	36.16									
	Error	28	0.786	0.028				8.736									

Kazık temelli rüzgar türbini sisteminde kullanılan başlıca tasarım parametrelerinin sistem yanıtları üzerindeki etkisi varyans analizi ANOVA yöntemiyle değerlendirilmiştir. ANOVA çizelgesi, her bir tasarım değişkeninin belirli yapısal tepkiler üzerindeki istatistiksel önemini ortaya koymakta ve bu ilişkileri sayısal olarak ifade etmektedir.

Parametreler ile sistem yanıtları arasında kurulan bu doğrudan ilişki, her bir değişkenin hem katkı oranı hem de p-değeri üzerinden belirlenmiştir. Örneğin türbin kütlesi (T_m), deplasman (δ_{SSI}) ve dönme açısı (θ_{SSI}) üzerinde sırasıyla %60,47 ve %36,16 oranında yüksek katkı sağlamış; her iki yanıt için de $p < 0.001$ seviyesinde istatistiksel anlamlılık göstermiştir. Bu durum, söz konusu parametrenin yapısal

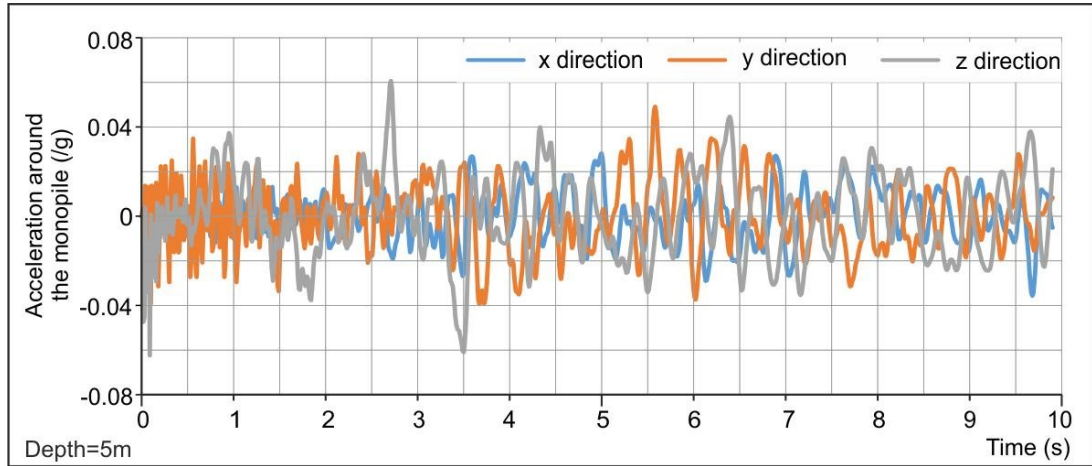
performans üzerinde doğrudan ve güçlü bir etkisi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde kazık uzunluğu (L_p), moment (M_{ssi}) ve rijitlik oranı (MCR_{ssi}) gibi sistem yanıtları üzerinde sırasıyla %26,84 ve %18,18 oranlarında katkı sağlayarak, sistemin rijitlik ve dönme davranışı üzerinde belirleyici rol üstlenmektedir. Parametrelerin katkı oranlarının yüksek olması ve p-değerlerinin istatistiksel anlamlılık sınırlarının altında kalması, her bir değişken ile yanıt arasında doğrudan ve güçlü bir nedensellik kurulduğunun göstergesidir.

Bu analiz yaklaşımı, hangi parametrelerin daha hassas kontrol altında tutulması gerektiğini belirleyerek, optimize tasarım sürecine yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır. Dolayısıyla, istatistiksel olarak anlamlı bulunan parametreler ile sistem tepkileri arasındaki ilişki sadece istatistiksel değil, aynı zamanda mühendislik açısından da işlevseldir ve yapı performansının rasyonel biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

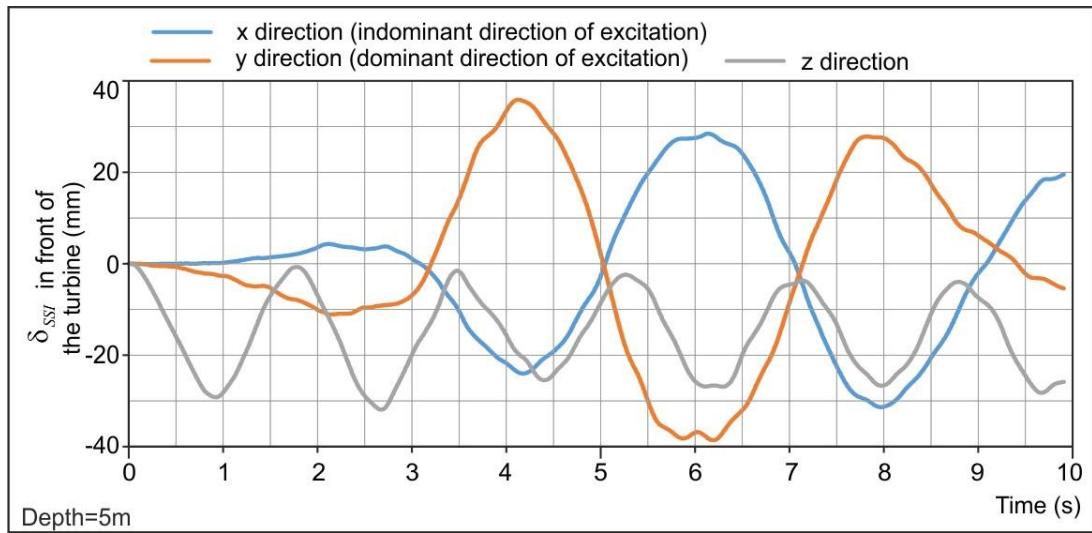
4.1.3. Farklı Boyuttaki Tekil Kazıkların Sonuçlarının İvme, Deformasyon ve Dönme Değişimleri Sonuçları

Bu tez çalışmasında çoklu analizlerde tekil kazığın tipi temele sahip denizüstü rüzgar türbinlerinin farklı gömülme derinliklerinde maruz kaldığı dinamik davranışlar yapı-zemin etkileşimi (Soil-Structure Interaction, (SSI)) çerçevesinde analiz edilmiştir. Grafiklerde Şekil 4.2'de verilen genel olarak hem x hem y hem de z yönlerinde dikkate değer düzeyde düzensiz ve yoğun frekans bileşenleri gözlenmektedir.



Şekil 4.2. 5 m Derinlikteki Tekil Kazıgın X, Y ve Z Yönlerindeki İvme-Zaman Değişimleri

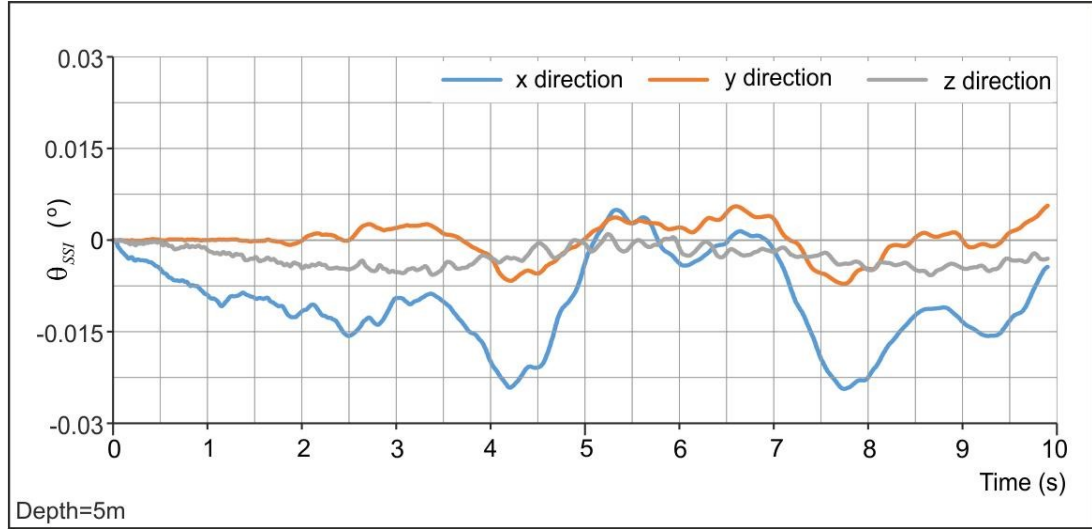
Özellikle ilk birkaç saniyede ivme genliklerinin görece yüksek olduğu, ardından bu titreşimlerin çevresel yükler olan dalga, deniz ve deprem göre daha dağılmış ama sürekli bir hâl aldığı izlenmektedir. Bu durum, sistemin başta ani bir çevresel kuvvete maruz kaldığını ve ardından serbest titreşim moduna geçtiğini görülmüştür. Burada sistemin x ve y yönlerinde gözlenen davranışları birbirine yakın seyretmekle y yönündeki etkinin daha geniş salınımları olduğu görülmüştür.



Şekil 4.3. 5 m Derinlikteki Tekil Kazıgın X, Y ve Z Yönlerindeki Deformasyon-Zaman Değişimleri

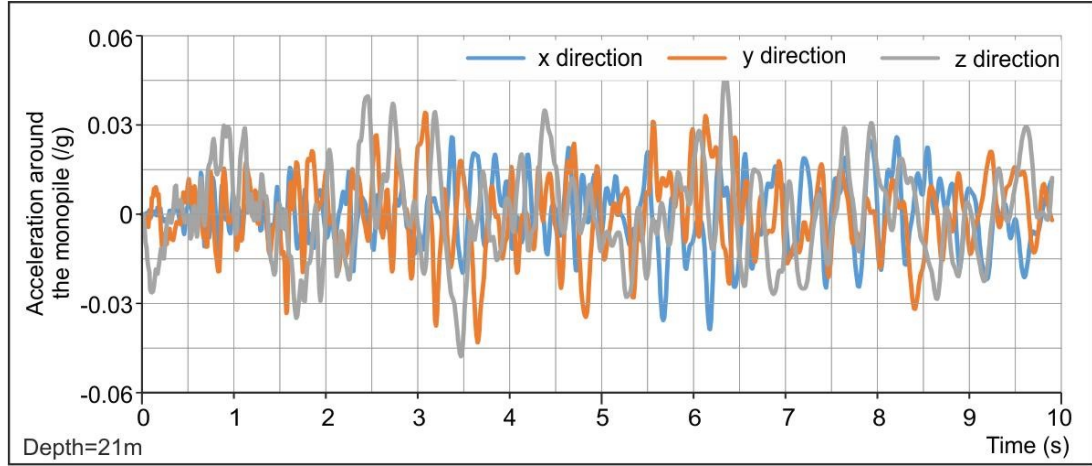
Dinamik yüklemenin y yönünde olduğu çok rahat gözlemlenmiştir. Daha sonra bu grafiğe göre çevresel etkiler altında yüklerin Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.. yer alan deformasyon (δ_{ssi}) ve dönme (θ_{ssi}) grafiklerinde deformasyonun özellikle y

yönünde + 30 mm ve – 30 mm arasında salınım yapıldığı gözlemlenmiştir. X yönünde benzer bir eğilimde fakat daha düşük deformasyon gözlemlenmiştir. Z yönü ise harekette sınırlı bir eğilim göstermiştir. Şekil 4.4. daki dönme (θ_{ssl}) grafiğimizdeki x yönü daha belirgin bir eğilim (-0.025° civarına kadar) meydana gelmiştir. Bu durum yatay düzlemde rijitliğin sınırlı olduğunu ve sistemin moment etkilerine karşı daha duyarlı davrandığını gösterir.

