

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AÇIK DENİZDE RÜZGÂR TÜRBİNİ TAŞIYICI SİSTEMİNİN SİSMİK
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Adem BARLAS

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İlyas Devran ÇELİK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA-2022**



©2022 [Adem BARLAS]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisi	2
1.2. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi	4
1.3. Rüzgâr Türbinleri ve Çeşitleri	6
1.3.1. Dönme eksenlerine göre rüzgâr türbini çeşitleri	9
1.3.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri	9
1.3.1.2. Düşey (dikey) eksenli rüzgâr türbinleri	9
1.4. Dünya ve Avrupa’da Offshore Durumu	10
1.4.1. Dünyada DRES durumu	12
1.4.2. Avrupa Ülkeleri 2030 yılı kapasite beklentisi	13
2. KAYNAK ÖZETLERİ	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1. Rüzgâr Potansiyeli	33
3.2. Derinlik Durumu	35
3.3. Karasuları Sınırı	35
3.4. Askeri Sınırlar	36
3.5. Deniz Ulaşım ve Boru Hatları	36
3.6. Çevresel Faktörler	36
3.7. Temel Tipleri	37
3.7.1. Ağırılık temeller (Gravity base structure)	37
3.7.2. Tekil kazıklı temeller (Monopile)	38
3.7.3. Grup kazıklı modeller (Tripod)	39
3.7.4. Kafes temeller (Jacket)	39
3.7.5. Vakumlu kova keson (Suction Bucket)	40
3.7.6. Yüzen temeller (Floating)	41
3.8. 5 MW Kara Tipi Rüzgâr Türbin Modeli	42
3.9. Kanat, Nasel ve Göbek Özellikleri	44
3.10. Tasarımda Dikkate Alınan Yükler	49
3.10.1. Dalga Yükü	52
3.10.1.1. Küçük genlikli dalga teorisi	54
3.10.1.2. 5.derece stokes dalga teorisi	56
3.10.2. Deprem yükü	58
3.10.3. Rüzgâr Yükü	60
3.10.4. Ölü Yük ve Diğer Yükler	61
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	62
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	93

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AÇIK DENİZDE RÜZGÂR TÜRBİNİ TAŞIYICI SİSTEMİNİN SİSMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Adem BARLAS

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlyas Devran ÇELİK

Gelişen ve yenilenen dünyada petrol krizleri, iklim değişiklikleri, çevre kirlilikleri ve yenilemez enerji kaynaklarının azalması gibi sebeplerden dolayı alternatif enerjilere özellikle de yeşil enerji üretiminde etkin rol oynayan rüzgâr enerjisine duyulan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Kara alanlarındaki yetersizlikler istikrarlı ve devamlı rüzgâr ikliminin sağlanması, daha verimli enerji üretimi gibi nedenler açık deniz rüzgâr türbinlerine olan ilgiyi artırmaktadır. Açık denizlerde kurulması planlanan rüzgâr türbinlerinin yerlerinin belirlenmesinde derinlik koşulları, askeri sahalar, ülke sınırları, deniz altı kablo hatları, deniz ulaşimleri, rüzgâr hızları göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kapsamda yapılan araştırmalar neticesinde Bozcaada ve Gökçeada kıyıları açık deniz rüzgâr türbinleri bakımından olumlu sonuç vermişlerdir. Açık deniz yapıların rüzgâr, dalga, sismik yükler ve çevresel yükler etkisi altında değerlendirilmeli zemin durumları detaylı bir şekilde incelenip modellere doğru bir şekilde yansıtılmalıdır.

Türkiye'nin üç tarafının denizlerle çevrili olması, konumunun getirmiş olduğu avantajlar ve konumundan kaynaklı yüksek rüzgâr potansiyeline sahip olması rüzgâr enerjisi yönünden birçok ülkeye nazaran ön plana çıkmasını sağlamış, son 10 yılda rüzgâr enerjisinde yaşanan olumlu gelişmelerle birlikte ülkemizde ki enerji ihtiyacının yaklaşık %8 'i rüzgâr enerjisinden sağlanmıştır. Kara alanlarının sınırlı olması dolayısıyla açık denizlerde sürekli rüzgâr iklimi sağlanarak enerji üretim veriminin artırılması avantajlı ve kullanışlı olacağı öngörülmektedir. Fakat açık denizlere taşınan rüzgâr türbinleri ülkemizde henüz yapılmamıştır. Gelecek yıllarda konumunun getirdiği avantajlar ile deniz üstü rüzgâr türbini uygulamalarının başlayarak yaygınlaşması ülkemiz açısından dışa bağlı petrol ve doğalgaz tabanlı enerji politikası yerini yenilenebilir, temiz ve sürekli enerjilerden olan deniz üstü yatırımlarına bırakarak yerli ve milli servetin büyük oranda korunmasını sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında Ülkemiz Bozcaada açıklarında kurulabilecek ceket tipi rüzgâr türbini yapısı için Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından hazırlanan 5MW Rüzgâr Türbini özellikleri kullanılmış olup kule yüksekliği 87.6 m alınmıştır. Ekstrem durum kombinasyonları göz önüne alınarak yapılan analizlerde yapının zemine ankastre, yay sabitli ve katı zemin tanımlı modeller

oluşturulup yapı kule tanımlı ve kule tanımsız sistemli olmak üzere analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde dalga, rüzgâr ve sismik yükler başta olmak üzere çevresel yükler dikkate alınmış analizlerde SAP2000 sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Türbinleri, Dalga Analizi, Deprem Analizi, SAP2000

2022, 93 sayfa



ABSTRACT

M.Sc Thesis

INVESTIGATION OF SEISMIC BEHAVIOUR OF OFFSHORE WIND TURBINE CARRIER SYSTEM

Adem BARLAS

**Suleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. İlyas Devran ÇELİK

In the developing world, due to petroleum related crises, climate changes, environmental pollutions and decrease in the nonrenewable energy sources, the need for alternative energy sources such as the wind that is an effective green energy source is increasing day by day. Due to inadequacies in land such as instability and discontinuity of conditions for the wind and more efficient energy production, the interest in the offshore wind turbines is increasing. When determining the locations of the offshore wind turbines; depth conditions, military zones, country borders, submarine cable lines, marine transportation and wind speeds should be considered. In this context, Bozcaada and Gökçeada shores are very qualifying for offshore wind turbines. In offshore structures; wind, wave, seismic loads and circular loads as well as soil conditions should be considered and reflected well in the models.

Advantages of the Turkey's location and having high wind potential has made Turkey prominent in the wind energy compared to many countries. In the last 10 years, with the positive developments in the wind energy, about 8% of the energy need of our country has been met with the wind energy. Due to land areas being limited, with the continuous wind conditions met in offshore, better energy production efficiency may be acquired. However, wind turbines that are transported to the offshores have not been made in our country so far. In the future, with the locational advantages and offshore wind turbine applications, foreign dependent petroleum, natural gas based energy policy may give place to renewable, clean and continuous energy and thus national wealth may be preserved substantially.

In this thesis study, jacket type wind turbine structure in Bozcaada offshore waters of our country was investigated. Tower height was chosen 87.6 m and 5mw wind turbine properties prepared by National renewable energy laboratory (NREL) was selected for the wind turbine. In the analyses with the consideration of extreme condition combinations; fixed to the ground, spring constant and solid ground defined models were created. Structure is analysed for carrier system with and without the tower component. In the analysis; wave, wind and seismic

loads as well as circular loads were considered. SAP2000 finite element model analysis program has been utilised for the numerical analysis.

Keywords: Wind Turbines, Wave Analysis, Earthquake Analysis, SAP2000

2022, 93 pages



TEŞEKKÜR

Lisans hayatıma başladığım günden bu yana her daim bana yol gösteren, hayatımda her daim desteğini hissettiğim ve bilim adına tarafıma her türlü katkıyı sağlayan, yanında çalışmaktan onur duyduğum ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı tez danışmanım değerli bilim insanı Sayın Dr. Öğr. Üyesi İlyas Devran Çelik'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Tezin yürütülmesinde her aşamada yanımda olup hem manevi hem akademik olarak desteğini devamlı hissettiğim kıymetli arkadaşlarım; Sait Gül, Yasin Kılıç Arslan, Tevfik Burak Kocaman, Sefa Uğur, Ercan Egemen Başar ve Yusuf Öztürk'e teşekkür ederim.

Tez çalışmasında her daim desteklerini hissettiğim Isparta Belediyesi Etüd Proje Müdürlüğü ekip arkadaşlarım Ahmet Sarıcık, Murat Kodaloğlu, Bilgehan Yıldırım, Ahmet Koruk, Selahattin Coşkun ve Müdürümüz Yasin Tekin'e teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmasında manevi desteklerini eksik etmeyen dostlarım Ali Samet Yurt, Bedirhan İmam ve Lokman Aydın'a teşekkür ederim.

Tez çalışmasında desteklerini eksik etmeyen Serdar Demirci, Emre Ayan, Kadir Üzümcü, Rıdvan Çakır ve Onur Karakoç'a teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca beni destekleyen, her daim yanımda olan dedem ve babaanneme teşekkür ederim.

Teşekkürlerin en büyüğünü hak eden, sürecin başından sonuna kadar her anımda yanımda olan, gece gündüz demeden sabır ve büyük fedakârlık gösteren, attığım ve atacağım adımlarda beni destekleyen kıymetli eşime yürekten teşekkür ederim.

Adem BARLAS
ISPARTA, 2022

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Dünya toplam rüzgâr kurulum kapasitelerinin tarihsel gelişimi	3
Şekil 1.2. 2020 yılı kara ve açık deniz rüzgâr enerjisi santrallerinin oransal dağılımı	4
Şekil 1.3. Türkiye Rüzgâr Atlası	5
Şekil 1.4. Türkiye rüzgâr enerji santraller dağılımı haritası	5
Şekil 1.5. Rüzgâr türbini bileşenleri	8
Şekil 1.6. Rüzgâr türbini çeşitleri	8
Şekil 1.7. Rüzgâr türbini sınıfları a) Yatay eksen, b) Dikey eksen	9
Şekil 1.8. Avrupa ülkelerinde DRES kurulu gücü gelişimi	10
Şekil 1.9. DRT Temel tipleri çözüm sayıları	12
Şekil 1.10. Dünyada 2006-2019 yılları arasında DRES kurulu güç gelişimi	13
Şekil 1.11. Avrupa Ülkeleri 2030 yılı kapasite beklentileri	13
Şekil 2.1. Üç bacaklı ve dört bacaklı model örnekleri	19
Şekil 2.2. Çalışmadaki model genel görünümüleri	22
Şekil 2.3. Dört ayaklı ve üç ayaklı modeller.	25
Şekil 2.4. Bağlantı yerleri ve türleri	30
Şekil 3.1. Türkiye rüzgâr atlası	34
Şekil 3.2. Açık deniz rüzgâr türbinleri temel tipleri	37
Şekil 3.3. Ağırlık temel	38
Şekil 3.4. Tekil kazıklı temel	38
Şekil 3.5. Grup kazıklı temel	39
Şekil 3.6. Kafes temel	40
Şekil 3.7. Vakumlu keson temel	41
Şekil 3.8. Yüzen temel	41
Şekil 3.9. Rüzgâr türbini boyutsal parametreleri	43
Şekil 3.10. Modele ait boyutsal parametreler	46
Şekil 3.11. Tasarımda kullanılan yüklemeler	49
Şekil 3.12. MTY VE MKY modelleri zemin kesiti ve özellikleri	50
Şekil 3.13. MTY VE MKY yatak katsayıları	52
Şekil 3.14. Küçük genlikli dalga teorisi kesit	55
Şekil 3.15. Kullanılan dalga teorilerinin mertebelerinin dalga şekline etkisi	56
Şekil 3.16. Dalga seçiminde kullanılan Atkins cetveli	58
Şekil 3.17. Deprem kuvveti için seçilen Bozcaada çalışma alanı	60
Şekil 4.1. Sismik yük verileri (AFAD)	63
Şekil 4.2. Bozcaada gözlenmiş ortalama rüzgâr iklimi	63
Şekil 4.3. Bozcaada rüzgâr atlası	64
Şekil 4.4. Ölçeklendirilmiş deprem ivme-spektrum eğrileri	65
Şekil 4.5. Kulesiz modellerin zemine ankastre, yay sabitli ve zemin katı model tanımlı yanal yer değiştirme grafiği	66
Şekil 4.6. Kuleli modellerin zemine ankastre, yay sabitli ve zemin katı model tanımlı yanal yer değiştirme grafiği	67
Şekil 4.7. Ankastre, yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin yanal yer değiştirmeleri	68
Şekil 4.8. Ankastre mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin yanal yer değiştirmeleri.	68

Şekil 4.9. Yay sabiti mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin yanal yer değiştirmeleri.	69
Şekil 4.10. Katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin yanal yer değiştirmeleri.....	70
Şekil 4.11. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kuleli modelin basınç bölgesinde yer alan kazık yanal yer değiştirmeleri.....	71
Şekil 4.12. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kulesiz modelin basınç bölgesinde yer alan kazık yanal yer değiştirmeleri.	72
Şekil 4.13. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kuleli modelin çekme bölgesinde yer alan kazık yanal yer değiştirmeleri.....	73
Şekil 4.14. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kulesiz modelin çekme bölgesinde yer alan kazık yanal yer değiştirmeleri.	73
Şekil 4.15. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modelin basınç bölgesinde yer alan kazık yanal yer değiştirmeleri.	74
Şekil 4.16. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kule taşıyıcılı ve kule taşıyıcılı modelin çekme bölgesinde yer alan kazık yanal yer değiştirmeleri.	74
Şekil 4.17. Kuleli modellerin zemine ankastre, yay sabitli ve zemin katı model tanımlı response etkisinde yanal yer değiştirmesi	75
Şekil 4.18. Kulesiz modellerin zemine ankastre, yay sabitli ve zemin katı model tanımlı response etkisi altında yanal yer değiştirme grafiği..	76
Şekil 4.19. Kuleli ve kulesiz modellerin zemine ankastre, yay sabitli ve zemin katı model tanımlı response etkisi altında yanal yer değiştirme grafiği.....	77
Şekil 4.20. Ankastre mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin modal analiz sonucu.....	82
Şekil 4.21. Yay sabiti mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin modal analiz sonucu.....	83
Şekil 4.22. Katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin modal analiz sonucu	83

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. 2022 yılı ilk 6 aylık dünyadaki rüzgâr santral kurulu gücünün listesi	3
Çizelge 1.2. En yüksek rüzgâr kapasitesi olan 15 ilimizin kurulu güçleri	6
Çizelge 1.3. Avrupa ülkeleri dres sayısı	11
Çizelge 3.1. 5MW taban rüzgâr türbini modeli için brüt özellikler (NREL)	43
Çizelge 3.2. Kanat yapısal özellikleri (NREL)	44
Çizelge 3.3. Nasel ve göbek özellikleri (NREL)	44
Çizelge 3.4. Kule özellikleri (NREL)	44
Çizelge 3.5. Modele ait boyutsal parametreler	46
Çizelge 3.6. Modellere ait genel görünümeler	47
Çizelge 3.7. Modellerde kullanılan malzeme sınıfı ve özellikleri	47
Çizelge 3.8. Modellerde kullanılan elemanların kesit özellikleri	48
Çizelge 3.9. Meyerhof taşıma gücü katsayıları.....	51
Çizelge 3.10. Modellere etki eden dalga yüksekliği ve periyot değerleri	58
Çizelge 3.11. Analizlerde kullanılan yük kombinasyonu	61
Çizelge 4.1. Ankastre mesnet tanımlı kulesiz model için modal analiz sonuçları	79
Çizelge 4.2. Ankastre mesnet tanımlı kuleli model için modal analiz sonuçları .	79
Çizelge 4.3. Yay sabit mesnet tanımlı kulesiz model için modal analiz sonuçları	80
Çizelge 4.4. Yay sabit mesnet tanımlı kuleli model için modal analiz sonuçları .	80
Çizelge 4.5. Katı zemin tanımlı kulesiz model için modal analiz sonuçları.....	81
Çizelge 4.6. Katı zemin tanımlı kuleli model için modal analiz sonuçları.....	82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	Doğrusal dalga teorisinde dalga yüksekliğinin yarısı
A	Birim uzunluktaki alan
c	Kohezyon
C	Dalga hızı
CD	Sürüklenme katsayısı
Cm	Atalet katsayısı
d	Su derinliği
D	Deformasyon yükleri
E	Çevresel yükler (Dalga, Rüzgâr, Deprem)
F	Toplam dalga kuvveti
FD	Birim uzunluktaki sürtünme kuvveti
FI	Birim uzunluktaki atalet kuvveti
g	Yer çekim ivmesi
H	Dalga yüksekliği
L	Dalga boyu
l	Hareketli yükler (Personel vb.)
P	Kalıcı yükler
T	İki tam dalga çukuru veya tam dalga tepesinin aynı noktadan geçene kadar olan süre
u	Dalga parçacığı yatay hız bileşeni
U	Elemanın eksenine normal etki eden su parçacık hızı bileşeni
U	U değerinin mutlak değer
V	Birim uzunluktaki hacim
w	Açısal frekans
w	Dalga parçacığı düşey hız bileşeni
α_x	Dalga parçacığı yatay yöndeki ivme
α_z	Dalga parçacığı dikey yöndeki ivme
Υ	Birim hacim ağırlık
η	Dalganın herhangi bir andaki yüzeyde oluşan yükselmesi
Φ	İçsel sürtünme açısı
dU/dt	Eleman eksenine normal etki eden su parçacık ivmesi bileşeni

1. GİRİŞ

Gelişen ve yenilenen dünyada petrol krizleri, iklim değışiklikleri, çevre kirlilikleri ve yenilenemez enerji kaynaklarının azalması gibi sebeplerden dolayı alternatif enerjilere duyulan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Dünyada ki enerji ihtiyacının birçoğu yenilenemez kaynaklardan elde edilmekte olup bunun sonucunda kaynak sıkıntısı oluşmaktadır. Bunun yanı sıra yenilenemez enerji kaynaklarının başında gelen fosil yakıtların “çevre kirliliğı” meydana getirdiğı bilinmektedir. Oksijenin azalmasına sebep olduğu gibi karbondioksit oranını da artırır. Bu da zamanla iklim değışmelerine sebep olmaktadır. Fosil yakıtların kullanılması sonucunda ortaya çıkan gaz salınımıyla insan sağlığı da etkilenmektedir. Kansere, solunum yolları hastalıklarına da yol açabilmektedir. Ekonomik olarak da büyük bütçe gerektiren yenilenemez enerji kaynaklarının yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması gün geçtikte daha da önemli hale gelmektedir. Bu bağlamda ilk olarak gelişmiş devletlerin öncülüğünde yenilenebilir kaynakların kullanılmasına yönelik teşvikler başlamıştır.

Günümüzde en alternatif yenilenebilir kaynaklardan birisi de rüzgâr enerjisidir. Kullanımı ve üretimi bakımından temiz olması, güneş tarafından devamlı yenilenmesi sayesinde enerji ihtiyacını karşımada önemli bir yer tutmaktadır.

Kara alanlarındaki yetersizlikler, istikrarlı ve devamlı rüzgâr ikliminin sağlanması, daha verimli enerji üretimi gibi nedenler açık deniz rüzgâr türbinlerine olan ilgiyi artırmaktadır.

Açık denizlerde kurulması planlanan rüzgâr türbinlerinin yerlerinin belirlenmesinde derinlik koşulları, askeri sahalar, ülke sınırları, deniz altı kablo hatları, deniz ulaşimleri, rüzgâr hızları göz önünde bulundurulmalıdır.

Ülkemizin üç tarafının denizlerle çevrili olması, konumunun getirmiş olduğu avantajlar ve konumundan kaynaklı yüksek rüzgâr potansiyeline sahip olması rüzgâr enerjisi yönünden birçok ülkeye nazaran ön plana çıkmasını sağlamış, son 10 yılda rüzgâr enerjisinde yaşanan olumlu gelişmelerle birlikte ülkemizde ki enerji ihtiyacının yaklaşık %8 'i rüzgâr enerjisinden sağlanmıştır.

1.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisinin kullanılması M.Ö. ye dayanmakta olup ilk örnekleri ilkel yel değirmenleridir. Bu yel değirmenlerini sulama amacıyla kullandıkları düşünülmektedir. Uzun yıllar boyunca kullanılan yel değirmenleri, şehir içinde kurulmaya elverişli olmadığından insanoğlu elektrik üretebilen yapı arayışına girmiştir. İlk olarak 1891 yılında Danimarka'da Paul La Cour tarafından rüzgâr türbini kullanılarak elektrik elde edilmiştir. Bu rüzgâr türbinin ardından dünyada da rüzgâr türbinlerinin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. 1.Dünya Savaşı'ndan sonra rüzgâr türbinlerine ilgi azalmış olsa da 1973 yılında dünyada yaşanan petrol krizinden sonra enerjiye duyulan ihtiyaç sebebiyle rüzgâr türbinlerine olan ilgi yeniden artmıştır. Bir yandan dünyada da artan nüfusla beraber enerji ihtiyacı da artmış olup günümüzde halen ihtiyaç duyulmaktadır. İnsanoğlu dünyadaki teknolojik ve endüstriyel gelişmelerin eşliğinde enerji arayışında da alternatif çözümler bulmaya çalışmıştır.

Özellikle geçtiğimiz son 20 yıl içerisinde dünyada rüzgâr enerjisi kullanımını yaygınlaştırmak için çalışmalar ivedilikle yürütülmektedir. Şekil 1.1'de dünya toplam rüzgâr kurulum kapasitelerinin tarihsel gelişimi verilmiştir. Ulaşılan verilere göre 2020'de yıllık %53 oranında büyümeyle tarihteki en iyi küresel rüzgâr enerjisi büyümesi gerçekleşmiştir (Joyce Lee, 2021).

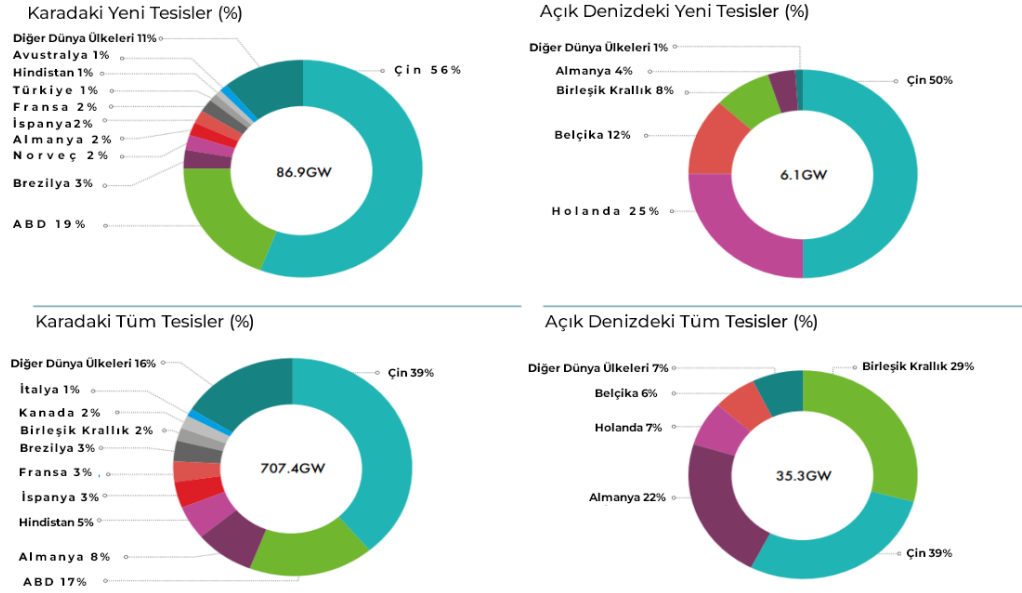


Şekil 1.1. Dünya toplam rüzgâr kurulum kapasitelerinin tarihsel gelişimi (GWEC, 2020)

Günümüzde rüzgâr enerjisi kurulu gücü en yüksek olan ülke Çin’dir. Güncel 2022 yılı ilk 6 aylık dünyadaki rüzgâr santral kurulu gücünün listesi Çizelge 1.1’de verilmiştir. 2020 yılında ülkelere göre kümülatif ve yeni eklenen kara ve açık deniz rüzgâr enerjisi santrallerinin oransal dağılımı Şekil 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. 2022 yılı ilk 6 aylık dünyadaki rüzgâr santral kurulu gücünün listesi (Enerji Atlası, 2021)

Sıra	Ülkeler	Kurulu Güç (MW)
1.	Çin	328.973
2.	Amerika Birleşik Devletleri	132.738
3.	Almanya	63.760
4.	Hindistan	40.067
5.	İspanya	27.497
6.	Birleşik Krallık	27.130
7.	Brezilya	21.161
8.	Fransa	18.676
9.	Kanada	14.304
10.	İsveç	12.080
11.	İtalya	11.276
12.	Türkiye	10.886

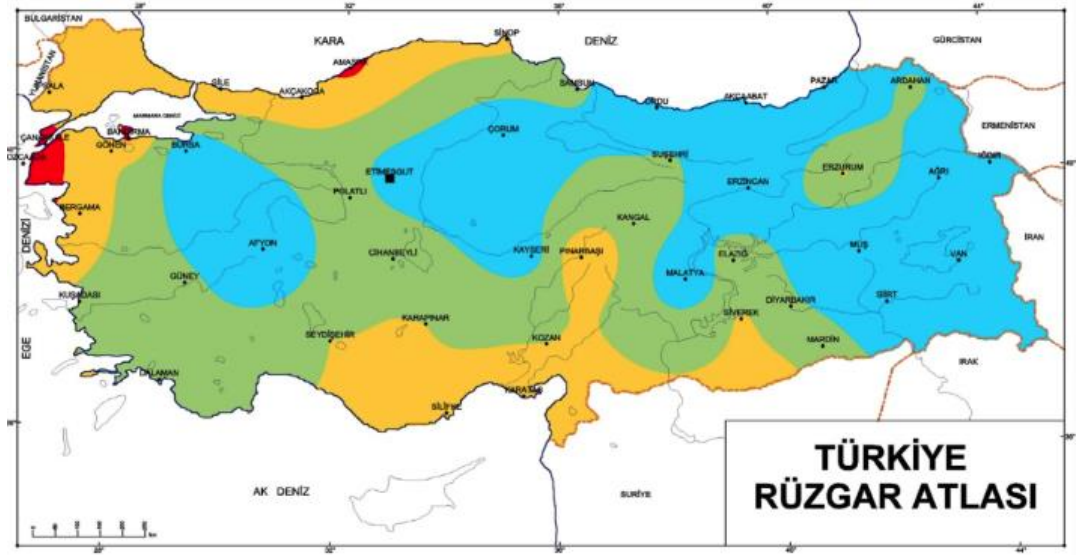


Şekil 1.2. 2020 yılı kara ve açık deniz rüzgâr enerjisi santrallerinin oransal dağılımı (GWEC, 2020)

Şekillerde görüldüğü üzere Çin, rüzgâr enerji santrallerine oldukça önem vermektedir. Hem karada hem de açık denizde rüzgâr enerji santrallerine yaptıkları yatırım ve elde edip kullandıkları rüzgâr enerjisi neredeyse dünya oranının yarısını kaplamaktadır.

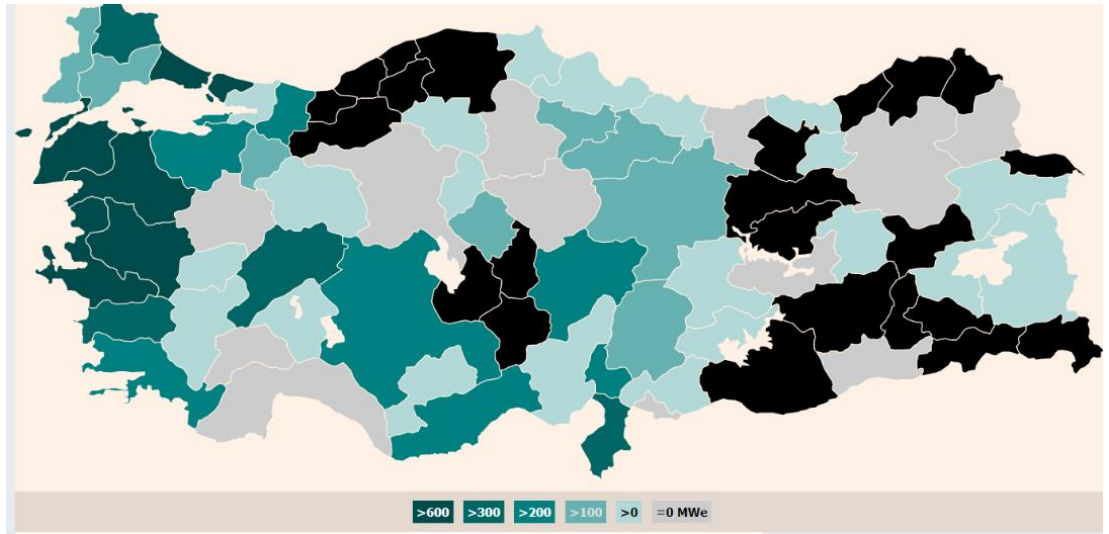
1.2. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi

Dünyadaki gelişen teknolojiyle birlikte Türkiye’de de rüzgâr enerjisi üretiminde ve kullanımında önemli adımlar atılmıştır. Özellikle geçtiğimiz son 20 yıl içerisinde yenilenebilir enerji kullanımına teşvik oldukça fazladır. Bu bağlamda YEKDEM (Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması) ve YEKA (Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları) gibi kuruluşların son 20 yıl içerisinde kurulmuş olup çalışmalarını sürdürdüklerini görmekteyiz. Yapılan araştırmalara göre Türkiye’de rüzgâr potansiyeli bakımından özellikle Marmara, Ege ve Doğu Akdeniz kıyıları oldukça zengindir. Şekil 1.3’te Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan Türkiye Rüzgâr Atlası’nda Türkiye’de 5 farklı topografik durum için yer seviyesinden 50m yükseklikteki rüzgâr potansiyelleri gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Türkiye Rüzgâr Atlası (MGM, 2022)

2021 yılı rüzgâr enerjisinin toplam elektrik üretimi içindeki payı yüzde 9 olarak ölçülmüştür (AA, 2021). Rüzgâr enerjisinin Türkiye'nin toplam elektrik kurulu gücündeki payı yüzde 10'a ulaşırken, rüzgâr enerjisi toplam yenilenebilir enerji kurulu gücünün ise yüzde 19,3'ünü oluşturdu. Böylelikle, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi kurulu gücü 10 bin megavattı aşarken, bu alanda faaliyet gösteren şirket sayısı 3 bin 580'e, doğrudan ve dolaylı istihdam ise 25 bin kişiye ulaştı. Şekil 1.4'te Türkiye Rüzgâr Enerji Santralleri Dağılımı Haritası, Çizelge 1.2'de En yüksek rüzgâr kapasitesi olan 15 ilimizin rüzgâr enerji santrali kurulu gücü verilmiştir.



Şekil 1.4. Türkiye rüzgâr enerji santraller dağılımı haritası (Enerji Atlası, 2021)

Çizelge 1.2. En yüksek rüzgâr kapasitesi olan 15 ilimizin kurulu güçleri (Enerji Atlası, 2021)

İller	Kurulu Güç (MW)
İzmir	1700
Balıkesir	1300
Çanakkale	850
Manisa	750
İstanbul	420
Hatay	415
Kırklareli	415
Aydın	400
Afyonkarahisar	325
Kayseri	272
Osmaniye	260
Konya	242
Muğla	220
Bursa	205
Mersin	200

En son yapılan istatistiksel analizlere göre 2021 yılı aralık ayı itibari ile Türkiye'deki rüzgâr enerjisi türbin sayısı 3868'e toplam kurulu güç ise 10.58 GW'a ulaştı. 1 Nisan 2022 tarihinde 189 bin 258 MWH tüm zamanların en yüksek rüzgâr enerjisi üretimi gerçekleşti.

1.3. Rüzgâr Türbinleri ve Çeşitleri

Dünyada giderek artmakta olan enerji kaynaklarındaki tüketim ve enerji fiyatlarının yükselmesi gelişmiş ülkelerde farklı ve doğal enerji kaynakları arayışını doğurmuştur. Bunlardan biri de son yirmi yılda hızlı bir artış gösteren açık deniz (offshore) rüzgâr türbinleri ve buna bağlı teknolojilerdir. Günümüzde rüzgâr enerjisi rüzgâr türbinleri vasıtasıyla elektrik enerjisi üretmek için kullanılmaktadır. Rüzgâr türbini, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir. Rüzgâr enerjisinin mevcut olarak karalara kurulan (onshore) ve açık denizlere kurulan (offshore) rüzgâr türbinleri olarak iki uygulaması vardır.

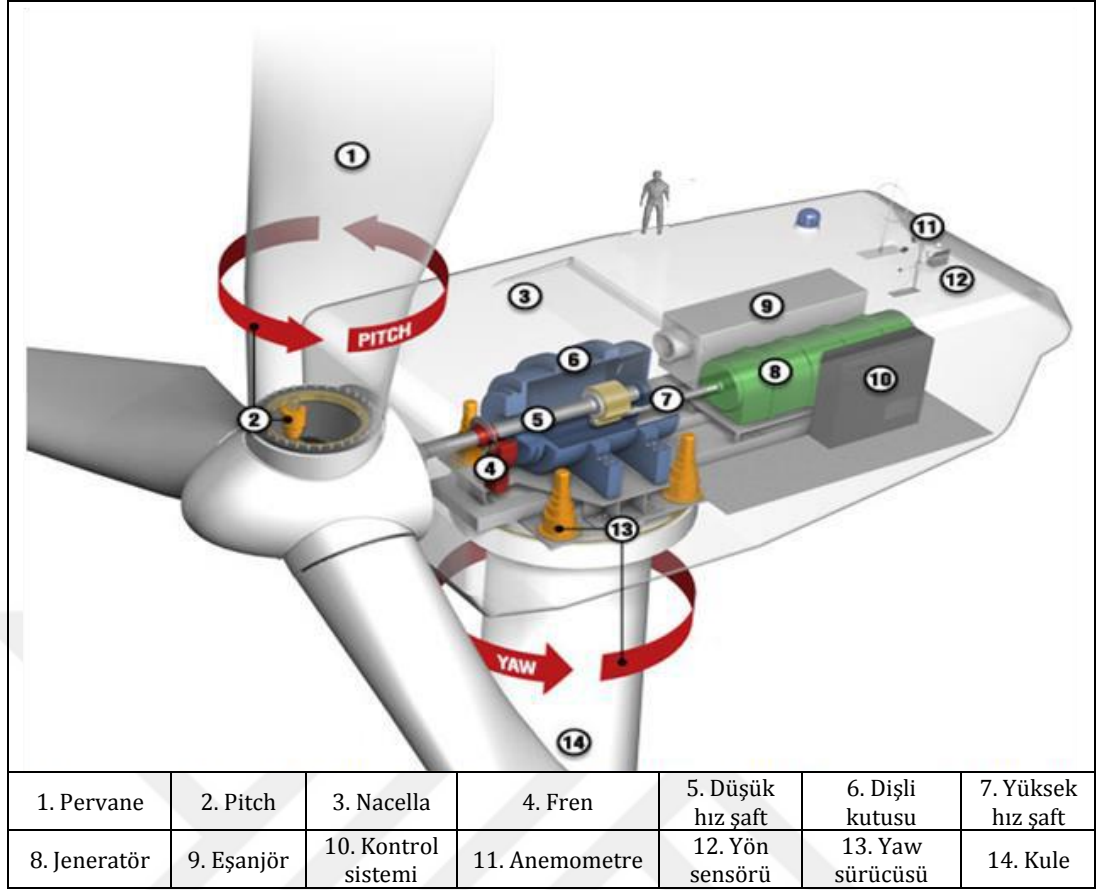
Denizlerde görülen rüzgârlar karada görülen rüzgârlara göre daha hızlı ve daha şiddetli olduğundan açık deniz yapıları enerji üretimi için daha avantajlıdır. Bu avantajların yanında bir de konum olarak yaşamın düzenini etkilemediğinden

konum olarak da daha uygun bir yöntemdir. Öte yandan açık deniz rüzgâr türbinleri karadaki rüzgâr türbinlerine kıyasla 1.5-2 kat daha maliyetli olabilmektedir. Bu nedenle Offshore rüzgâr türbinlerinin kurulumuna karar verilirken, kârlılık hesaplamalarında kurulum ve bakım maliyetleri göz önüne alınması gereken en önemli noktalardan biridir.

Bir rüzgâr türbini genel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik elektronik elemanlar ve pervaneden oluşur. Rüzgârın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Pervane milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki jeneratöre aktarılır. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya doğrudan alıcılara ulaştırılır. Şekil 1.5'te rüzgâr türbini bileşenleri verilmiştir.

Rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine, devirlerine, güçlerine, kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, dişli özelliklerine ve kurulum konumlarına göre sınıflandırılırlar. Rüzgâr türbin çeşitleri Şekil 1.6'da verilmiştir.

Kullanımdaki rüzgâr türbinleri boyut ve tip olarak çeşitlilik gösterse de genelde dönme eksenine göre sınıflandırılır. Rüzgâr türbinleri dönme eksenine göre “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri” (YERT) ve “Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri” (DERT) olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Şekil 1.7'de rüzgâr türbini sınıfları gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Rüzgâr türbini bileşenleri (DÜRED, 2021)



Şekil 1.6. Rüzgâr türbini çeşitleri (Elibüyük ve Üçgül, 2014)



a) Yatay eksen



b) Dikey eksen

Şekil 1.7. Rüzgâr türbini sınıfları a) Yatay eksen, b) Dikey eksen

1.3.1. Dönme eksenlerine göre rüzgâr türbini çeşitleri

Kullanımdaki rüzgâr türbinleri boyut ve tip olarak çeşitlilik gösterse de genelde dönme eksenine göre sınıflandırılır. Rüzgâr türbinleri dönme eksenine göre “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri” (YERT) ve “Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri” (DERT) olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar.

1.3.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde; dönme eksenini rüzgâr yönüne paralel, kanatlar rüzgâr yönüne diktir. Ticari türbinlerin çoğu yatay eksenlidir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri rüzgârı önden en iyi alacak şekilde döner bir tabla üzerine yerleştirilir. Bu türbinlerde rotor kanatların sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık %45’dir. YERT genel olarak yerden 20-30m yüksekte ve çevredeki engellerden 10m yüksekte olacak şekilde yerleştirilmelidir (Enerji Portalı, 2019).

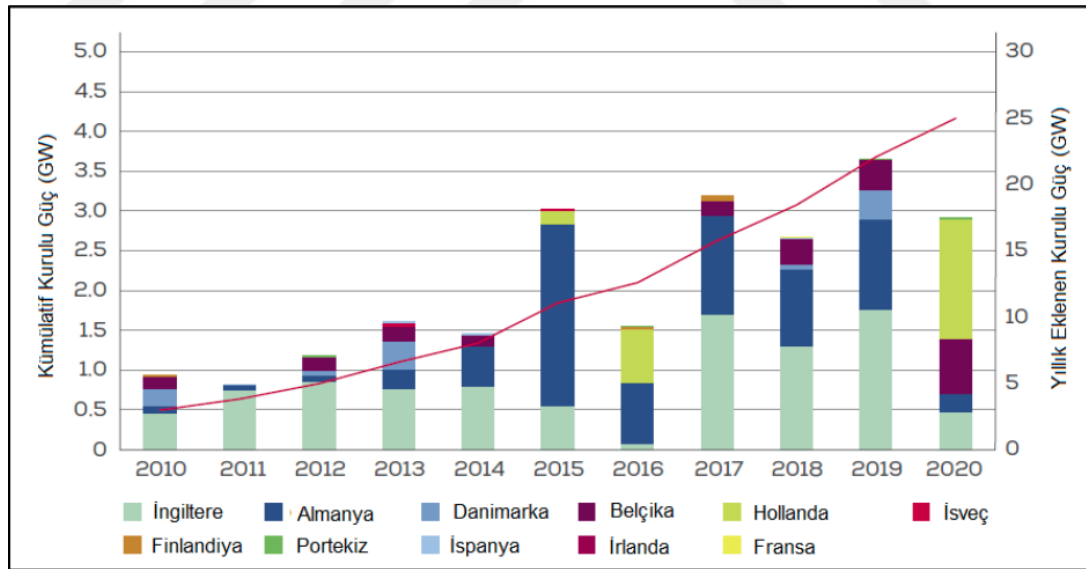
1.3.1.2. Düşey (dikey) eksenli rüzgâr türbinleri

Dönme eksenleri rüzgâr yönüne dik ve düşey olmakla birlikte türbinlerin kanatları da düşeydir. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri rüzgârı her yönden alıp kullanabilmektedir. Bu yönüyle diğer türlerine göre avantajlıdır. Yüksek rüzgâr gücünde verimi YERT’e göre daha düşüktür. DERT’lerin verimi yaklaşık %35’dir (Enerji Portalı, 2019).

1.4. Dünya ve Avrupa’da Offshore Durumu

Gelişen dünyada büyük endüstriyel ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak özellikle de Almanya ve Danimarka gibi ülkelerin öncülüğünde rüzgâr türbinleri gün geçtikçe ilerleme kaydederek günümüze kadar gelmiştir. Kara üstünde RT’lerin kullanımı yaygınlaşırken bir yandan RT’lerin denizüstü için de kullanılabilmesi için çalışmalar yürütülmeye başlanmıştır. Bu hususta Danimarka denizüstüne RT kurmanın çalışmalarını başlatarak 1991 yılında ilk denizüstü rüzgâr elektrik santralini (DRES) Vindeby’de o zamanki adıyla Bonus marka 11 adet 450 kW’lık türbinler kullanarak 4.95 MW gücündeki proje ile başlamıştır (DÜRED, 2021).

2020 yılında toplam 356 adet Denizüstü Rüzgâr Türbini montajı yapılarak 2918 MW yeni kapasite eklenmiştir ve Avrupa’da toplam kurulu güç 2020 yılı sonu itibarı ile 25 014 MW olmuştur. Şekil 1.8’de Avrupa Ülkeleri’ndeki DRES kurulu gücü gelişimi verilmiştir. ORES Raporu’na göre 2050 yılı sonuna kadar Avrupa Ülkeleri, 300 GW DRES hedeflemektedir.



Şekil 1.8. Avrupa ülkelerinde DRES kurulu gücü gelişimi (DÜRED, 2021).

Çizelge 1.3’te Avrupa Ülkelerinde 2020 yıl sonuna göre DRES ve DRT sayıları ve kurulu güç değerleri görülmektedir. Avrupa ülkelerinde önümüzdeki yıllarda DRES projelerine ağırlık verileceği öngörülmektedir.

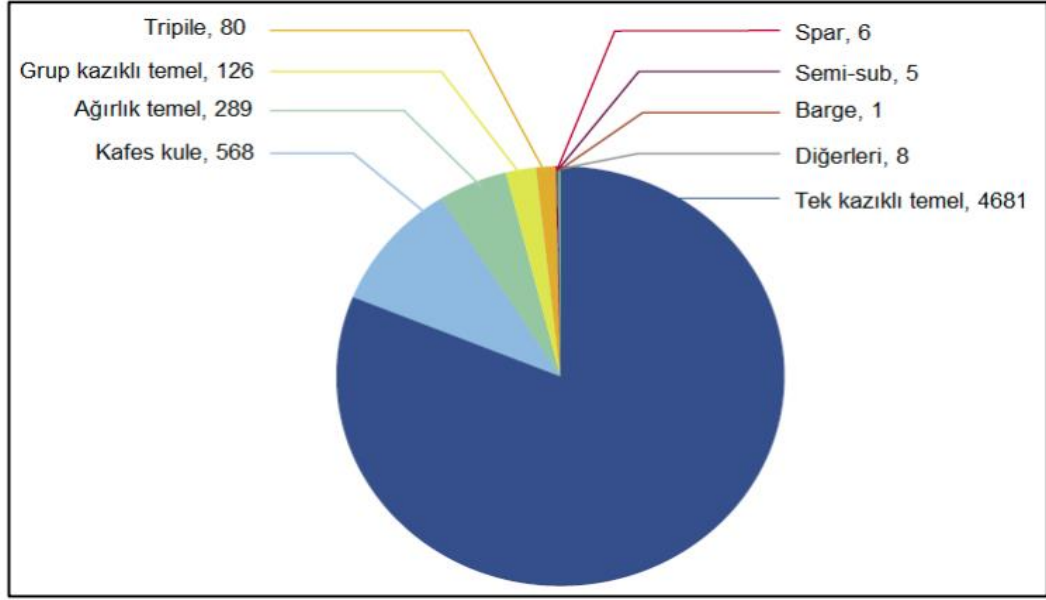
Çizelge 1.3. Avrupa ülkeleri dres sayısı (DÜRED, 2021).

Ülke	Dres Sayısı	Toplam Kurulu Güç (Mw)	Drt Sayısı
İngiltere	40	10428	2294
Almanya	29	7698	1501
Hollanda	9	2611	537
Belçika	11	2261	399
Danimarka	14	1703	559
İsveç	5	192	80
Finlandiya	3	71	19
İrlanda	1	25	7
Portekiz	1	25	3
İspanya	1	5	1
Fransa	2	2	1
Norveç	1	2	1
Toplam	116	25014	5402

DRT kurulu gücü 2016 yılından bu zamana yılda %16 büyümeye göstermiştir. Avrupa ülkelerinde 2020 yılına göre ünite kurulu gücü 8.2 MW'dır. Son zamanlarda gelişen teknolojik ilerlemelere bakıldığında 2022 yılında ünite kurulu gücü 12 MW civarında olacağı beklenmektedir.

DRES'lerin kurulduğu proje sahasının su derinliği ise 2020 yılında 36 m olmuştur. DRES proje sahaları zaman içerisinde sahilden daha uzak mesafeye doğru kaymaktadır. İki yüzer temelli DRES projesi Kincadrine (İngiltere) 67 m ve Windfloat Atlantic (Portekiz) 100 m su derinliğinde yapılmıştır. En derin sabit temelli DRT 45 m ile Moray East (İngiltere) DRES projesinde montajı yapılmıştır. Derin olmayan sulardaki DRES projelerinin büyük bir çoğunluğu tek kazıklı temel kullanılarak yapılmıştır.

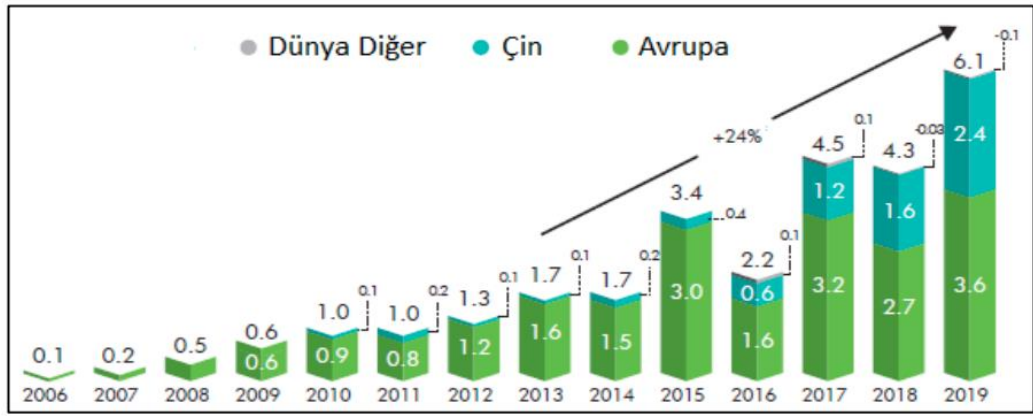
2020 yılında inşaatı bitirilen DRT'lerde % 80,5 oranında tek kazıklı temel (monopile foundation) en fazla kullanılan temel çözümdür. Avrupa bugüne kadar işletmeye alınan DRES'lerdeki DRT temeli % 81.2 ile ilk sıradadır. Kafes temel (jacket) % 9.9, ağırlık temel (gravity) %5, grup kazıklı temel (Tripod) %2.2 ile sıralanmaktadır. Şekil 1.9'da DRT'lerde kullanılan temel çözümü sayıları görülmektedir.



Şekil 1.9. DRT Temel tipleri çözüm sayıları (DÜRED, 2021).

1.4.1. Dünyada DRES durumu

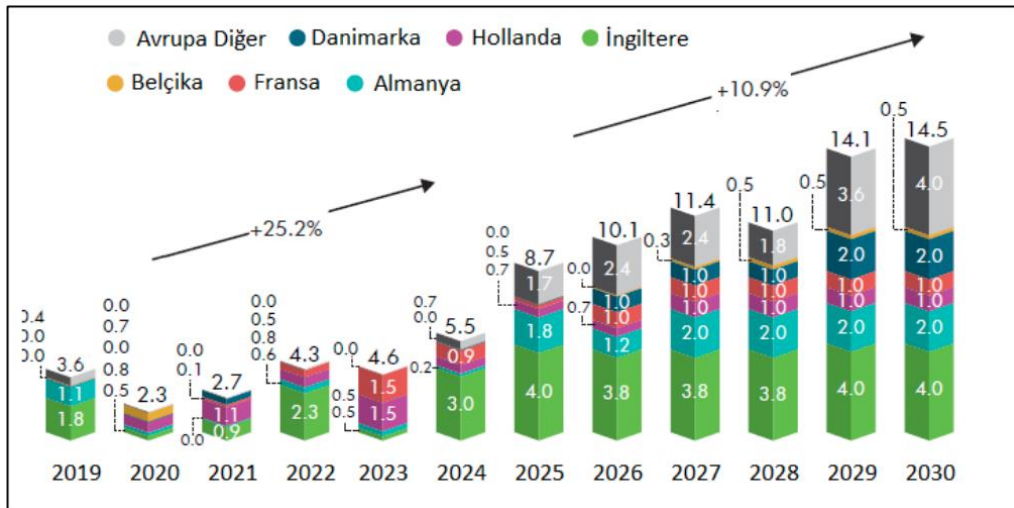
Avrupa ülkelerinin yanında Asya ve ABD’de DRES projeleri gerçekleştirilmektedir. Asya’da ki Çin, Japonya gibi ülkeler ve daha öncesinde Avrupa ve ABD’de yapılan yatırımlar bu konuda onlara da öncülük etmiştir. En önemli nokta özel sektör ve kamunun birlikte çalışmasıdır. Dünyada 2019 yılında eklenen 6.1 GW kapasite toplamda kurulu gücü 30 GW’a yaklaştırmıştır. 2020 yılında 6 GW yeni denizüstü RES kapasitesi işletmeye alınmıştır. 2020 yılında yapılan DRES ihalelerinde 1005 MW kapasite verilmiştir ve bu kapasitenin 759 MW’ı Hollanda’da, kalan kapasite de Çin’de ihale edilmiştir. Şekil 1.10’da 2006-2019 yılları arasındaki dünya DRES kurulu güç gelişimi verilmiştir.



Şekil 1.10. Dünyada 2006-2019 yılları arasında DRES kurulu güç gelişimi. (DÜRED, 2021).

1.4.2. Avrupa Ülkeleri 2030 yılı kapasite beklentisi

Avrupa ülkeleri 2030 yılına kadar kapasite projeksiyonları belirlemiştir. Özellikle ana marketler olan İngiltere, Almanya, Danimarka ve Belçika net hedefler belirlemiştir. İlk DRES projesinin yapıldığı 1991 yılından bu yana geçen 30 yıl içerisinde DRES projeleri piyasa ile rekabet edebilir hale gelmiştir. Avrupa’da 2025 yılında 8.7 GW kurulu güce ulaşılması beklenmekte; 2030 yılına kadar ise 15 GW hedeflenmektedir. Ayrıca AB Komisyonunun öngörüsüne göre, 2050 yılında 240 GW DRES kapasitesine ulaşılması belirtilmiştir. İngiltere, Avrupa’da DRES piyasa liderliğini sürdürmeyi devam ettirerek 2030 yılına kadar 40 GW kapasite hedefi koymuştur. Şekil 1.11’de Avrupa Ülkeleri 2030 yılı kapasite beklenti tahminleri verilmiştir (DÜRED, 2021).



Şekil 1.11. Avrupa Ülkeleri 2030 yılı kapasite beklentileri (DÜRED, 2021).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapılan bu tez çalışma konusuyla ilgili açık deniz rüzgâr türbini, açık deniz petrol arama platformları gibi açık deniz yapıları ile ilgili çalışmalar hakkındaki bilgiler bu bölümde kısaca sunulmuştur.

Altunsu (2020), çalışmasında çevresel etkiler türbinin çalışma durumuna göre seçilmiş ve farklı koşullarda değerlendirilmiştir. Birinci durum türbin çalışması sırasında depremin etki etmediği ikinci durum türbinin çalışmadığı anda deprem etkisinde üçüncü olarak türbinin rölanti halinde rüzgâr yüklerinin etki etmesi dördüncü olarak türbin normal çalışma anında iken depremin etki ettiği ve türbin rölanti halindeyken depremin etki ettiği olarak toplamda 5 adet durum altında incelenmiştir. Yapılan tez çalışmasında dizayn yapılmamış olmasına rağmen API standartlarında geçen öneriler üzerinden çalışma yapılmıştır. Rüzgâr yükleri Turbsim adlı programda Türbülans modeli esas alınarak simüle edilmiştir. Operasyonel koşullar için 3m/sn ve 23m/sn hızlar arasında artırılarak türbülanslı rüzgâr verileri kullanılmıştır. Türbinler 25m/sn üzerindeki hızlarda rölanti moduna geçer bu sebeple 25m/sn ve 50m/sn arasında bulunan rüzgâr yükleri de türbülanslı durumlar için ele alınmıştır. Yapılan çalışmada rüzgâr türbinlerinin kullanıldığı alana göre deprem analizlerinin yapılmasının gerekli olduğu vurgulanmış, ama deprem anında yapısal elemanlarda oluşan iç kuvvetlerde ciddi artışlar olduğu ama güç üretiminin değişmediğini gözlemlemişlerdir.

Zarrin vd. (2021), çalışmalarında birden fazla noktalı itme analizi metodu üzerinde çalışma yürütmüşlerdir. Açık deniz yapılarında çevresel yükler altında yapılan statik itme analizleri performans noktalarının saptanmasında önemli rol almaktadır. Geleneksel itme analizlerinde ileri mod durumu önemsenmemektedir. Çalışmalarında ileri mod durumları değerlendirilmiştir. İtme analizinin karşılaştırılmasında uzak bölgelerdeki deprem durumlarının reaksiyonları karşılaştırılmıştır. Statik itme analizi açık deniz yapılarının doğrusal olmayan davranışları konusunda bilgilendirmektedir. Performans noktalarının saptanmasında basit ve kullanımı kolay olmasından kaynaklı yaygın olarak kullanılmaktadır. Taban kesme ve yer değiştirme (deplasman) değerlerine

ulaşılması bu çözümlemeyi etkili bir hale getirmektedir. Yapılan çalışmada birinci modun etkili olduğu durumlarda uygulanan itme analizi neticesinde üst taraflarda yer alan çaprazlarda, ikinci modun etkili olduğu durumlarda daha altlarda yer alan çaprazlarda burkulmalar olduğu gösterilmektedir. Kafes tipi yapılarda sık görülen davranışların tersine bir davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Taşıyıcı sistem ve temel arasındaki bağlaşımla olduğu ikinci ve üçüncü modların periyotlarının spektral değerleri sismik sürüklenmelerle istatistiksel çalışmalardan anlaşılmaktadır. İleri mod durumları için taşıyıcı sistem reaksiyonlarının saptanmasında önemli olduğu görülmektedir. Yüksek mod durumlarının yapının davranışına etkisini artırmak amacıyla platform esnekliğini artıracak yüksek mod değerleri etkileri dikkate alınması gerekliliği atfedilebilir. Dolayısıyla zemin yapı kazık etkileşiminde yapılan modellemenin doğru bir şekilde yapılmalı ve ileri mod durumlarıyla itme analizi gerçekleştirmek gerekmektedir.

Çelik vd. (2020), çalışmalarında dalga yüksekliğini sabit tutmuşlar ve değişkenlik gösteren dalga periyotlarının yapı üzerindeki etkisini gözlemlemişlerdir. 90m, 150m ve 250 m olarak tasarlanan modeller üzerinde çalışmalarını yürütmüşlerdir. Analizlerde Structural Analysis Program (SAP200) yapısal analiz programını kullanmışlardır. Küçük Genlikli Dalga Teorisine (Lineer, Airy) göre dalga boyutlandırmaları yapılmıştır. Statik itme analizleri yapılarak yapısal sınırların belirlenmesi sağlanmıştır. Analizlerde rüzgâr kuvvetleri dalga hesaplarına dahil edilmiştir. Yapılan çalışmalarda kütle katılım oranlarının ileri mod durumlarında dikkate alınır hale geldiğini ve periyotlarının az olmasından kaynaklı olarak dalga kuvvetiyle yapı rezonansının gerçekleşmediği görülmüştür. Akdeniz Bölgesi baz alınarak yapılan çalışmada kullanılan dalga yüksekliklerinin yer değiştirme değerleri statik itme analizleri ile kıyaslanarak grafiklerin lineer bölgede kaldığı görülmüştür. Yapılan çalışmada rüzgâr kuvvetinin de önemi vurgulanmıştır.

Ivanhoe (2020), çalışmalarında, analiz için beş sınır durumu dikkate almıştır. Bunlar; burkulma, sapma, yorulma, frekans ve nihai sınır durumlarıdır. Her bir sınır durumunun altındaki güvenilirlik indeksi daha sonra düşük olasılık değerlerinin hesaplanmasına olanak sağlamak için FORM (birinci dereceden

güvenilirlik yöntemi) kullanılarak hesaplanabileceğini önermişlerdir. Önerdikleri çerçeveyi, yapının kritik bileşenlerinin güvenilirliğini değerlendirmek için yazılarında “NREL 5 MW OWT OC4” olarak adlandırdıkları ceket uygulamışlardır. Güvenilirlik değerlendirmesinden dikkate alınan koşullar için ceket yapısının yapısal bileşenlerinin kabul edilebilir güvenilirlik seviyeleri içinde bulunduğunu savunmaktadırlar. Tasarımlarda yükler, dayanımlar ve yapısal modellemelerdeki belirsizlikler nedeniyle olasılık tabanlı yöntemlerin kullanılmasının potansiyel olarak avantajlı olduğunu ifade etmişlerdir. Bir yapının tasarım ömrü içinde tatmin edici bir performans göstermesi gerekmekte olup açık deniz rüzgâr türbinleri için en az 25 yıl boyunca güvensiz hale gelmediği anlamı taşıdığını söylemişlerdir.

Shittu vd. (2020), çalışmalarında ceket destek yapılarının güvenilirlik değerlendirmesi için bir formülasyona dayalı olarak genel bir çerçeve geliştirmişlerdir. 10 MW’lık bir temel 10 MW NREL rüzgâr türbininden oluşan dikey yüksekliği 66 m olup, kazıklar 42 m toprağa gömülmüş ve 50 m okyanusa daldırılması planlanan ceket tipi yapı modellemesinde Ansysys programı kullanılmıştır. Çevresel koşullar göz önünde bulundurularak dalga, rüzgâr ve akım gibi yükler manuel olarak hesaplanmış ve modele dahil edilmiştir. Dalga kuvvetlerinin hesaplanmasında Morrison denklemi kullanılmıştır. Açık deniz yapılarının analizinde sıkça tercih edilen yöntemlerden olan, dalga teorisi ve dalga kinematik özelliklerini tahmin etme konusundaki kesinliği ile Stokes dalga teorisi kullanılmıştır. Dalga profili verilerinden Stokes üçüncü derece dalga teorisi, dalga karakteristiklerini ve davranışlarını modellemek amacıyla dikkate alınmıştır. Daha spesifik olarak, ceket destek yapılarının parametrik bir FEA (sonlu eleman analizi) modeli, değişen girdi koşulları altındaki tepkisini haritalamak için yük ve yapı-zemin etkileşimini birleştirerek geliştirilebileceğine değinmişlerdir. Açık deniz rüzgâr türbinleri, çevresel yüklerde ve zemin özelliklerinde önemli belirsizlikler bulunan zorlu deniz ortamlarında inşa edilmektedir. Bu da değerlendirmelerini zorlu bir görev haline getirmekte ve bu belirsizlikleri sistematik olarak hesaba katmak için güvenilirlik değerlendirmesini en uygun yaklaşım olarak nitelendirmektedirler. Açık deniz rüzgâr türbinlerinde zemin sistemine kazıklar aracılığı ile sabitlendiğinden,

yapının tepkisini maksimum düzeyde yakalamak amacıyla yapı-zemin etkileşimini hesaba katmanın önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Wang vd. (2020), çalışmalarında açık deniz rüzgâr türbinleri sabit kule tipi taşıyıcı sisteminin (Jacket) dalgayla olan etkileşimini incelemişlerdir. Çalışmalarında 0-50 mt su derinliğine sahip alanları tercih etmişler bu derinlikte inşa edilen yapıların dik ve kırılma dalgalarının etkisinde kaldığını, maruz kalınan bu durumun yapılarda önemli derecede hasarlara sebep olduğunu söylemişlerdir. Dalga teorisinde kullanılan denklemler, formüller ve hesap yöntemlerinin yaygın olarak tek kolon tipine uygun yapılar için kullanıldığı sabit kule tipi yapılara uygun olmadığını belirsiz olduğu ifade edilmiştir. Deneysel modeller ile analitik modeller arasındaki ilişkiler üzerine çalışmışlardır. Sabit kule platform yapılar için Morrison denklemi kullanılması kırılma olmadan dik dalgalar için çok iyi sonuçlar verdiği söylemektedirler. Kırılma dalgalarının hesaplanmasında yarı statik ve darbeli çarpma kuvvetinin bileşmelerine bölünerek hesaplanması gerektiği söylenmektedir. Yarı statik kuvveti Morrison Denklemi'yle doğru bir şekilde hesaplanmaktadır. Çalışmalarında kırılan dalga'nın yapıyla olan ilişkisini varsa aralarında ilişkiyi belirlemeyi hedeflemişlerdir. Yaptıkları çalışmada Morrison denkleminin kırılmayan dalgalar konusunda ki doğruluğunu deneysel olarak irdeleyerek geçerliliğini ve doğruluğunu vurgulamışlardır. Çarpma kuvveti ve yarı statik dalga kuvveti olarak tanımlanan dalga yaklaşımlarının sonuç verdiği ayrıca doğru dalga kinematiğinin uygulanmasının önemi vurgulanmıştır.

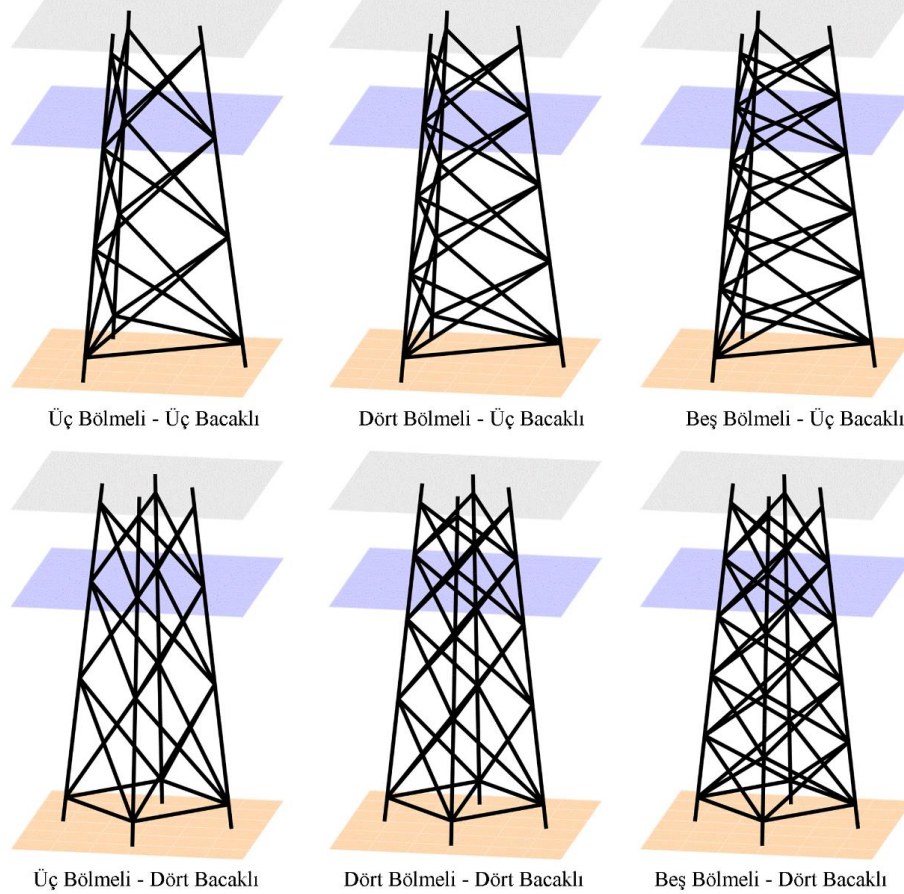
Musa (2019), açık deniz rüzgâr türbinleri sürekli olarak hidrodinamik ve aerodinamik yüklere maruz kalırlar. Bu nedenle çevresel yükler Açık deniz rüzgâr türbinin yapısının taşıyıcı sisteminde tasarımında göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur. Yapılan çalışmada aerodinamik ve hidrodinamik yükler altında açık deniz rüzgâr türbininin destek yapısının davranışının incelenmesi asıl amaçtır. Bu amaçla aerodinamik rüzgârın etkisiyle beraber hidrodinamik dalgayı analiz etmenin önemli olduğu vurgulanmıştır. Yapılan çalışma Ansys programında yapılmış olup Von-Mises gerilmelere ve deplasmanlar açısından incelenmiştir. Yüklemler de iki ayrı tanımlama yapılmıştır. İlk yüklemede Aerodinamik yük ve de hidrodinamik yük aynı yönde

yapıya etki ettiği düşünülürken yükleme durumu 2 içinde tam ters yönde etki ettiği varsayılmıştır. Von-Mises gerilmeleri açısından inceleme yapıldığında rüzgâr türbini kulesinde gerilme yığılması olduğu belirlenmiş ve bunun giderilmesi için iki ayrı yöntem tavsiye edilmiştir.

Kaynia ve Amir (2019), çalışmalarında açık deniz rüzgâr türbini tasarımlarında deprem analizleri üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Geçtiğimiz on yıldan bugüne yenilebilir ve temiz enerjiye olan ilgi rüzgâr enerjisine olan ilgiyi artırmıştır. Açık deniz rüzgâr türbinleri tasarımda ki aerodinamik, hidrodinamik ve sismik yükler büyük sorunlar teşkil etmektedir. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin sismik durumlarını gözden geçirmişler, düşey doğrultuda oldukça yüksek doğal frekanslardan dolayı düşey deprem uyarımına hassas olduğunu ifade etmişlerdir. Makalelerinde açık deniz rüzgâr türbinlerinin deprem yüklemesi için tasarımın performansa dayalı hususlar tarafından yönlendirilmesi gerektiğini söylemişlerdir. Çeşitli doğrusal ve doğrusal olmayan çözüm algoritmaları kullanılan rüzgâr türbinlerinin sismik açıdan yapı-zemin etkileşiminin sayısal analizleri, yapı-zemin etkileşiminin dahil edilerek rüzgâr türbinleri üzerindeki deprem yüklerini %10'a kadar azaltılabileceğini vurgulamışlardır. Sonuç olarak açık deniz rüzgâr türbini sismik tasarımında performansa dayalı analizlerin önemi açıkça vurgulanmıştır.

Häfele vd. (2019), çalışmalarında açık deniz yapıları ceket tipi modellerin taşıyıcı sistemi optimizasyonu üzerinde gerçekleştirmişler yapısal optimizasyon problemi olarak genellikle yapının tüm kütesini en aza indiren boruların boyutlandırılması olarak kabul edilebileceğinden bahsetmişlerdir. Ceket tipi yapılarda optimizasyon işlemi genellikle belirli tasarım kısıtlamaları çerçevesinde maliyeti minimize etmek olarak tanımlanmıştır. Bu kısıtlamaların yorgunluk ve aşırı yükleme olduğu varsayılmaktadır. Çalışmalarında ceket tipi yapıların yorulma ve aşırı yük dirençleri ile ilgili geçerliliğı kontrol etmek amacıyla yapısal tasarım kontrolleri yapılmıştır. Yorulma kontrolleri için DNV nihai sınır durum kontrolleri için NORSOK standartları kullanılmıştır. Alman Kuzey Denizi'ndeki FINO3 araştırma platformunda kaydedilen ölçümler ve çevresel koşullar göz önünde bulundurulmuş ve tasarım için gerekli yükler belirlenmiştir. Bu yaklaşımları için verilen topolojinin her durumda sabit olduğu

varsayımında bulunmuşlardır. Mevcut yazıları, bu konuya daha detaylı bir geometri, maliyet ve yapısal tasarım esaslarının kontrolü ile katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Önerdikleri yaklaşım ile rüzgâr çiftliği planlamasında karar vermeye yardımcı rehberlik etmeyi amaçlamaktadırlar. Çalışma neticesinde 50 mt su derinliğinde yaklaşık 5 MW nominal güce sahip açık deniz rüzgâr türbini taşıyıcı sisteminde üç bölmeli üç ayaklı modellerin maliyet açısından en ideal çözümü sunduğunu savunmuşlardır. Boru boyutlarını artırmak ve yapısal eleman sayısını minimuma seviyede tutmanın ek yük taşıma kapasitesini artırmak amacıyla ekstra bir ayak eklemekten daha ideal çözüm olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarındaki sonuçlardan üç bacaklı modellerin bu çalışmalarındaki parametreler için dört bacaklı modellere göre tercih edilebilecekleri olduğuna karar kılmışlardır. Kütleye bağımlı maliyet fonksiyonlarının belirlenmesinde sadece ceket bacaklarının dikkate alınmasının daha uygun olacağını ayrıca belirtmişlerdir. Şekil 2.1’de çalışmalarında kullanılan üç ve dört bacaklı model örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.1. Üç bacaklı ve dört bacaklı model örnekleri

Alessi vd. (2019), ceket tipi yapıların yer altı kaynaklarının olduğu bölümlerde kaynakların çıkarılması için yapıldığını, kaynaklar bittiğinde ise bu yapıların yerinin değiştirilmesi ya da servis ömrünü tamamlamış ise kaldırılması gerektiğini söylemişlerdir. Bu fikirlere ek olarak çalışmalarında bu yapıların açık deniz rüzgâr kulelerine dönüştürülebilme olasılığını araştırmışlardır. Çalışmalarında aynı açık deniz kafes yapısı için farklı güçlendirme işlemlerini kontrol analizi için bir yaklaşım sunmayı amaçlamışlardır. Matlab ve Strand7 programlarını kullanarak çok sayıda farklı yük kombinasyonlarını simüle ederek bu işlemin yerine kullanılan pahalı ve daha çok zaman isteyen analiz programlarını kullanmadan istenen verileri sunmuşlardır. Bu çalışmalarının istenen değerlere yakın tahminler gerçekleştirdiğini fakat sınırlamalardan arınmış olmadığını söylemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın hizmet dışı kalmış ceket tipi platformların açık deniz rüzgâr enerjisi üretimi için kullanılmasının güvenilirliğinin analizi için başlangıç çalışması olduğunu söylemişlerdir.