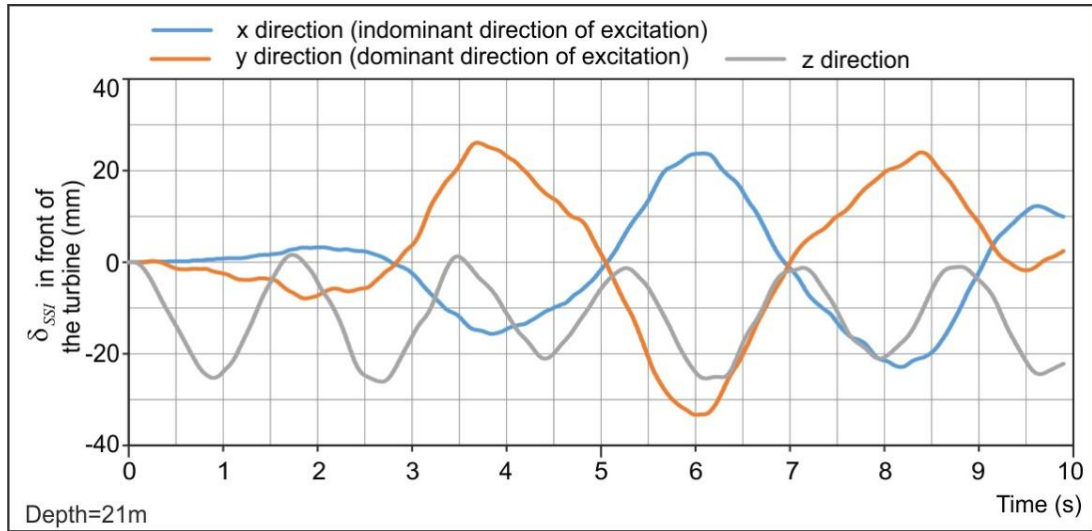


Şekil 4.4. 5 m Derinlikteki Tekil Kazıgın X,Y Ve Z Yönlerindeki Dönme-Zaman Değişimleri

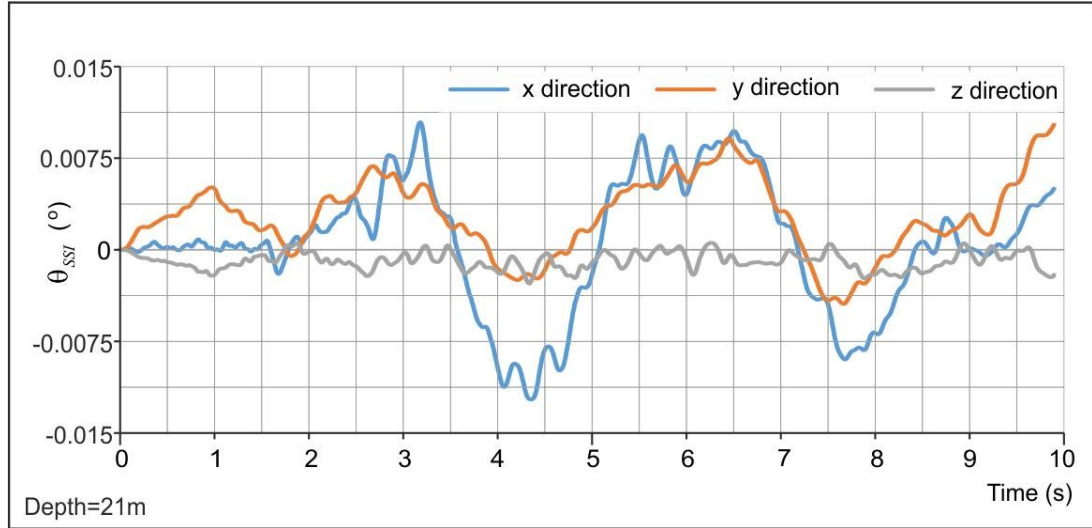
Y yönünde daha dengeli bir salınımın gözlemlendiği z yönünde ise sabit eğilimde olduğu görülmüştür. Dönmedeki tepkilerin bu şekilde farklılaşması, sistemde rijitliğin ve zemin tepkisinin oldukça heterojen olduğunu da bize göstermiştir. Bu iki grafiği beraber ele aldığımızda yapısal performansı artıracağı için temel gömülme derinliğinin daha arttırılması gerektiğini göstermiştir.



Şekil 4.5. 21 m Derinlikteki Tekil Kazıgın X, Y ve Z Yönlerindeki İvme-Zaman Değişimleri



Şekil 4.6. Derinlikteki Tekil Kazıgın X, Y ve Z Yönlerindeki Deformasyon-Zaman Değişimleri



Şekil 4.7. 21 m Derinlikteki Tekil Kazığın X, Y ve Z Yönlerindeki Dönme-Zaman Değişimleri

Dinamik analiz tepkilerine göre ivme (g) değerleri Şekil 4.5.'de verilen h:21 metre kazık boyunun 5 metreye göre daha geniş spektrum ile daha düzenli frekans bileşenlerine göre gözlemlenmiştir. Bu sistemde dinamik yüklere karşı daha rikit ve stabil çizgisel eğri sergilediği ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.6.'de gösterilen grafiğimize deformasyon grafiğinde 21 metre derinlikteki tekil temel kazığında yatay yönde deformasyon salınımlarında 5 metreye daha düşük bir eğri çizgisi gözlemlenmiştir. Özellikle y yönünde dominant deformasyonlar 21 metre derinlikte yaklaşık yarı yarıya düştüğü tespit edilmiştir. Bu dinamik sönümler etkisinin artması zeminle daha fazla entegre olup etkileşim daha etkin olması ile açıklanabilir. Şekil 4.7.'de yer alan dönme grafiğinde x yönünde meydana gelen salınımlar 21 metre derinlikte daha sınırlı bir aralıkta kalırken 5 metre de daha belirgin bir eğilimle -0.0025 civarına eğilim meydana gelmiştir.

4.1.4. Tekil Kazıkta Farklı Yükleme Koşullarındaki Davranış Eğrileri

Belirlenen kazıklarda optimum seviyede belirlenmesi amacıyla Şekil 4.1. farklı kazık çapları (D_p), belirlenen yükler (T_m) ve kazıkların gömülme uzunlukları (L_p) için tekil kazıkta rüzgar dalga ve depremin olduğu çevresel yükler altında rüzgar türbinlerinin zeminle etkileşimli dinamik davranışlarını değerlendirmektedir. Grafikler; tepki spektrumu oranı (RRS_{max}), deformasyon (δ_{ssi}), dönme (θ_{ssi}), moment (M_{ssi}) ve moment oranları (MCR_{ssi}) gibi temel parametrelerin değişimini göstermektedir. Şekil 4.1.'da her bir grafik ayrı ayrı ele alınmış, ardından genel sonuçlar yorumlanmıştır. . $RRS_{max} - L_p$ grafiğinde kazıkların uzunluğuna göre düşük kazık çapı ve yüklerde rijitlik daha küçük $D_p=6$ m ve $T_m=350$ ton olan

kombinasyonda RRS_{max} değeri, L_p arttıkça çok belirgin şekilde yükselmiştir. Yüksek çap ve düşük rotor ağırlığı kombinasyonu, rijitlik açısından en avantajlı durumdur.

Diğer deformasyon grafiğinde $\delta_{ssi} - L_p$ grafik, kazığın ucunda oluşan yatay deformasyonu (δ_{ssi}) göstermektedir. Tüm eğriler, L_p arttıkça δ_{ssi} değerinin düştüğünü göstermektedir. Bu durum, kazığın daha derine gömülmesinin yatay deformasyonunda azaldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca kazık uzunluğu arttıkça yapısal stabilite artmaktadır. Dönme grafiğinde ise $\theta_{ssi}-L_p$ kazık ucundaki açısallık yer değiştirme miktarını (θ_{ssi}) göstermektedir. δ_{ssi} grafiğiyle benzer şekilde, açısallık yer değiştirme gömülme derinliği arttıkça azalmaktadır. $D_p=6$ m olan kazıklar, daha düşük dönmeye sahiptir. Daha çap uzunlukları arttıkça kazıklar dönme durumu açısından daha başarılı bir performans sergilemiştir.

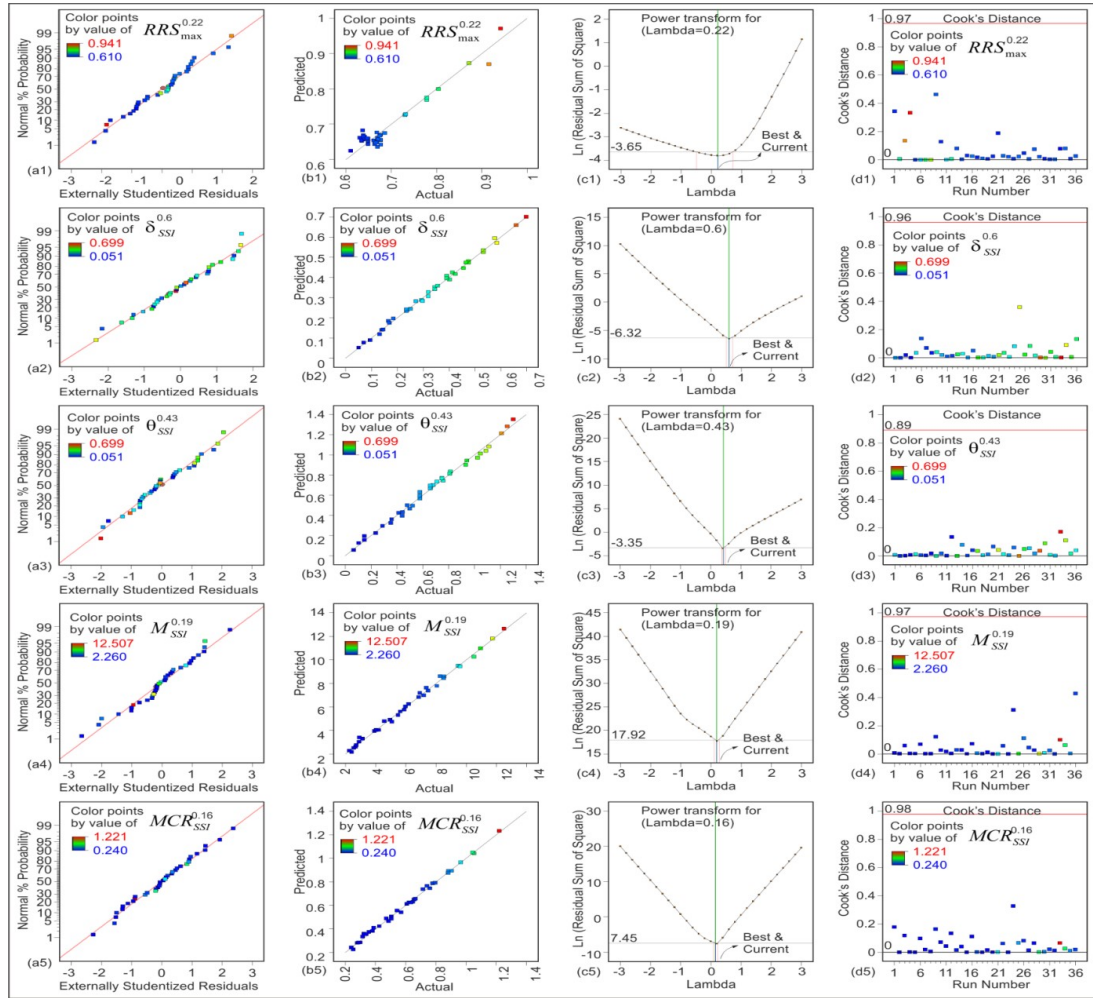
Moment, kazık uzunluğu $M_{ssi} - L_p$ grafiğinde kazık ucundaki maksimum momenti (M_{ssi}) göstermektedir. Moment değeri, L_p arttıkça düşmektedir. Görünen eksende gözlemlenen eğim farklılıkları, sistemin rijitliğini etkileyen diğer parametrelerin (D_p , T_m) etkisini vurgular. Kazık uzunluğunun artırılması, kazık üzerindeki momenti belirgin bir şekilde azaldığı görülmüştür. $MCR_{ssi} - L_p$ grafiğinde, momentin rijitliğe oranını yansıtan bir grafik. L_p arttıkça bu oran azalmakta, yani sistemin moment taşıma kapasite oranı artmaktadır. Çapın daha yüksek D_p ve düşük T_m kombinasyonları en avantajlı performansı göstermektedir. Kazığın rijitliğinin artırılması, sistemin moment oranını olumlu yönde etkilemiştir.

Sonuç olarak kazık çapı, belirlenen yükler ve kazık uzunluğu gibi parametreler dikkate alındığında en uygun performans, yüksek çap ($D_p=6$ m), yükte ($T_m=350$ ton) ve yüksek gömülme uzunluğu ($L_p \geq 40$ m) kombinasyonlarında elde edilmektedir. Bu bulgular, denizüstü rüzgar türbini tasarımlarında yapı-zemin etkileşiminin optimize edilmesinde kritik rol oynar ve mühendislik açısından güvenli, ekonomik ve uzun ömürlü sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlar.

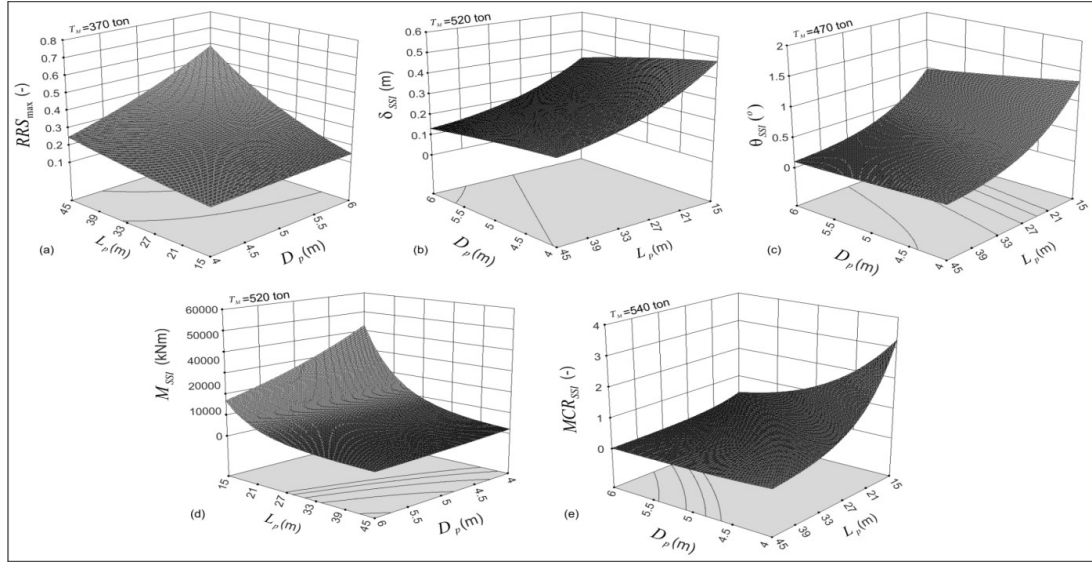
4.1.5. Yükleme Koşullarına Göre Tekil Kazık Davranışlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, deniz üstü rüzgar türbini temelleri için kullanılan tekil kazığın sistemlerinin yapısal davranışları, hem istatistiksel hem de mühendislik bakış açısıyla iki aşamalı olarak incelenmiştir. Şekil 4.8., oluşturulan doğrusal regresyon modellerinin güvenilirliğini ve uygunluğunu test eden grafiksel sonuçlarını sunmakta; Şekil 4.9. ise bu modellerin üç boyutlu yüzeyler üzerinden fiziksel yansımaları göstermektedir. Elde edilen bulgular, hem matematiksel modelleme hem de uygulanabilirlik açısından bütün olarak bir değerlendirme yapılmasını mümkün

kılmaktadır.



Şekil 4.8. Eşitlik (1-5)'teki Modellerin İstatistiksel Analizi, (A1-A5) Modeller İçin Artıkların Normal Olasılık Grafikleri, (B1-B5) Gerçek ve Tahmin Edilen Değerler, (C1-C5) Box-Cox Dönüşüm Analizi, (D1-D5) Cook Mesafesinin Değişimi, (E1-E5) Tasarım Noktalarındaki Kaldıraç Değişimi, (F1-F5) Sırasıyla DFFITS Değerleri



Şekil 4.9. Eşitlik (1-5)'teki Regresyon Modellerine Dayalı Olarak Bu Çalışmadaki Parametrelerin 3B Değişimleri

Şekil 4.8.'da rüzgar türbini temellerine ait tekil kazık sistemlerinin yapısal tepkilerinin tahmininde kullanılan istatistiksel modellerin güvenilirliğini değerlendirmeye yönelik grafiksel analizleri içermektedir. Grafikler, sırasıyla tasarım için seçilen faktörlere bağlı olarak normal dağılıma uygunluğunu, gerçek ve tahmin değerlerinin benzerlik düzeylerini, Box-Cox dönüşüm uygunluğunu ve Cook mesafesi ile aykırı veri varlığını incelemektedir. İlgili grafikler, literatürde granüler zeminler üzerinde yapılan değerlendirmelere benzer şekilde, modelleme yaklaşımının istatistiksel açıdan güçlü olduğunu ve fiziksel sistemlere uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bu yönüyle, Şekil 3.17'te sunulan analizler, Şekil 3.18'teki üç boyutlu fiziksel modellemelerin altlığını oluşturan teorik temelleri doğrulamak amacıyla kritik bir işlev üstlenmektedir. Bu grafiklere bakıldığında sayısal modellerin güvenle sahada uygulanabilir olduğu görülmektedir.

Şekil 4.9, Şekil 4.8'te istatistiksel geçerliliği test edilen modellerin fiziksel karşılıklarını üç boyutlu yüzeyler üzerinden sunmaktadır. Her bir yüzey grafiği, farklı rotor ağırlıkları altında değişken kazık çapı (D_p) ve kazık boyu (L_p) kombinasyonlarının yapısal tepkiler üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Örneğin; (a) grafiği, rijitlik oranındaki artışı; (b) grafiği, yatay yer değiştirme miktarını; (c) grafiği ise açılmalık eğilimlerini göstermektedir. (d) ve (e) grafikleri ise sırasıyla kazığa etki eden momenti (M_{SSI}) ve kapasiteye oranlı eğilme momentini (MCR_{SSI}) ortaya koymaktadır. Bu grafiklerin ortak özelliği, geometrik parametrelerin (D_p ve L_p) yapısal performansa etkisini görsel olarak izlenebilir kılmasıdır.

Şekil 4.9., Şekil 4.8.'te istatistiksel geçerliliği test edilen modellerin fiziksel karşılıklarını üç boyutlu yüzeyler üzerinden sunmaktadır. Her bir yüzey grafiği, farklı rotor ağırlıkları altında değişken kazık çapı (D_p) ve kazık boyu (L_p) kombinasyonlarının yapısal tepkiler üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

Kazık temelli rüzgar türbini sisteminin yapısal tepkileri üzerinde etkili olan tasarım parametreleri için çoklu regresyon modelleri geliştirilmiş ve bu modellerin her biri için istatistiksel uygunluk kriterleri değerlendirilmiştir. Elde edilen her bir model için belirleme katsayısı (R^2), ayarlanmış belirleme katsayısı (Adj. R^2), tahmin belirleme katsayısı (Pred. R^2) ve sinyal-gürültü oranını gösteren Adequate Precision (Adeq. Precision) değerleri kullanılarak modelin istatistiksel uygunluğu değerlendirilmiştir. Aşağıda her bir sistem yanıtı için geliştirilen model denklemleri ve bunlara ait performans göstergeleri birlikte sunulmuştur. Aşağıda sunulan denklemler, sistem yanıtlarını (örneğin moment, deplasman, rijitlik oranı vb.) belirleyen temel bağımlı değişkenler olup, türbin kütlesi (T_m), kazık çapı (D_p) ve kazık uzunluğu (L_p) gibi bağımsız değişkenlerin etkileri doğrusal ve etkileşimli terimler kapsamında modellenmiştir.