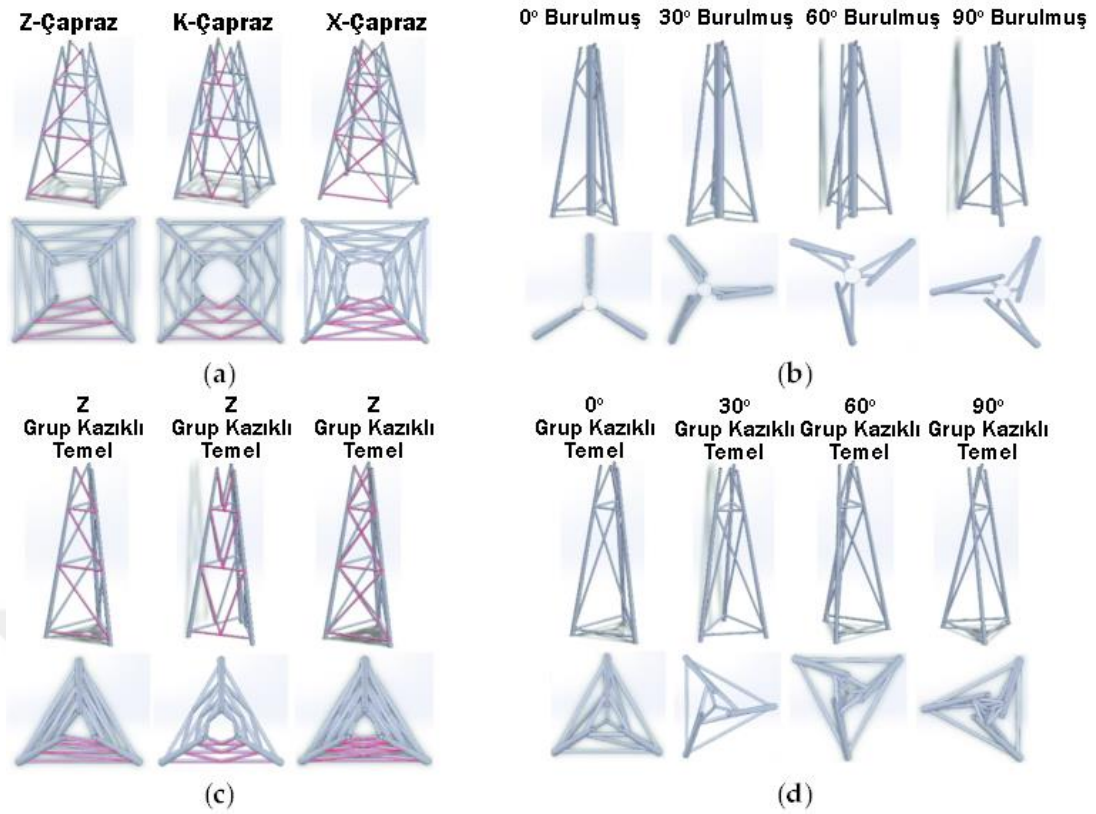
Srikanth ve Ishwarya (2016), çalışmalarında sabit açık deniz platformlarının yapısal davranışını incelemişlerdir. Offshore Structure Design and Analysis Program (SACS) programı ile analizlerini gerçekleştirmiş ve değişkenlik gösteren çaprazlamalar ile dalga-sismik yükler altında yapısal davranışı incelemişlerdir. Yapı zemin etkileşimi göz önüne alınarak yapılan model kapsamında sabit mesnetlenme koşuluyla yapı zemin etkileşimi karşılaştırılmıştır. Çalışmalarında kolon eğimlerinin optimum seviyesini % 16 olarak bulmuşlardır. Kolon eğimleri kıyaslanarak yapılan çalışmalarda % 16 yani optimum seviyede yapılan çalışmalarda % 2 daha hafif olarak çözüm yapılmıştır. Farklı çaprazlama teknikleri incelenmiş yapılan çaprazlamaların çok fazla etki etmediği ayrıca statik itme analizlerinde çaprazların yaklaşık olarak aynı yük değerleri altında burkulduğu söylenmektedir.

Chen vd. (2016), çalışmalarında Tayvan Boğazı'ndaki NREL 5-MW temel rüzgâr türbinine benzer 50 m su derinliğine sahip bir açık deniz ceket tipi yapı üzerinde araştırma yapmışlardır. Yapıların boyutlarını, bu tür yapıların genellikle benzer yük taşıma kapasitesine sahip olmasını sağlamak amacıyla statik gerilme analizleri kullanılarak yinelemeli tasarım yapmışlardır.

NORSOK standartları kullanılarak yapılan analizlerde basınç elamanlarının yerel burkulma mukavemeti incelenmiş, ölçeği küçültülen deneylerle doğrulama gerçekleştirilmiş ve tüm yapıların sayısal burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Açık deniz rüzgâr türbini yapısının tamamına uygulanan yük kombinasyonlarının karmaşık olması ve sahaya özgü yüklerden kaynaklı olarak rüzgâr türbini kulesi ve gövdesi yapıya tanımlanmamış, ağırlıklıya birlikte rüzgâr türbini ve kulesine etkiyen yükler analizde dikkate alınmıştır. Bunun yanı sıra rüzgâr, dalga, akıntı yükleri dikkate alınmış ancak gelgit, sismik, buz yükleri gibi diğer çevresel yükler ile zemin koşulları ve sıcaklık etkisi dikkate alınmamıştır. Başlangıçta tüm taşıyıcı sistemler varsayılan boyutlarda tasarlanmış ardına yapılarda maksimum Von-Mises gerilmelerini belirlemek amacıyla gerilme analizleri yapılmıştır. Yapıların boyutları aynı yük ve sınır koşulları altında üretilen maksimum gerilmelerin benzer bir seviyeye düşmesi amacıyla iteratif olarak değiştirilmiştir. Maksimum gerilmelerde yinelemeler durdurulmuş, yapıların optimize edilmesi amaçlanmamıştır.

Abaqus sonlu elemanlar programı kullanılarak modal analiz, yorulma analizi, zaman alanı analizi yapılmış gelecekte dinamik analizlerin önemine de dikkat çekilmiştir. Deneylerde ve analizlerde 14 tip model tasarlanmış tasarlanan modellerde hem üç hem de dört bacaklı ceket tipi yapıların derin su koşullarında uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca üç bacaklı modellerin incelenen modeller arasında en hafif ve uygun maliyetli olduğu belirtilmiştir.

Çalışmalarında önerdikleri MJ tipi yapıların mükemmel bir yapısal davranışa ve patentli bükülmüş kılıf yapılarıyla rekabet eden az sayıda yapısal düğüm noktasının ve bileşene sahip olduğunu fakat üç ayaklı ceket tipi yapılara benzer şekilde düşük malzeme kullanımının avantajlarını koruduğunu göstermektedir. Çalışmada yeşil enerji uygulamaları için açık deniz rüzgâr türbini taşıyıcı sistemi seçimi ve tasarımı için alternatifler sunmaktadır. Şekil 2.2’de çalışmalarında kullanılan modellerin genel görümleri verilmiştir.



Şekil 2.2. Çalışmadaki model genel görünümüleri

Srikanth vd. (2016), çalışmasında doğrusal olmayan itme analizini Kuzey Denizi bölgesinde sabit platform taşıyıcı sistemi için yapmıştır. Yapı Offshore Structure Design and Analysis Program (SACS) kullanılarak modellenmiş değişkenlik gösteren çapraz tekniklerinin yapısal davranışa olan etkisi üzerinde çalışılmıştır. Dinamik ve statik itme analizlerini sismik ve dalga yükleri etkisi altında yapmışlardır. Kazıklı temelle birlikte modellenen sabit platformlar sismik yüklere bağlı olarak yapıyı zorlayacak yatay kuvvetler oluşturabilirler dolayısı ile bu tür yapıların tasarım aşamasında dinamik analizin önem kazandığı vurgulanmıştır. Çalışmada dört bacaklı bir platformun öncelikle statik ve dinamik dalga analizleri yapılmış, deprem analizlerinde zaman tanım alanı yöntemi kullanılmış son aşamada deprem ve dalga yükleri kullanılarak doğrusal olmayan itme analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kolon eğimleri değişken tutulmuş ve 3° - 14° arasında ideal ağırlık optimizasyonu yapılmıştır. Zemin etkisini dikkate almak amacıyla yay sabitleri yöntemi tercih edilmiştir. Yay sabitleri için P-Y, Q-Z, T-Z eğrileri kullanılmıştır. Çalışmada API standartlarında belirtilen 4 ayaklı yapılarda minimum 8 yönden dalga geliş açısı belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarda

yapının doğal frekansının yaklaşık 2.9 sn civarında olduğu saptanmış ve bulunan değerin bu tür sabit platform yapıları için ideal değerler olduğu ifade edilmiştir.

Temel sistemi tanımlanan analizler ile sabit mesnet kabulü yapılarak uygulanan analizlerdeki dinamik dalga kuvvetiyle oluşan tepki kuvveti incelediğinde temel sistemi uygulanarak yapılan analizlerin sabit mesnet kabulüne göre yapılan analizlerdeki tepki kuvvetinden %35 daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle kazıklı temel uygulanan yapılarda dinamik dalga kuvveti altında yatay yer değiştirme serbestliği verilmiştir. Devrilme momenti ve taban kesme kuvvetini de göz önüne alındığında zaman tanım alanında yapılan analizlerde tepki (response) spektrum analizinden elde edilen kuvvetlerden %25 daha fazla olduğu belirtilmiştir.

İlk elemanda meydana gelen kırılma anı yapı tasarımında kullanılan çapraz şekillerine bağlı değildir. Farklı çaprazlama şekilleri kullanıldığında karşılaşılan ilk elemanın plastikleşme durumuna geçmesi durumu farklı çaprazlama şekillerinde de hemen hemen yakın değerler göstermektedir.

Abhinav ve Saha (2015), makalelerinde, yapı-zemin etkileşimi ihmal edildiğinde ve dikkate alındığında, ceket destekli açık deniz rüzgâr türbininin dalga yükü altındaki tepkisini karşılaştırmaktadırlar. Ceket 70 m su derinliği için Hindistan'ın batı kıyısındaki zemin koşullarını dikkate almışlardır. Ceket rotorunun, güvenli çalışması için ortalama rüzgâr hızı 50 m/s ve önemli dalgalanma yüksekliği $H_s = 16$ m ve pik spektral periyodu $T_p = 18$ altında kaldığını kabul etmişlerdir. Çalışmalarında yapı-zemin etkileşiminin dahil edilmesinin önemi, itme analizleri ve düzensiz dalga dinamik analizleri ile araştırmışlardır. İki durumun serbest titreşim tepkisindeki değişimi belirlemek için modal çalışmalar yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Yapı-zemin etkileşiminin göz ardı edilmesinin, çeşitli modlarda nihai mukavemet özelliklerini % 3-60 oranında fazla bir değer elde etme veya kulenin tepesinin yer değiştirmesini güvenli sınırın üzerine çıkarma eğiliminde olduğu görmüşlerdir. Dinamik analiz için dalga yüksekliği, dalga süperpozisyon yöntemi kullanılarak oluşturmuşlardır. JONSWAP dalga spektrumu ek belirsizlik getiren sabit alan yöntemi kullanılarak ayırtmışlardır. Analiz sonucunda, kuyruk bölgesini

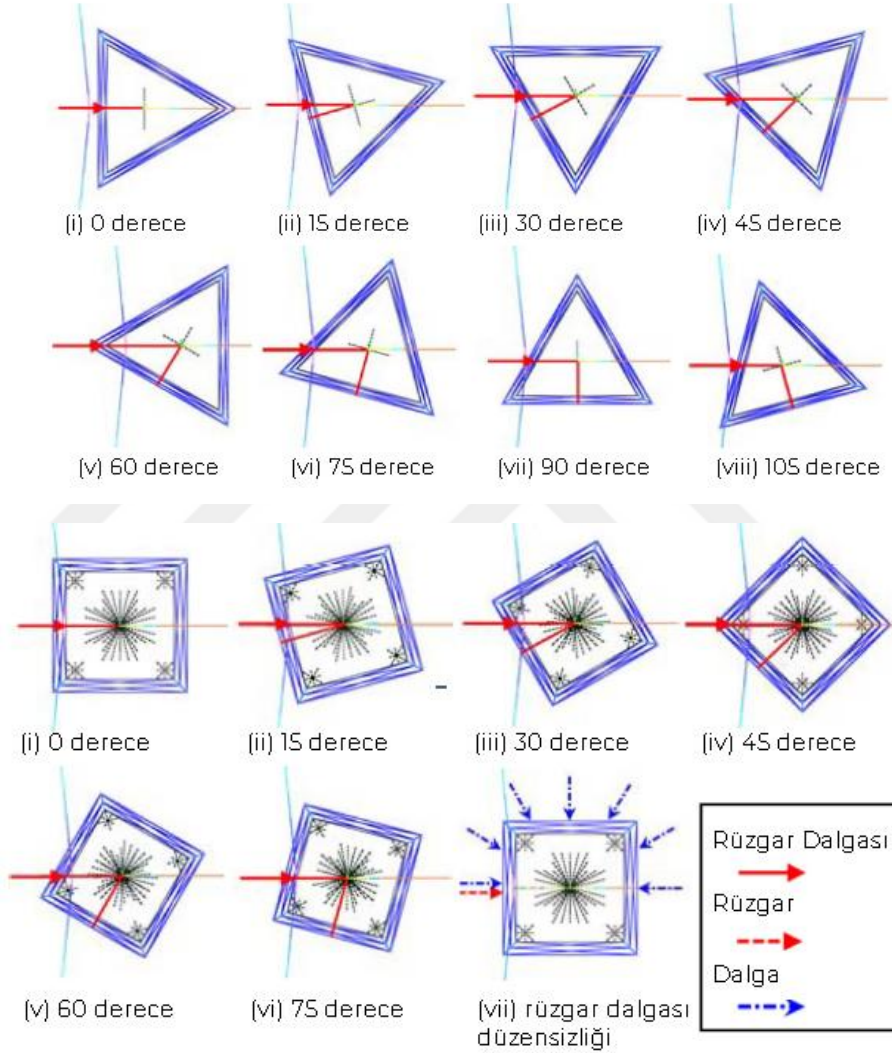
uygun şekilde yakalamak için sabit alan yöntemi kullanarak yaklaşık 200 frekansın gerekli olduğuna değinmişlerdir. Ayrıca dinamik analizler için dalga yüksekliği oluşumundaki istatistiksel belirsizliği örnek yakınsama çalışmaları ile ölçmüşlerdir. Analizlerinde, makul istatistikler elde etmek için yaklaşık 20-40 numunenin gerekli olduğunu görmüşlerdir.

Nguyen ve Sinsabvarodom (2015), çalışmalarında X tipi, V tipi ve tek yöne olacak şekilde 3 adet çapraz şeklinin sismik etkiler altında performansını incelemişlerdir. İtme analizi ile performans noktası belirlenen yapının lineer olmayan statik analizine de yer verilmiştir. Performans noktaları belirlenirken itme analiziyle aynı zamanda plastik şekil değiştirme noktaları da belirlenmiştir. Özellikle sismik yükler altında incelemesi yapılan yapının analiz neticesinde kapasite değerlerine yer verilmiştir. Çalışmalar neticesinde ulaşılan grafiklerde X tipi çapraz sistemine sahip yapı tek yönde çaprazları olan ve V tipi çapraz sistemine sahip yapılara nazaran daha fazla kapasiteye ulaştığı belirtilmiştir.

Abhinav ve Saha (2015), çalışmalarında tek kazıklı (monopile) olarak isimlendirilen taşıyıcı sistemi üzerine yumuşak-orta sert- sert kil zemin etkisinin dikkate alındığı dinamik çalışma yapmışlardır. Zemin yay sabitleri tarafından oluşturulmuş kazık boyunca tanımlanmış, yay sabitleri hesaplanmasında P-Y, Q-Z, T-Z eğrileri kullanılmıştır. Dalga ve rüzgâr kuvvetleri etkisi altında analizleri yapılan yapının yumuşak killerde periyodu artırdığından dolayı yapının rezonans etkisine girmesinin kolaylaştığı belirtilmiştir. 5m, 6m, 7m olan kazık çapları neticesinde açık deniz rüzgâr türbini taşıyıcı sisteminde kazık çaplarının artmasıyla birlikte yanal deplasmanda azalmalar meydana gelmiştir. Sonuç olarak yumuşak zeminlerde yanal deplasmanlar artmakta ayrıca sert killi zeminlerde farklılık gösteren kazık çaplarında yapı daha rijit davranışlar göstermektedir.

Chew vd. (2014), çalışmalarında dört bacaklı ve üç bacaklı ceket tipi açık deniz yapılarında karşılaştırma çalışması yapmışlardır. Fatigue (FLS-Yorulma) ve ultimate limit state (ULS) analizleri yapmışlar ve üç ayaklı konseptin farklı bir alternatif olarak uygulanabilir olduğunu sonuçlarında görmüşlerdir. Üç ayaklı tasarımın, dört ayaklı tasarıma göre yapı ağırlığında yüzde 17'lik bir azalma ve

kaynaklı bağlantılarda yüzde 25'lik bir azalma ile daha etkin bir maliyet sunduğuna değinmişlerdir. Dinamik performansın duyarlılığını değerlendirmek için farklı yükleme koşulları ile daha fazla analiz yapmışlardır. Analizlerinde, her iki tasarımın da yüklemedeki yön değişimlerinden son derece etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Dört ayaklı ve üç ayaklı modeller Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Dört ayaklı ve üç ayaklı modeller.

El Din ve Kim (2014), çalışmasında sabit kule tipi platform modellemesindeki, yer hareketlerindeki belirsizlikler ve zemin kazık etkileşimi üzerinde çalışarak sismik hareketlerin kazıklı temeller üzerine inşa edilmiş sabit kule tipi platforma olan etkilerini incelenmiştir. Yapısal performansı etkileyecek olan belirsizlikler ya rastgele ya da tahminle yapılabilecek yükler olup amacın proje safhasında

hangi belirsizliklerin özenle irdelenmesi gerekliliği olduğu ifade edilebilir. Tasarım esnasında belirsizlikleri minimuma indirmenin ekonomik açıdan büyük fayda sağlayacağı belirtilmektedir. Çalışmada Birinci Dereceden İkinci Moment (FOSM) ve Tornado diyagramı (TDA) yöntemleri doğrusal olmayan analiz yapılarak kullanılmıştır. Yapılarda salınım olayı TDA 'da belirsizliklerin alt ve üst değerler alınmak suretiyle karşı cevapların değerlendirilmesi olarak isimlendirilmekte olup bunlar arasındaki farklılıklar duyarlılık ölçüsü olarak kabul edilir. Girdi parametrelerinin standart sapması ve ortalamaları hesaplanır ve yapının basit hesap yöntemleriyle hesaplanması FOSM yönteminde uygulanmaktadır. Çalışmasında kazık ucu yatağı, kazık çakmasında yüklemenin döngüsel evresi, kazık zemin ilişkisinde eksenel kazık sürtünmeleri belirsizlik olarak ifade edilmiştir. Diğer belirsizlikler ise yapısal kütle, sönüm oranı, elemanların elastisite modülleri, plastik mafsallık noktaları, yapısal elemanların akma dayanımı ve depremin doğasından kaynaklanan belirsizliklerdir. Deprem kaynaklı belirsizlikler diğerlerine nazaran daha belirleyici olduğu ifade edilmektedir. Kütle, plastik mafsallık ve yapısal sönüm özelliklerinin yapısal davranışlar açısından etkili olduğu söylenmiştir. Depremden kaynaklı belirsizlikler en büyük tepe deplasman değerini oluşturmaktadır.

Maske vd. (2014), çalışmalarında aktif sismik bölgelere yapılan platform tipi yapıların deprem etkisinde yapının tam göçme hali olmadan hizmet edebilir nitelikte tasarlanması gerekliliğini belirtmişlerdir. Dinamik analiz ile açık deniz yapılarının sismik etkiler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Ansys programı kullanılarak Basra Körfezinde modellenen platforma deprem ve dalga kuvvetleri aynı zamanda etki edilmiştir. Dalga ve deprem kuvvetlerinin eş zamanlı etki ettiği durum, ayrı ayrı etki edildiği durumdaki yapısal deplasmanlar daha azdır. Açık deniz yapı tasarımında doğrusal olmayan davranışların incelenmesi gerekliliği savunulmuştur.

Shi vd. (2013), çalışmalarında denize kıyıları olan ülkelerin açık deniz rüzgâr enerjisi kullanımı için iyi bir potansiyele sahip olduğuna değinmişlerdir. Açık deniz rüzgâr türbinleri büyüdükçe ve su derinliğinin de artması ile birlikte ceket yapılarında maliyet artmaktadır. Farklı modelleme parametrelerinin bir açık deniz rüzgâr türbininin dinamik tepkisi üzerindeki etkilerini araştırmak için

ceket tipi yapı modellemişlerdir. Bu amaçla, modal analiz ve farklı modelleme parametreleri ile aero servo hidro elastik simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarındaki bulgularında, birleşim noktaları, örtüşme ve deniz büyümesinin dinamik tepkiyi güçlü bir şekilde etkilediğini ve tasarlanan yapının doğal frekansları üzerinde küçük bir etki olduğunu göstermekte olduğundan bahsetmişlerdir. Uygun geçiş elemanlarının seçilmesinin genel yapı elemanlarındaki aşırı yükleri azaltabileceğine değinmişlerdir.

Raheem ve Shehata (2013), Kızıldeniz’de mevcut bir yapıdan esinlenerek yapılan çalışmasında güvenilir ve ekonomik tasarım için dalga kuvvetinin önemli olduğunu, ceket tipi yapıların tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken kuvvetin dalga kuvveti olduğunu söylemektedir. Çalışmasında 5. Dereceden Stokes Teorisini kullanmış, Morrison denklemiyle 5. Dereceden Stokes Dalga Teorisi ile hesap edilen dalga kuvvetleri elemanlar üzerine statik kuvvet olarak etki ettirilmiştir. 1 yıllık ve 100 yıllık olarak iki ana dalga tanımlaması yapılmış olup, yapı ile dalganın yaklaşma açıları arasında farklılık oluşturularak deplasman durumları göz önüne alınmıştır. Bir yapının dinamik gerilim genliğinin %15 civarında azaltılması yapısal elemanların ömrünü yaklaşık olarak iki kat artırabilir. Yapının kurulacağı saha göz önüne alınıp, çevresel yüklerin yapının kurulacağı sahaya göre değişkenlik göstereceği ve her bir montaj sahası kendi içerisinde değerlendirilmesi gereklidir. Yapı tabanında oluşabilecek deplasmanın yapısal davranışlar üzerinde büyük görece yer değiştirmeden kaynaklı olarak ciddi sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Hazırlanan bu makalede ceket tipi yapıların doğrusal olmayan davranışının gerçeğe en yakın yükler ile tasarlanması gerekliliği ifade edilmiştir.

Raheem vd. (2013), çalışmalarında durgun su ve maksimum dalga şartlarında karşılaşılabilecek yükler doğrultusunda tasarımlarının yapılması gerektiğini savunmuşlardır. Açık deniz yapılarının maksimum şiddetteki yükler altında modellenmesi gerektiğini ve optimum düzeyde performans noktasının belirlenmesinde bu yaklaşımın kullanımını ifade etmişlerdir. Kızıldeniz’de bulunan mevcut bir platform dikkate alınarak Sap2000 analiz programı ile tasarımı yapılan çalışmada dalga kuvvetleri yapısal elemanlara Morrison

denklemleri ile statik kuvvet olarak etki edilerek hesaplanmıştır. Çalışmada 5. Derece Stokes Dalga teorisi seçilmiş ve birleşik dalga etkisi dikkate alınmıştır.

0°, 45°, 90°, 135°, 180° yaklaşma açılarıyla ayrı ayrı etkitilen dalga kuvvetleri davranışsal olarak değişkenlik gösteren yaklaşma noktaları sonucunda yapısal deplasman kontrolü sağlanmıştır. Doğal titreşim modları dikkate alınarak yapılan çalışmada platformun servis ömrü boyunca sağlıklı çalışabilmesi için tasarım esnasında çevresel yükler ve tasarımsal optimizasyonların dikkate irdelenmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada yapısal elemanların moment, kesme kuvveti, eksenel kuvvet ve düğüm noktaları deplasmanları incelenmiştir. Dalga açısının değiştirilmesi yapısal eleman düğüm noktaları deplasmanlarının yapının tabanından üst kısımlara doğru doğrusal olmayan şekilde arttırdığı görülmüştür.

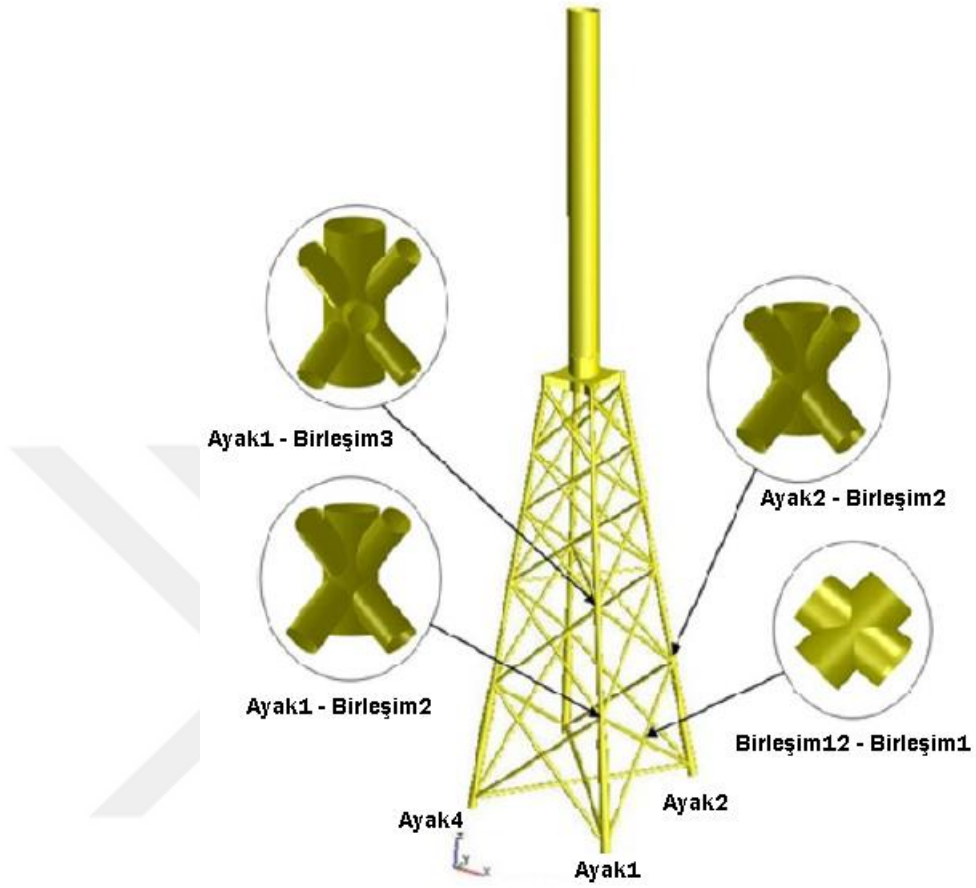
Hensel vd. (2012), çalışmalarında, açık deniz yapıları için olası siteleri bulmak için bir deniz mekânsal planlama yaklaşımını ve bu yaklaşım kullanılarak oluşturulan dizinde geçen TT (Teknoloji tipi) faktörünü kullanmışlardır. Bu makalelerinde TT faktörünün ceket tipi taşıma yapılarına yönelik kullanımını araştırmışlardır. Çalışmalarında, yapı elemanlarının nihai gerilmelerini belirleyebilmek için, Ansys programı kullanarak hidrodinamik ve yarı statik türbin yükleri kullanarak 50 yıllık ekstrem rüzgâr ve 100 yıllık ekstrem dalga yüklemesine maruz kalacak şekilde analiz etmişlerdir. Yazılarında kazık temel ve ceket ağırlıklarını 30 m ve 60 m arasında değişen 3 temsili zemin tipine göre hesaplamışlardır. Çalışmalarının sonuçlarını 2 mevcut ceket tipi yapı ile kıyaslamışlardır.

Raheem vd. (2012), çalışmasında sabit bir açık deniz yapısının doğrusal olmayan davranışı analiz edilmiştir. Dalga kuvveti Morrison denkleminden faydalanılarak yapıya statik kuvvet olarak etkitilerek yapının dalga kuvveti etkisindeki tasarımı ekonomik ve güvenilir bir tasarım için gerekliliğini ifade etmişlerdir. Analizler Apı Standartları doğrultusunda belirtilen 1 yıllık ve 100 yıllık geri dönüş periyotlu dalgalarda yapılmış, dalga kuvvetleri sonucunda taşıyıcı elemanlardaki moment, kesme kuvveti ve eksenel kuvvet değerleri yapının servis ömrü boyunca görevini yerine getirebilmesi için araştırılmıştır. 1 yıllık ve 100 yıllık geri dönüş

periyoduna sahip dalgaların maksimum deplasman değerleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmada yapısal olarak yüksek ve daha esnek yapıların tasarımında dinamik davranışın dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır. Platform taşıyıcı sisteminde sondaj aksındaki katlar arası görelî farkların oluşmaması gerekliliği vurgulanmış ayrıca akım ve dalga yönünün birbirinden sapma hareketi yapmasının deplasmanları azalttığı görülmüştür. Dinamik yük genliği oranının yaklaşık %15 azaltılmasının yapı ömrünü 2 katına çıkardığı ifade edilmiştir. Platformun kurulacağı bölgeler ve çevresel koşullar ayrı ayrı değerlendirilmeli ve tasarım esnasında bu faktörler göz önüne alınmalıdır ayrıca platformlarda doğrusal olmayan analizlerin yapılması gerekliliği vurgulanmıştır.

Donga vd. (2011), çalışmalarında 70 m su derinliğindeki Kuzey Denizi sahası için tasarlanmış sabit bir ceket açık deniz rüzgâr türbini için kaynaklı çok düzlemli boru şeklindeki bağlantıların uzun vadeli yorulma analizini yapmışlardır. Rüzgâr ve dalga yükleri nedeniyle ceket taşıyıcı yapısının dinamik tepkisinin hesaplanmasında doğrulukla ayrıştırılmış bir prosedür kullanılmasına değinmişlerdir. Hem 2 parametrelî bir weibull işlevi hem de genelleştirilmiş gama işlevi için rüzgâr türbininin operasyonel koşullarında temsili çevresel koşullar için bir zaman alanı simülasyonunun bir kombinasyonu ile sıcak nokta stres aralıklarının uzun vadeli istatistiksel dağılımına uymak için kullanılabileceğine değinmişlerdir. Ortalama rüzgâr hızının ortak bir olasılık modeli U_w , önemli dalga yüksekliği H_s ve spektral tepe periyodu T_p , Kuzey Denizi'ndeki temsili çevresel koşulların oluşum sıklıklarını elde etmek için kullanıldığından bahsetmişlerdir. Rüzgâr yükleri, dalga yükleri, rüzgâr ve dalga yüklerinin etkileşim etkisinden kaynaklanan yorgunluk hasarına katkıları belirlemek için 3 farklı yük durumu analiz edilebileceğine değinmişlerdir. Bahsi geçen yükleme durumları ise; yalnızca rüzgâr yükleri, yalnızca dalga yükleri, rüzgâr ve dalga yüklerinin bir kombinasyonudur. Yorulma hasarına maksimum katkıya karşılık gelen temsili çevresel koşul tanımlanabileceğini ifade etmişlerdir. Farklı modeller için seçilen bağlantı bölgelerinin karakteristik yorulma hasarı tahmin edilir ve karşılaştırılabilmektedir. Çaprazların kalınlığının, seçilen bağlantı bölgelerinin karakteristik yorgunluk hasarı üzerindeki etkisinin de bir

Çalışma ile analiz edilebileceğine karar vermişlerdir. Yaptıkları çalışmada çapraz elemanların bağlantı yerleri ve türleri şekil 2.4'te gösterilmiştir.



şekil 2.4. Bağlantı yerleri ve türleri

Bargi vd. (2011), çalışmalarında mevcut Basra körfezinde yer alan bir petrol platformundan yola çıkmışlar, açık deniz platformunun kazık temel ile modellemesini yaparak eş zamanlı olarak deprem ve dalga kuvvetleri etkisi altında Ansys programını kullanarak analizlerini yapmışlardır. Sismik olarak aktif alanlarda yer alan petrol arama platformlarının birleşik yk etkileri altında davranışlarını gözlemlemişlerdir. 70.2 m su derinliğinde 6 ana taşıyıcı kolona sahip, taşıyıcı elemanları dairesel kesitlerden tercih edilen bir model kurmuşlardır. Yapı zemin etkileşimini dikkate almışlardır. Sonuç olarak deprem ve dalga yüklerinin eş zamanlı etkisine göre sadece deprem kuvveti yükünün etkisine göre daha fazla deplasman yaptığı ifade edilmiştir.

Toğan (2009), çalışmasında mühendisliğin en önemli noktalarından olan ekonomiklik ve kesit optimizasyonu üzerinde çalışmış, açık deniz yapılarının güvenilirlik açısından analizlerini incelemiştir. Bir yapı tasarımında kullanılan parametreler yük, malzeme, kesit ve sistem geometrisi gibi algoritmalar arasında sıkışmış olup tasarımsal olarak maliyeti en aza indirmek amaçlanmaktadır. Hayata geçirilen projelerde ve yapı ömürleri boyunca karşılaştıkları çevresel faktörler ve yükler açısından belirsizlikler olabilmektedir. Bu belirsizlikler çeşitli istatistiksel çalışmalarla mühendislik yaklaşımları ve tasarımsal parametrelere entegre edilebilir. Optimizasyon işleminde ardışık ikinci dereceden programlama, diferansiyel gelişim yöntemi; güvenlik metodu olarak birinci dereceden güvenilirlik yöntemi ve tersine güvenilirlik yöntemleri aracılığı ile kodlar üretilmiş, yapılan çalışmada Fortran programı ile programlama dilleri kullanılarak açık bir yazılımla değerlendirmeler yapılmıştır.

Açık deniz tipi yapının kesit optimizasyonu yapımında maksimum dalga yüksekliği, maksimum güverte ağırlığı ve kendi ağırlığı altında olmak üzere ayrı ayrı şekillerde tasarlanan yapı belirsizliklerde göz önünde bulundurulmuş, elemanların güvenilirliği ön planda tutularak optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Belirsizliklerin dahil edilmesinden kaynaklı olarak yapı ağırlığının daha fazla çıktığı ifade edilmiştir. Optimizasyonda belirsizliklerin dahil edilmesiyle tersine güvenlik yönteminin yaklaşım aynı zamanda işlem süresinin kısalması bakımından avantajlı olduğu belirtmiştir.

Seidel (2007), yapılan çalışmasında ceket tipi yapılar, açık deniz rüzgâr türbinleri için yaklaşık 20 m ile 50 m su derinliklerinde çekici bir çözümdür. Yazılarında kaynak bağlantılı bir ceket ve döküm düğümlü bir alternatif sunulmaktadır. Çalışmalarında ana tasarım zorluklarını ele alıp petrol ve gaz sektöründeki ceketlere kıyasla tasarım sürecinin özelliklerine değinmektedir. Ayrıca, bir tripod çözümüyle belirleyici nitelikte bir karşılaştırma sunmuşlardır. Çalışmalarında, iyi bir gelişme potansiyeline sahip olan bu konuda ceket tipi rüzgâr türbin yapılarının geliştirilmesinde hala başlangıç aşamasında olduğuna değinmişlerdir.

Kırmıaeı vd. (2004), çalışmasında sabit açık deniz platformlarının kazıklı temel ile birlikte modelleyerek sismik davranışları üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır. Yapılan çalışmada sismik olarak aktif bölgelerde yer alan platform tasarımlarında yapı zemin etkileşiminin en önemli parametrelerden olduğu ifade edilmiştir.

Açık deniz platformlarının tasarım aşamasında doğrusal olmayan toprak davranışları neticesinde yapısal elemanlarda oluşabilecek olan doğrusal olmayan elaman davranışları dikkate alınmalıdır.

Yapı kazık zemin etkileşiminde BNWF modeli kurulmuş, yapı kazıklarının dinamik analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmada toprak kademeli olarak farklı tür malzemelerden oluşacak şekilde tasarlanmış, zemin ve kazık arasındaki boşluklu yapı dikkate alınmıştır. Farklı zemin ivmelerinde kazık ve yapısal elemanların deplasman değerlerine bakılmış 0.05g ve 0.2g arasında en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.

Harnett (1997), çalışmasında İrlanda'nın güney kıyılarında bulunan sabit petrol platformunun modal davranışını incelemiş, kazıklı temeller uygulanmıştır. Açık deniz platformu büyük hidrodinamik yüklere maruz kalmaktadır. Kazıklı temel sistemi ile zemine sabitlenen platformun doğal titreşim periyodunu bulmak için çalışmalar sürdürülmüştür. Yapıya etkiyen hidrodinamik yüklerle birlikte yapıdaki noktasal ve hareketli yüklerle yapı davranışında önemli farklılıklar oluşturmaktadır. Yapılan çalışmada saha da yapısal noktalardan ölçümler alınmış, bilgisayar programları ile karşılaştırılması sağlanmıştır. Ayrıca çalışmada çevresel yük frekanslarıyla yapı doğal frekansı arasındaki ilişkiler göz önünde tutulmuştur. Hâkim yönündeki burulma ve eğilme durumları bilinmesi hidrodinamik kuvvetler sonucunda yapının yer değiştirmesinde önemli rol oynayabilir. Yapılan araştırmada petrol platformu güvertesinin kütesinden güçlü bir şekilde etkilenen mod şekilleriyle ilgili frekanslar hidrodinamik kütlede ki büyük değişikliklere karşı hassas olmadığı belirlenmiştir. Dolu gövde olmayarak tasarlanmış elemanların yapı ömrü boyunca içinin dolup yapısal davranış üzerindeki etkileri olup olmadığı incelenmelidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, Türkiye karasularında kurulabilecek açık deniz ceket tipi rüzgâr türbini taşıyıcı sisteminin çevresel yükler özellikle rüzgâr ve sismik yükler altında davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

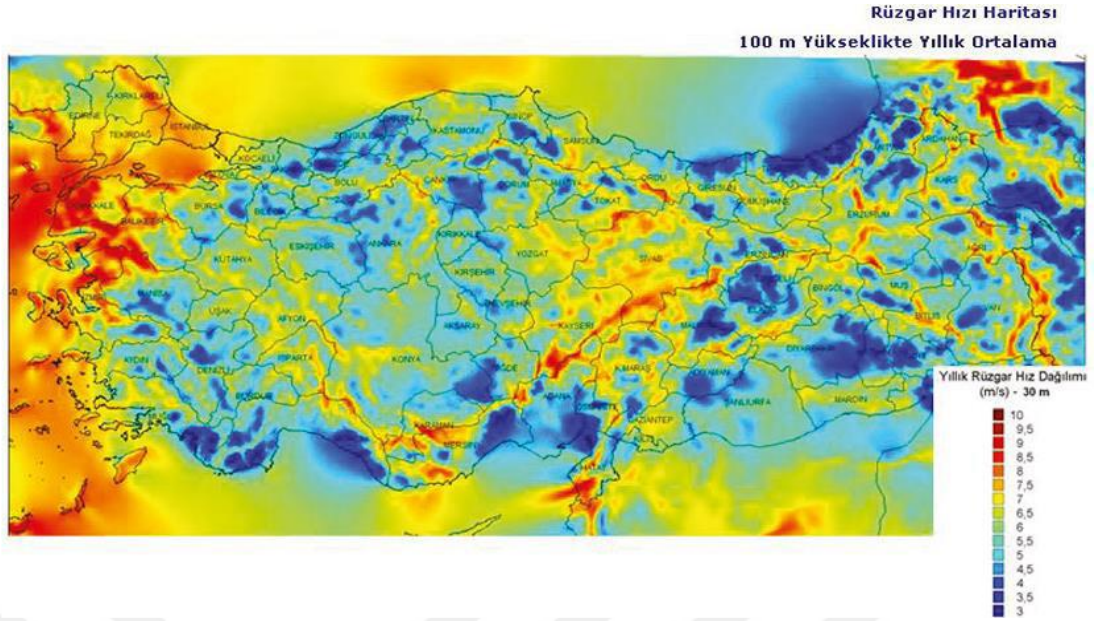
Açık deniz rüzgâr türbini tasarımında öncelik olarak uygun yer seçimi kriterleri araştırılmış, Türkiye karasularında çeşitli bölgeler irdelenmiştir. Tasarlanması planlanan yapının verimli çalışabilmesi, yapım maliyetinin ekonomik olması amacıyla;

- Bölgenin rüzgâr potansiyeli
- Bölgenin oşinografik yapısı
- Askeri ve karasuları sınırları
- Boru hatları ve deniz altı kablolama sistemleri
- Elektrik iletimi ve karalardaki enterkonnektesi temel bağlantı koşulları
- Deniz üstü ve altı doğal koruma alanları ve canlı yaşamları
- Çevresel faktörler gibi kriterler bölge seçimlerinde göz önünde bulundurulmuştur.

3.1. Rüzgâr Potansiyeli

Bölgenin rüzgâr potansiyelinin belirlenmesinde ülkelerin resmi kurum-kuruluşları, üniversiteler ve ticari faaliyet yürüten kurumlar tarafından oluşturulan rüzgâr atlasları tasarım aşamasında fikir verecek olup, bazı paket programlar ile bölgenin topografik verilerinden yararlanılarak elde edilecek rüzgâr atlasları da tasarıma katkı sağlayacaktır.

Tasarımın ve yapımın başarılı ve etkili olabilmesi amacıyla rüzgâr hız potansiyeli yüksek bölgeler tercih edilmeli, rüzgâr verileri detaylı irdelenmeli doğru ve güvenilir veriler çerçevesinde tasarım kriterleri oluşturulmalıdır. Şekil 3.1’de Türkiye Rüzgâr Atlası verilmiştir.



Şekil 3.1. Türkiye rüzgâr atlası

Ön tasarım sonrasında seçilen bölge için en az bir yıllık rüzgâr verileri elde edilmeli, tasarım kriterleri tekrar gözden geçirilmelidir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde rüzgâr hızının en belirleyici kriterlerin başında yer aldığı görülmekte olup, uygun yer seçiminde en dikkat edilmesi gereken konudur. Rüzgâr türbini çalışma prensipleri incelendiğinde rüzgâr türbinlerinin verimli ve doğru bir şekilde çalışmasını sağlamak, elde edilecek enerji kalitesini artırmak için kontrol sistemleri yer almaktadır. Bunların başında türbinin devreye gireceği ve devreden çıkacağı açma-kapama sistemleri yer almaktadır.

Rüzgâr türbinlerinin devreye girebilmesi için gerekli olan devreye alma rüzgâr hızı (cut-in) rüzgâr türbini modellerine göre yaklaşık olarak minimum 3-4 m/sn olup bu hızın altındaki rüzgarlarda enerji üretimi gerçekleşmemektedir. Rüzgâr türbinlerinin nominal seviyede (rated) üretebilecekleri güç için gerekli olan rüzgâr hızı yaklaşık olarak 10-12 m/sn olarak ifade edilmiştir. Rüzgâr türbinleri yüksek hızlara maruz kaldıklarından dolayı üretilebilecek enerji seviyesi artmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin güvenilir bir şekilde çalışacağı maksimum rüzgâr hızı (cut-out) modeline göre maksimum 25-30 m/sn olarak ifade edilmekte olup, bu hızdan sonra frenleme sistemlerini devreye sokarak türbin parçalarının zarar görmemesi açısından kendini korumaya alır. Yapının göçmesini engellemek amacıyla yüksek hızlarda devreye giren frenleme

sistemleri yavaşça fren yapmak suretiyle yapının doğal frekansına yaklaşmadan rezonansı önlemiş olur.

Türkiye özelinde baktığımızda Dünya Bankası tarafından Ekim 2019 tarihinde yayınladığı rapora göre Türkiye karasularında açık deniz rüzgâr enerjisi potansiyelinin Ege Bölgesinin Kuzey Batısı'ndaki alanlarda, Marmara ve Karadeniz Bölgelerinde 7-9 m/s hızlara ulaşan alanların yer aldığı 50 mt ve altında yer alan derinliklerde toplamda 18 GW, 50-1000 metre derinlikte toplamda 57 GW olmak üzere genel toplam olarak 75 GW açık deniz rüzgâr potansiyeline sahip olduğu belirtilmektedir (DÜRED, 2021)

3.2. Derinlik Durumu

Açık deniz rüzgâr türbinleri tasarımlarının yapılmasında belirleyici en önemli faktörlerden diğeri de derinlik koşullarıdır. Açık deniz rüzgâr türbinlerini karasal rüzgâr türbinlerinden ayıran faktörlerin başında yapı temelleri yer almakta olup açık deniz rüzgâr türbinleri rüzgâr, dalga, akıntı, bölge tercihinine bağlı olarak sismik, çevresel yüklere maruz kalmaktadır. Karada inşa edilen rüzgâr türbini temel sistemleri yapı maliyenin yaklaşık % 5'lik kısmını oluşturmaktayken açık deniz yapı temel sistemlerinin maliyeti yaklaşık % 25 seviyelerine gelmekte olup ciddi bir artış göstermektedir. Danimarka Horns Rev bölgesinde yer alan rüzgâr çiftliğinde 80 adet 2 MW tekil kazıklı rüzgâr türbini yer almakta olup proje toplam maliyetinin yaklaşık % 22'lik kısmı temel ve zemin araştırmalarından oluşmaktadır. Bu kapsamda bölge seçimlerinin doğru bir şekilde yapılması maliyetlere ciddi manada katkı sağlayacaktır.

3.3. Karasuları Sınırı

Uluslararası hukuka göre karasuları, bir devletin kıyılarına bitişik deniz alanlarında bölgesel yetkiye sahip olduğu sınırdır. Açık deniz rüzgâr türbinin kurulurken bu sınırlara dikkat edilmesi gerekmektedir. 1982 tarihli Birleşmiş Milletler Deniz Hukuk Sözleşmesine göre devletlere, 12 deniz miline kadar kendi karasuları sınırını belirleyebilme yetkisi tanınmıştır. Birçok ülke bu anlaşmayı imzalayarak sınırlarını 12 deniz miline kadar çıkarmıştır. Rüzgâr potansiyeli

açısından yüksek olan Ege Denizi'nde bu durum bir sorun teşkil etmektedir. Bu anlaşmayı imzalayan ülkelerden Yunanistan, Ege Denizinde karasuları sınırını 12 deniz miline çıkarmak istemiştir. Bunun sonucunda Ege Denizi'nde %70 hakimiyet Yunanistan'a geçecektir. Bu durum ülkemiz tarafından çok tabii olarak hükümsüz kabul edilmiştir. Ülkemizin 1964 yılında çıkardığı kanun ile birlikte Ege Denizi'nde karasuları sınırının 6 deniz mili olduğuna karar vermiştir. Akdeniz ve Karadeniz kıyıları için böyle bir sorun mevcut değildir (Birleşmiş Milletler, 1982).

3.4. Askeri Sınırlar

Açık deniz rüzgâr türbini bölge tercihlerinde dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise askeri sınırlardır. Açık denizlerde devletlerin askeri güçleri çeşitli faaliyetlerini yürütmektedir. Kullanılan bu alanlar, açık deniz rüzgâr türbinlerinin konumlandırılmasında işleri karmaşık hale getirmekte olup ekonomik açıdan uygun alan tercihlerini zorlaştırmaktadır. (Argin ve Yerci, 2017).

3.5. Deniz Ulaşım ve Boru Hatları

Deniz tabanından geçen elektrik iletim boruları, doğalgaz boruları, petrol boruları gibi mevcut hatlar, ileride yapılması planlanan hatlar ve kurulacak rüzgâr türbininin iletim hatları açık deniz rüzgâr türbinlerinin yer tercihlerinde göz ardı edilmemesi gereken durumlardan gelmektedir. Kurulum yapılacak bölgedeki deniz ulaşım hatları, balıkçılık faaliyetlerine dikkat edilmeli nihai projede tercih edilecek bölgeler için yetkili kurumlardan gerekli izinler alınmalıdır. (Bianchi vd, 2007).

3.6. Çevresel Faktörler

Açık deniz rüzgâr türbinlerinde kullanılması planlanan rüzgâr türbini modeline göre türbin kanat çapları yaklaşık 150 m'ye, kule yüksekliği ise yaklaşık 90 m'ye kadar ulaştığı görülmektedir. alıştıklarında çıkardıkları ses gürültüsü, görsel estetik kaygısı ile gündeme gelen türbinlerin gürültüleri en az 1.5 km'den sonra

ortadan kalkmakta olup kıyıdan uzakta yapıldığında yerleşim yerleri açısından engel teşkil eden sorunlar ortadan kalkmış olacaktır. Bölgenin ekolojik yapısını da ön planda tutarak canlı yaşam alanları, kuş göç yolları, deniz ekolojisi gibi faktörlerde yapılacak çalışmalarda dikkat edilmelidir (Snyder ve Kaiser, 2009).

3.7. Temel Tipleri

Açık deniz rüzgâr türbinleri temel tiplerine göre;

- Tekil kazıklı temeller (Monopile)
- Grup Kazıklı Temeller (Tripod)
- Kafes Temeller (Jacket)
- Vakumlu Kova Keson (Suction bucket)
- Ağırlık Temeller (Gravity base)
- Yüzer temeller (Floating)

Temel tiplerinin derinliklere göre değişimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Açık deniz rüzgâr türbinleri temel tipleri

3.7.1. Ağırlık temeller (Gravity base structure)

Betonarme ağırlık yapısı çok yüksek bir taşıma kapasitesine sahiptir. Deniz tabanına oturmuş olan büyük bir betonarme temelle stabilitesini sağlamaktadır. Genellikle sığ sularda deniz tabanının kaya veya üzerindeki ağırlığı taşıyabilecek olan sularda kullanılır. Ağırlıkları yaklaşık 1500 ton olan bu temeller diğer temel tiplerine göre yük taşıma kapasiteleri daha az olup uygulaması daha kolaydır.

Uygulama derinlikleri 10-20 m arasında kalmaktadır (Esteban vd. 2019). Şekil 3.3'te ağırlık temele ait örnek verilmiştir.



Şekil 3.3. Ağırlık temel (Esteban vd. 2019)

3.7.2. Tekil kazıklı temeller (Monopile)

Tekil kazıklı temel çok basit bir temel sistemine sahiptir. Bu temeller çelik boru tipi elemanlarda imal edilmiştir. Çapları genellikle 3 ile 8 m arasında değişkenlik göstermektedir. Çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ağırlıkları yaklaşık 250 ton olan bu temel tipleri su derinliği 30 m olan alanlarda yaygın olarak kullanılmakla birlikte 45-50 m derinliklere kadar uygulanabilir. Deniz tabanının kazık çakılabilecek olduğu her yerde uygulanabilir. Bu yapılarda hidrodinamik aerodinamik kuvvetler kazığa eğilme momenti ve kesme kuvveti olarak yansıtılır (Delwiche ve Tavares, 2017). Şekil 3.4'te tekil kazıklı temellere ait örnek verilmiştir.



Şekil 3.4. Tekil kazıklı temel

3.7.3. Grup kazıklı modeller (Tripod)

Grup kazıklı temeller 25-50 su derinlikleri arasında tercih edilmektedir. Temel anlamda çaprazlar kullanılarak oluşturulmuş olan bir tekil kazıklı sistem olarak görülebilir. Bu sayede hem kafes sistem hem de tekil kazıklı temellerin avantajlarından faydalanılmaktadır. Bu yapıların en büyük avantajları arasında çelik boru üzerine gelen kuvvetle temel ayaklarına oradan da zemine aktarılır bu sayede yapıdan gelen kuvvet yayılarak aktarılmış olur. 25-50 m arasında kullanılmaktadır (Esteban vd. 2019). Şekil 3.5'te grup kazıklı modele ait örnek verilmiştir.



Şekil 3.5. Grup kazıklı temel

3.7.4. Kafes temeller (Jacket)

Deniz tabanına çakılarak yerleştirilen kazıklar üzerine düzlem kafes sistemden oluşan taşıyıcı bir sistemin kurulması ile çözülmüş temel sistemleridir. Bu sistemler kıyılarda imal edilir bargelar ile montaj alanına getirilip batırılarak zemine bağlanır. 25-50m su derinliğinde kullanılabilmektedir. Kafes sistemler rijit ve çevresel yüklere karşı dayanıklı sistemler olması sebebi ile ekstrem koşullarda kullanılabilir. Temel de kullanılan kazıklar grup kazık şeklinde tasarlanabilir bu sayede çap ve uzunluklar üzerinde değişiklikler yapılarak daha ekonomik çözümler elde edilmesi mümkündür. Şekil 3.6'da kafes temellere ait örnek verilmiştir.



Şekil 3.6. Kafes temel

3.7.5. Vakumlu kova keson (Suction Bucket)

Vakumlu kova keson temeller ağırlık temellerile benzemektedirler ancak ağırlık temellerinden farklı olarak yerleştirme metoduyla da ayrılmaktadırlar. Kova kesonlar tripod sistemler içinde temel yerine kullanılabilir. Yerleştirme yöntemi olarak kovanın açık kısmı deniz tabanına oturtulur içerisindeki su boşaltılarak emiş kuvveti oluşturulur bu sayede zemin vakumlanarak kova zemine sıkıştırılır. Bu tip temellerin en önemli avantajları: yüksek su derinliklerinde de kullanılabilmesi, basit üretimi ve kolay taşınabilir olması, ucuz kurulumu olması, düşük maliyetli olması ve kova yanları sayesinde yanıl dayanımının yüksek olmasıdır. Şekil 3.7’de vakumlu kova keson temele ait örnek verilmiştir.



Şekil 3.7. Vakumlu keson temel

3.7.6. Yüzen temeller (Floating)

Su derinliği arttıkça temel sistemi ve yapının taşıyıcı sisteminin maliyeti artmaktadır. Bu sebeple yüzer tip temellere geçilmektedir. Yüzer tip temellerin kurulmasının kolay olması kıyıda üretilip deniz üzerinde çekilerek çalışma sahasına getirilmesi avantajları arasındadır. Yüzer yapılar deniz tabanına çapalama sistemi ve gergi halatları ile bağlanabilmektedir. Yüzen yapıların en büyük avantajları arasında deniz tabanına olan mesafesi sayesinde deniz tabanında ki yaşama zarar vermemesi de avantajları arasındadır. Şekil 3.8’de yüzen temellere ait örnek verilmiştir.



Şekil 3.8. Yüzen temel

Açık deniz rüzgâr türbinleri diğer bölümlerde aktarıldığı üzere tasarım aşamasından yapım aşamasına kadar çok ciddi disiplin, minimum hata payı gerektiren bir alandır. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin bahsedildiği üzere en önemli basamak aşaması uygun yer seçimi yapılmasıdır. Uygun yer seçimi enerjiyi en verimli şekilde elde etmeyi sağlayacak ayrıca derinlik ve kıyıdan uzaklık gibi faktörlerinde doğru yapılması maliyetleri olabildiğince minimum düzeyde tutacaktır. Yapılan literatür çalışmalarında Türkiye karasularında Ege Kıyıları, Marmara ve Karadeniz Bölgeleri'nin kurulması planlanan açık deniz rüzgâr türbinleri açısından uygun olduğu görülmektedir.

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin seçilen modele göre devreye girebilmeleri için rüzgâr hızının minimum 3 m/sn olduğu göz önünde bulundurulmuş, yapılan araştırmalar neticesinde Bozcaada açıklarında yerden 10 m yükseklik için ortalama 4,78 m/sn olarak tespit edilmiştir (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021).

Açık deniz rüzgâr türbini modelimiz için tercih ettiğimiz Bozcaada açıklarında su derinliği 40 m olarak belirlenmiştir. Su derinliği 30-50 m arasında yer alan açık denizlerde enerji verimi ve maliyet faktörleri göz önünde tutularak ceket tipi (offshore jacket wind turbine) modeli tercih edilmiştir.

3.8. 5 MW Kara Tipi Rüzgâr Türbin Modeli

Yapılan çalışmada referans türbin modeli olarak Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından modellenen 5 MW üretim gücüne sahip yatay eksenli rüzgâr türbini seçilmiş, söz konusu rüzgâr türbini boyutsal parametreleri şekil 3.9'da verilmiştir. Ayrıca türbin özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Rüzgâr türbini boyutsal parametreleri

Çizelge 3.1. 5MW taban rüzgâr türbini modeli için brüt özellikler (NREL)

Güç	5 MW
Rotor Yönü, Konfigürasyonu	Rüzgâr a karşı, 3 Kanat
Kontrol	Değişken hız, Kolektif Sapma
Güç Aktarımı	Yüksek Hız, Çok kademeli Vites Kutusu
Rotor, Göbek Çapı	126 m, 3 m
Göbek Yüksekliği	90 m
Açma, Nominal, Kesme Rüzgâr Hızı	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Açma, Nominal Rotor Hızı	6.9 rpm, 12.1 rpm
Nominal Uç Hızı	80 m/s
Konsol, Şaft Eğimi, Precone	5 m, 5°, 2.5°
Rotor Kütlesi	110,000 kg
Nasel Kütlesi	240,000 kg
Kule Kütlesi	347,460 kg
Genel CM'nin Koordinat Konumu	(-0.2 m, 0.0 m, 64.0 m)

3.9. Kanat, Nasel ve Göbek Özellikleri

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) rüzgâr türbini üç kanatlı olup her bir kanatın uzunluğu 61.5 m'dir. Kule tepesinden göbek yüksekliğine olan dikey mesafe 2.4 m, türbin sapma yatağından tabana olan mesafe 87.6 m, göbek yüksekliği ise 90m olarak verilmiştir. Kanat yapısal özellikleri çizelge 3.2'de, nasel ve göbek özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Ayrıca kule özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kanat yapısal özellikleri (NREL)

Uzunluk	61.5 m
Kütle Ölçek Faktörü	% 4.54
Toplam Kütle	17,740 kg
İkinci Kütle Atalet Momenti	11,776,047 kg.m ²
Birinci Kütle Atalet Momenti	363,231 kg.m
CM Konumu	20.475 m
Yapısal Sönüm Oranı (Tüm Modlar)	% 0.48

Çizelge 3.3. Nasel ve göbek özellikleri (NREL)

Sapma Yatağının Zeminden Yüksekliği	87.6 m
Sapma Yatağının Şaft'a Sapma Eksenine Boyunca Dikey Mesafesi	1.96 m
Göbek Merkezinden Yaw Eksenine Uzaklık	5.02 m
Göbek Merkezinden Ana Yatağa olan Şaft Boyunca Uzaklık	1.912 m
Göbek Kütle	56,780 kg
Düşük Hızlı Milin Göbek Ataleti	115,926 kg.m ²
Nasel Kütle	240,000 kg
Sapma Ekseninde Nasel Ataleti	2,607,890 kg.m ²
Nacelle CM Konumu (Sapma Eksenine Rüzgâr Altı)	1.9 m
Nacelle CM Konumu (Sapma Yatağının Üzerinde)	1.75 m
Eşdeğer Nacelle-Yaw-Aktüatör Doğrusal-Yay Sabiti	9,028,320 kN.m/rad
Eşdeğer Nacelle-Yaw-Aktüatör Doğrusal-Sönüm Sabiti	19,160 kN.m/(rad/s)

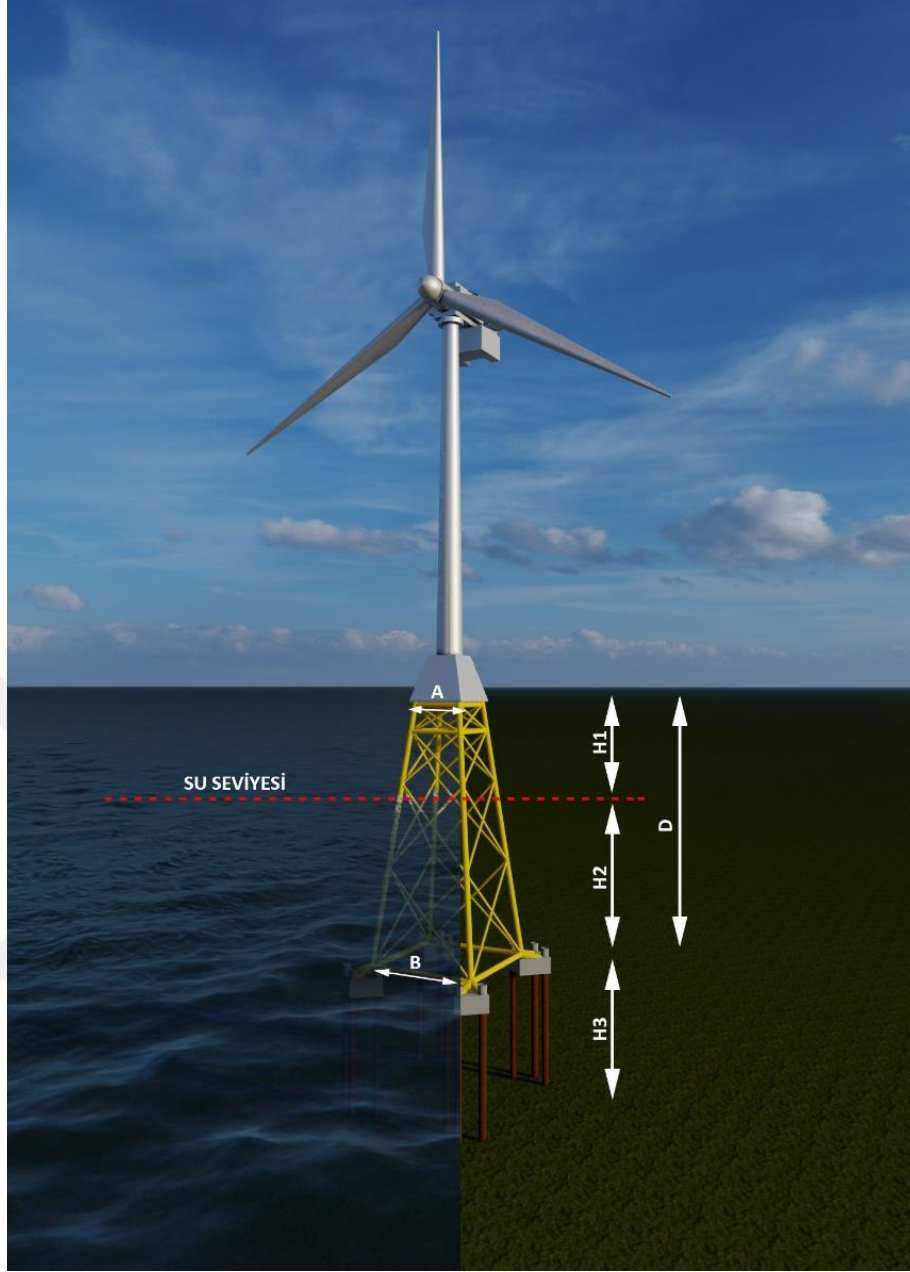
Çizelge 3.4. Kule özellikleri (NREL)

Zemin Üstündeki Kule Üstü Yüksekliği	87.6 m
Kule taban çapı	6 m
Kule taban kalınlığı	0.027 m
Kule üst çapı	3.87 m
Kule üst kalınlığı	0.019 m
Genel (Bütünleşik) Kütle	522,617 kg
Young modülü (E)	210 Gpa
Kayma modülü (G)	80.8 Gpa
Çelik yoğunluğu (etkili)	8500 kg/m ³

Yapılan çalışmada Türkiye karasuları kurulabilecek açık deniz rüzgâr türbinlerinin ve çevresel yükler altında davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Rüzgâr potansiyeli, derinlik durumu, topografik yapısı ve diğer faktörler göz önünde tutulmuş Bozcaada açıklarında 40 m su derinliğinde açık deniz ceket tipi rüzgâr türbini taşıyıcı sistemi için tasarımlar yapılmıştır. Tasarım kapsamında dalga, rüzgâr, akıntı, sismik ve çevresel yük kaynakları belirlenmiş ve yapılan analizler bu çerçevede kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Açık deniz yapıları tasarımında rüzgâr ve dalga periyotları ile olan ilişkilerinde yapı-zemin çerçevesi kapsamında önem arz ettiği görülmektedir. Kule tipi açık deniz yapılarında sahip olunan ağırlık, ağırlığın konumlandırılması (kule kotu, ağırlık merkezi kotu vs.), mesnetlenme koşulları, sistem geometrisi yapı doğal titreşim periyotlarında önemli rol oynamaktadır. Bu kapsamda yukarıda yapı geometrisi, kule özellikleri belirtilen yapıımız ankastre, yay sabitli ve katı model kazıklı olarak üç farklı mesnetlenme koşuluyla yapı analizlerinde dikkate alınmıştır. Literatürde taşıyıcı sistemin kazıklı ankraj sistemi ile birlikte analiz edilmesinin, özellikle dalga periyotlarının yapı analizlerinde yansıtılmasında etkili oluşu belirtilmiştir (Mostafa ve El Naggar, 2004). Literatürde yer alan bilgi kapsamında tasarımda ayrıca kuleli ve kulesiz olmak üzere yapı zemin ilişkisi modellere sayısal olarak yansıtılmıştır.

Taşıyıcı sistemin güvenliğini ve rijitliğini artırmak ayrıca yapı maliyetini düşürmek amacıyla literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde yapının tabanından güverte kısmına kadar daralan bir geometri oluşturulması gerekliliği savunulmuştur. Bu kapsamda literatürde yer alan kolon daralma açısı % 2-16 arasında değişkenlik gösterdiği göz önünde tutularak taşıyıcı sistem taban oturumu 25*25 m üst oturumu 11*11 m taban oturumuna sahip olup kolon açısı % 11 seviyelerinde tutulmuştur. Taşıyıcı sistem modeline ait boyutsal parametreler Şekil 3.10'da ve Çizelge 3.5'te verilmiştir. Ayrıca genel görünümleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

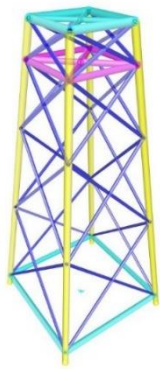
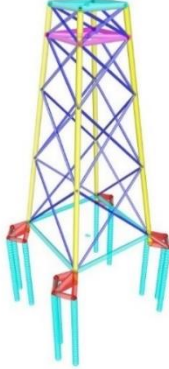
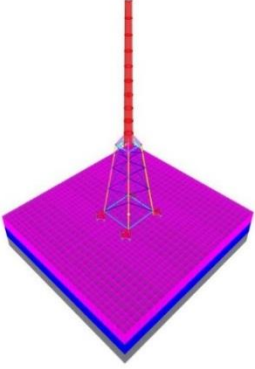
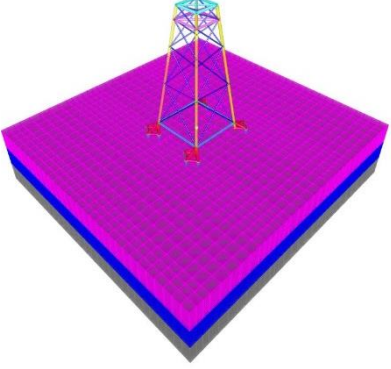


Şekil 3.10. Modele ait boyutsal parametreler

Çizelge 3.5. Modele ait boyutsal parametreler

	H₁ (m)	H₂(m)	H₃(m)	Su Derinliği (m)	D (m)	A (m)	B (m)
M1	20	40	25	40	60	11	25

Çizelge 3.6. Modellere ait genel görünüm

	
Ankastre Mesnet Tanımlı Kuleli Model (MKA)	Ankastre Mesnet Tanımlı Kulesiz Model (MTA)
	
Zemini Temsilen Yay Kullanılmış Kuleli Model (MKY)	Zemini Temsilen Yay Kullanılmış Kulesiz Model (MTY)
	
Zeminin Katı Modellendiği Kuleli Model (MKZ)	Zeminin Katı Modellendiği Kulesiz Model (MTZ)

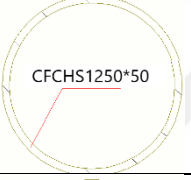
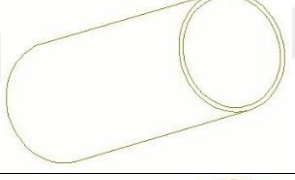
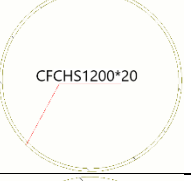
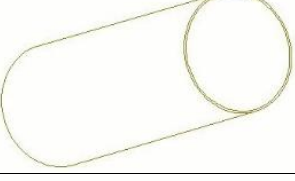
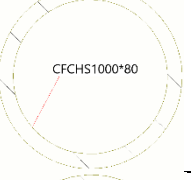
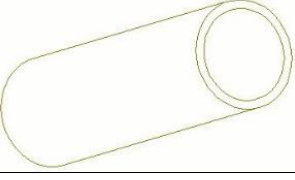
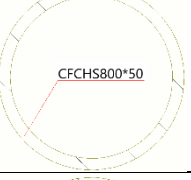
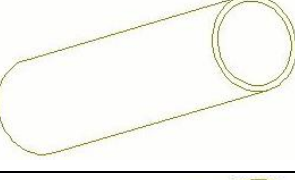
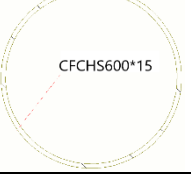
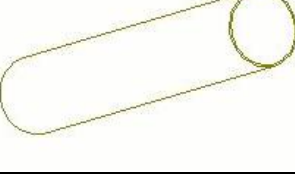
Taşıyıcı sistem olarak planlanan modellerimizde kullanılan tüm yapı elemanları malzeme özeliği olarak S355 sınıfı çelik kullanılmıştır. SAP2000 Sonlu elemanlar programına Çizelge 3.7’de ifade edilen değerler tanımlanmıştır.