Geliştirilen regresyon modelleri aşağıda sıralanmıştır:

$$M_{ssi} = +1.01 \times 10^6 - 2.59 \times 10^5 \cdot T_m - 4.66 \times 10^6 \cdot D_p - 6.37 \times 10^4 \cdot L_p + 2.75 \times 10^4 \cdot T_m \cdot D_p + 206.09 \cdot T_m \cdot L_p + 4.57 \times 10^5 \cdot D_p \cdot L_p$$

$$\rightarrow R^2 = 0.931, \text{Adj. } R^2 = 0.903, \text{Pred. } R^2 = 0.826, \text{Adeq. Precision} = 25.24$$

$$\delta_{ssi} = + 0.00383 + 0.001493 \cdot T_m + 0.09455 \cdot D_p + 0.001092 \cdot L_p - 4.397 \times 10^{-4} \cdot T_m \cdot D_p - 5.021 \times 10^{-5} \cdot T_m \cdot L_p - 0.01671 \cdot D_p \cdot L_p$$

$$\rightarrow R^2 = 0.997, \text{Adj. } R^2 = 0.996, \text{Pred. } R^2 = 0.994, \text{Adeq. Precision} = 115.95$$

$$\theta_{ssi} = + 0.00504 + 1.831 \times 10^{-4} \cdot T_m + 0.1412 \cdot D_p + 0.001788 \cdot L_p - 5.573 \times 10^{-5} \cdot T_m \cdot D_p + 6.735 \times 10^{-5} \cdot T_m \cdot L_p - 0.02506 \cdot D_p \cdot L_p$$

$$\rightarrow R^2 = 0.993, \text{Adj. } R^2 = 0.992, \text{Pred. } R^2 = 0.990, \text{Adeq. Precision} = 116.57$$

$$RRS_{max} = + 1.11 - 0.005251 \cdot T_m - 2.632 \cdot D_p - 0.02351 \cdot L_p + 0.001588 \cdot T_m \cdot D_p + 5.650 \times 10^{-4} \cdot T_m \cdot L_p + 0.3719 \cdot D_p \cdot L_p$$

$$\rightarrow R^2 = 0.996, \text{Adj. } R^2 = 0.994, \text{Pred. } R^2 = 0.991, \text{Adeq. Precision} = 84.29$$

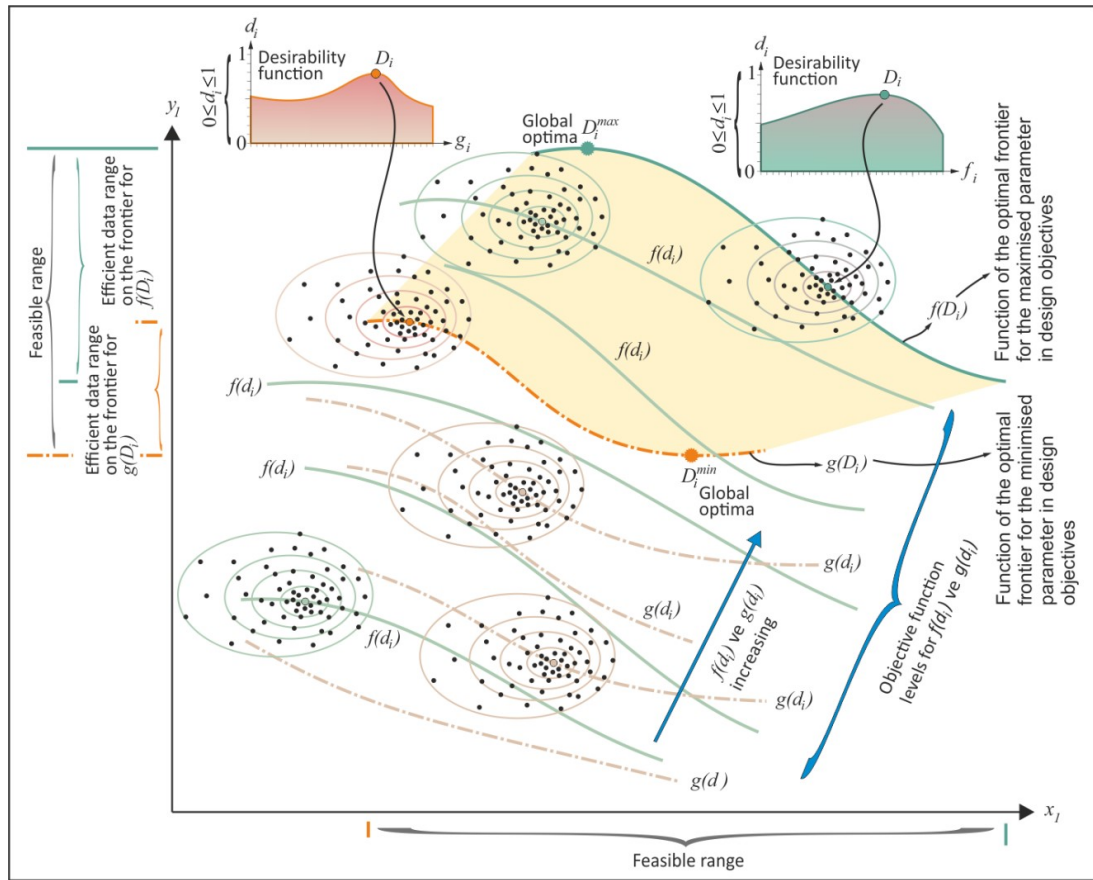
$$\text{MCR}_{\text{ssi}} = + 3.74 + 0.01282 \cdot T_m + 1.032 \cdot D_p + 0.02034 \cdot L_p - 0.004388 \cdot T_m \cdot D_p - 9.805 \times 10^{-4} \cdot T_m \cdot L_p - 0.2212 \cdot D_p \cdot L_p$$

$$\rightarrow R^2 = 0.996, \text{Adj. } R^2 = 0.995, \text{Pred. } R^2 = 0.991, \text{Adeq. Precision} = 88.31$$

Bu modeller, çoklu doğrusal regresyon yapısında oluşturulmuş olup hem bireysel hem de etkileşimli etkileri içermektedir. Her bir model için R^2 , Adj. R^2 , Pred. R^2 ve Adequate Precision değerleri yüksek olup, %90'ın üzerinde açıklama gücüne sahiptir. Özellikle, M_{ssi} ve θ_{ssi} yanıtları için tahmin edici uyumun çok güçlü olduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilen bu modeller, çok amaçlı optimizasyon süreçlerinde kullanılmaya uygun, güvenilir ve açıklayıcı niteliktedir. Tasarım parametrelerinin sistem performansına etkisini hem mühendislik hem de istatistiksel düzeyde ortaya koyduğunu gözlemlemiştir.

4.1.6. Çok Hedefli Optimizasyonda Uygunluk Fonksiyonlarının Grafikselleştirilmesi



Şekil 4.10. Uygunluk Fonksiyonları İle Çok Amaçlı Optimizasyonun Görseli

Şekil 4.10'da grafikte yer alan her bir simge ve renkli alan, tasarım değişkenlerinin farklı hedef fonksiyonlar (maksimize edilen $f(d_i)$ ve minimize edilen $g(d_i)$) doğrultusunda nasıl değerlendirildiğini göstermektedir. $f(d_i)$ ve $g(d_i)$ eğrileri: Yeşil ve kahverengi tonlarla gösterilen bu eğriler, sırasıyla maksimize edilmek istenen ve minimize edilmesi amaçlanan hedef fonksiyonları temsil eder. Bu eğriler, farklı tasarım noktalarının bu fonksiyonlara göre uygunluk düzeylerini belirtir. Siyah noktalar: Gerçekleştirilen deneysel/sayısal analizlerden elde edilen çözümleri simgeler. Her bir nokta, belirli bir tasarım kombinasyonuna karşılık gelir.

Yoğunluk konturları: Noktaların etrafında yer alan dairesel konturlar, çözüm kümelerinin yoğunluğunu ifade eder. Konturların sıklaştığı bölgeler, yüksek olasılıklı veya daha verimli çözüm alanlarını gösterir. Sarı yüzey (karar bölgesi): $f(d_i)$ ve $g(d_i)$ hedeflerinin birlikte değerlendirilmesiyle oluşan optimum çözüm yüzeyidir. Bu yüzey üzerinde kalan noktalar, çoklu hedeflerin dengelendiği tasarım seçenekleridir. Turuncu eğri ve $D_{\min}$ noktası: $g(d_i)$ fonksiyonu açısından optimize edilmiş (minimize edilmiş) tasarım değerlerinin sınırını ifade eder. $D_{\min}$ bu sınır üzerindeki en uygun noktadır. Mavi eğri ve $D_{\max}$ noktası: $f(d_i)$ fonksiyonuna göre en yüksek uygunluk sağlayan çözüm kümesini temsil eder. $D_{\max}$ bu fonksiyon için en yüksek desirability'ye sahip tasarım noktasıdır. Küçük grafikler (sol üst ve sağ üst): Her iki hedef için normalize edilmiş desirability fonksiyonlarını gösterir. Bu fonksiyonlar, 0 (uygunsuz) ile 1 (mükemmel uygun) arasında değer alır. D_i noktasının karşılık geldiği desirability değeri, ilgili küçük grafikte görsel olarak sunulmuştur. Feasible range (Uygulanabilir aralık): Hem yatay hem dikey ekseninde gösterilen bu çizgiler, tasarım parametrelerinin fiziksel veya mühendislik açısından geçerli olduğu sınırları tanımlar.

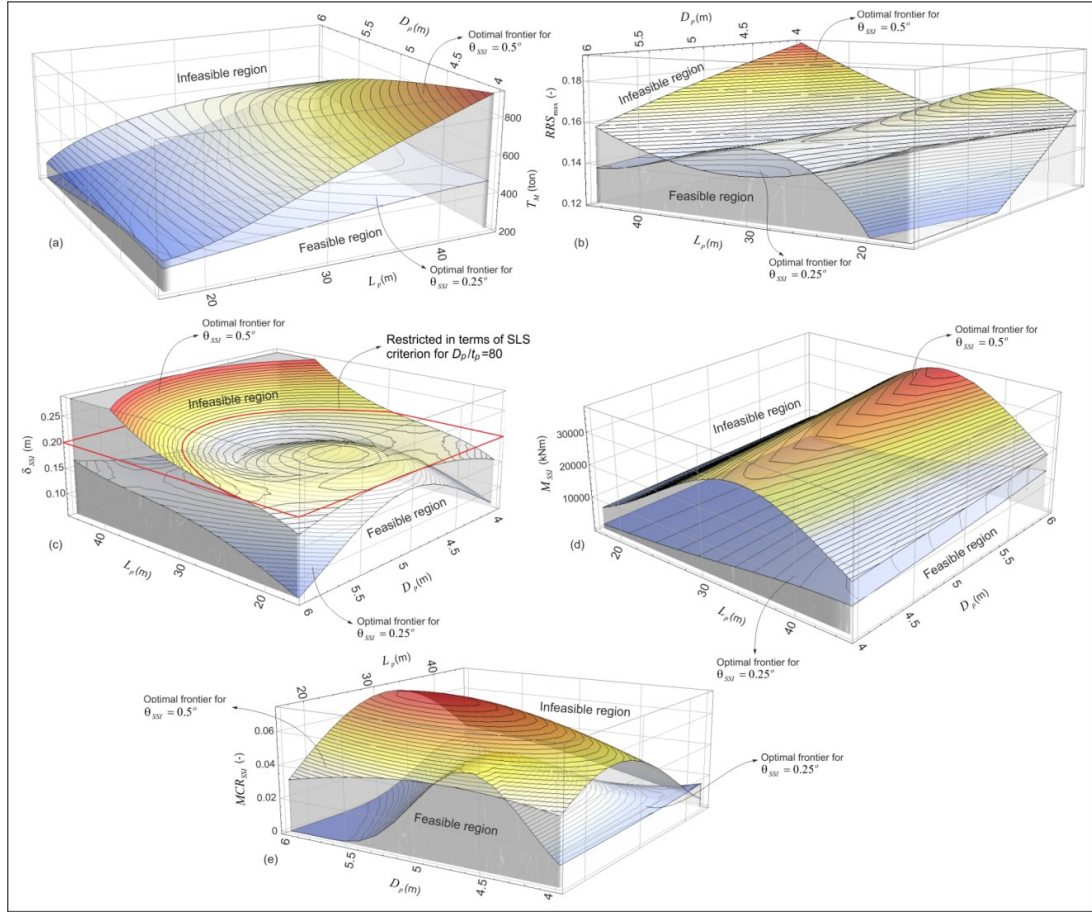
Efficient data range: Her iki fonksiyon için verimli sonuçların alındığı bölgeler; yani hem fiziksel olarak uygulanabilir hem de performans açısından kabul edilebilir çözümlerin yer aldığı veri aralığıdır.

Karar sınırları (Frontiers): Hem $f(d_i)$ hem $g(d_i)$ için belirlenen optimal eğriler, tasarım değişkenleri açısından farklı kriterlerin nasıl dengelendiğini belirleyen karar sınırlarını gösterir. Bu grafik, özellikle çok kriterli mühendislik kararlarında birden fazla hedefin aynı anda değerlendirilmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Tek bir hedefe odaklanmak yerine, bu yaklaşım farklı kriterler arasında denge kurarak sistem performansını artırmayı hedefler. Bu yönüyle grafik, istatistiksel analiz ve optimizasyon tekniklerinin mühendislik tasarımına entegrasyonu açısından son derece değerlidir. Sonuç olarak grafikte sunulan kavramsal yapı, çok değişkenli mühendislik sistemlerinde optimal karar noktalarının belirlenmesine olanak tanır. Uygunluk fonksiyonları ve bu fonksiyonlara bağlı çözüm sınırları sayesinde, hem

tasarım değişkenlerinin hem de performans çıktılarının aynı anda değerlendirilmesi mümkündür. Bu yaklaşım, özellikle rüzgar türbini temelleri gibi karmaşık sistemlerde, hem maliyet hem güvenlik hem de yapısal performans gibi farklı hedefleri dengeleyerek en iyi çözüm aralığını ortaya koyar.

4.1.7. Çok Hedefli optimizasyonda Uygunluk Fonksiyonlarının Karşılaştırılmalı Grafikselsel Analizi

Şekil 4.11.'de rüzgar türbinlerine ait tekil kazık temeller için gerçekleştirilmiş olan çok amaçlı optimizasyon analizlerinin üç boyutlu yüzey grafiklerini sunmaktadır. Grafiklerde, kazık uzunluğu (L_p), çapı (D_p) ve türbin kütlesi (T_m) gibi tasarım parametrelerine bağlı olarak belirli mühendislik çıktılarının, örneğin dönme (θ_{ssi}), yer değiştirme (δ_{ssi}), bükülme momenti (M_{ssi}), rijitlik oranı (MCR_{ssi}) ve maksimum yansıyan spektral oran (RRS_{max}) değişimlerinin izlenebilir olduğu görülmektedir. Her bir yüzeyde, tasarım uzayının uygun (feasible) ve uygun olmayan (infeasible) bölgeleri belirgin şekilde ayrılmıştır. Ayrıca, $\theta_{ssi}=0.25^\circ$ ve $\theta_{ssi}=0.5^\circ$ değerlerine karşılık gelen verimli sınır eğrileri farklı renklerle vurgulanmıştır. Bu grafikler sayesinde, belirli performans kriterleri için en uygun kazık geometrisi kombinasyonlarının elde edilmesi mümkün hale gelmektedir.



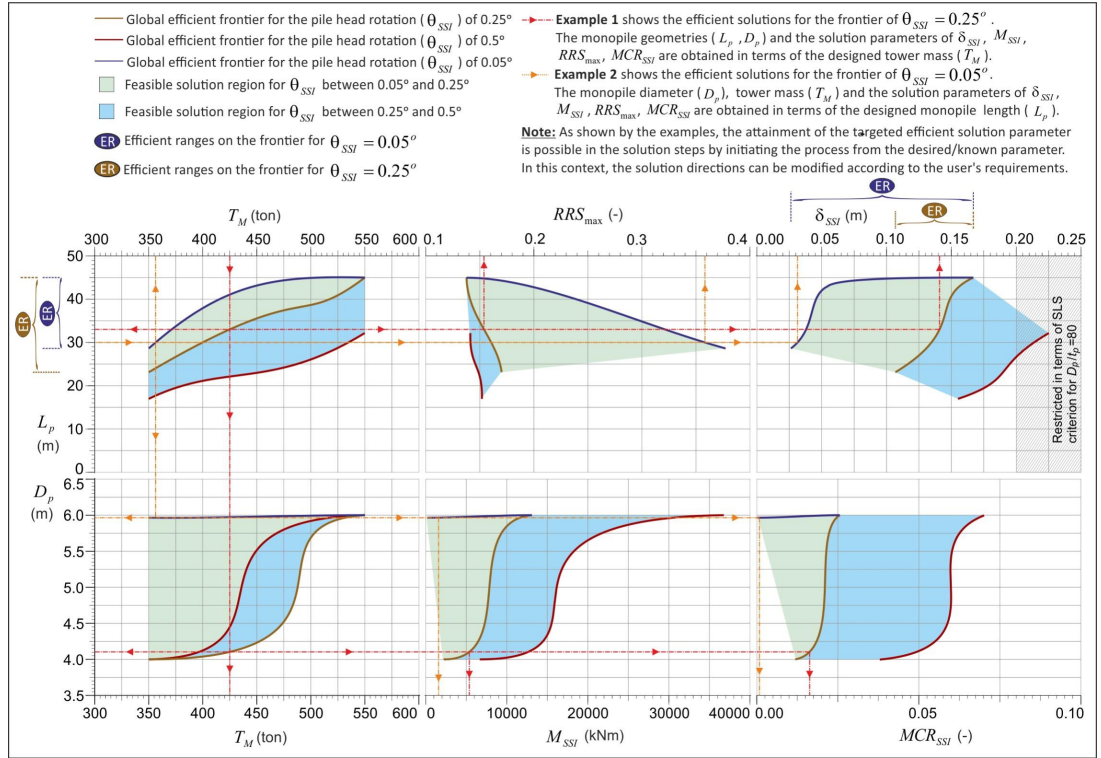
Şekil 4.11. Rüzgar Türbinleri İçin Gerçekleştirilen Çok Amaçlı Verimlilik Yüzeyleri

Şekil 4.12.'de rüzgar türbinleri için kullanılan tekil kazık temellerin çok amaçlı optimizasyon sürecinde elde edilen etkin (verimli) çözüm bölgelerini ve bu bölgelerin tasarım parametreleriyle olan ilişkilerini iki boyutlu olarak sunmaktadır. Her bir alt grafik, iki değişkenin birbiriyle ilişkisini θ_{ssi} (kazık başı dönme açısı) sınırları bağlamında analiz eder.

Şekil 4.12.'de belirli performans kriterleri doğrultusunda farklı kazık geometrileri için elde edilen verimli çözüm aralıklarını göstermektedir. Grafikler, kazık başı dönme (θ_{ssi}) kriterine göre $\theta_{ssi} = 0.05^\circ$ ve $\theta_{ssi} = 0.25^\circ$ için iki farklı çözüm aralığı sunmaktadır. Her bir grafik, kazık uzunluğu (L_p) ve çapı (D_p) ile türbin kütlesi (T_m), maksimum moment (M_{ssi}), maksimum yansıyan spektral oran (RRS_{max}), deformasyon (δ_{ssi}) ve rijitlik oranı (MCR_{ssi}) değişkenleri arasındaki ilişkileri detaylandırmaktadır. Yeşil ve mavi alanlarla gösterilen bölgeler sırasıyla $\theta_{ssi} = 0.05^\circ$ ve $\theta_{ssi} = 0.25^\circ$ için uygun çözüm bölgelerini ifade ederken, kırmızı ve kahverengi eğriler verimli sınırları temsil etmektedir. Bu grafik, kullanıcının çözüm sürecini başlatacağı parametreye göre yönlendirme sağlayarak mühendislik karar süreçlerini

kolaylaştırmaktadır.

Şekil 4.12, belirli performans kriterleri doğrultusunda farklı kazık geometrileri için elde edilen verimli çözüm aralıklarını göstermektedir. Grafikler, kazık başı dönme (θ_{ssi}) kriterine göre $\theta_{ssi} = 0.05^\circ$ ve $\theta_{ssi} = 0.25^\circ$ için iki farklı çözüm uzayını sunmaktadır. Her bir grafik, kazık uzunluğu (L_p) ve çapı (D_p) ile türbin kütlesi (T_M), maksimum moment (M_{ssi}), maksimum yansıyan spektral oran (RRS_{max}), yer değiştirme (δ_{ssi}) ve rijitlik oranı (MCR_{ssi}) değişkenleri arasındaki ilişkileri detaylandırmaktadır. Yeşil ve mavi alanlarla gösterilen bölgeler sırasıyla $\theta_{ssi} = 0.05^\circ$ ve $\theta_{ssi} = 0.25^\circ$ için uygun çözüm bölgelerini ifade ederken, kırmızı ve kahverengi eğriler verimli sınırları temsil etmektedir. Bu grafik, kullanıcının çözüm sürecini başlatacağı parametreye göre yönlendirme sağlayarak mühendislik karar süreçlerini kolaylaştırmaktadır.



Şekil 4.12. Rüzgar Türbini Kazık Temelleri İçin Belirlenen Uygun ve Verimli Çözüm Aralıkları

Grafikteki Bileşenlerin Akademik Açıklaması

- **Kırmızı çizgi:** $\theta_{ssi} = 0.25^\circ$ sınırını temsil eder. Sistem tasarımının servis sınırı

durumuna uygunluğunu gösterir.

- **Kahverengi çizgi:** $\theta_{ssi} = 0.05^\circ$ sınırını temsil eder. Daha katı performans gereksinimlerine işaret eder.

- **Yeşil alan:** $\theta_{ssi} \leq 0.05^\circ$ için en güvenli çözüm bölgesidir.

- **Mavi alan:** $0.05^\circ < \theta_{ssi} \leq 0.25^\circ$ aralığına denk gelir. Kabul edilebilir ve ekonomik çözüm aralığıdır.

- **ER etiketleri:** Efficient Range – verimli çözüm aralıklarının tasarım düzlemindeki karşılıklarını belirtir.

- **Yön okları:** Tasarım değişkenlerinin hangi yönde değişmesi gerektiğini veya çözüm yönünü sezgisel olarak gösterir.

Grafik, kullanıcının kazık çapı, uzunluğu ya da türbin kütlesi gibi başlangıç parametrelerinden hareketle optimum performans çıktısına ulaşabilmesini sağlar. Ayrıca bu grafikler, hem ileri yönde (verilenle en iyiyi bulma) hem ters yönde (hedefe ulaşmak için ne yapılmalı) analizleri destekleyecek şekilde karar desteği sunar.

5. TARTIŞMA

5.1. İstatistiksel Değerlendirme

Bu tez kapsamında, Açık Deniz Rüzgar Türbinlerine ait tekil kazık temelli sistemin tasarım parametreleri ile yapısal sistem yanıtları arasındaki istatistiksel ilişki çok değişkenli regresyon modelleri ve varyans analizi ANOVA yöntemiyle değerlendirilmiştir (Algın, 2016; Faruk ve Algın, 2023). Bu yöntemler, sistem tepkileri üzerinde etkili olabilecek parametrelerin istatistiksel anlamlılığını belirleyerek model güvenilirliğini artırma amacı taşımaktadır. İlgili analiz sonuçları, Çizelge 4.2'de: Çok Amaçlı Optimizasyonda ANOVA Sonuçları başlığı altında detaylı biçimde sunulmuştur.