Çizelge 3.7. Modellerde kullanılan malzeme sınıfı ve özellikleri

Malzeme	Fy (N/mm ²)	Fu (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Poisson oranı (ν)	Yoğunluk Kg/m ³
S355	355	510	210000	0.3	7850

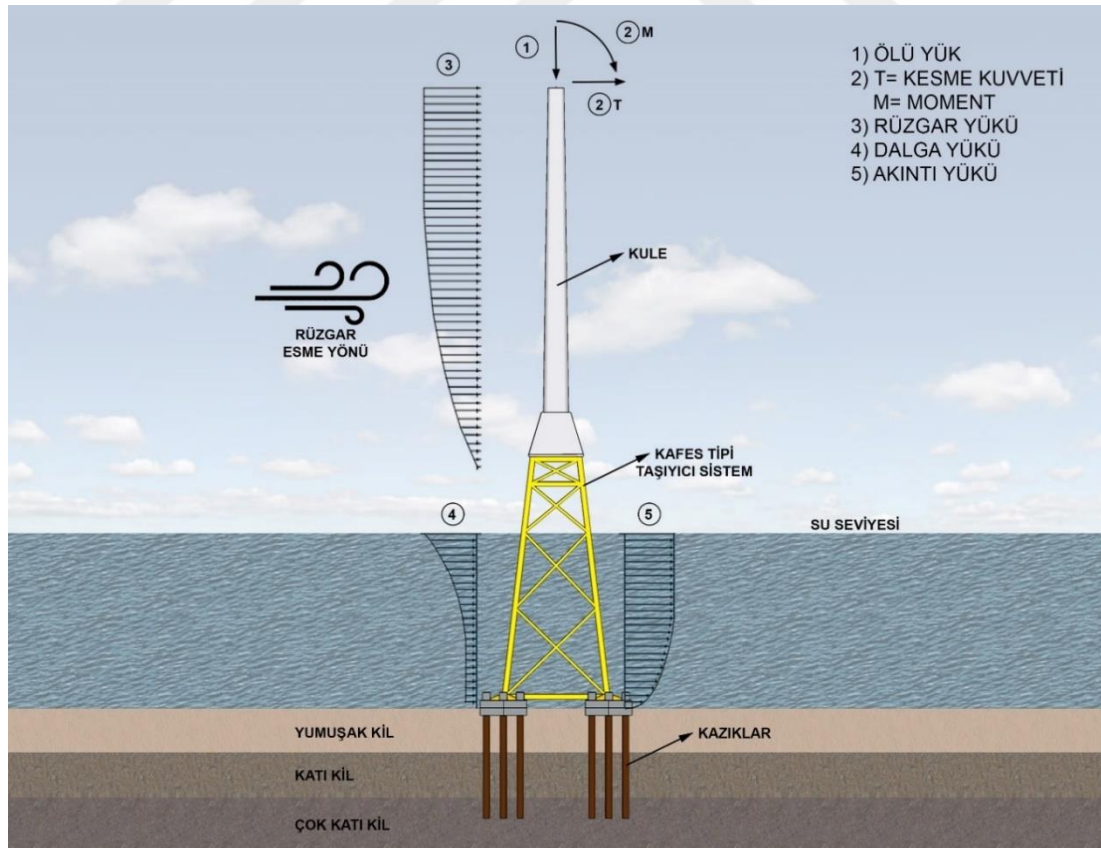
Metal veya metal alaşımların çevre ile yaptığı elektrokimyasal tepkimeler sonucunda aşınmaları durumu olarak tanımlanan korozyon olayı açık deniz rüzgâr türbin sistemlerinde de önemli bir parametre olarak yer almaktadır. Deniz suyu ciddi oranda çözünmüş tuz içerdiği ve çelik yapıları çok aşındırdıklarından dolayı deniz ortamlarındaki altyapı ve varlıklar korozyona özellikle duyarlıdır. Bu kapsamda taşıyıcı elaman olarak tercih edilecek profillerde literatür araştırmalarında dairesel kesitli profillerin diğer profil kesitlerine göre organik madde birikimlerinin en az seviyede olduğu görülmektedir. Ayrıca dairesel profillerinin kesit ataletinin her yönde aynı olması sebebi ile hem literatür hem de uygulamada taşıyıcı sistem tasarımında kullanılmaktadır. Yapılan tez çalışmasında taşıyıcı sistem olarak kullanılması planlanan modelimiz için kullanılan profil isimleri, çapları ve cidarları Çizelge 3.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. Modellerde kullanılan elemanların kesit özellikleri

	Enkesit	Genel Görünüm	Profil Adı	Çap (mm)	Cidar (mm)
KOLONLAR			CFCHS1250*50	1250	50
KUŞAK VE ÇAPRAZLAR			CFCHS1200*20	1200	20
			CFCHS1000*80	1000	80
			CFCHS800*50	800	50
			CFCHS600*15	600	15

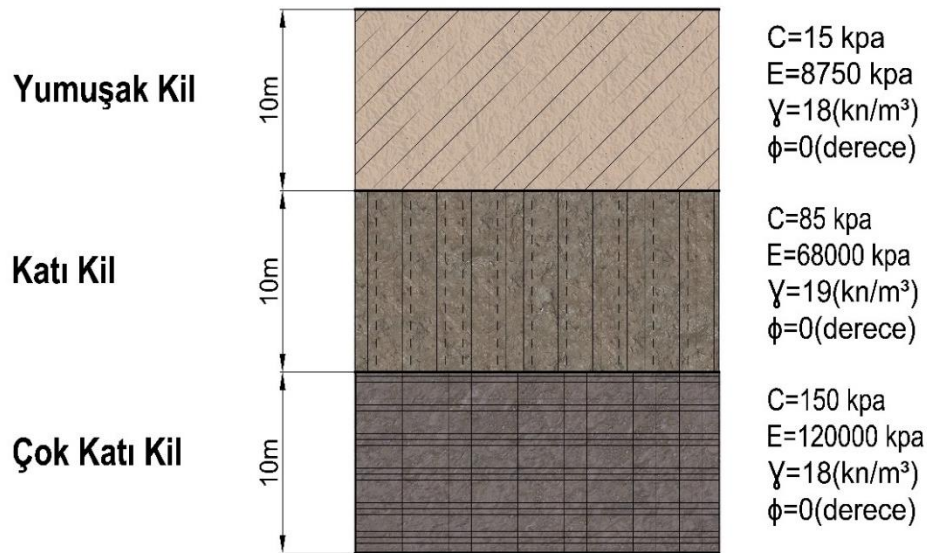
3.10. Tasarımda Dikkate Alınan Yükler

Karada ve açık denizlerde hizmet vermesi planlanan rüzgâr türbinleri hizmet ömürleri boyunca çeşitle yüklere maruz kalmaktadır. Türbin üzerindeki yüklerin en doğru şekilde belirlenmesi tasarımın bu çerçevede yapılması büyük önem teşkil etmektedir. Açık deniz rüzgâr türbinleri rüzgâr, dalga, sismik ve çevresel yüklerin etkilerini göstermekle beraber bilinen bu yüklerin farklı davranış şekillerine maruz kalmaktadır. Tasarımda ki sabit ve hareketli yüklerin yanında dikkate alınan çevresel yükler türbin üzerinde önemli ölçüde hasarlar meydana getirebilir. Açık deniz yapılarına etkiyen yükler dalga, rüzgâr, buz çarpması, gemi çarpması ve deprem olmak üzere çeşitlilik göstermektedir (API RP2A WSD). Bu yükler, sabit yüklerden farklı olarak, söz konusu süre boyunca büyüklük, konum ve yön bakımından farklılık gösterebilir. Farklı geri dönüş periyotları için, çalışma sahasının çevresel verilerine dayanmalıdır. Bu yükler; rüzgârlar, depremler, jeolojik koşullar ve sıcaklık olarak tanımlanabilir (Altunsu, 2020). Şekil 3.11’de tasarımda kullanılan yüklemeler gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Tasarımda kullanılan yüklemeler

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin yük durumları göz önüne alındığında rüzgâr, dalga ve sismik yükler etkin rol oynamaktadır. Bu kapsamda doğal titreşim periyodunun gerçeğe en yakın olarak programa tanıtılması oldukça önem arz etmektedir. Bu tip yapıların sahip oldukları doğal titreşim periyodu literatürde ortalama 1-4 sn olarak yer almakta olup ankastre kabulü yapılarak tasarlanan modellerde bu değer gerçek davranışın altına düşmektedir. Yapılan çalışmada mesnetlenme koşulları, ankraj kazıklarına her bir metre derinlikte tanımlanan ve zemin yatak katsayıları için hesaplanan yay sabitleri ile sağlanmakta olup tasarımımda kazık çapı, kazık sayısı ve kazık kesitleri sabit tutularak hem kuleli hem de kulesiz olmak üzere modellerimizde temel tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda zemin tanımı yapılan tüm modellerde kazık sayısı üçer adet belirlenmiş her ayak için üçer adet kazık kullanılmış olup kazık boyu 26m olarak tasarlanmıştır. Literatürde yer alan ideal kazık aralığı 2d-9d olarak belirtildiğinden kazık aralığı olarak yaklaşık 6m tasarımlarda dikkate alınmıştır. Modelimizde kullandığımız zemin kesiti, zeminin yoğunluğu (γ), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) özellikleri Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. MTY VE MKY modelleri zemin kesiti ve özellikleri

Şekil 3.12’de verilen zemin profilleri ve zemin özellikleri göz önüne alınarak göre Bowles (1996) yatak katsayıları Denklem 3.1 Denklem 3.2 ve Denklem 3.3’ de yer alan formüller kullanılarak hesaplanmıştır. SAP2000 sonlu elamanlar programına yay sabitleri olarak tanımlanan yatak katsayıları sayesinde sistemin

yatay yer değiştirme rijitliği sağlanmıştır. Bu kapsamda zeminin altında gerçeğe yakın bir zemin modellemesi yapılmadan zemin etkisi analizlere dâhil edilerek yapı-zemin ilişkisi incelenmiştir. Denklemlerde Meyerhof taşıma gücü katsayılarından faydalanılarak Şekil 3.12'deki içsel sürtünme açısına göre Şekil 3.13'ten seçilerek elde edilmiştir. Çizelge 3.9'da Meyerhof taşıma gücü katsayıları gösterilmektedir. (Bowles , 1996).

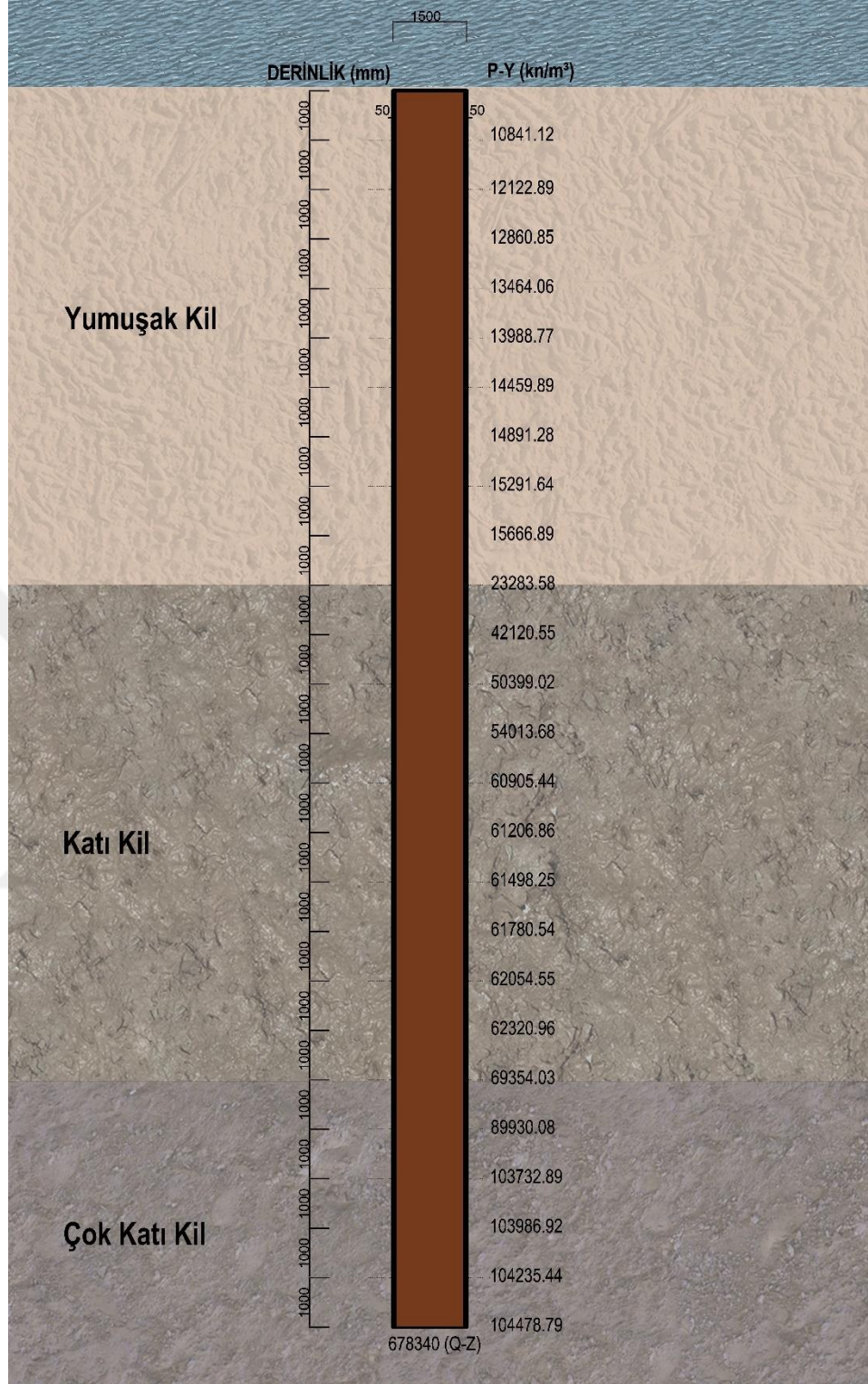
$$k_s = A_s + B_s Z^n \quad (3.1)$$

$$A_s = C * (cN_c + 0.5 * \gamma B_p * N_\gamma) \quad (3.2)$$

$$B_s = C * (N_q * \gamma) \quad (3.3)$$

Çizelge 3.9. Meyerhof taşıma gücü katsayıları (Bowles , 1996)

Meyerhor N _c , N _q , N _γ Taşıma Gücü Katsayıları			
Φ	N _c	N _q	N _γ
0	5,14	1	0
5	6,49	1,6	0,1
10	8,34	2,5	0,4
15	10,97	3,9	1,1
20	14,83	6,4	2,9
25	20,71	10,7	6,8
26	22,25	11,8	8
28	25,79	14,7	11,2
30	30,13	18,4	15,7
32	35,47	23,2	22
34	42,14	29,4	31,1
36	50,55	37,7	44,4
38	61,31	48,9	64
40	75,25	64,1	93,6
45	133,73	134,7	262,3
50	266,5	318,5	871,7



Şekil 3.13. MTY VE MKY yatak katsayıları

3.10.1. Dalga Yüğü

Açık deniz yapıları için dalga kaynaklı yükler tasarım yapılırken taşıyıcı sistemin belirlenmesinde en önemli yüküdür. Çalışmada dikkate alınan dalga kuvvetleri

rüzgârın su üzerinde ki kütleyi harekete geçirmesi ile oluşan dalga kuvvetleridir. Bu dalga kuvvetleri için yapı hem su kütlesi hem de su kütlesinin hareketlerinden etkilenmektedir. Bu kuvvetlerin yapısal elemanlarda yatay deplasman oluşturmaktadır. Su yüzeyinde oluşan bu dalgalar tasarımın en önemli parametresidir (U. S. Army Corps of Engineers, 2015). Yüzeyde oluşan dalgalara ilave olarak farklı derinliklerde farklı doğrultularda gelen akıntıların etkisinde de kalabilen yapı, bu kuvvetlere karşı dayanımlı olmaktadır (Chakrabarti, 2015). Dalgaların tanımlanmasın düzenli ve düzensiz olarak iki farklı dalga teorisi kullanılmaktadır. Düzenli dalgalar iki boyutlu düzlemde sabit yükseklik ve sabit dalga periyodu kabulü yapılarak matematiksel olarak dalga mekaniğinin anlaşılmasında kullanılır. İki boyutlu olarak kabul edilen dalgalar sinüzoidal formda hareket ettiği kabul edilir. Küçük genlikli dalga teorisi örnek olarak gösterilebilir.

Küçük dalga teorisi olarak adlandırılan düzenli dalga teorisinden temelde dalgayı oluşturan parçacığın belli bir anda belli bir konumda bulunan hız ve ivme değerlerinden yola çıkarak kuvvet hesabı yapılmaktadır (Kocaman, 2021). Dalga yüksekliklerinin artması sonucunda dalgalarda kırılım olmaktadır, bunun sonucunda düzenli olan sinüzoidal görünüm bozulmaktadır. Daha sivri tepeler ve daha sivri çukurların davranışa etkisini anlatabilmek adına düzensiz dalga teorileri kullanılmaktadır. Düzensiz dalga teorileri aslında doğada ölçümler sonucu oluşturulan dalga verilerinin istatistiki çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır. Cnoidal, Solitary, Stokes 2. 3. 4. 5. ve daha yüksek dereceli olan dalga teorileri kullanılabilmektedir.

Lineer dalga teorisi mühendislik çözümlerinde genel manada yeterli sonuçlar vermektedir (U. S. Army Corps of Engineers, 2015). Dalga teorisi seçiminde dalga ve kıyı arasındaki yanaşma açısı dikkate alınmalıdır. Kıyıya yaklaşan dalgalarda şekil farklılıkları oluşmaktadır. Bu sebeple yapılan incelemelerde kıyıya yaklaşan dalgalarda yüksek dereceli dalga teorileri kullanılmaktadır (Chakrabarti, 2015).

Dalga kuvvetinin hesaplanmasında dalga hesap yöntemi seçiminden sonra statik kuvvete çevirebilmek adına Morison Formülü kullanılmaktadır. Morison Formülü sayesinde statik kuvvet şekline döndürülen dalga kuvveti yapısal

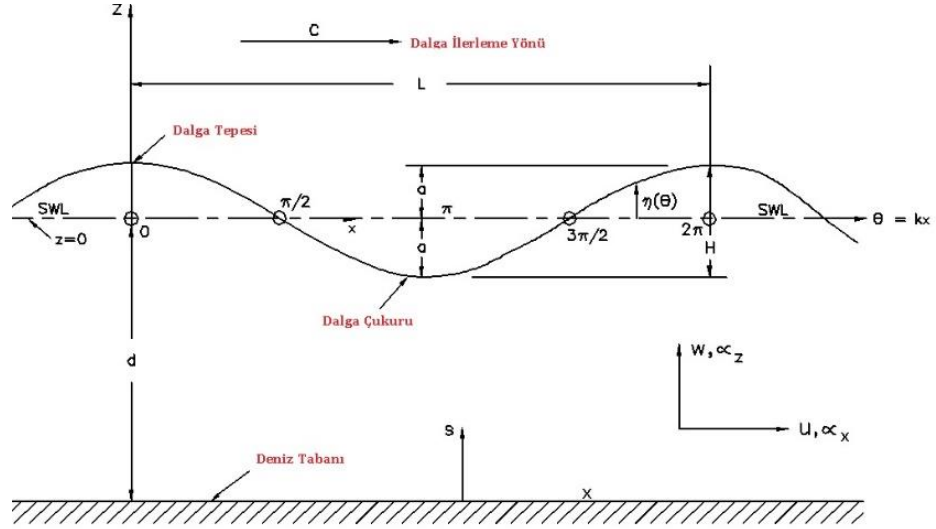
elemanlar üzerine etki ederler. Dalga hareketi süresince değişen dalga hızı ve ivme değerleri farklı kuvvetlerin hesaplanmasını sağlamaktadır. Kullanılan programlar en büyük kuvvetleri seçerek analizlere devam etmektedir.

Dalga kuvvetleri hesaplanırken farklı yönetmeliklerde yer alan farklı geri dönüş periyotları yer almaktadır. Analizler yapılırken yapı ömrü boyunca olması muhtemel tüm dalgalar analizlere dahil edilebileceği gibi, yapı ömrü boyunca sadece bir kez karşılaşılabilecek olan dalga ile de analizlere devam edilebilir.

3.10.1.1. Küçük genlikli dalga teorisi

Dalgaların tanımlanmasında kullanılan en basit ve kolay çözüm üreten teoridir. 2 boyutlu hareket kabulü yapılır. Dalga sinüzoidal şekilde tanımlanır. Bu şekil kabulü doğada bulunan dalga şekli ile benzerlik göstermemesine rağmen mühendislik problemlerinin çözümünde kolaylık sağlar. Küçük genlikli dalga teorisinde durgun su seviyesi için tepe ve çukurlar birbirine eşittir. Dalga genliği dalga yüksekliğinin yarısıdır.

Belirli bir noktadan geçen ardışık iki dalga tepesi veya çukurunun geçiş süresi dalga periyodu “T” olarak tanımlanır. Dalga boyu “L” ise, iki dalga tepesi veya iki dalga çukuru üzerinde ki özdeş iki nokta arasındaki mesafe olarak tanımlanır. Dalga yayılım hızı “ $C=L/T$ ” olarak tanımlanır. Küçük Genlikli Dalga Teorisi kullanılırken akışkanların homojen olup sıkıştırılamayacağı, yoğunluklarının sabit olacağı, yüzey geriliminin ihmal edileceği, coriolis etkisinin ihmal edileceği ve dalga genliğinin küçük olup zamanla değişmeyeceği kabulleri yapılmaktadır (Kocaman, 2021). Küçük genlikli dalga teorisi Şekil 3.14’de gösterilmektedir.



Şekil 3.14. Küçük genlikli dalga teorisi kesit

η dalganın herhangi bir andaki periyot ve dalga boyuna bağlı yüzey yükselmesi olarak tanımlanmaktadır. Denklem 3.4'te gösterilmiştir.

$$\eta = \alpha \cos(kx - \omega t) = \frac{H}{2} \cos 2\pi r \left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right) = \alpha \cos \Theta \quad (3.4)$$

Burada $H/2$ dalga yüksekliğinin yarısını tanımlamaktadır. α doğrusal dalga teorisinde dalga yüksekliği yarısına denk gelmektedir dalga genliği olarak tanımlanır. L dalga boyunu T dalga periyodunu tanımlamaktadır.

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (3.5)$$

C dalga periyot, su derinliği ve dalga boyuna bağlı olarak dalga hızını göstermektedir.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) = \frac{gT}{w} \tanh(kd) \quad (3.6)$$

$$L \sim \frac{gT^2}{2\pi} \sqrt{\tanh\left(\frac{4\pi^2 d}{T^2 g}\right)} \quad (3.7)$$

L ; periyot, su derinliği ve açısal frekansa ($w=2\pi/T$) bağlı olarak dalga boyunu göstermektedir. Denklem 3.7'de gösterilen yöntemde en fazla %10 hata oranıyla yaklaşık sonuç bulmada kullanılabilir.

Dalga hareketi içerisinde yer alan su parçacığının yatay-düşey hız ve ivme değerleri dalga hareketini kuvvete çevirmede önem arz etmektedir. Parçacık hızının yatay bileşenini Denklem 3.8’de parçacık hızının düşey bileşenini Denklem 3.9’da göstermektedir.

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \left[\left(\frac{\cosh[2\pi \frac{(z+d)}{L}]}{\cosh[\frac{(2\pi d)}{L}]} \right) \right] \cos\theta \quad (3.8)$$

$$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \left[\left(\frac{\sinh[2\pi \frac{(z+d)}{L}]}{\cosh[\frac{(2\pi d)}{L}]} \right) \right] \sin\theta \quad (3.9)$$

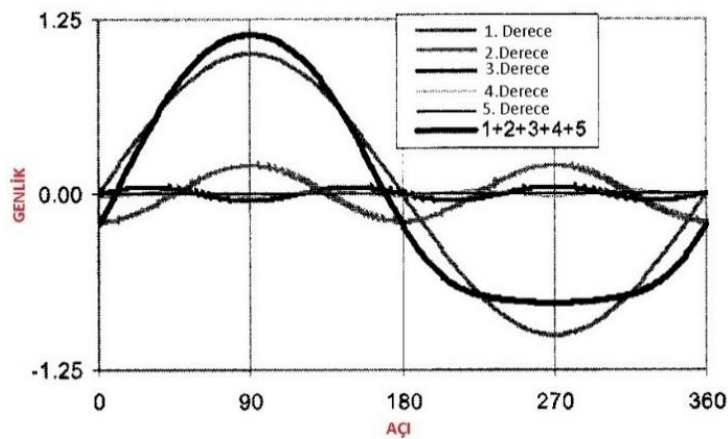
Denklem 3.10 ve 3.11’de tanımlanan formüller ile parçacık hareketinin yatay ve düşey ivme bileşenleri tanımlanmıştır (U.S. Army Corps of Engineers, 2015).

$$a_x = \frac{g\pi H}{L} \left[\left(\frac{\cosh[2\pi \frac{(z+d)}{L}]}{\cosh[\frac{(2\pi d)}{L}]} \right) \right] \sin\theta \quad (3.10)$$

$$a_z = -\frac{g\pi H}{L} \left[\left(\frac{\sinh[2\pi \frac{(z+d)}{L}]}{\cosh[\frac{(2\pi d)}{L}]} \right) \right] \cos\theta \quad (3.11)$$

3.10.1.2. 5.derece stokes dalga teorisi

Bu dalga teorisinde dalgayı tanımlama da üst derece etkiler dikkate alınmıştır. Bu bileşenler art arda daha küçük bir büyüklüğün sırasındır. Şekil 3.15’te üst derece dalga mertebelerinin dalga davranışına etkisi görülmektedir.

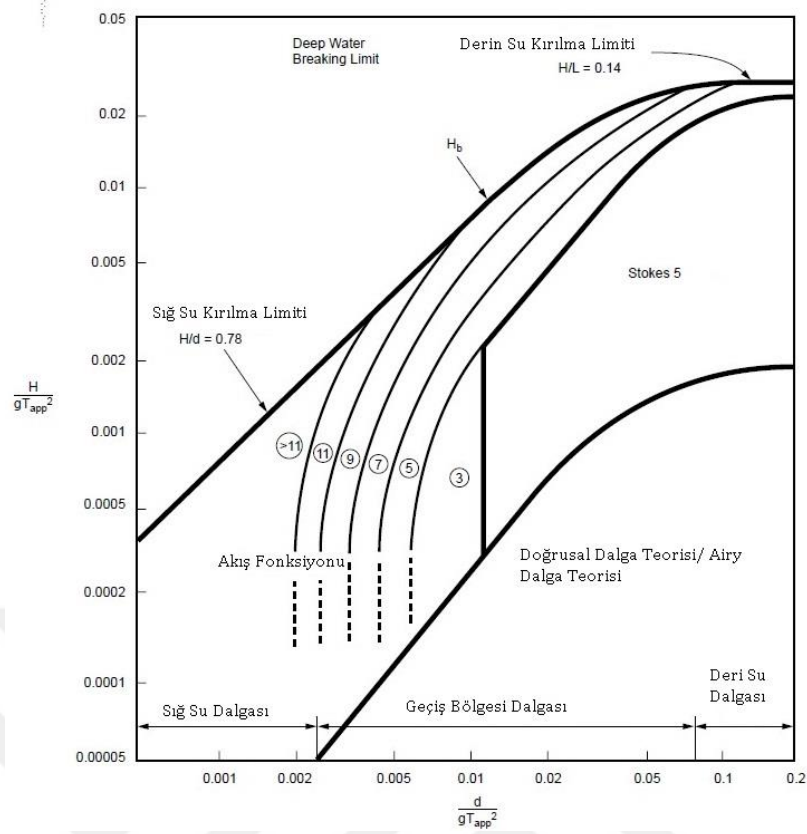


Şekil 3.15. Kullanılan dalga teorilerinin mertebelerinin dalga şekline etkisi (Chakrabarti, 2005)

Farklı dereceden Stokes dalga teorileri aslında bir alt derecede k , dalga teorilerinin farklı frekansları olarak yorumlanmaktadır. Şekil 3.15’de görüldüğü üzere oluşmuş olan derin çukur ve yüksek dalga tepeleri yapısal elemanlar üzerinde ciddi etkilere sahip olmaktadır (Chakrabarti, 2005). Yüksek dalgalar mühendislik çözümlerinde daha büyük kuvvetler oluşturmaktadır. Dolayısıyla üzerinde daha bir özenli çalışma gerektirir.

Yapısal tasarım yapılırken genellikle büyük dalgalar dikkate alınır. Bu sebeple yüksek dereceli dalga teorilerinin kullanılması yapısal tasarımda yüksek dalgaların tanımlanmasında daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. 5. dereceden Stokes Dalga Teorisi hem sığ hem de derin sularda tasarım yapılırken kullanılmaktadır. Stokes dalgalarında parçacık hareket yörüngesi Küçük Genlikli Dalga Teorisinden farklı olarak artık kapalı bir yörünge de değil, dalga ile beraber hareket eden ve kütle taşınımına yol açan bir dairesel veya elipsel yörüngede hareket ederler (Kocaman, 2021).

Açık deniz rüzgâr türbini modelimizde dalga yükseklik ve periyotlarının belirlenmesinde Atkins tarafından tasarlanan API tarafında düzenlenen cetvel kullanılarak karar verilmiştir. Cetvel kapsamında Y eksen H/gT^2 X eksen d/gT^2 boyutsuz değerler kullanılarak seçilmiştir. Modelimizde kullanılacak bu değerler SAP2000 sonlu elemanlar analiz programına dalga periyodu, dalga yüksekliği ve dalga teorisi seçilerek dalga yükleri tanımlanarak API standartlarına göre etkitilmiştir. Atkins Cetveli Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. Dalga seçiminde kullanılan Atkins cetveli (API, 2000)

Tasarlanan tüm modellerde su derinliği sabit alındığından dolayı yapıya etki eden dalga kuvveti bütün modellerde aynı olup dalga periyotları ve dalga yükseklikleri Çizelge 3.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. Modellere etki eden dalga yüksekliği ve periyot değerleri

Dalga Periyodu (sn)	5 m	7,5 m	10 m
6 sn	✓	-	-
7 sn	✓	✓	-
8 sn	✓	✓	-
9 sn	✓	✓	✓
10 sn	✓	-	-

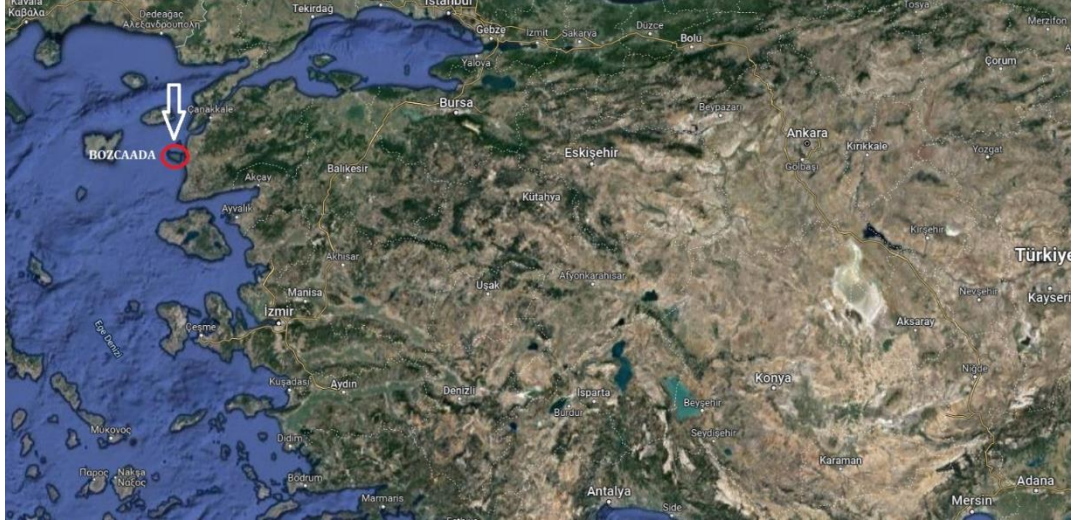
3.10.2. Deprem yükü

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin kurulacağı alanın sismik olarak incelenmesi, yapıların fay hatlarına olan uzaklığı özellikle bu faylarda oluşan deprem büyüklüklerinin incelenmesi önem arz etmektedir. Fay hatlarında oluşan zemin

içerisindeki sivilaşma durumları incelenmeli sismik alanın aktivitesi yapı üzerinde oluşturabilecek hasarlar açısından değerlendirilmesi tavsiye edilmektedir. Yapı ömrü boyunca karşılaşması ön görülen en büyük depremlerin çalışmasının yapılması, tasarım açısından deprem tekrar periyotları ve yapı hasarları incelenerek dizayn yapılması gerekmektedir (Kocaman, 2021).