Çizelge 4.2.'te yer alan varyans analizine göre, türbin kütlesi (T_m), deplasman (δ_{SSI}) ve dönme açısı (θ_{SSI}) üzerindeki etkisiyle %60,47 ve %36,16 gibi yüksek katkı oranları göstermiştir. Bu parametrelerin $p < 0.001$ seviyesinde anlamlılık göstermesi, yapısal davranışlar üzerinde doğrudan ve güçlü bir etki yarattığını ortaya koymaktadır (Algın, 2018). Aynı şekilde, kazık uzunluğu (L_p) ile moment (M_{SSI}) ve rijitlik oranı (MCR_{SSI}) üzerindeki etkiler sırasıyla %26,84 ve %18,18 olup; bu parametrelerin optimize edilmesi durumunda sistem performansında iyileşme sağlanabileceği öngörülmektedir. Bu sonuçlar, literatürde önerilen tasarım duyarlılığı analizleriyle paralellik göstermektedir (Reese ve Van Impe, 2000).

İstatistiksel değerlendirmeyi destekleyen grafiksel analizler Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'da sunulmuştur. Şekil 4.8.'te, modelin normal dağılıma uygunluğu, tahmin doğruluğu ve aykırı değer etkileri gibi analizler grafiksel olarak verilmiştir. Bu grafikler, regresyon modellerinin güvenilirliğini ve sahada uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır (Bhattacharya, 2014). Şekil 4.9.'da ise Şekil 4.8'de istatistiksel geçerliliği test edilen modellerin fiziksel karşılıklarını üç boyutlu yüzey grafiklerle sunarak, geometrik değişkenlerin sistem tepkileri üzerindeki görsel etkilerini açıklamaktadır. Bu sunum, model çıktılarının sadece istatistiksel olarak değil, aynı zamanda mühendislik tasarımına uygunluk açısından da değerlendirilmesini sağlamaktadır.

5.2. Optimizasyon Verimlilik Sınırlarının Değerlendirilmesi

Optimizasyon çalışmaları kapsamında, Çizelge 4.1.'de: Parametrelerin Tanımları ve Hedefleri temel alınarak tasarım parametrelerinin sınırları belirlenmiş ve sistem tepkileri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir (Chen ve Kim, 2022). Bu tabloda, kazık çapı (D_p), kazık uzunluğu (L_p), türbin kütlesi (T_m) gibi bağımsız

değişkenler ile deplasman (δ_{SSI}), dönme açısı (θ_{SSI}), moment (M_{SSI}), rijitlik oranı (MCR_{SSI}) gibi bağımlı değişkenler optimize edilmiştir. Böylece, her bir tasarım değişkeninin yapısal performansa etkisi sayısal olarak ortaya konmuştur.

Şekil 4.11.'de ve Şekil 4.12.'de, farklı kazık derinlikleri ve yükleme senaryoları altında elde edilen maksimum deformasyon oranları ve dönme davranışlarını sunmaktadır. Bu grafikler sayesinde, optimum tasarım aralıkları daha net bir şekilde belirlenebilmekte ve sistemin hangi parametre kombinasyonlarında daha verimli çalıştığı izlenebilmektedir (Ziegler ve vd., 2016). Ayrıca, bu grafiksel sunumlar sayesinde mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek alternatif senaryoların değerlendirilmesi de mümkün hale gelmiştir.

Yürütülen çok amaçlı optimizasyon analizleri sonucunda, hedeflenen performans kriterleri olan minimum deplasman, minimum dönme açısı, minimum moment ve maksimum rijitlik oranı doğrultusunda çözüm uzayı oluşturulmuş ve Pareto-optimal çözüm kümesi elde edilmiştir. Bu çözüm kümesi sayesinde hem mühendislik gereklerini karşılayan hem de ekonomik açıdan verimli tasarımlar elde edilmiştir (Faruk ve Algin, 2023). Ayrıca, bu optimizasyonlar sadece bireysel parametre sınırları değil, aynı zamanda parametreler arası etkileşimleri de dikkate alınıp çok boyutlu karar mekanizmaları sunmaktadır.

Sonuç olarak, elde edilen optimizasyon verileri, sistem performansını artırmak ve ekonomik tasarımı mümkün kılmak adına önemli karar destek araçları sunmaktadır. Geliştirilen modellerin grafiksel ve sayısal çıktılarıyla birlikte değerlendirilmesi, mühendislik tasarım süreçlerinde çok amaçlı karar alma mekanizmalarının etkinliğini ortaya koymakta ve gelecekteki tasarımlar için yol gösterici olmaktadır.

6. SONUÇLAR

1. Bu çalışmada, açık deniz koşullarında çalışan rüzgar türbinlerinin tekil kazık temelli sistem davranışları, üç temel parametre olan kazık çapı (D_p), kazık uzunluğu (L_p) ve türbin kütlesi (T_m) dikkate alınarak değerlendirilmiş ve çok değişkenli regresyon analizi ile bu parametrelerin sistem tepkileri üzerindeki etkileri sayısal olarak ortaya konmuştur.

2. Gerçekleştirilen varyans analizi (ANOVA) sonucunda, türbin kütlesinin deplasman (δ_{SSI}) ve dönme açısı (θ_{SSI}) üzerindeki etkisinin sırasıyla %60,47 ve %36,16 gibi yüksek katkı oranlarıyla istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde, kazık uzunluğunun moment (MSSI) ve rijitlik oranı (MCRSSI) üzerinde sırasıyla %26,84 ve %18,18 oranında etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

3. Regresyon modelleri istatistiksel açıdan yüksek doğruluk oranlarıyla sonuçlanmış; açıklayıcılık (R^2), ayarlanmış R^2 ve tahmin edici R^2 değerleri %90'ın üzerinde bulunmuştur. Modelin güvenilirliğini destekleyen Adequate Precision (Adeq. Precision) değeri ise 25 ile 116 arasında değişmiş, bu da modellerin mühendislik amaçlı karar süreçlerinde kullanılabilirliğini desteklemiştir.

4. Grafiksel analiz sonuçlarına göre (Şekil 4.8 ve 4.9), kazık çapı ve uzunluğundaki değişimlerin sistemin moment ve dönme davranışı üzerinde doğrudan etkili olduğu, modelleme sonuçlarının hem görsel hem de istatistiksel olarak tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

5. Yapılan çok amaçlı optimizasyon analizlerinde, minimum deplasman, minimum moment ve maksimum rijitlik oranı hedeflenmiş; bu doğrultuda optimum tasarım parametreleri belirlenmiştir. Pareto-optimal çözüm kümesi aracılığıyla hem güvenli hem de ekonomik yapı kombinasyonları elde edilmiştir.

6. Sonuç olarak bu tez kapsamında geliştirilen regresyon ve optimizasyon modelleri, rüzgar türbinleri için yapısal sistemlerin güvenli ve verimli tasarlanmasına olanak sağlayacak düzeyde güvenilir, istatistiksel olarak anlamlı ve mühendislik uygulamaları için kullanılabilir düzeydedir.

7. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, Açık Deniz Rüzgar Türbini sistemlerinin tekil kazık temelli yapılarla etkileşiminin istatistiksel modeller ve çok amaçlı optimizasyon yöntemleriyle başarılı bir şekilde analiz edilebildiğini göstermiştir. Ancak, bu çalışmada değerlendirilen parametrelerin ve sınır koşullarının ötesine geçilmesi, modelin daha geniş uygulamalara uyarlanabilirliğini artıracaktır.

1. Gelecek çalışmalarda, farklı zemin türleri (örneğin yumuşak kil, gevşek kum) için benzer analizlerin yapılması, modelin farklı jeoteknik koşullardaki performansını değerlendirmek açısından önemlidir.

2. Rüzgar türbininin rotor çapı, kule yüksekliği ve aerodinamik kuvvetleri gibi üst yapı parametrelerinin de modele entegre edilerek yapısal tepkiler üzerindeki etkisinin araştırılması önerilmektedir.

3. Bu çalışmada sadece statik yüklemeler değerlendirilmiş olup, ilerleyen araştırmalarda dinamik yüklemeler (örneğin rüzgar fırtınası, dalga yükü, sismik etkiler) altında kazık-tepki davranışlarının modellenmesi gerekmektedir.

4. Uygulanan çok amaçlı optimizasyon sürecine, ekonomik maliyet ve çevresel etki gibi sürdürülebilirlik kriterlerinin dahil edilmesi, çok boyutlu karar verme sistemlerinin daha etkin kullanılmasını sağlayacaktır.

5. Son olarak, geliştirilen modellerin saha verileri ile doğrulanması, istatistiksel modellerin mühendislikteki pratik geçerliliğini artıracak ve yapısal sistemlerin güvenilirliğini üst seviyeye taşıyacaktır.

KAYNAKLAR

- Abdel-Rahman, K., & Achmus, M. (2005). Finite element modelling of laterally loaded monopile foundations for offshore wind energy converters in Germany. In *Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics* (pp. 391–396). Taylor & Francis.
- 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>
- Adhikari, S., & Bhattacharya, S. (2011). Vibrations of wind turbines considering soil–structure interaction. *Wind and Structures*, 14(2), 85–112. <https://doi.org/10.12989/WAS.2011.14.2.085>
- Alcantara, F. J., de Souza, M. I. L., Pierret, S., & Caprace, J. D. (2020). Monopile offshore wind turbine structural optimization methodology. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(8), 565. <https://doi.org/10.3390/jmse8080565>
- Algin, H. M. (2018). Optimal design of jet-grouted rafts subjected to non-uniform vertical loading. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(2), 494–508. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0841-1>
- Algin, H. M. (2016). Optimal design of jet-grouted rafts using response surface methodology. *Computers and Geotechnics*, 74, 56–73. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.12.012>
- Algin, H. M., Ekmen, A. B., & Kaya, E. (2022). 3D seismic response assessment of a high-rise building with barrette piles using a comprehensive subsurface model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 163, 107488. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107488>
- Algin, H. M., Ekmen, A. B., & Yenmez, L. (2019). 3D finite element analysis of barrette piled raft foundations. *Teknik Dergi*, 30(2), 9443–9458. <https://doi.org/10.18400/tekderg.399679>
- Algin, H. M., & Gumus, V. (2018). 3D FE analysis on settlement of a foundation supported by a jet-grouted pile group. *International Journal of Geomechanics*, 18(6), 04018095. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001189](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001189)
- Alkhoury, P., Soubra, A., Rey, V., & Aït-Ahmed, M. (2021). A full three-dimensional model for estimating the natural frequencies of an offshore wind turbine in sand. *Wind Energy*, 24(7), 699–719. <https://doi.org/10.1002/we.2598>
- Alkhoury, P., Soubra, A.-H., Rey, V., & Aït-Ahmed, M. (2022). Dynamic analysis of a monopile-supported offshore wind turbine considering soil–foundation–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 158, 107281. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107281>
- American Petroleum Institute (API). (2014). *Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms: Working stress design* (API RP 2A-WSD, 22nd ed.). API Publishing.