Deprem kuvveti statik ve dinamik olarak incelenmeli, bölgeye göre tasarımlar gerçekleştirilmelidir. Deprem etkisinin az olduğu bölgelerde rüzgâr ve dalga kuvvetleri ön plana çıkarken, deprem etkisinin fazla olduğu bölgelerde sismik etkiler dikkate alınmalıdır.

Çalışma kapsamında diğer yükleme tipi deprem etkisi olmakla birlikte Bozcaada çalışma alanı için DD2 deprem yük tanımlamaları belirlenerek analizler yapılmıştır. Sismik yüklerin belirlenmesinde zemin sınıfı ZD olarak kabul edilmiş, deprem parametreleri bu doğrultuda hesaplanmıştır. Açık deniz yapılarının tasarımı ve yapımında sahaya özgü sondajlar yapıp zemin profillerinin belirlenmesi ve analizlerin zemin tahminleri üzerinden değil, gerçek zemin profilleri üzerinden yapılması tavsiye edilmektedir. Analizlerde dinamik ve statik sismik yüklemeleri yapılarak statik yüklemelerde AFAD veri tabanı için oluşturulan eşdeğer statik yükleme verileri kullanılmıştır. Dinamik yüklemeler için 11 ayrı deprem kaydı seçilen çalışma alanı doğrultusunda ölçeklendirilmiş, ölçeklendirilmiş ivme kayıt verileri üzerinden spektrum eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen spektrum eğrileri üzerinden ortalama spektrum eğrisi analizlerde dikkate alınmıştır. Yapılan tez çalışmasında araştırmalar sonucunda kabul edilen zemin özelliklerine göre zemin tehlike analizi yapılarak zemin özellikleri doğrultusunda deprem spektrumu ve spektrum ile uyumlu yer hareketleri belirlenmiştir. Tasarımda seçilen çalışma alanı için Bozcaada açıklarında şekil 3.17’de gösterilen 3 yer seçilerek zemin parametreleri AFAD deprem tehlike haritasından alınıp ortalama değer belirlenerek ölçeklendirilmiştir. Zaman tanım alanında lineer analizlerde kullanılacak 11 deprem kaydının ortalama ivme spektrumu 0,2T-1,5T olacak şekilde ölçeklendirilmiştir.



Şekil 3.17. Deprem kuvveti için seçilen Bozcaada çalışma alanı

3.10.3. Rüzgâr Yüğü

Açık deniz rüzgâr türbinlerinde en belirgin kuvvetlerden biri de rüzgâr kuvvetleridir. İşletme anında yapıya gelen en önemli yatay etki rüzgâr kuvvetleri olup rüzgâr türbinleri ağırlıklı olarak rüzgâr kuvvetine göre tasarlanmaktadır. Açık deniz rüzgâr türbini temeline gelen döndürme momentinin yaklaşık % 75'ini rüzgar kuvvetleri oluşturmaktadır (Byrne vd., 2003). Rüzgâr ölçümleri, meteorolojik rüzgâr hızları gibi etkenler kule yüksekliği göz önünde bulundurulurken ele alınmalıdır. Ülkemiz TS498 ve ilgili yönetmeliklerde kara yapılarında tasarlanacak çelik yapılar için rüzgâr hızları tanımlanmış, ancak açık deniz yapılarıyla ilgili herhangi bir tanımlama ve kritere yer verilmemiştir. Deniz yapılarında topografik durum sebebiyle rüzgâr şiddetinin azalması, daha düşük mertebelerde olması sebebiyle deniz üzerinde elde edilen rüzgâr hızlarından veya meteorolojik verilerden direkt olarak yararlanılabilir. Türkiye'de deniz yapılarının tasarımı kapsamında rüzgâr hızı değerlerini elde etmek için Türkiye kıyıları derin deniz rüzgâr ve dalga atlası, Meteoroloji Genel Müdürlüğü ve çeşitli kurum-kuruluşlardan alınacak veriler dikkate alınabilir.

Yapılan çalışmada Türkiye karasuları Bozcaada açıklarında literatür kapsamında araştırmalar gerçekleştirilmiş, rüzgâr hızının 10 m yükseklik için ortalama 4.78m/sn olduğu görülmüştür. Rüzgâr türbinlerinin devreye girebilmesi için gerekli olan rüzgâr hızı 3-4 m/sn, nominal seviyede üretebilecekleri güç için gerekli olan rüzgâr hızı 10-12 m/sn, güvenilir bir şekilde çalışacağı maksimum

rüzgâr hızı 25-30 m/sn olarak bölüm 3.1’de detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu kapsamda yapılan tez çalışmasında farklı mesnetlenme koşulları altında tüm modellere 30 m/sn rüzgâr hızı etkitilmiştir. Kule yapısının dikkate alındığı bölümde rüzgâr yükü doğrudan kule yapısına etkitilmiş, kanatlardan ve naselde rüzgâr kaynaklı oluşacak kesme kuvveti ve moment etkileri de dikkate alınmıştır. Kule yapısı dikkate alınmadan tasarlanan modellerde ise kanat, nasel ve kulede oluşacak rüzgâr kaynaklı kesme kuvveti ve moment etkileri taşıyıcı sisteme doğrudan etkitilmiştir.

3.10.4. Ölü Yük ve Diğer Yükler

Tasarım kapsamında ölü yükler Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de detaylı şekilde verilen kanat, rotor ve nasel ağırlığı olarak kule dikkate alınan modellerde kule yapısı üzerine kule yapısı dikkate alınmayan modellerde kanat, rotor, nasel ve kule ağırlığı taşıyıcı sistem üzerine etkitilmiştir.

Analizlerde ekstrem durum yük kombinasyonu kullanılmış olup çizelge 3.11’de verilmiştir. Analiz sonuçları elde edilen veriler ve grafikler bu kombinasyona göre alınmıştır. Aynı anda dalga, rüzgâr ve deprem yükleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 3.11. Analizlerde kullanılan yük kombinasyonu

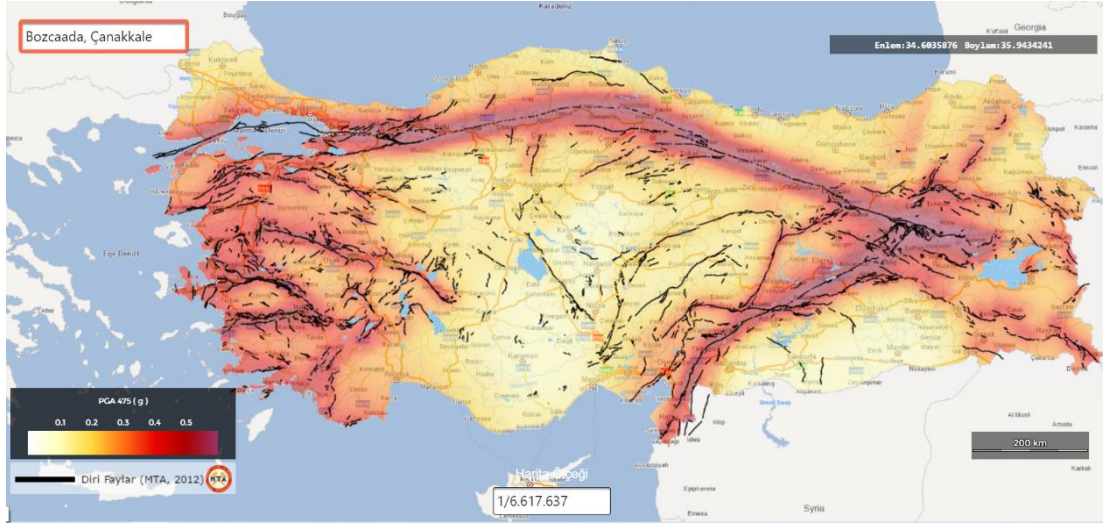
Ekstrem Durum Yük Kombinasyonu
1,0D+1,0L+1,3E
D: Ölü (Kalıcı) yükler (Kanat, Nasel, Rotor, Kule) L: Hareketli yükler (Aerodinamik) E: Çevresel yükler (Dalga, Rüzgâr, Deprem)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

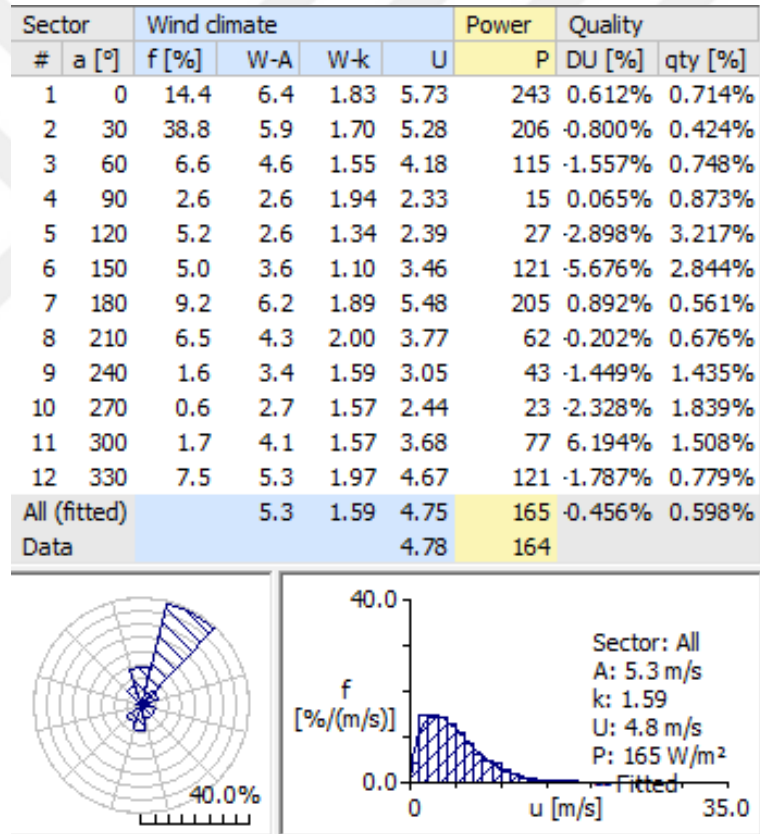
Yapılan bu çalışmada sığ sularda hizmet vermesi planlanan açık deniz rüzgâr türbinleri taşıyıcı sistem davranışları statik ve dinamik yükler altında analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde taşıyıcı sistemlerin mesnetlenme koşullarının yapı davranışı üzerine etkisini inceleyebilmek adına oluşturulan modeller temele ankastre, yay sabiti tanımlı ve katı zemin modellenli olmak üzere 3 mesnetlenme koşulu için analiz edilmiştir.

Analizlerde ayrıca taşıyıcı sistem üzerinde konumlanan türbin taşıyıcı platformun sistem davranışına olan etkisini de ayırtırmak amacıyla tüm bu modeller kule tanımlı ve kule tanımsız sistem olmak üzere ayrı ayrı analiz edilmiştir. Kule tanımlı sistemin tanımlanmadığı durumda; kule bölümünden gelen yükler ana taşıyıcı sisteme, en üst kottan her bir kolona etkilmiştir. Bu kapsamda; rüzgâr türbini, zati ağırlığı ölü yük, sistem hizmet koşullarında oluşan etkiler hareketli yük kapsamında değerlendirilmiştir.

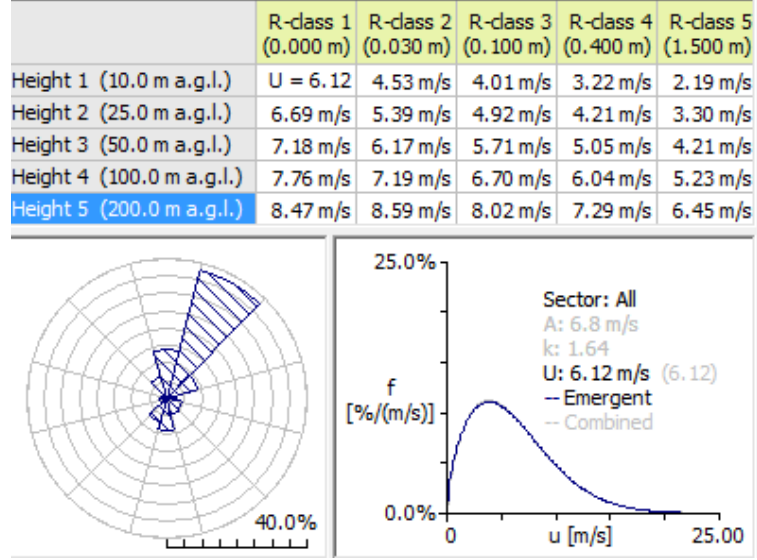
Çalışmada dikkate alınan taşıyıcı sistem için etkin yük durumları kapsamında, rüzgâr, dalga ve sismik yükler dikkate alınmıştır. Bu kapsamda ülkemiz karasuları içinde yıllık ortalama rüzgâr istatistikleri detaylı bir şekilde tanımlanan Bozcaada açıkları çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bozcaada açıkları çalışma alanı seçilen analizlerde sismik yük verileri Şekil 4.1’de konum bilgileri detaylı bir şekilde ifade edilen yerleşim alanı için ülkemiz AFAD Risk Haritaları kapsamında belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.2’de Bozcaada gözlenmiş ortalama rüzgâr iklimi, Şekil 4.3’de Bozcaada rüzgâr atlası verilmiştir.



Şekil 4.1. Sismik yük verileri (AFAD)



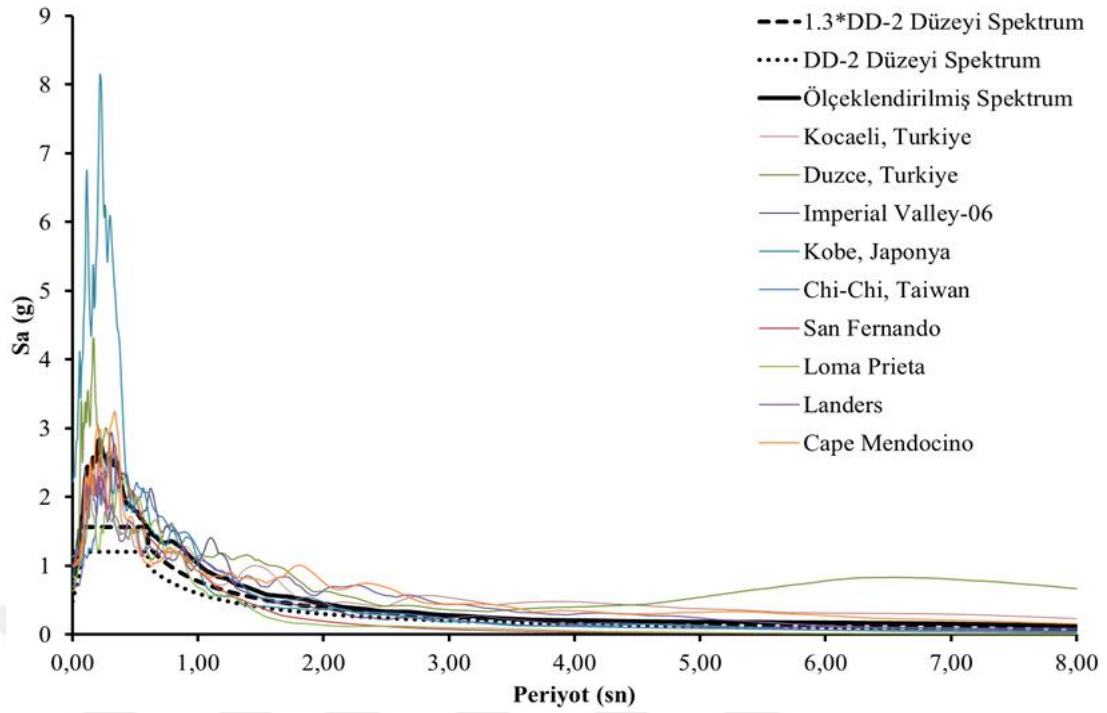
Şekil 4.2. Bozcaada gözlenmiş ortalama rüzgâr iklimi (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021)



Şekil 4.3. Bozcaada rüzgâr atlası (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021)

Bu tipteki yapıların tasarımının ilgili literatür ve şartnamelerde deprem sınıfı tanımlaması DD1 ve DD2 kapsamında yapılması önerilmekte olup bu noktadaki seçim tasarımcıya bırakılmıştır. Yapılan bu çalışmada sismik yük değerleri Bozcaada çalışma alanı için DD2 deprem yük tanımlamaları için belirlenerek analizler yapılmıştır. Sismik yüklerin belirlenmesinde zemin sınıfı ZD olarak kabul edilerek deprem parametre yükleri hesaplanmıştır.

Dinamik analizlerde ise çalışma kapsamında Şekil 4.4'te ifade edilen ivme kayıtları Bozcaada açıklarında koordinat düzlemi tanımlanan çalışma alanı için ölçeklendirilmesi yapılmış ve ölçeklendirilmiş ivme kayıtları üzerinden elde edilen ivme spektrum eğrileri için analizler yapılmış ancak çalışma kapsamında ortalama ivme spektrum eğrisine ait sonuçlar paylaşılmıştır.

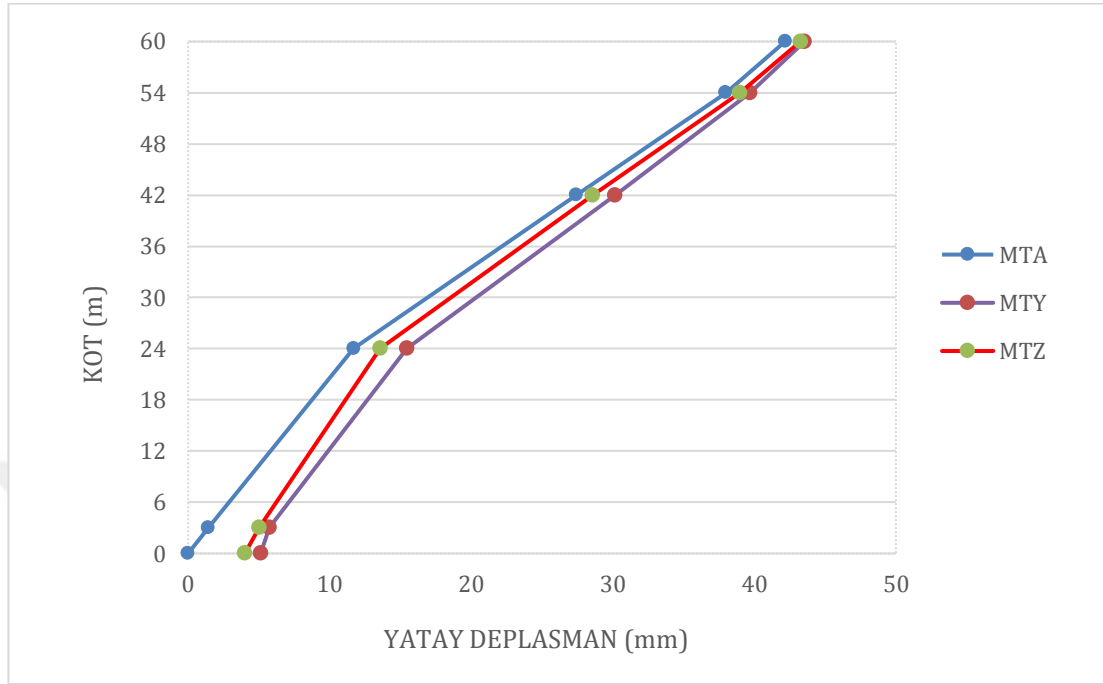


Şekil 4.4. Ölçeklendirilmiş deprem ivme-spektrum eğrileri

Analizler sonucunda elde edilen sonuçlar taşıyıcı sistem ve taşıyıcı sistemin zemin ile olan ilişkisini sağlayan temel sistemi olmak üzere iki bölümde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda öncelikli olarak taşıyıcı sistemin deniz tabanından kule kotuna kadar olan bölümdeki, her yatay kuşaklama kotu için yanal yer değiştirmeleri statik ve dinamik yükler altında hesaplanmış ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu bölümdeki karşılaştırmalar ankastre mesnet tanımlaması, yay tanımlı zemin tanımlaması ve katı model zemin tanımlaması için yapılmıştır.

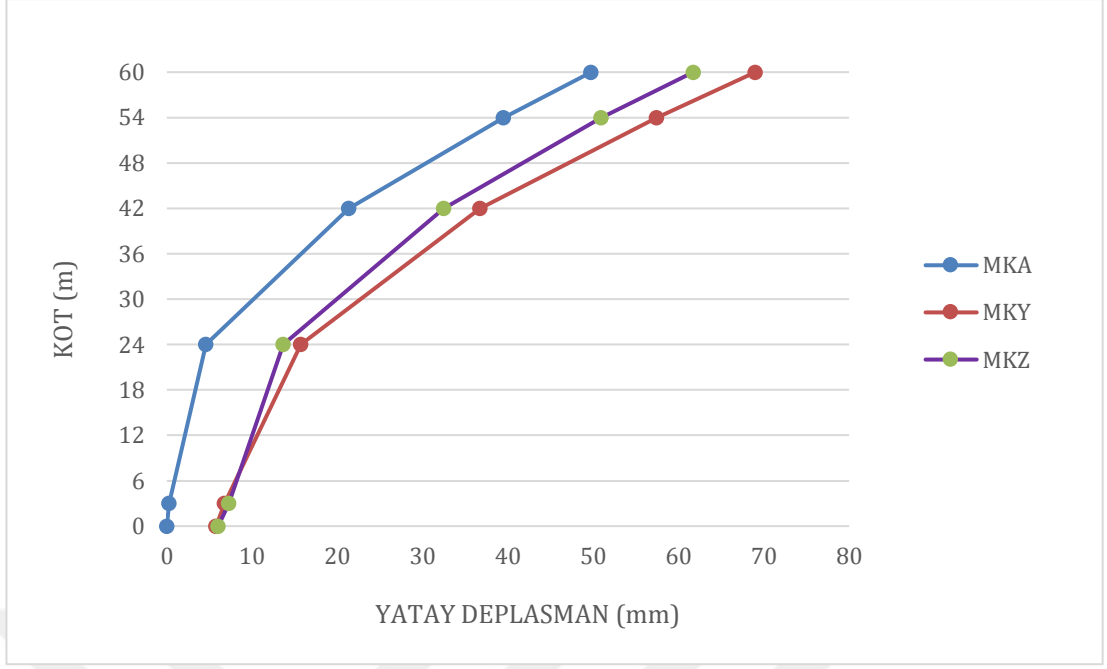
Kazıklı temel sistemine ait sonuçların değerlendirildiği bölümde ise; yay tanımlı zemin durumu ve katı model zemin tanımlamasına ait sonuçlara yer verilmiştir. Çalışmada her taşıyıcı kolon altında üç adet kazık hizmet vermektedir. Bu bölümde sistem yükleme yönüne göre, basınç ve çekme yüklerinin etkin olduğu ayaklarda yer alan maksimum iç kuvvetlerin ve maksimum yanal yer değiştirmenin etkin olduğu kazık elemanlardan bir adet seçilmiş, bunlara ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen tüm sonuçlar kule yapısı ile birlikte ve kule yapısı dikkate alınmadığı durum olmak üzere iki aşamalı değerlendirilmiştir. Şekil 4.5'te kule yapısı dikkate alınmadan analiz edilen

taşıyıcı sistemin her 3 mesnetlenme koşuluna ait yanal yer değiştirmeleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.5. Kulesiz modellerin zemine ankastre, yay sabitli ve zemin katı model tanımlı yanal yer değiştirme grafiği

Kule yapısının dikkate alınmadığı DD2 deprem durumu yanal yer değiştirmelerin paylaşıldığı Ş ekil 4.5 incelendiğinde her 3 mesnetlenme koşulu için deniz tabanından kule kotuna kadarki yapısal davranışın benzer olduğu ancak yay tanımlı ve katı zemin tanımlı modellerin ankastre modelden deniz tabanı kotundaki yanal yer değiştirme miktarınca ayrıştığı görülmektedir. Bu kapsamda yay tanımlı zemin durumu ve katı zemin durumlu modellerde deniz tabanı kotunda ortalama 5mm yanal yer değiştirme hesaplanmış her 3 model için de tepe kotu yanal yer değiştirme miktarı 40mm mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.6'da taşıyıcı sistem kule yapısı ile birlikte analiz edilmiş, yapılan analiz sonucunda elde edilen grafikler sunulmuştur.

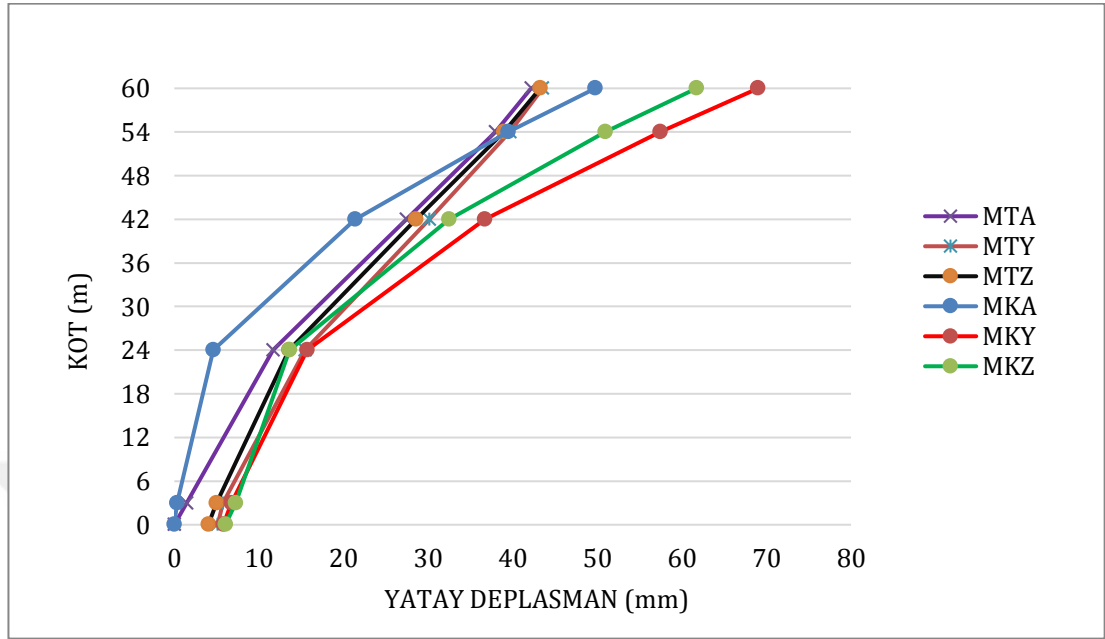


Şekil 4.6. Kuleli modellerin zemine ankastre, yay sabitli ve zemin katı model tanımlı yanal yer değiştirme grafiği

Grafikler incelendiğinde yapının deniz tabanından kule kotuna olan yapısal davranışı her 3 mesnetlenme koşulu için benzerdir. Davranışça uyum, kulesiz yapı analizlerine göre daha etkin düzeydedir. Tüm sistemlerde, yatay yer değiştirme miktarını gösteren eğrideki kırılmalar, aynı kotlarda değişmektedir. Kulesiz sistemde olduğu gibi, yay tanımlı mesnetlenme koşulu ve katı model mesnetlenme koşulu için elde edilen sonuçlar taban kotundaki yanal yer değiştirme miktarı sebebiyle ankastre mesnetlenmiş modelden ayrılmaktadır. Bu modelde de taban kotundaki yanal yer değiştirme ortalama 7mm mertebelerinde hesaplanmıştır. Kulesiz modelde bu değer 3mm mertebelerindedir. Bu modelin diğer modelden ayrışmasındaki en temel faktör ilk ötelenme rijitliklerinin kulesiz modellere göre büyük olmasıdır. Bu fark taşıyıcı sistemin kule ile birlikte modellendiğinde kulenin yapısal davranışta belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu durum tasarımcının taşıyıcı sistem bağlantı noktalarında dikkate alması gereken detay çözümlerini ön plana çıkarmaktadır.

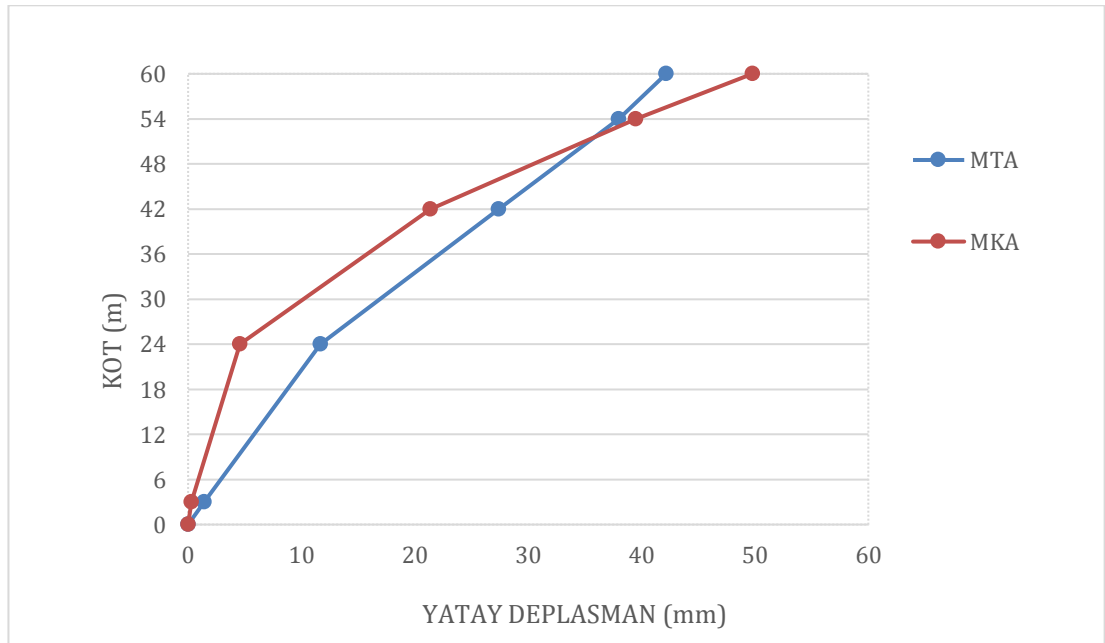
Analiz sonuçlarına göre kuleli ve kulesiz olarak modellenen ve analiz edilen sistemin yapısal davranışlarını birbirleri ile detaylı olarak karşılaştırabilmek

amacıyla her 3 mesnet koşulu kendi içinde karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.7’de sunulmuştur.



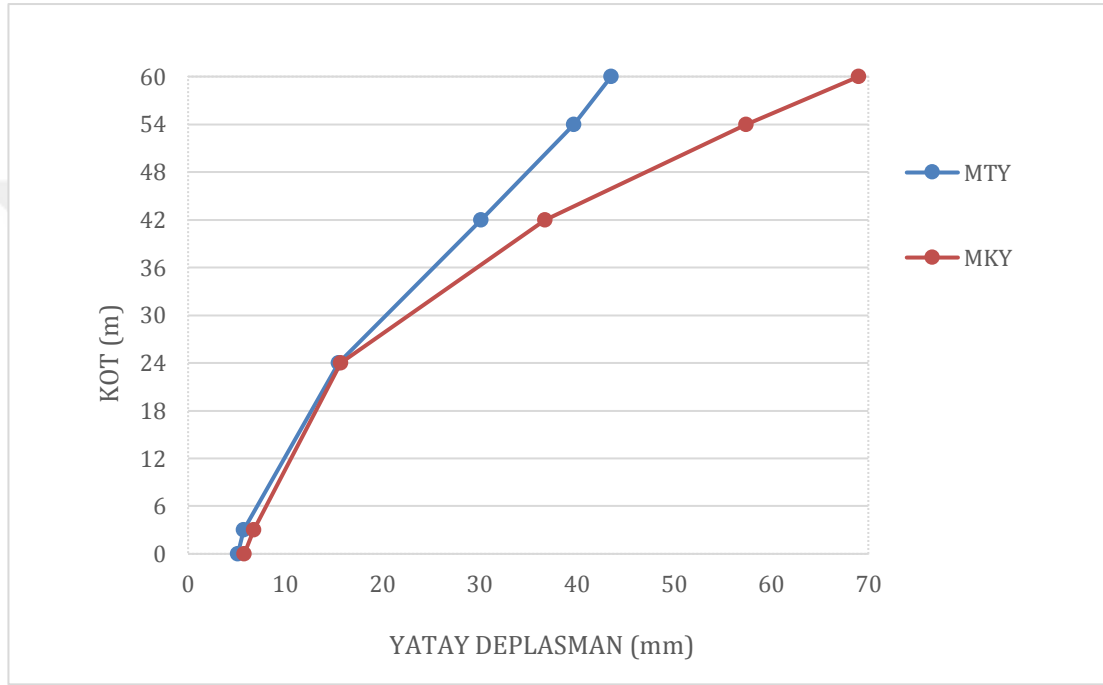
Şekil 4.7. Ankastr, yay sabitli v katı zemin tanımlı msnat koşulunda kulali v kulesiz modellerin yanal yır dğıştirmeleri.

Ankastr msnat koşulu için kulali v kulesiz sistem durumları birbirleri ile şekil 4.8’de karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.



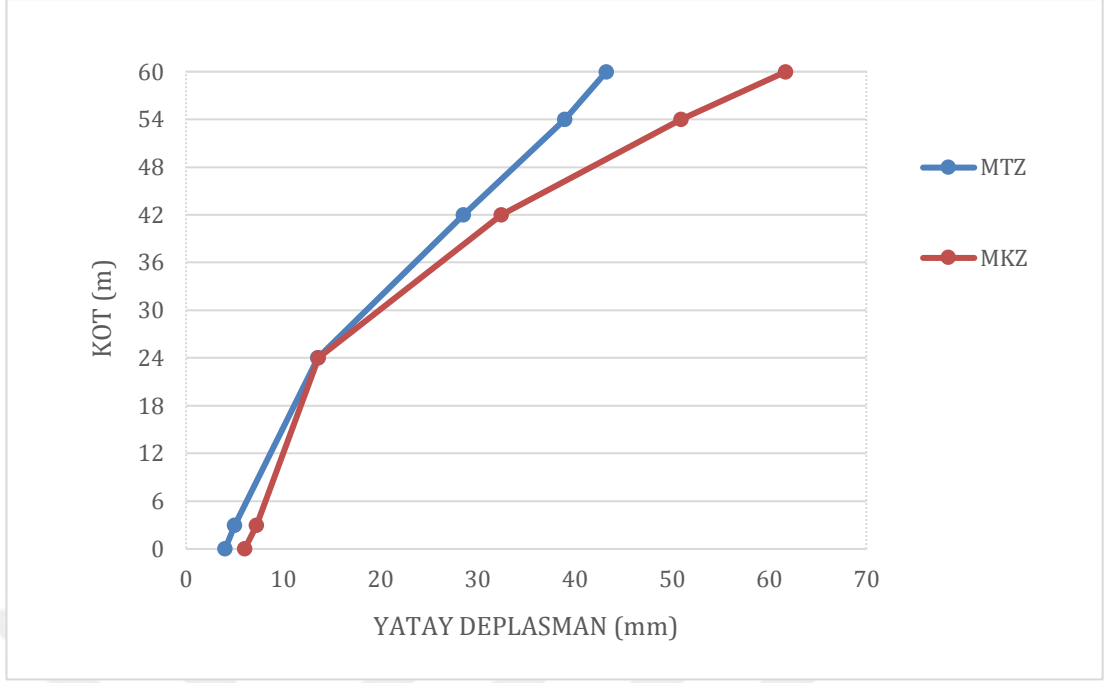
Şekil 4.8. Ankastr msnat koşulunda kulali v kulesiz modellerin yanal yır dğıştirmeleri.