- Anoyatis, G., Di Laora, R., & Mylonakis, G. (2013). Axial kinematic response of end-bearing piles to P-waves. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(18), 2877–2896. <https://doi.org/10.1002/nag.2166>
- Arany, L., Bhattacharya, S., Macdonald, J. H. G., & Hogan, S. J. (2015, May). A critical review of serviceability limit state requirements for monopile foundations of offshore wind turbines (OTC-25874-MS). In *Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/25874-MS>
- Bellotti, R., Jamiolkowski, M., Lo Presti, D. C. F., & O'Neill, D. A. (1989). Stiffness of sands from CPT and DMT. In *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 1, pp. 179–184). Rio de Janeiro, Brazil.
- Bhattacharya, S. (2014). Challenges in design of foundations for offshore wind turbines. *Engineering & Technology Reference*, 1–9. <https://doi.org/10.1049/etr.2014.0021>
- Binh, L. V., Ishihara, T., Phuc, P. V., & Fujino, Y. (2008). A peak factor for non-Gaussian response analysis of a wind turbine tower. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(12), 2217–2227. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.019>
- Bou Zid, D. A., Bhattacharya, S., & Otsmane, L. (2018). Assessment of the natural frequency of installed offshore wind turbines using a nonlinear finite element model considering soil–monopile interaction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(2), 333–346. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.10.002>
- Brew, D. (2014). *Conceptual model—Wind farm site, Dogger Bank Teesside A & B*. Royal HaskoningDHV.
- Byrne, B., McAdam, R., Burd, H., Houlsby, G., Martin, C., & Leblanc, C., et al. (2015). New design methods for large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications. In V. Meyer (Ed.), *Frontiers in Offshore Geotechnics III* (pp. 705–710). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18442-96>
- Byrne, B. W., & Houlsby, G. T. (2003). Foundations for offshore wind turbines. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361(1813), 2909–2930. <https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1286>
- Cao, G., Chen, Z., Wang, C., & Ding, X. (2020). Dynamic responses of an offshore wind turbine considering soil nonlinearity and combined wind–wave loads. *Ocean Engineering*, 217, 108155. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108155>
- Chen, J., & Kim, M.-H. (2022). Review of optimization methodologies in recent offshore wind turbine research and design. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(1), 28. <https://doi.org/10.3390/jmse10010028>

- Cheng, X., Wang, T., Zhang, J., Wang, P., Tu, W., & Li, W. (2023). Dynamic response analysis of monopile offshore wind turbines under seismic and environmental loading considering clay stiffness degradation. *Computers and Geotechnics*, 155, 105210. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105210>
- Christian, B., Frederik, Z., Robert, B., Taeseong, K., Anders, Y., & Hansen, C. H. L., et al. (2013). *Description of the DTU 10 MW reference wind turbine*. DTU Wind Energy.
- Corciulo, S., Zanoli, O., & Pisanò, F. (2017). Transient response of monopiles for offshore wind turbines in sand: The role of cyclic hydro-mechanical soil behaviour. *Computers and Geotechnics*, 83, 221–238. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.11.010>
- Cotterill, C., Phillips, E., James, L., Forsberg, C., & Tjelta, T. I. (2017). How understanding past landscapes can inform present-day site investigations: A case study from Dogger Bank, southern central North Sea. *Near Surface Geophysics*, 15(4), 403–414. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2017032>
- Cotterill, C. J., Phillips, E., James, L., Forsberg, C. F., Tjelta, T. I., Carter, G., et al. (2017). The evolution of the Dogger Bank, North Sea: A complex history of terrestrial, glacial and marine environmental change. *Quaternary Science Reviews*, 171, 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.07.006>
- Dassault Systèmes. (2013). *Abaqus 6.13 documentation*. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Davenport, A. G. (1961). The application of statistical concepts to the wind loading of structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 19(4), 449–472. <https://doi.org/10.1680/iicep.1961.11304>
- De Vries, W., & Krolis, V. (2007). Effects of deep water on monopile support structures for offshore wind turbines. In *Proceedings of the European Offshore Wind Conference* (pp. 1–10).
- DeJong, M. J., & Vibert, C. (2012). Seismic response of masonry towers: Computational and experimental modelling. *Engineering Structures*, 40, 566–574. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.001>
- Det Norske Veritas (DNV). (2013). *Design of offshore wind turbine structures*. DNV GL.
- Det Norske Veritas (DNV). (2014). *Design of offshore wind turbine structures* (DNV-OS-J101). DNV GL.
- Di Laora, R., & Rovithis, E. M. M. (2015). Kinematic bending of fixed-head piles in inhomogeneous soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(6), 04015030. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001270](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001270)
- Diego, F. (2019). Materials, structural models and properties in GTS NX [PDF document]. Midas IT.

- Doherty, J. P., & Lehane, B. M. (2018). An automated approach towards optimisation of monopile foundations for offshore wind turbines in terms of serviceability and ultimate limit state design. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 140(5), 051901. <https://doi.org/10.1115/1.4039825>
- Duncan, J. M., & Buchignani, A. L. (1976). *An engineering manual for settlement studies*. University of California, Berkeley.
- Elmas, F. (2024). Three-dimensional finite element analyses of biomaterials and biomechanical behaviors using geotechnical parameters [Master's thesis].
- Emery, A. R., Hodgson, D. M., Barlow, N. L. M., Carrivick, J. L., Cotterill, C. J., & Mellett, C. L., et al. (2019). Topographic and hydrodynamic controls on barrier retreat and preservation: An example from Dogger Bank, North Sea. *Marine Geology*, 416, 105981. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.105981>
- Emery, A. R., Hodgson, D. M., Barlow, N. L. M., Carrivick, J. L., Cotterill, C. J., & Phillips, E. (2019). Left high and dry: The glaciation of Dogger Bank, North Sea, recorded in proglacial lake evolution. *Frontiers in Earth Science*, 7, 234. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00234>
- Emery, A. R., Hodgson, D. M., Barlow, N. L. M., Carrivick, J. L., Cotterill, C. J., & Richardson, J. C., et al. (2020). Ice-sheet and palaeoclimate controls on drainage network evolution: An example from Dogger Bank, North Sea. *Earth Surface Dynamics*, 8(4), 869–891. <https://doi.org/10.5194/esurf-8-869-2020>
- Fan, K., Gazetas, G., Kaynia, A., Kausel, E., & Ahmad, S. (1991). Kinematic seismic response of single piles and pile groups. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(12), 1860–1879. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:12\(1860\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:12(1860))
- Gasparre, A. (2005). *Advanced laboratory characterization of London Clay* [Doctoral dissertation, Imperial College London].
- Germanischer Lloyd (GL). (2005). *Guideline for the certification of offshore wind turbines*. GL Renewables Certification.
- Gudehus, G., Amorosi, A., Gens, A., Herle, I., Kolymbas, D., Mašin, D., et al. (2008). The soilmodels.info project. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(13), 1571–1572. <https://doi.org/10.1002/nag.675>
- Gupta, B. K., & Basu, D. (2020). Monopile foundations for offshore wind turbines: Design perspectives. *Ocean Engineering*, 213, 107514. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107514>
- Haghi, R., Ashuri, T., van der Valk, P. L. C., & Molenaar, D. P. (2012). Integrated multidisciplinary constrained optimization of offshore support structures. In *The Science of Making Torque from Wind* (pp. 1–10).
- Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A., & Park, D. (2016). *DEEPSOIL 6.1, user manual*. University of Illinois at

Urbana-Champaign.

- Heap, M. J., Faulkner, D. R., Meredith, P. G., Vinciguerra, S., & Zang, A. (2010). Evolution of elastic moduli and accompanying stress changes with increasing crack damage: Implications for stress changes around fault zones and volcanoes. *Geophysical Journal International*, 183(1), 225–236. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04726.x>
- Ho, A., & Mbistrova, A. (2017). *The European offshore wind industry: Key trends and statistics 2016*. WindEurope.
- Ho, A., Mbistrova, M. I., & Corbetta, G. (2016). *The European offshore wind industry—Key trends and statistics 2015*. European Wind Energy Association. <https://windeurope.org/about-wind/statistics>
- Iannuzzi, A., & Spinelli, P. (1987). Artificial wind generation and structural response. *Journal of Structural Engineering*, 113(12), 2382–2398. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1987\)113:12\(2382\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:12(2382))
- International Organization for Standardization (ISO). (2004). *ISO 19901-2: Petroleum and natural gas industries—Specific requirements for offshore structures—Part 2: Seismic design procedures and criteria*. ISO.
- Iovino, M., Di Laora, R., Rovithis, E. M. M., & De Sanctis, L. (2019). Beneficial role of piles on seismic loading of structures. *Earthquake Spectra*, 35(3), 1141–1162. <https://doi.org/10.1193/021418EQS046M>
- Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., & Lo Presti, D. C. F. (2001). Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT. In *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (Vol. 1, pp. 201–238). Bali, Indonesia.
- Jian, S., Fu, L.-Y., Liao, Z., Deng, W., & Du, Q. (2022). Elastic properties of fault damage zones in ultra-deep carbonates in the Tarim Basin, NW China. *Journal of Geophysics and Engineering*, 19(6), 650–662. <https://doi.org/10.1093/jge/gxac040>
- Jostad, H. P., Dahl, B. M., Page, A., Sivasithamparam, N., & Sturm, H. (2020). Evaluation of soil models for advanced design of offshore wind turbine foundations in dense sand. *Géotechnique*, 70(8), 682–699. <https://doi.org/10.1680/jgeot.19.TI.034>
- Kallehave, D., Byrne, B. W., Thilsted, C. L., & Mikkelsen, K. K. (2015). Optimization of monopiles for offshore wind turbines. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2035), 20140100. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0100>
- Kaynia, A. M. (2019). Seismic considerations in design of offshore wind turbines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 124, 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.038>
- Kementzetzidis, E., Corciulo, S., Versteijlen, W. G., & Pisanò, F. (2019). Geotechnical aspects of offshore wind turbine dynamics from 3D nonlinear

- soil–structure simulations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 181–199. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.037>
- Kiyomiya, O., Rikiji, T., & van Gelder, P. H. (2002). Dynamic response analysis of onshore wind energy units during earthquakes. In *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*.
- Kulik, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual for estimating soil properties for foundation design*. U.S. Department of Transportation.
- Kuzniar, K., & Tatara, T. (2020). The ratio of response spectra obtained from free-field and building-foundation vibrations of the seismic type: Influence of rockburst parameters and simple models of kinematic soil–structure interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(3), 907–924. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00734-w>
- Lee, S., Kim, H., & Lee, S. (2010). Analysis of aerodynamic characteristics on a counter-rotating wind turbine. *Current Applied Physics*, 10(Suppl. 1), S339–S342. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2009.11.073>
- Lesny, K., & Wiemann, J. (2005). Design aspects of monopiles in German offshore wind farms. In *Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics* (pp. 383–389). A. A. Balkema.
- Liaw, C., & Chopra, A. K. (1974). Dynamics of towers surrounded by water. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(1), 33–49. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290030104>
- Luo, C., Yang, X., Zhan, C., Jin, X., & Ding, Z. (2016). Nonlinear 3D finite element analysis of a soil–pile–structure interaction system subjected to horizontal earthquake excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.02.005>
- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95(4), 859–877.
- Mašin, D. (2019). *Modelling of soil behaviour with hypoplasticity: Another approach to soil structural modelling*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-03976-9>
- Mašin, D. (2005). A hypoplastic constitutive model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29(4), 311–336. <https://doi.org/10.1002/nag.416>
- Madabhushi, G. S. P., & Haiderali, A. E. (2013, May). Assessment of the p–y method in the design of monopiles for offshore wind turbines (OTC-24088-MS). In *Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/24088-MS>
- Mayne, P. W. (2006). In-situ test calibrations for evaluating soil parameters. In K. Phoon, D. Hight, S. Leroueil, & T. Tan (Eds.), *Characterisation and engineering properties of natural soils* (pp. 1601–1652). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/NOE0415426916.ch2>

- Mayne, P. W. (2006). Interrelationships of shear wave velocity, cone tip resistance, and porewater pressure in soft clays. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing* (pp. 3–4). Porto, Portugal.
- Mosca, I., Sargeant, S., Baptie, B., Musson, R. M. W., & Pharaoh, T. C. (2022). The 2020 national seismic hazard model for the UK. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(2), 633–675. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01281-z>
- Mostafa, Y. E., & El Naggar, M. H. (2004). Response of fixed offshore platforms to wave and current loading including soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(4), 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2003.11.008>
- Murphy, G., Igoe, D., Doherty, P., & Gavin, K. (2018). A 3D FEM approach for the design of laterally loaded monopiles. *Computers and Geotechnics*, 100, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.03.013>
- Musial, W., & Butterfield, S. (2004). *Future of offshore wind energy in the United States* (NREL/CP-500-36313). National Renewable Energy Laboratory.
- Muskulus, M., & Schafhirt, S. (2014). A review of design optimization of wind turbine support structures. *Journal of Ocean and Wind Energy*, 1(1), 12–22.
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2012). *Soil–structure interaction for building structures* (NIST GCR 12-917-21). NEHRP Consultants Joint Venture.
- Nicholson, J. C. (2011). *Design of wind turbine tower and foundation systems: Optimization approach* [Master’s thesis, University of Iowa].
- Niemunis, A., & Herle, I. (1997). Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 2(4), 279–299. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199710\)2:4<279::AID-CFM29>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199710)2:4<279::AID-CFM29>3.0.CO;2-8)
- Nieto, A., Camacho, J., & Ruiz, E. (2009). Determination of parameters for Mohr–Coulomb and Hardening Soil elastoplastic models in clayey soils. In *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Öztoprak, S., & Bolton, M. D. (2013). The stiffness of sands through a laboratory test database. *Géotechnique*, 63(1), 54–70. <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.078>
- Padrón, L. A., Carbonari, S., Dezi, F., Morici, M., Bordón, J. D. R., & Leoni, G. (2022). Seismic response of large offshore wind turbines on monopile foundations including dynamic soil–structure interaction. *Ocean Engineering*, 257, 111653. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111653>
- Pandey, B. H., Ventura, C. E., & Finn, W. D. L. (2012). Vibrational characteristics of foundation and free-field motions of instrumented buildings during earthquakes. In *Topics on the dynamics of civil structures*. Society for Experimental Mechanics.

- Peiris, T., Thambiratnam, D., Perera, N., & Gallage, C. (2014). Soil–pile interaction of a pile embedded in deep-layered marine sediment under seismic excitation. *Structural Engineering International*, 24(4), 521–531. <https://doi.org/10.2749/101686614X13854694314720>
- Petrini, F., Manenti, S., Gkoumas, K., & Bontempi, F. (2010). Structural design and analysis of offshore wind turbines from a system perspective. *Wind Engineering*, 34(1), 85–107. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.34.1.85>
- Phillips, E., Johnson, K., Ellen, R., Plenderleith, G., Dove, D., Carter, G., et al. (2022). Ice-marginal landform evidence for ice-sheet interaction and retreat along the western part of Dogger Bank (North Sea) during the Last Glaciation. *Proceedings of the Geologists' Association*, 133(1), 87–111. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2021.11.005>
- Pierson, W. J., & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research*, 69(24), 5181–5190. <https://doi.org/10.1029/JZ069i024p05181>
- Plodpradit, P., Dinh, V. N., & Kim, K.-D. (2019). Tripod-supported offshore wind turbines: Modal and coupled analysis and a parametric study using X-SEA and FAST. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(5), 181. <https://doi.org/10.3390/jmse7050181>
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. Wiley.
- Powell, J. J., & Lunne, T. (2005). Comparison of piezocones of different sizes in UK clays. In *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing* (pp. 729–734). IOS Press.
- Powell, J. J. M., Quarterman, R. S. T., & Fernando, D. S. (1998). Interpretation of shear strength of soils. In *Geotechnical site characterisation* (pp. 179–184). Balkema.
- Randolph, M. F. (1981). The response of flexible piles to lateral loading. *Géotechnique*, 31(2), 247–259. <https://doi.org/10.1680/geot.1981.31.2.247>
- Reese, L. C., & Van Impe, W. F. (2000). *Single piles and pile groups under lateral loading*. CRC Press.
- Ren, B., & Wang, Y. (2004). Numerical simulation of random wave slamming on structures in the splash zone. *Ocean Engineering*, 31(4), 547–560. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2003.10.006>
- Robertson, P. K., & Campanella, R. G. (1983). Interpretation of cone penetration tests: Part I—Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), 718–733. <https://doi.org/10.1139/t83-078>
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D., & Greig, J. (1986). Use of piezometer cone data. In *Proceedings of the In-Situ '86 Specialty Conference* (pp. 1263–1280). Virginia Tech, Blacksburg, VA.

- Rostami, R., Hytiris, N., Bhattacharya, S., & Giblin, M. (2017). Seismic analysis of piles within the plastic hinge and liquefiable soil. *Geotechnical Research*, 4(4), 203–213. <https://doi.org/10.1680/jgere.17.00009>
- Scarfone, R., Morigi, M., & Conti, R. (2020). Assessment of dynamic soil–structure interaction effects for high-rise buildings: A 3D numerical approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128, 105864. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105864>
- Schijve, J. (2003). Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *International Journal of Fatigue*, 25(8), 679–702. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00049-6)
- Schmoor, K. A., & Achmus, M. (2015). Optimum geometry of monopiles with respect to geotechnical design. *Journal of Ocean and Wind Energy*, 2(2), 54–60.
- Schnaid, F. (2008). *In situ testing in geomechanics: The main tests*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482266054>
- Senneset, K., Janbu, N., & Gregory, G. H. (1989). In-situ determination of shear strength parameters from piezocone tests. *Transportation Research Record*, 1235, 24–37.
- Senneset, K., Janbu, N., & Gregory, G. H. (1988). Shear strength parameters from static cone penetration tests. In *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing* (Vol. 2, pp. 853–861). Orlando, FL.
- Shadlou, M., & Bhattacharya, S. (2016). Dynamic stiffness of monopiles supporting offshore wind turbine generators. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.04.002>
- Song, Y., Gong, F., Zeng, L., Zhang, Z., Mao, Z., & Huang, C., et al. (2024). Effects of stress on the fracture and elastic properties of carbonate rocks controlled by strike-slip faults: A new rock physics modelling perspective. *Geophysical Journal International*, 238(2), 1165–1180. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae210>
- Stacul, S., Rovithis, E. M. M., & Di Laora, R. (2022). Kinematic soil–pile interaction under earthquake-induced nonlinear soil and pile behaviour: An equivalent-linear approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(10), 04022093. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002813](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002813)
- SzilvÁgyi, Z., & Ray, R. P. (2018). Verification of the Ramberg–Osgood material model in Midas GTS NX with modelling of torsional simple shear tests. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(3), 629–635. <https://doi.org/10.3311/PPci.11564>
- Taborda, D. M. G., Zdravković, L., Potts, D. M., Burd, H. J., Byrne, B. W., & Gavin, K. G., et al. (2020). Finite element modelling of laterally loaded piles in dense marine sand at Dunkirk. *Géotechnique*, 70(11), 1014–1029. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.PISA.006>

- Treffeisen, T., & Henk, A. (2020). Elastic and frictional properties of fault zones in reservoir-scale hydro-mechanical models—A sensitivity study. *Energies*, 13(18), 4606. <https://doi.org/10.3390/en13184606>
- Turner, B. J., Brandenburg, S. J., & Stewart, J. P. (2017). Effects of kinematic SSI on foundation input motions for bridges on deep foundations. *PEER Report*. University of California, Berkeley.
- Vardanega, P. J., & Bolton, M. D. (2013). Stiffness of clays and silts: Normalization of shear modulus and shear strain. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(9), 1575–1589. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000887](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000887)
- Velarde, J., & Bachynski, E. E. (2017). Design and fatigue analysis of monopile foundations supporting the DTU 10 MW offshore wind turbine. *Energy Procedia*, 137, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.330>
- von Wolffersdorff, P.-A. (1996). A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1(3), 251–271. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199607\)1:3<251::AID-CFM13>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199607)1:3<251::AID-CFM13>3.0.CO;2-3)
- Vorpahl, F., Schwarze, H., Fischer, T., Seidel, M., & Jonkman, J. (2013). Offshore wind turbine environment, loads, simulation and design. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(6), 548–570. <https://doi.org/10.1002/wene.54>
- Watanabe, K., Pisanò, F., & Jeremić, B. (2017). Discretization effects in finite element simulation of seismic waves in elastic and elasto-plastic media. *Engineering with Computers*, 33(3), 519–545. <https://doi.org/10.1007/s00366-016-0488-4>
- Wichtmann, T., & Triantafyllidis, T. (2016). Experimental database for the development, calibration and verification of constitutive models for sand with emphasis on cyclic loading: Part I—Tests with monotonic loading and stress cycles. *Acta Geotechnica*, 11(3), 739–761. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0402-z>
- Wu, X., Hu, Y., Li, Y., Yang, J., Duan, L., & Wang, T. (2019). Foundations of offshore wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 379–393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.012>
- Yu, Y. X. (1981). Application of ocean wave simulation. *Journal of Dalian University of Technology*, 84–90.
- Zaaijer, M. B. (2006). Foundation modelling to assess the dynamic behaviour of offshore wind turbines. *Applied Ocean Research*, 28(1), 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2006.03.004>
- Zdravković, L., Taborda, D. M. G., Potts, D. M., Jardine, R. J., Sideri, M., Schroeder, F. C., et al. (2015). Numerical modelling of large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications. In *Proceedings of the*

International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (pp. 759–764). Oslo, Norway.

- Zhai, J., & Yin, Q. (2023). Finite element analysis of newly designed monopiles for offshore wind turbines on seabed with shallow-buried batholith. *Ships and Offshore Structures*, 18(6), 735–747. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2067419>
- Zhao, X., & Hu, C. (2012). Numerical and experimental study on a 2D floating body under extreme wave conditions. *Applied Ocean Research*, 35, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2012.01.001>
- Ziegler, L., Schafhirt, S., Scheu, M., & Muskulus, M. (2016). The effect of load sequence and air temperature seasonalities on fatigue crack growth in monopile offshore wind turbines. *Energy Procedia*, 94, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.201>
- Zuo, H., Bi, K., & Hao, H. (2018). Dynamic analyses of offshore wind turbines including soil–structure interaction. *Engineering Structures*, 157, 42–62. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.001>