Şekil incelendiğinde tepe kotu yer değiştirmeleri miktarında kuleli sistem, kulesiz sisteme göre ortalama 10 mm daha büyük yer değiştirme yaptığı hesaplanmıştır. Bunun dışında kuleli sistem tepe kotu yer değiştirmesi kulesiz sisteme göre büyük olmasına karşı ilk ötelenme rijitliğince kulesiz sistemden de ayrılmaktadır. Buradaki bu ayrışım kulenin taşıyıcı sistem üzerinde belirleyici bir etki yaptığını açıkça göstermektedir. Şekil 4.9'da yay tanımlı zemin durumuna ait sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.9. Yay sabiti mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin yanal yer değiştirmeleri.

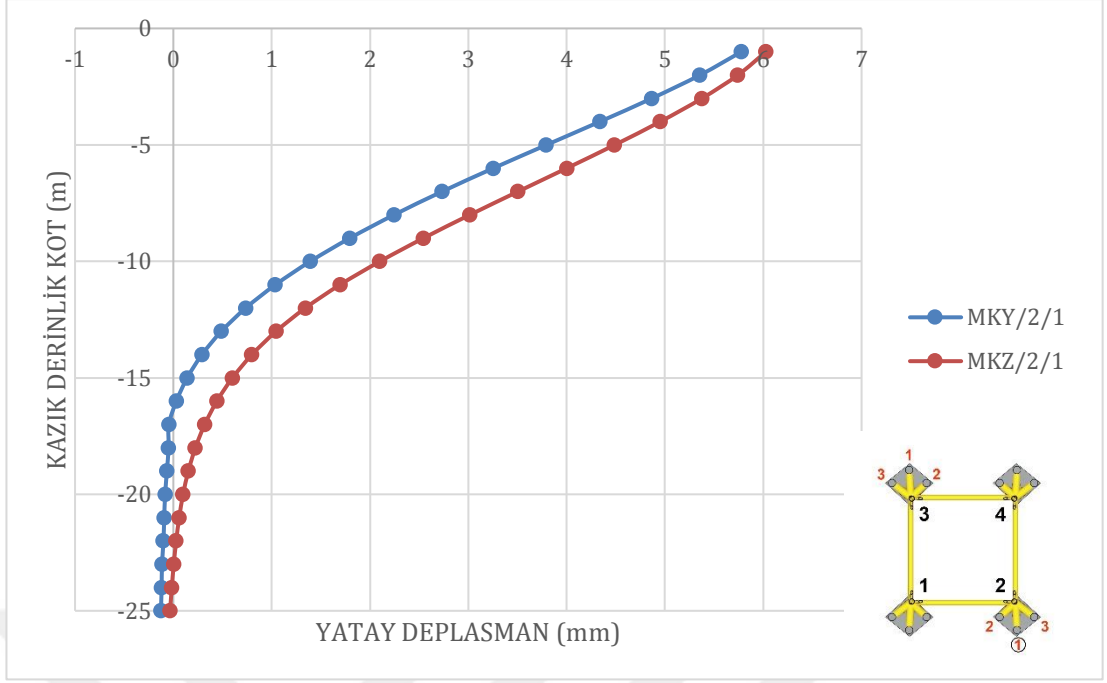
Sonuçlar incelendiğinde tepe kotu yer değiştirme miktarları bu mesnet koşulu için birbirinde belirgin bir şekilde ayrılmıştır. Yay tanımlı zemin grubunda tepe kotu yer değiştirme miktarı 42 mm olarak hesaplanmış, kuleli zemin model durumu için tepe kotu yer değiştirme miktarı 70 mm hesaplanmıştır. Bu iki model 23 m kotuna kadar yanal yer değiştirme miktarları birbirleri ile aynı değerleri paylaşmaktayken 25 m kotu ve üzerinde kuleli model, kulesiz modele göre yanal yer değiştirme miktarı ile ayrılmaktadır. Bu grafikte kulenin davranışı yapısal davranışı etkilediği ve analizlerde dikkate alındığında tasarımcıya özellikle sistemin eğilme rijitliği ve yanal ötelenme miktarında ortaya koyduğu farklılıkları ön plana çıkarmaktadır. Şekil 4.10'da katı model zemin tanımlaması için elde edilen grafikler karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.10. Katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin yanal yer değiştirmeleri.

Bu grafikte diğerlerinden farklı olarak hem deniz tabanı kotunda hem de kule platformun üst kotundaki yanal ötelenme miktarları birbirinde ayrılmaktadır. Bu ayrışım yay tanımlı modellerde olduğu gibi 25 m kotuna müteakip belirgin yönde artmaktadır. Bu durum diğerlerinde olduğu gibi kule sisteminin yapısal davranışı etkilediğini göstermektedir.

Çalışmanın ikinci kısmında taşıyıcı sistem mesnetlenme koşullarında etkili olan temel sistemi yay sabitli ve katı model zemin tanımlaması için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Grafiklerde basınç bölgesi 2 no'lu ayak 1 no'lu kazık için yay sabitli ve katı model zemin durumuna ait kuleli modeller için elde edilen sonuçlar Şekil 4.11'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

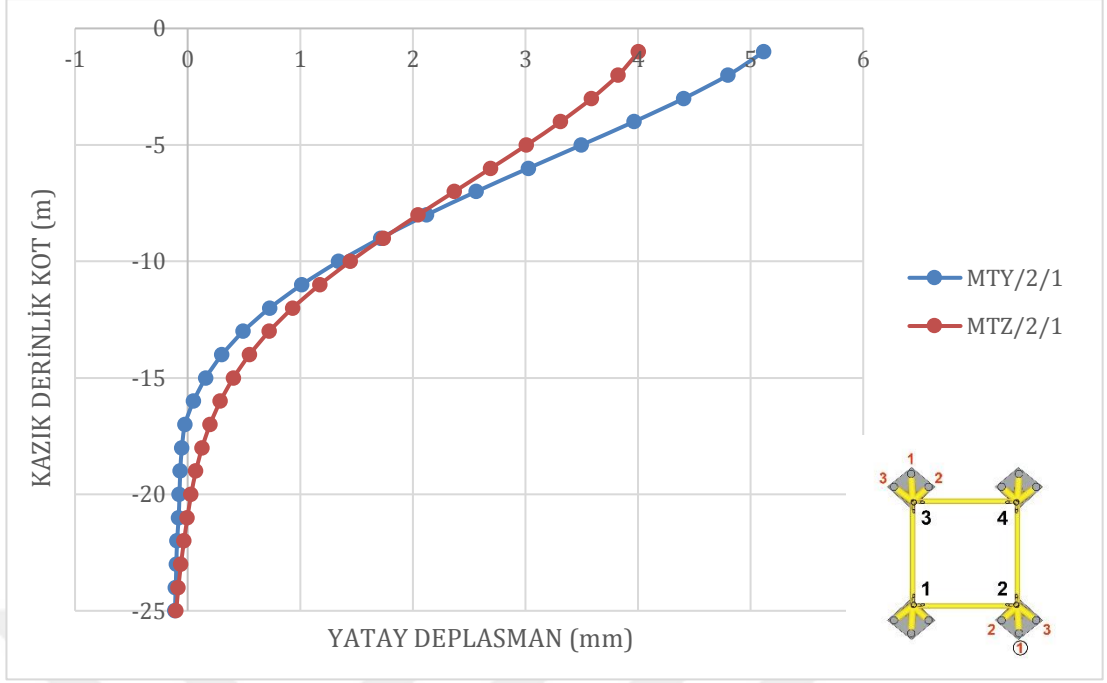


Şekil 4.11. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kuleli modelin basınç bölgesinde yer alan kazık yanal yer değıştirmeleri.

Şekil 4.11'deki grafik incelendiğinde kuleli durumda yay sabitli ve katı modelli zemin tanımlaması için elde edilen yer değıştirme miktarları deniz tabanından - 20 m kotuna kadar birbirinden değerce az olmakla birlikte ayrıışmakta olup davranışça birbirleri ile örtüşmektedir. Bu durum kuleli tasarımlarda yay sabitli ve katı model tanımlı mesnetlenme koşulunu yapısal davranışça temel sisteminde belirgin farklar ortaya koymadığını göstermektedir. Başka bir ifade ile yay sabitlerinin Bowles yöntemi kullanılarak hesaplandığı bu çalışmada kabul edilen zemin koşulu için oluşturulan ve hesaplanan yay sabitlerini zemin koşulu için gerçek zemin koşullarını ortaya konulmaya çalıştığı katı model durumlarının katı modele ait sonuçlar ile uyuştudur.

Bu durum bu tipteki yapılarda kuleli modeller için literatürde Dinamik analizlerde etkili olduğu ifade edilen Bowles yaklaşımlarını statik yükleme durumlarında kullanımının uygun olacağını ifade etmektedir.

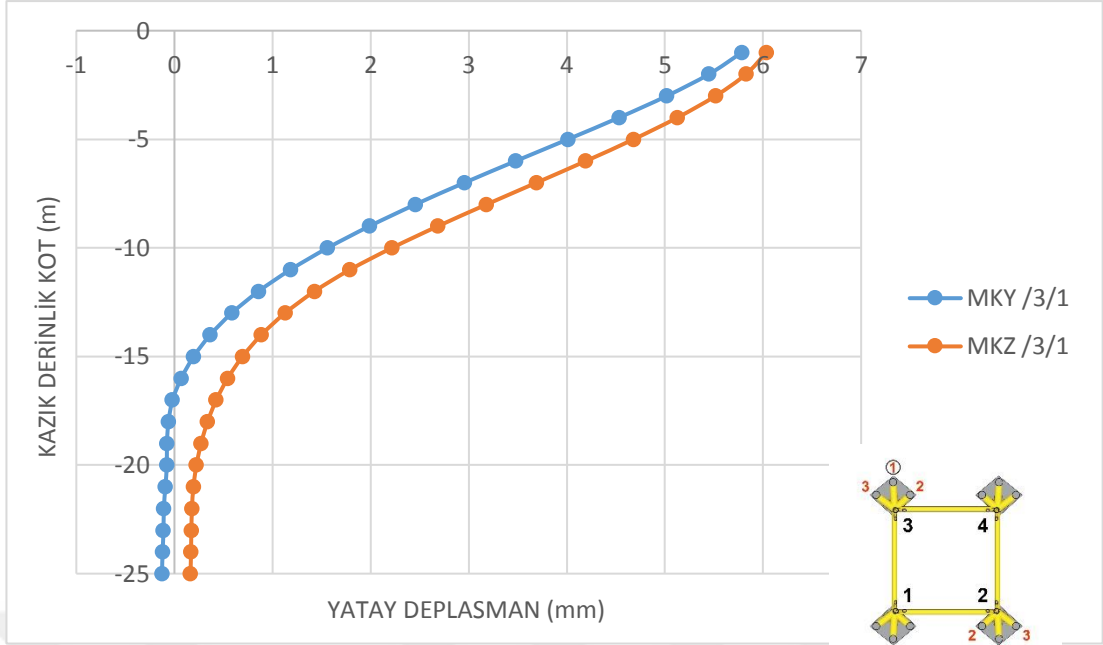
Farklı 2 mesnetlenme durumu için kulesiz modellere ait kazık yanal yer değıştirme değeri basınç ayakları için Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



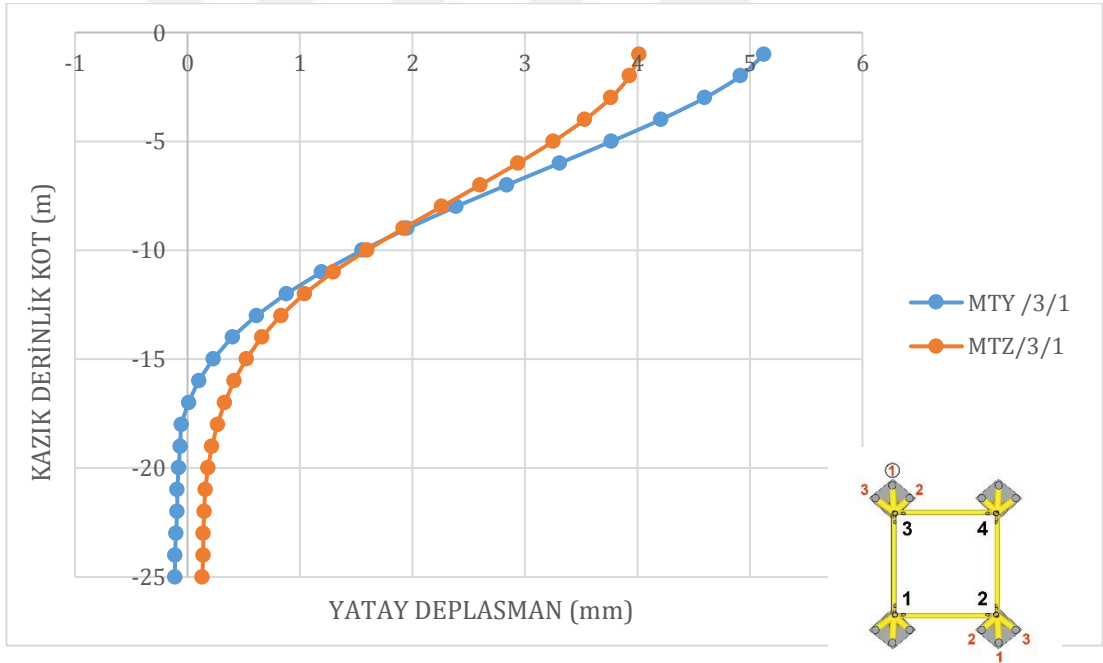
Şekil 4.12. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kulesiz modelin basınç bölgesinde yer alan kazık yanal yer değiştirmeleri.

Buradaki yer değiştirmeye ait eğriler incelendiğinde bu sonuçlarında davranışça birbirleri ile uyum içerisinde olduğu, deniz tabanı kotundaki yer değiştirme miktarları ile birbirinden 2mm'lik çok küçük bir değerce ayrıştığı görülmektedir. Bu ayrışımın yapısal davranışı etkilemeyecek kadar küçük bir fark olması durumu ile kulesiz tasarımlar içinde rüzgâr türbinleri için tasarlanan taşıyıcı sistemlerde zemin tanımlamasında Bowles yatak katsayı kullanımını yapısal davranışça gerçek zemin durumunu sayısal modelle yansıtılmasında doğru bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Çalışmada çekme ayağı için aynı yanal yer değiştirme değerleri 3 No'lu ayak 1 No'lu kazık için de kuleli ve kulesiz durum için hesaplanmış ve Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verilmiştir.



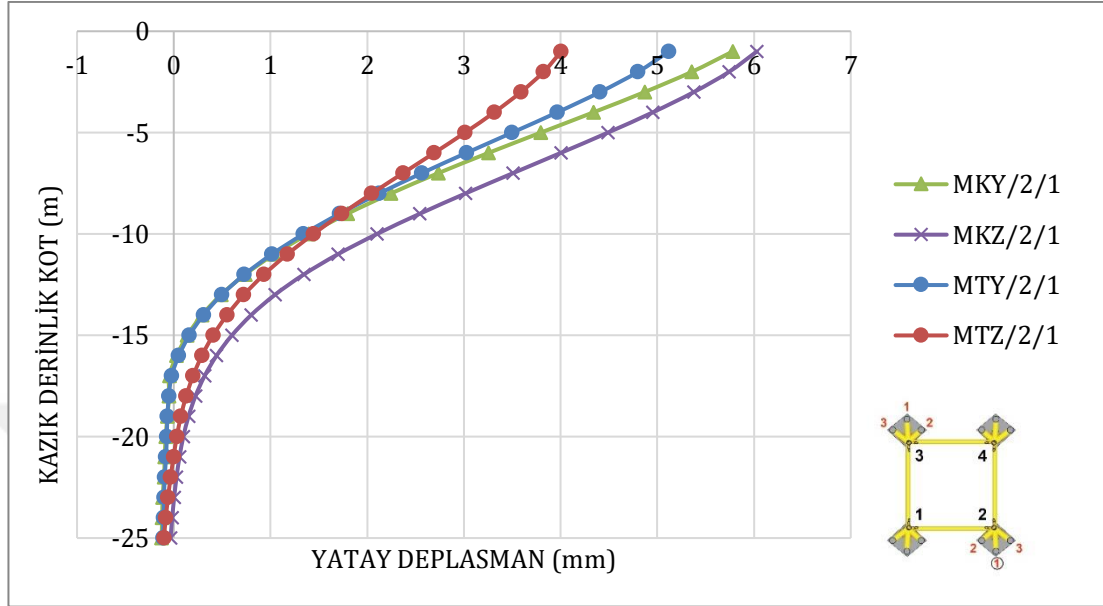
Şekil 4.13. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kuleli modelin çekme bölgesinde yer alan kazık yanal yer değiştirmeleri.



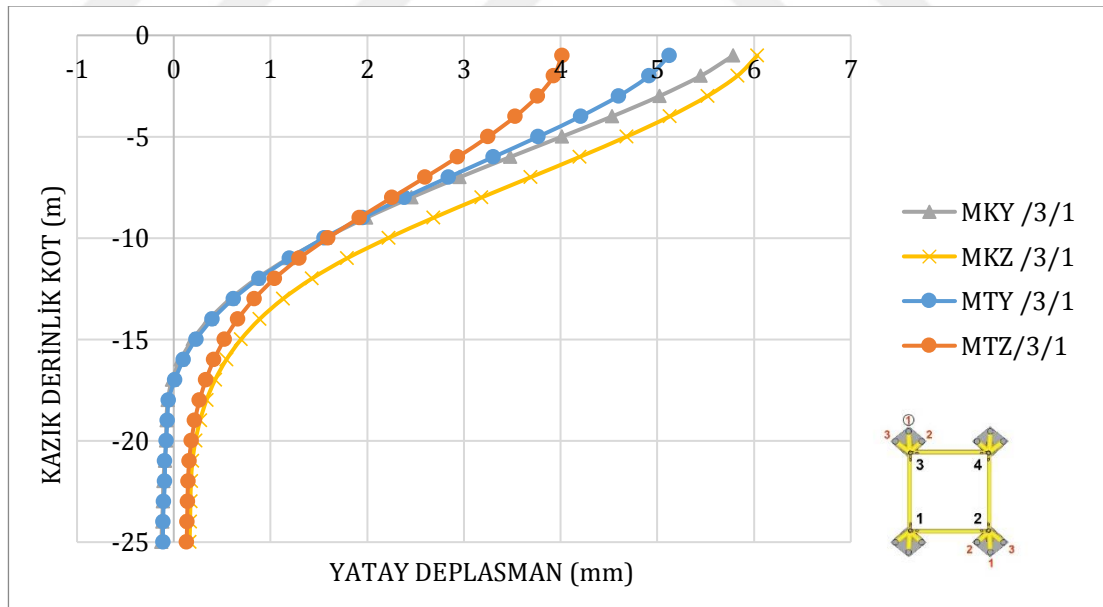
Şekil 4.14. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kulesiz modelin çekme bölgesinde yer alan kazık yanal yer değiştirmeleri.

Buradaki yanal yer değiştirmeye ait sonuçlar incelendiğinde aynı basınç bölgesinde olduğu gibi hem kuleli hem kulesiz modellerde kazık davranışlarının birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Basınç bölgesinde ve çekme bölgesi için elde edilen kazık yanal yer değiştirme miktarları kuleli ve kulesiz modellerin temel sistemi davranışına etkisini yorumlayabilmek için bir arada Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da sunulmuştur.



Şekil 4.15. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modelin basınç bölgesinde yer alan kazık yanal yer değiştirmeleri.

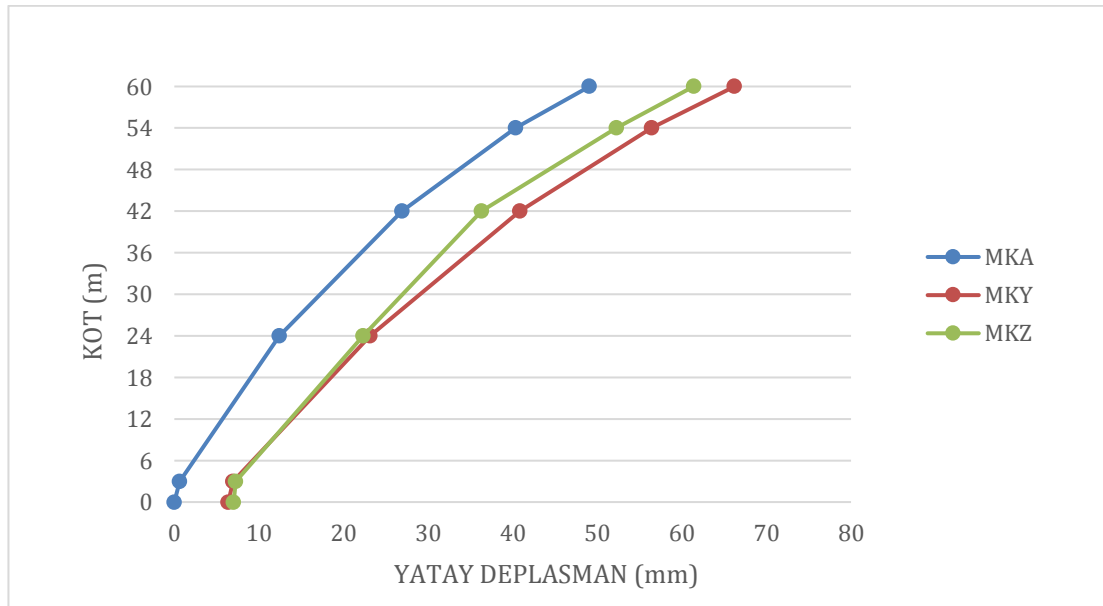


Şekil 4.16. Yay sabitli ve katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kule taşıyıcılı ve kule taşıyıcılı modelin çekme bölgesinde yer alan kazık yanal yer değiştirmeleri.

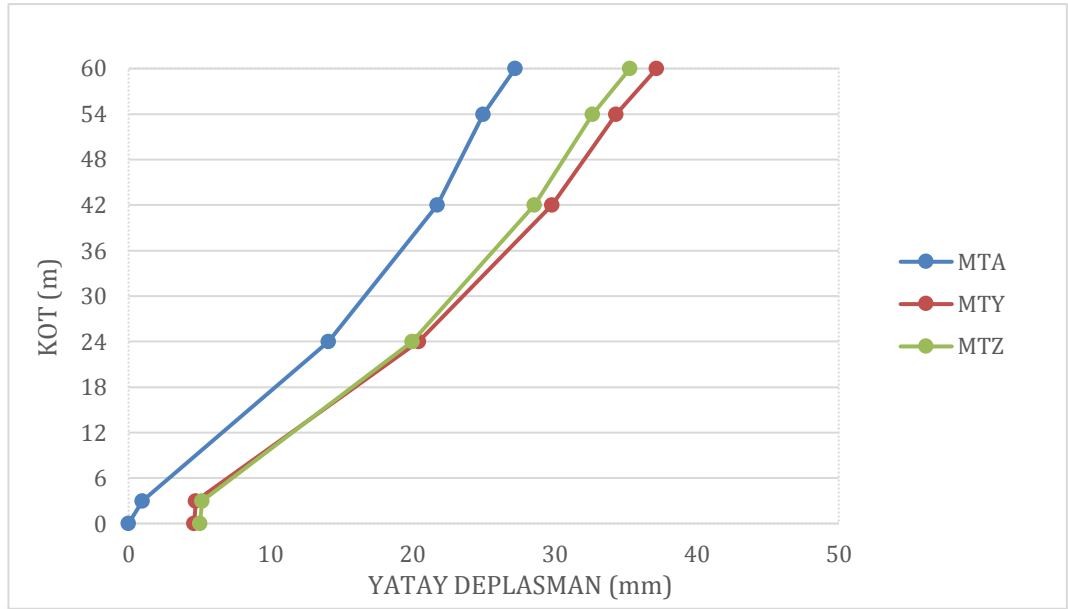
Hem basınç bölgesinde hem de çekme bölgesinde hem kuleli hem kulesiz sonuçların davranışça uyum içerisinde olduğu bu grafiklerde de net bir şekilde

görülmektedir. Grafiklerde kazık başı kotunda farklılık görülse de şekillerde hesaplanan kazık kotunda farklılıklar 1 ile 2 mm mertebelerindedir. Bu sebeple hesaplanan bu fark dikkate alınmayacak kadar küçük olup, kazık sistemi davranışça yorumlanmaktadır. Hem çekme hem basınç bölgesinde -15 m kotuna kadar kazıklar yanal ötelenme kabiliyeti yüksek olup, -15 m ve -25 m kotu içerisinde tüm yanal ötelenme -15 m kotuna kadar sönümlenmiş, bu kottan kazık ucuna kadar kazıklar ankastre bir davranış sergileyecek kadar dönme rijitliğine kavuşmuştur. Bu durum kazıkların özellikle -15 m kotunda eğilme rijitliği bakımından tasarımlarının nitelikli olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Yapı üst taşıyıcı sisteminin sismik yükler altında yorumlanmasında diğer aşama olarak dinamik analizler ele alınmıştır. Yapılan bu çalışmadaki dinamik analizlerde 11 ayrı deprem kaydı için ölçeklendirilmiş ivme kayıtları için elde edilmiş spektrum eğrileri üzerinden ortalama spektrum değeri hesaplanmış ve bu spektrum eğrisi için dinamik analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda üç ayrı mesnetlenme koşulu kuleli ve kulesiz modellere ait sonuçlar Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de karşılaştırılarak sunulmuştur.



Şekil 4.17. Kuleli modellerin zemine ankastre, yay sabitli ve zemin katı model tanımlı response etkisinde yanal yer değiştirmesi

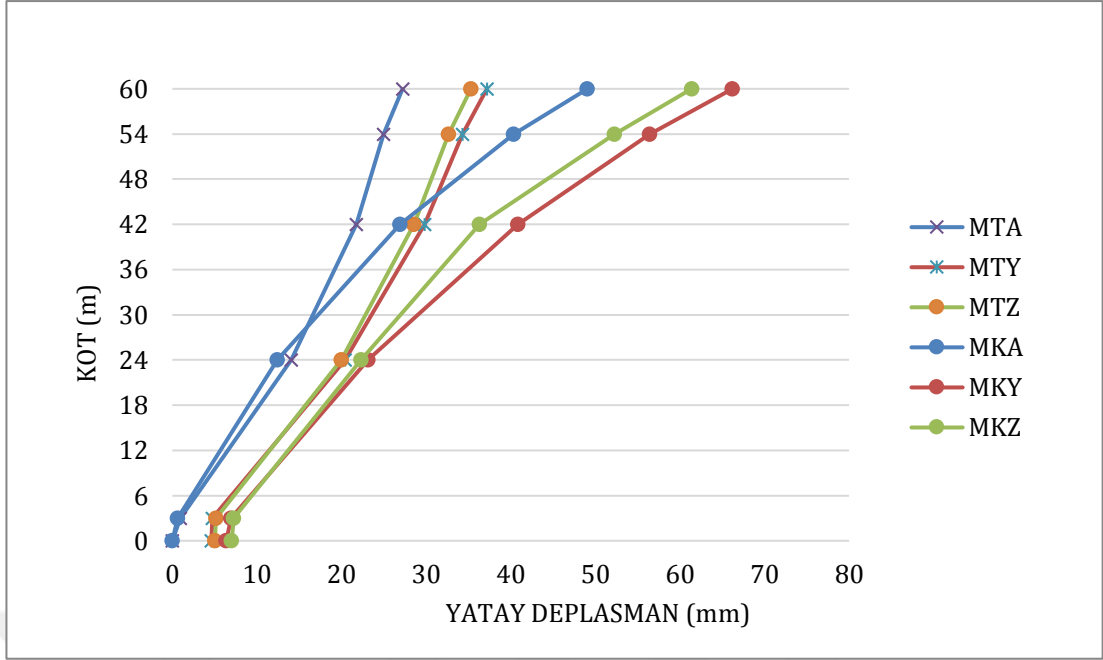


Şekil 4.18. Kulesiz modellerin zemine ankastre, yay sabitli ve zemin katı model tanımlı response etkisi altında yanal yer değiştirme grafiği

Şekil 4.18’de kulesiz model 3 ayrı mesnetlenme koşulu için dinamik analiz altında verilen süreç incelendiğinde yay sabitli ve katı zemin modelli durum için elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu, ancak ankastre davranıştan sonuçları birbirinden ayrılmaktadır. Buradaki ayrışmadaki temel etkinin özellikle katı model ve yay sabitli modelde taban kotundaki yer değiştirmeden kaynaklandığı görülmüştür.

Şekil 4.17’de ise dinamik analizlerin kuleli modellerin dinamik analiz olup, ortalama ivme spektrum eğrisine ait dinamik analiz sonuçları görülmekte burada da davranışça her 3 modelin her 3 mesnetlenme koşulu birbirine yakın sonuç verdiği görülmekte yalnız taban kotu yer değiştirmesi miktarınca yay sabitli ve katı model tanımlı zemin durumu için elde edilen sonuçların ayrıştığı görülmektedir bu ayrışımın bir öncekinde olduğu gibi taban kotunda oluşan yer değiştirmeden kaynaklandığı görülmektedir.

Analizlerde kuleli ve kulesiz modellerin birbirleri ile olan davranış farklılıklarını ortaya koyabilmek adına Şekil 4.19’da kuleli ve kulesiz modellerin her 3 mesnetlenme koşulu için birbirleriyle olan sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.19. Kuleli ve kulesiz modellerin zemine ankastre, yay sabitli ve zemin katı model tanımlı response etkisi altında yanal yer değiştirme grafiği

Sonuçlar incelendiğinde kuleli modellerin kulesiz modellere göre daha büyük yer değiştirmeler ortaya koyduğu, yer değiştirme miktarları özellikle +20 m kotu ve üzerinde ayrıştığı görülmektedir.

+20 m kotuna kadar tüm modellerde yer değiştirmelerin hem kuleli hem kulesiz durumlar için birbirleri ile aynı eğilimde olduğu görülürken, +25 m kotundan itibaren kuleli modellerin yer değiştirme oranları kulesiz modellere göre artmakta ve tepe kontrolü yer değiştirme miktarı ortalama %100 fazla olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlarla birlikte kuleli tasarımın yapısal davranışta belirleyici olduğu, davranış üzerinde özellikle tasarımcı için dikkat etmesi gereken farklılıklar ortaya koyduğu, tıpkı statik analizlerde olduğu gibi dinamik analizlerde de görülmüştür.

Statik analiz ve dinamik analiz sonucundaki yapısal davranışın birbiri ile olan ilişkisi yorumlanmak istendiğinde özellikle dinamik etki altında kuleli sistemin kulenin yapısal davranışta daha etkin olduğu ve yapısal yer değiştirmede özellikle +25 m ve üzerinde olan kotlarda kulenin yer değiştirme miktarında artış yönünde katkı sağladığı, bu da yapısal davranışta belirleyici olduğu hem ankastre

mesnetlenme koşulu için hem yay sabitli mesnetlenme koşulu için hem de katı zemin modelli mesnetlenme koşulu için ortaya farklılık koyduğu görülmektedir.

+25 m ve üzerindeki bu davranıştaki, değişimdeki temel sebep dinamik analizlerde sismik kuvvetteki belirleyici unsurun ağırlık kaynaklı olması ve taşıyıcı sistemin ağırlık merkezinin +25 m ve üzerinde konumlanmış olmasıdır.

Bu kapsamda sonuçlar değerlendirildiğinde platformun kule yapısıyla birlikte analiz edilmesinin dinamik analizler için daha gerçekçi bir yaklaşım olduğu elde edilen analizler sonucunda karşımıza çıkmaktadır. Farklı mesnetlenme koşullarının, kule yapısının ve taşıyıcı sistem davranışı üzerine etkisinin belirlenmesinde ayırt edici noktalardan bir tanesi de yapı doğal titreşim periyotlarıdır. Bu amaçla her 3 mesnetlenme koşulu kule yapısı modele dahil edilmiş ve kule yapısı modele dahil edilmemiş durumlar için yapılan analizlerde elde edilen ilk 12 mod durumuna ait periyot değerleri ve bu periyotlar için kütle katılım oranları tablolar halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de ankastre mesnetlenme koşulu için kuleli ve kulesiz modelleri ait doğal titreşim periyodu verileri verilmiştir. Çizelge 4.1’deki kulesiz durum için elde edilen periyot değerleri incelendiğinde 1. periyotta 0.57 saniyelik bir doğal titreşim serisi elde edilmiş, bu durum içinde x yönündeki kütle katılım oranı %85 oranında gerçekleşmiştir. 2. Periyotta yine aynı süre elde edilmiş ve yine y yönünde de %85 oranında kütle katılım oranı elde edilmiştir. Kulesiz durumda yapının dikdörtgen bir yerleşimde ve her iki yönde simetrik olması sebebiyle hem x hem de y yönünde aynı doğal titreşim periyotları elde edilerek aynı kütle katılım oranlarıyla sonuçlandığı görülmektedir.

Çizelge 4.2’deki kuleli durum için elde edilen periyot değerleri incelendiğinde 1. periyot değerinde 1.10 saniyelik bir doğal titreşim durumu elde edilerek kütle katılım oranı 0.17 oranında y yönünde elde edilmiştir. İlgili yönetmelikte bu tip yapı taşıyıcı sistemleri için etkin periyot durumu belirlenmesinde katılım oranının %70 ve üzerinde olması ifade edilmektedir. Bu kapsamda elde edilen doğal titreşim periyodu değerlendirildiğinde ankastre mesnetlenme koşulu

kuleli durum için 4.periyot değeri yani 0.43 saniyelik durum için %78'lik kütle katılım oranı x yönünde elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Ankastre mesnet tanımlı kulesiz model için modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Period (Sn)	X Yönü Kütle Katılım	Y Yönü Kütle Katılım	X Yönü Toplam Kütle Katılım	Y Yönü Toplam Kütle Katılım	Z Yönü Toplam Kütle Katılım
1	0,57575	0,85	0,0002085	0,85	0,000209	0
2	0,57575	0,000209	0,85	0,85	0,85	0
3	0,376984	1,32E-17	1,156E-17	0,85	0,85	60
4	0,138202	8,06E-16	1,434E-15	0,85	0,85	0,82
5	0,137984	0,001737	0,06393	0,85	0,91	0,82
6	0,137984	0,06393	0,001737	0,91	0,91	0,82
7	0,122594	6,48E-16	5,086E-16	0,91	0,91	0,82
8	0,113784	1,47E-15	2,082E-15	0,91	0,91	0,82
9	0,099009	2,91E-18	8,44E-16	0,91	0,91	0,85
10	0,097783	5,95E-06	9,785E-07	0,91	0,91	0,85
11	0,097783	9,79E-07	0,000005946	0,91	0,91	0,85
12	0,096153	1,59E-16	2,692E-16	0,91	0,91	0,85

Çizelge 4.2. Ankastre mesnet tanımlı kuleli model için modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Period (Sn)	X Yönü Kütle Katılım	Y Yönü Kütle Katılım	X Yönü Toplam Kütle Katılım	Y Yönü Toplam Kütle Katılım	Z Yönü Toplam Kütle Katılım
1	1,107632	0,000207	0,17	0,0002	0,17	0
2	1,107632	0,17	0,0002065	0,17	0,17	0
3	0,431963	0,4	0,2	0,57	0,38	0
4	0,431963	0,2	0,4	0,78	0,78	0
5	0,244073	1,33E-20	6,93E-19	0,78	0,78	0
6	0,215422	0,04286	4,019E-07	0,82	0,78	0
7	0,215422	4,02E-07	0,04286	0,82	0,82	0
8	0,12926	0,06404	0,0006299	0,88	0,82	0
9	0,12926	0,00063	0,06404	0,88	0,88	0
10	0,11921	4,44E-15	4,672E-15	0,88	0,88	0,7
11	0,117421	3,6E-15	3,29E-15	0,88	0,88	0,7
12	0,099085	2,29E-15	1,925E-14	0,88	0,88	0,7

Yay sabitli zemin durumu için ifade edilen tablo verileri incelendiğinde kulesiz durum için 0.67 kütle katılım oranı ile 1. periyot değerinde 0.72 saniyelik bir periyot süresi hesaplanmış, 0.76 kütle katılım oranı için tablo yani kütle katılım oranının %70'den fazla olduğu ilk doğal titreşim periyodu ise yay sabitli kulesiz modelde 5. doğal titreşim periyodu olan 0.14 saniyelik süre elde edilmiştir. Yay sabit tanımlı kuleli model sonuçlarına baktığımız zaman yine ankastre modelde

olduğu gibi 1. ve 2. doğal titreşim periyodunda kule yapısının davranışı belirleyici olmuş, ortalama sürelerin bir saniye üzerinde seyrettiği görülmektedir. Ancak bir saniye üzerinde seyreden bu doğal titreşim değerlerinde kütle katılım oranları %17'lik mertebelerde olması sebebiyle bu analizlerde etkin kütle katılım oranları 9. modda elde edilmiş, 9. modda toplam kütle katılım oranı x yönünde %70 mertebelerinde olup, bu kütle katılım oranı için elde edilen periyot değeri 0.13 mertebelerindedir. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de yay sabitli mesnetlenme koşulu için kuleli ve kulesiz modelleri ait doğal titreşim periyodu verileri verilmiştir.

Çizelge 4.3. Yay sabit mesnet tanımlı kulesiz model için modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Period (Sn)	X Yönü Kütle Katılım	Y Yönü Kütle Katılım	X Yönü Toplam Kütle Katılım	Y Yönü Toplam Kütle Katılım	Z Yönü Toplam Kütle Katılım
1	0,725463	0	0,67	0	0,67	0
2	0,67597	0,67	0	0,67	0,67	0
3	0,3802	2,37E-20	0	0,67	0,67	0
4	0,164556	5,05E-16	1,939E-15	0,67	0,67	0,82
5	0,147162	0,08827	1,499E-16	0,76	0,67	0,82
6	0,147145	3,76E-16	0,08789	0,76	0,76	0,82
7	0,119591	3,67E-17	5,886E-19	0,76	0,76	0,82
8	0,116519	4,12E-17	1,424E-15	0,76	0,76	0,82
9	0,099272	9,6E-19	1,479E-15	0,76	0,76	0,83
10	0,097289	2,7E-15	0,000475	0,76	0,76	0,83
11	0,097217	0,000337	4,259E-15	0,76	0,76	0,83
12	0,095445	2,97E-15	5,967E-15	0,76	0,76	0,83

Çizelge 4.4. Yay sabit mesnet tanımlı kuleli model için modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Period (Sn)	X Yönü Kütle Katılım	Y Yönü Kütle Katılım	X Yönü Toplam Kütle Katılım	Y Yönü Toplam Kütle Katılım	Z Yönü Toplam Kütle Katılım
1	1,149491	0	0,17	0	0,17	0
2	1,131731	0,15	0	0,15	0,17	0
3	0,528579	4,61E-19	0,42	0,15	0,59	0
4	0,498948	0,44	0	0,59	0,59	0
5	0,247745	1,13E-18	0	0,59	0,59	0
6	0,218321	2,39E-18	0,03022	0,59	0,62	0
7	0,218202	0,03188	7,191E-17	0,62	0,62	0
8	0,14116	9,58E-16	9,109E-16	0,62	0,62	0,77
9	0,136885	0,0858	9,045E-17	0,7	0,62	0,77
10	0,136868	4,45E-16	0,08573	0,7	0,7	0,77
11	0,111723	6,82E-17	5,208E-16	0,7	0,7	0,77
12	0,105529	1,01E-14	5,564E-16	0,7	0,7	0,77

Bu kapsamda durum değerlendirildiğinde sismik yükler altında yay sabit tanımlı kuleli yapı için etkin süre 0.13 iken kulesiz yapıda yay sabitli zemin durumu için etkin süre 0.14 olarak birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir. Bu durum sismik yükler altında her iki yapının benzer yanal kuvvetlerle karşı karşıya kalacağını göstermektedir.

Katı zemin tanımlı modellere ait sonuçlar doğal titreşim periyotları bakımından incelendiğinde diğer durumlarda olduğu gibi kulesiz yapılarda doğal titreşim periyodunda %68 kütle katılım ile 0.68'lik bir süre ile kulesiz modellerde etkin mod durumları devreye girmiş, %70 ve üzeri kütle katılım oranı ise 4. modda 0.79 kütle katılımıyla y yönünde yakalanmış, bu kütle katılım oranı için elde edilen periyot 4. doğal titreşim periyodu için 0.15 saniye olarak hesaplanmıştır. Katı zemin tanımlı kuleli durum için veriler incelendiğinde %70'lik kütle katılım oranı y yönünde bu modelde de 8. mod durumunda elde edilmiş, hesap değerleri incelendiğinde bu 0.74 kütle katılım oranı için doğal titreşim periyodu 0.14 saniye olarak hesaplanmıştır.

Bu katı zemin tanımlı modelde de etkin kütle katılım oranları için elde edilen süreler yay tanımlı modelle örtüşerek 0.14 saniye olarak sonuç vermektedir. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da katı zemin tanımlı mesnetlenme koşulu için kuleli ve kulesiz modellere ait doğal titreşim periyodu verileri verilmiştir.

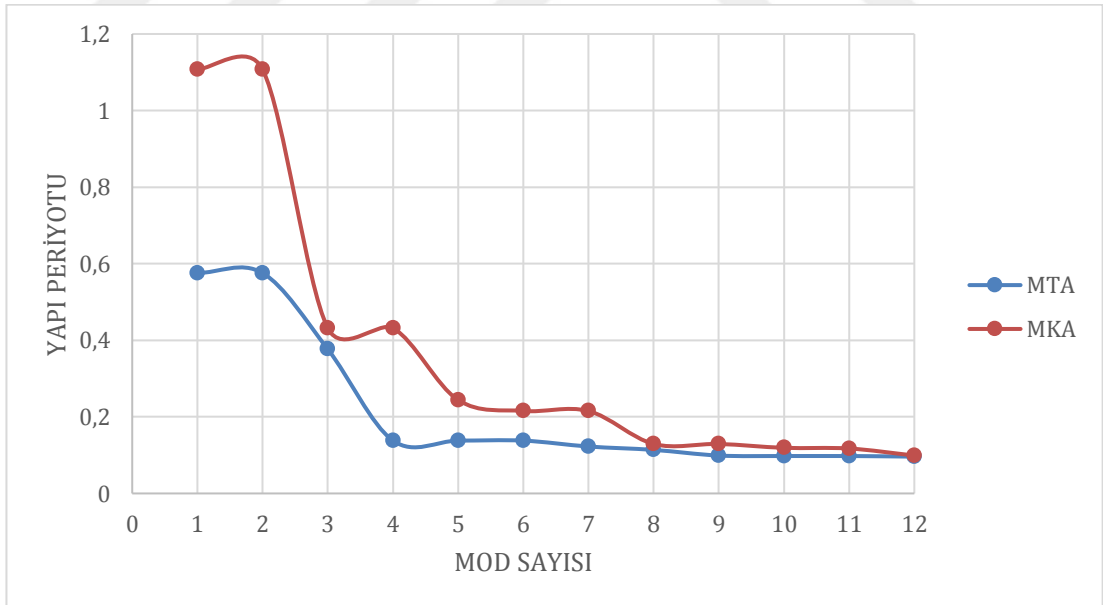
Çizelge 4.5. Katı zemin tanımlı kulesiz model için modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Period (Sn)	X Yönü Kütle Katılım	Y Yönü Kütle Katılım	X Yönü Toplam Kütle Katılım	Y Yönü Toplam Kütle Katılım	Z Yönü Toplam Kütle Katılım
1	0,681334	0	0,68	0	0,68	0
2	0,649873	0,68	1,53E-20	0,68	0,68	0
3	0,390586	1,66E-18	3,154E-19	0,68	0,68	0
4	0,152565	5,33E-17	0,11	0,68	0,79	0
5	0,151188	0,1	1,54E-15	0,78	0,79	0
6	0,15088	2,24E-17	5,964E-16	0,78	0,79	0,74
7	0,126223	1,09E-16	8,092E-16	0,78	0,79	0,74
8	0,116678	3,56E-16	2,314E-16	0,78	0,79	0,74
9	0,098612	2,92E-15	2,502E-14	0,78	0,79	0,76
10	0,098308	6,73E-17	0,05412	0,78	0,84	0,76
11	0,097355	0,0272	7,242E-15	0,81	0,84	0,76
12	0,097112	4,9E-16	0,002874	0,81	0,84	0,76

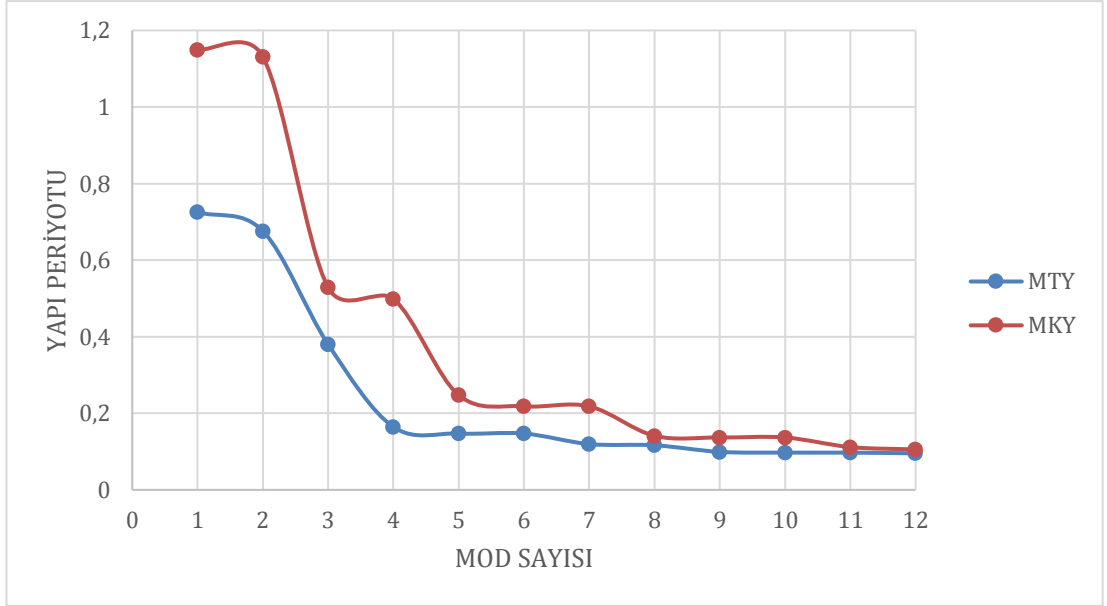
Çizelge 4.6. Katı zemin tanımlı kuleli model için modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Period (Sn)	X Yönü Kütle Katılım	Y Yönü Kütle Katılım	X Yönü Toplam Kütle Katılım	Y Yönü Toplam Kütle Katılım	Z Yönü Toplam Kütle Katılım
1	1,131223	0	0,15	0	0,15	0
2	1,121476	0,14	0	0,14	0,15	0
3	0,503002	3,53E-18	0,45	0,14	0,6	0
4	0,483001	0,46	1,218E-20	0,6	0,6	0
5	0,251624	5,53E-18	2,515E-18	0,6	0,6	0
6	0,219209	3,21E-18	0,03586	0,6	0,64	0
7	0,21886	0,03612	1,575E-17	0,64	0,64	0
8	0,141105	2,28E-16	0,11	0,64	0,74	0
9	0,139915	0,1	1,67E-17	0,74	0,74	0
10	0,129823	2,29E-16	4,634E-17	0,74	0,74	0,65
11	0,112852	6,64E-16	1,151E-15	0,74	0,74	0,65
12	0,111542	3,16E-17	4,578E-17	0,74	0,74	0,65

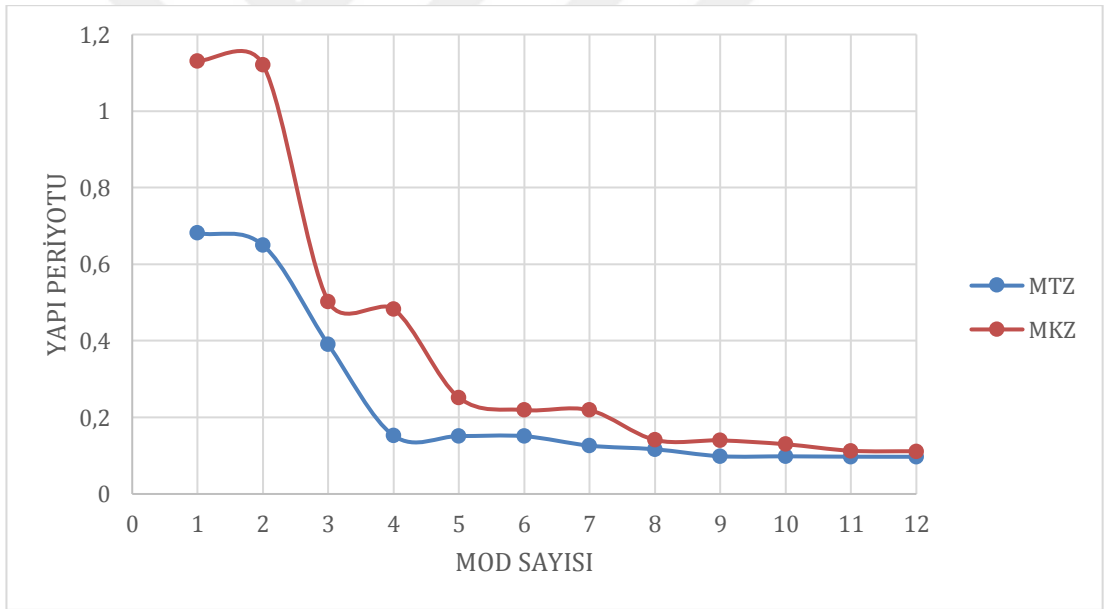
Doğal titreşim periyotlarının birbiri ile karşılaştırma yapabilmek amacı ile ilk 12 moda ait elde edilen süreler ankastre kuleli ve kulesiz, yay sabitli ve katı zemin modelleri için birbiri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de sunulmuştur.



Şekil 4.20. Ankastre mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin modal analiz sonucu



Şekil 4.21. Yay sabiti mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin modal analiz sonucu



Şekil 4.22. Katı zemin tanımlı mesnet koşulunda kuleli ve kulesiz modellerin modal analiz sonucu

Elde edilen süreler bakımından sonuçlar incelendiğinde her üç mesnet durumu için de 8. mod ve üzerindeki yapısal davranışın sonucunda elde edilen periyot süreleri birbirleri ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu tip yapılarda özellikle yay sabitli ve katı zemin tanımlı durumunda etkin kütle katılım oranları % 70 ve üstünde olduğunda 8. mod ve üzerinde elde edildiği durum, ankastre model için de yine 8. mod ve üzerinde elde edilme vesilesi ile davranışlar

birbirleri ile örtüşmesindeki temel sonuç kütle katılım oranı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kuleli modeller için elde edilen sonuçlar incelendiğinde her üç modelde de periyotların 1 sn ve üzerinde olduğu, bu 1 sn ve üzerindeki sonuçların da kule tanımlı modelin yanal ötelenme rijitliğinin düşük olması sebebi ile özellikle 1. ve 2. modda belirleyici davranış olduğu, ama kütle katılım oranı açısından %70'in altında kalması sebebi ile davranışta belirleyici olmasına rağmen, sismik belirleyici davranışın 8. mod ve üzerindeki durumlarda ortaya çıktığı tüm model sonuçlarında görülmektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada Türkiye Bozcaada açıklarında hizmet vermesi planlanan açık deniz rüzgâr türbinleri taşıyıcı sisteminin statik ve dinamik yükler altında yapısal davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda modeller ankastre, yay tanımlı zemin ve katı model zemin mesnetlenme koşullarında kuleli ve kulesiz olarak tasarlanmıştır. Yapısal davranışı inceleyebilmek adına sistemin deniz tabanı kotu ve kule kotu arasındaki farklı noktalardan yanal yer değiştirmeler alınmış, ayrıca deniz tabanı kotu ile kazık ucu kotu arasında birer metrelik kot değişimleri için yanal yer değiştirme miktarları hesaplanmıştır. Analizlerde dinamik ve statik sismik yüklemeler yapılmış, statik yüklemelerde AFAD veri tabanı için oluşturulan eşdeğer statik yükleme verileri kullanılmıştır. Dinamik yüklemeler için 11 ayrı deprem kaydı seçilen çalışma alanı için ölçeklendirilmiş, kayıtlı veriler oluşturulmuş, ölçeklendirilmiş ivme kayıt verileri üzerinden spektrum eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen spektrum eğrileri üzerinden ortalama spektrum eğrisi analizlerde dikkate alınarak statik ve dinamik analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

Bu tipteki taşıyıcı sistemlerin statik, dinamik yükler altındaki analizlerinde belirleyici etki, taşıyıcı sistemin sahip olduğu doğal titreşim periyotlarıdır. Bu noktada taşıyıcı sistemin kuleli ve kulesiz olarak modellenmiş olması yapısal davranış üzerinde özellikle doğal titreşim periyodu üzerinde belirleyici sonuçları olmaktadır.

Yapılan tasarımlarda her 3 mesnetlenme koşulu altında kule tanımlı modellerde yapısal periyodun 1 sn ve üzerinde, kulenin dikkate alınmadığı modellerde ise 0.5-0.7 sn aralığında sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu tipteki yapı sistemlerinde doğal titreşim periyodunun sismik kuvvet etkisi altında etkin yük durumu olarak kabul edilebilmesi için kütle katılım oranlarının değerlendirilme kapsamına alınması gerekmektedir.

Bu tipteki yapı sistemlerinde doğal titreşim periyodunun sismik kuvvet etkisi altında etkin yük durumu olarak kabul edilebilmesi için kütle katılım oranlarının da değerlendirilme kapsamına alınması gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar

incelendiğinde kuleli sistemlerde etkin mod durumunda olan 1 saniye üzerindeki periyot değerlerinde kütle katılım oranlarının %17 mertebelerinde kaldığı kuleli sistemin dikkate alınmadığı modellerde etkin doğal titreşim periyodu olan 1. modlarda kütle katılım oranlarının %70 ve üzerinde yer aldığı hesaplanmıştır. Kuleli modellerde kütle katılım oranının %70 ve üzerinde değer aldığı görülmektedir. Bu kapsamda grafikler incelendiğinde kütle katılım oranlarının etkin duruma geldiği doğal titreşim periyotları birbirleri ile göreceli olarak kıyaslandığında kuleli modeller ile kulesiz modeller arasındaki periyot değerlerinin arasında farklılıklar tespit edilmiştir. Bu durum etkin kütle katılım oranının dikkate alındığında kuleli modellere gelecek olan taban kesme kuvvetinin özellikle yakın bölge depremleri ve düşük periyotlu depremler için bu tipteki yapılarda daha büyük taban kesme kuvvetlerinin elde edileceği sonucunu vermektedir.

Çalışmada taşıyıcı sistemin yapısal davranışını yorumlayabilmek için statik yükleme altında üst taşıyıcı sistem yatay yer değiştirmesi için elde edilen grafikler kuleli ve kulesiz olmak üzere karşılaştırmalı olarak sunulmuş, bu grafikler incelendiğinde kuleli ve kulesiz modelde her 3 mesnetlenme koşulunun yapısal davranışları birbirleriyle benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.

Katı model zemin durumu ve yay sabitli zemin durumunun ankastre modelden yatay yer değiştirme miktarı ile ayrıştığı ancak bu ayrıştırmanın deniz tabanı kotundaki yer değiştirme kaynaklı olduğu görülmektedir.

Kuleli modeller ve kulesiz modeller kendi içlerinde kıyaslandığında kulesiz modellerdeki yer değiştirme miktarı tepe kotunda 40 mm mertebelerindeyken kuleli modellerdeki tepe kotu yer değiştirme miktarı 70 mm mertebelerinde sonuç vermektedir. Bu durum göstermektedir ki kütle katılımının etkin olduğu doğal titreşim periyodundaki aralık taban kesme kuvveti ile ilişkilendirildiği bu tipteki sistemlerde kuleli taşıyıcı sistem ile birlikte ele alınması hem yapısal davranış hem de elde edilen yer değiştirme miktarınca değerleri etkileyecek sonuçların olduğu görülmüştür.

Yapısal analizlerde yer değıştirme miktarlarının yer aldığı grafikler kendi içlerinde detaylı olarak incelendiğinde tüm modellerde ortalama 20 ile 30 m kotlarda taşıyıcı sistem davranışında belirgin farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Yapı ağırlık merkezinin de konumlandığı bu kot değerlerinde meydana gelen bu farklılık taşıyıcı sistem davranışında sistem ağırlık merkezinin ve geometrinin bir sonucu olarak rijitlik merkezinin belirleyici olduğunu göstermektedir.

Yapılan bu çalışmada yapısal davranışını inceleyebilmek adına diğer dikkate alınan bölüm ise kazıklı temel sisteminin sonuçlarıdır. Bu kapsamda taşıyıcı sistemin itme yönüne göre basınç ve çekme bölgelerinde yer alan ve maksimum yer değıştirmelerinin okunduğu iki kazık için yatay yer değıştirme miktarları deniz tabanı kotundan kazık ucu kotuna kadar hesaplanmış ve kendi içlerinde yay sabitli zemin durumunun katı zemin tanımlı kazık durumu için kuleli ve kulesiz sistem olmak üzere iki farklı koşulda grafiklendirilmiştir. Grafikler incelendiğinde hem kuleli hem de kulesiz sistem için elde edilen sonuçlar davranışça birbirlerine benzer olduğu görülmekte hem davranışlar hem de ortaya konulan yatay yer değıştirme miktarı ile birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bowles yatak katsayıları kullanılarak yay sabitli zemin durumunun hesaplandığı sayısal modellerden elde edilen verilerin katı model zemin durumuyla uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, yapılan analizlerde Bowles yatak katsayıları kullanılarak modellenen sayısal modülün yapısal davranışını incelemeye tasarımcı için doğru bir yaklaşım olduğu sonucunu vermiştir.

Kazık yer değıştirme miktarlarındaki uyum çekme bölgesindeki kazıklar içinde benzer sonuçlar vermiş, elde edilen veriler o bölge içinde birbiriyle örtüşen değerler vermektedir.

Yapılan analizlerde ayrıca dinamik olarak etkitilen deprem kuvvetinin yapısal davranış üzerindeki etkisini yorumlayabilmek için ortalama ivme-spektrum eğrisi için dinamik analizler yapılmış, statik analiz ile benzer sonuçlar vermiştir. Her üç mesnetlenme koşulu için elde edilen sonuçlar incelendiğinde hem yapısal davranış hem de yatay yer değıştirme miktarları her üç mesnetin birbiri ile uyum içerisinde olduğu yay sabiti tanımlı mesnetlenme durumunun ve katı

model mesnetlenme durumunun taban kotu yer değiştirmesi miktarınca ankastre mesnetlenmiş model den ayrıştığı görülmektedir.

Dinamik analizlerdeki yapısal davranış kendi içerisinde incelendiğinde dinamik analizlerde kuleli tasarım yapısal davranışça kulesiz tasarımdan belirgin olarak ayrıştığı bu modellerde açık bir şekilde görülmektedir. Kulesiz modellerde +25 m kotu ve üzerindeki sistemin yatay yer değiştirmeye olan eğilimi azalmaktayken, +25 m kotu ve üzerindeki kuleli modellerde yer değiştirmeye olan eğilimi artmaktadır. Bu noktada dinamik analizlerde özellikle kuleli tasarımların statik analizlere göre daha belirgin sonuçları olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak bu tipteki sistemlerin tasarımında yay sabiti tanımlı Bowles yatak katsayıları kullanılarak yay sabiti tanımlı zemin modelinin katı zemin tanımlı model durumuyla hem statik hem de dinamik analizlerde uyum içerisinde olduğu, kuleli tasarımların dinamik analizlerde statik analizlere göre yapısal davranışı etkileyen belirgin farklılıklar ortaya koyduğu, özellikle taşıyıcı sistem ağırlık merkezini yapısal davranışta yatay yer değiştirme yönündeki eğilimler de belirleyici bir sınır noktası olduğu yapılan analizlerde tespit edilmiştir. Bu kapsamda özellikle sığ bölgelerde konumlandırılacak olan rüzgâr türbinleri taşıyıcı sistemlerinin tasarımında kule tasarımının analizlerde dikkate alınması, analizlerin ankastre model tasarımın daha ziyade ya yay sabiti tanımlı model ya da katı zemin tanımlı model grubuyla yapılmasının tasarımcı için ve yapısal davranışın doğru yorumlanabilmesinde önemli olduğu yapılan analizler sonucunda tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdel Raheem, S., Abdel Aal, E.S.M.A., Abdel Shafy, A. G. A., Abdel Seed, F.K., 2012. Nonlinear Analysis of Offshore Structures Under Wave Loading. Lisboa, 15th World Conference On Earthquake Engineering.
- Abdel Raheem, S.E., 2013. Nonlinear Response Of Fixed Jacket Offshore Platform Under Structural and Wave Loads. *Coupled System Mechanics*, 2(1), 111-126.
- Abdel Raheem, S.E., Abdel Aal, E. M., 2013. Finite Element Analysis for tructural Performance of Offshore Plaforms Under Environmental Loads. *Key Engineering Materials*, 569-570, 159-166.
- Abhinav, K. A., Saha, N., 2015. Dynamic Analysis Of An Offshore Wind Turbine Including Soil Effectes. *Procedia Engineering*, Cilt 116, pp. 32-39.
- Alessi, L., Correia, J. A., Fantuzzi, N. 2019. Initial Design Phase And Tender Designs of a Jacket Structure Converted into a Retrofitted Offshore Wind Turbine. *Energies*, 12(4), 659.
- Altunsu, E., 2020. Rüzgâr Türbinlerinin Sismik ve Rüzgâr Yükleri Altındaki Davranışı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 130s, İstanbul.
- API, 2000. Recommended Practice for Planning Designing and Construction Fixed Offshore Platforms: Working Stress Design. Washington: American Petroleum Institute.
- Argin, M., Yerci, V., 2017. Offshore Wind Power Potential of the Black Sea Region in Turkey. *International Journal of Green Energy*, 14(10), 811-818.
- Bargi, K., Hosseini, S. R., Tadayon, M. H., Sharifian, H., 2011. Seismic Response of a Typical Jacket-Type Offshore Platform (SPD1) under Sea Waves. *Open Journal Of Marine Science*, 1, 36-42.
- Bianchi, F. D., De Battista, H., Mantz, R. J., 2007. Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design. London: Springer. 19
- Bowles, J. E., 1996. Foundation Analysis And Design. basım yeri:McGraw-Hill.
- Chen, I. W., Wong, B. L., Lin, Y. H., Chau, S. W., Huang, H. H., 2016. Design and Analysis of Jacket Substructures for Offshore Wind Turbines. *Energies*, 9(4), 264.
- Chew, K. H., Ng, E. Y. K., Tai, K., Muskulus, M., Zwick, D., 2014. Offshore Wind Turbine Jacket Substructure: A Comparison Study Between Four-Legged and Three-Legged Designs. *J. Ocean Wind Energy*, 1(2), 74-81.
- CSI, 2019. Sap 2000 Guidelines, Berkeley, CSI America.

- Çelik, İ. D., Kocaman, T. B., Öztürk, Y., 2020. Değişen Dalga Periyotları Etkisindeki Açık Deniz Yapılarının Davranışının İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(2). 136-149
- Denizüstü Rüzgar Enerjisi Derneği (DÜRED), 2021. Denizüstü RES Projeleri: Mavi Vatanın Enerjisi. 63s.
- Dong, W., Moan, T., Gao, Z., 2011. Long-Term Fatigue Analysis of Multi-Planar Tubular Joints for Jacket-Type Offshore Wind Turbine in Time Domain. Engineering Structures, 33(6), 2002-2014.
- El-Din, M. N., Kim, J., 2014. Sensivity Analysis of Pile fixed Steel Jacket Platforms Subjected to Seismic Load. Ocean Engineering, 85, 1-11.
- Elibüyük, U., Üçgül, İ., 2014. Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri. Yekarum, 2(3).
- Enerji Atlası, 2021. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Haritası. Erişim Tarihi: 17.04.2022. <https://www.enerjiatlası.com/ruzgar-enerjisi-haritasi/turkiye>
- Enerji Portalı, 2019. Rüzgar Türbini Çeşitleri Nelerdir. Erişim Tarihi: 26.06.2022. <https://www.enerjiportalı.com/ruzgar-turbini-nedir-ruzgar-turbinesitlerininelerdir>
- Global Wind Energy Council, 2020. Global Wind Report 2020. Erişim Tarihi: 25.06.2022. <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2020/>
- Häfele, J., Gebhardt, C. G., Rolfes, R., 2019. A Comparison Study on Jacket Substructures for Offshore Wind Turbines Based on Optimization. Wind Energy Science, 4(1), 23-40.
- Harnett, M., Mullarkey, T., Keane, G., 1997. Modal Analysisi of an Existing Offshore Platform. Engineering Structures, 19(6), 487-498.
- Hensel, J., Ravi Sharma, M. S., Baxter, C. D., James Hu, S. L., 2012. Development of a Technology Type Factor for Jacket Structures for Offshore Wind Turbines in Rhode Island. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 4(6), 063120.
- Ivanhoe, R. O., Wang, L., Kolios, A. (2020). Generic Framework for Reliability Assessment of Offshore Wind Turbine Jacket Support Structures under Stochastic and Time Dependent Variables. Ocean Engineering, 216, 107691.
- Kaynia, A. M., 2019. Seismic Considerations in Design of Offshore Wind Turbines. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 124, 399-407.
- Kımıaeı, M., Shayanfar, M. A., El Naggar, M. H., Aghakouchak, A. A., 2004. Nonlinear Response Analysisi Of Offshore Piles Under Seismic Loads. Vancouver, Canada, 13th World Conference On Earthquake Engineering.

- Maske, A. A., Maske, N. A., Shiras, P. P., 2014. Seismic Response of Typical Fixed Jacket Type Offshore Platform Under Sea Waves: A Review. International Journal Of Advance Research In Science And Engineering, 3(1), 24-35.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), 2022. Türkiye Rüzgar Atlası. Erişim Tarihi: 19.05.2022. <https://www.mgm.gov.tr/genel/ruzgar-atlasi.aspx>
- 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.
- Musa, M. N., 2019. Structural Analysis of Offshore Wind Turbine Support Structure under Hydrodynamic and Aerodynamic Loads. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s, İstanbul.
- Morrison, J., O'Brien, M., Johnson, J., Schaaf, S., 1950. Offshore Operation - The Force Exerted by Surface Waves on Piles. The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 189, 149-157.
- Nguyen, D.-D., Sinsabvarodom, C., 2015. Nonlinear Behavior of a Typical oil and Gas Fixed-Jacket Offshore Platform with Different Bracing Systems Subjected to Seismic Loading. Chonburi, THAILAND, 20th National Convention on Civil Engineering .
- Seidel, M., 2007. Jacket Substructures for The Repower 5M Wind Turbine. In Conference Proceedings European Offshore Wind
- Shi, W., Park, H., Han, J., Na, S., Kim, C., 2013. A Study On The Effect Of Different Modeling Parameters on The Dynamic Response of a Jacket-Type Offshore Wind Turbine in The Korean Southwest Sea. Renewable energy, 58, 50-59.
- Shittu, A. A., Mehmanparast, A., Wang, L., Salonitis, K., Kolios, A., 2020. Comparative Study of Structural Reliability Assessment Methods for Offshore Wind Turbine Jacket Support Structures. Applied Sciences, 10(3), 860.
- Snyder, B., Kaiser, M. J., 2009. Offshore Wind Power in the US: Regulatory Issues and Models for Regulation. Energy Policy, 37(11), 4442-4453.
- Srikanth, I., 2016. Nonlinear Static and Dynamic Analyses of Jacket Type Offshore Platform. Chennai, India: Division of Structural Engineering Department of Civil Engineering.
- Srikanth, I., Arockiasamy, M., 2016. Inelastic Pushover Analysis of Fixed Jacket Type Offshore Platform with Different Bracing Systems Considering Soil-Structure Interaction. Journal Of Shipping and Ocean Engineering, 6, 241-254.
- Toğan, V., 2009. Açık Deniz Yapılarının Güvenilirliğe Dayalı Optimizasyonu. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 125 s, Trabzon.

- Tortumluoğlu, M. İ., Doğan, M., 2021. Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri için Uygun Yer Seçim Kriterlerinin İrdelenmesi ve Kuzey Ege Kıyılarına Uygulanması. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 23(67), 25-41.
- Wang, S., Larsen, T. J., Bredmose, H., 2020. Experimental and Numerical Investigation of a Jacket Structure Subject to Steep and Breaking Regular Waves. Marine Structures, 72, 1131-1140
- Zarrin, M., Gharabaghi, A. R. M., Poursha, M., 2021. A Multi-Mode N2 (MN2) Pushover Procedure for Ductility Level Seismic Performance Evaluation of Jacket Type Offshore Platforms. Ocean Engineering, 220, 321-335

