İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SİSMİK VE RÜZGAR YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif ALTUNSU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SİSMİK VE RÜZGAR YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif ALTUNSU
(501171008)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali SARI

TEMMUZ 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501171008 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Elif ALTUNSU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SİSMİK VE RÜZGAR YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ali SARI** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Kadir GÜLER** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yasin FAHJAN .....
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 14 Haziran 2020
Savunma Tarihi : 16 Temmuz 2020



Canım aileme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında 5 MW yatay eksenli çelik bir rüzgar türbininde güçlü yer hareketlerinin ve farklı hızlardaki türbülanslı rüzgarların türbinin farklı modları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Tez çalışması boyunca bilgi ve tecrübesiyle önemli katkıları olan, yardımlarını hiç esirgemeyen, bizlere çalışma prensiplerini öğreten ve buna zemin hazırlayan, araştırmanın ve öğrenmenin ne olduğunu gösteren ve küçücük dünyalarımıza büyük ufuklar açan değerli tez danışmanım Doç.Dr.Ali SARI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, öğrenim hayatım boyunca bende emeği ve hakkı olan bütün hocalarıma teşekkür ederim.

Üniversite öğrenimim boyunca yanımda olan, desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Oğuzhan Murat Halat, Meltem Öntürk, Hamdi Yüce, Sevcan Yıldız, Shokrullah Sorosh ve özellikle bu çalışmamın her adımına ortak olan, destekleyen ve başarımda izi olan sevgili arkadaşım Onur GÜNEŞ'e teşekkürü borç bilirim.

Bugünlere ulaşmama vesile olan, maddi ve manevi her türlü desteği ve fedakarlığı gösteren, en zor anlarımda kilometreleri aşıp her an yanımda olan, tüm başarılarımın en büyük yardımcıları başta sevgili annem Fatma ALTUNSU ve sevgili babam Mehmet Ali ALTUNSU olmak üzere bütün aileme en içten sevgilerimi ve şükranlarımı sunarım.

Haziran 2020

Elif ALTUNSU
İnşaat mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xvii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xix**
ÖZET ..... **xxiii**
SUMMARY ..... **xxvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Literatür Araştırması 3
1.2.1 Mevcut kodlar ve standartlar 3
1.2.2 Türbin modelleme metotları 4
1.2.2.1 Basit model 4
1.2.2.2 Tam sistem modeli 5
1.2.3 Ek çalışmalar 5
1.2.4 Deprem riski 10
1.3 Kara ve Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Sektör Analizi 11
1.3.1 Dünya genelinde rüzgar enerjisi 11
1.3.2 Türkiye'de rüzgar enerjisi 14
2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KARAKTERİSTİKLERİ **17**
2.1 Rüzgar Enerjisi 17
2.2 Açık Deniz ve Kara Rüzgâr Türbinleri Hakkında Genel Bilgi 19
2.3 Rüzgar Türbini Sınıflandırılması 20
2.4 Rüzgar Türbini Bileşenleri" 21
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDEKİ YÜKLEMELER **25**
3.1 Rüzgar 26
3.1.1 Rüzgar kayması 26
3.1.2 Türbülans 27
3.1.2.1 Rüzgar spektrumları 28
3.2 Aerodinamik Yükler ve Konseptleri 30
3.2.1 Kule üzerindeki rüzgar yükü 31
3.2.2 Rotor üzerindeki rüzgar yükü 31
3.2.3 Kanatların üzerindeki aerodinamik yükler 33
3.2.4 Türbin güç üretimi 37
3.2.5 Türbin kontrol sistemleri 38
3.3 Deprem 40
3.3.1 Deprem yer hareketi düzeyleri 41
3.3.1.1 Deprem yer hareketi düzeyi-1 (DD-1) 41
3.3.1.2 Deprem yer hareketi düzeyi-2 (DD-2) 41

3.3.1.3 Deprem yer hareketi düzeyi-3 (DD-3) 41
3.3.1.4 Deprem yer hareketi düzeyi-4 (DD-4) 41
3.3.2 Deprem Yer Hareketi Spektrumları 41
3.3.2.1 Harita spektral ivme katsayıları ve tasarım spektral ivme katsayıları 42
3.3.2.2 Yerel zemin etki katsayıları 42
3.3.2.3 Yatay elastik tasarım spektrumu 43
3.3.2.4 Düşey elastik tasarım spektrumu 44
3.3.3 Deprem yer hareketlerinin tanımlanması 45
3.3.3.1 Gerçek deprem kayıtlarının seçilmesi 45
3.3.3.2 Yer hareketini ölçekleme yöntemleri 46
3.4 Yük Kombinasyonu 47
3.5 Sistem Dinamiği 49
3.5.1 Soft ve rijit rüzgar türbini sistemleri 52
3.5.1.1 Uyarım 52
3.5.1.2 Campbell Diyagramı 53
3.5.1.3 Destek yapısı 54
3.6 Dengelenme Koşulları 55
3.6.1 Aerodinamik sönümleme 56
3.6.2 Değişken hızlı türbinler 56
3.7 Gerilme Kontrolü 56
4. ANALİZ 59
4.1 Genel Hususlar 59
4.2 Projenin İlk Hükümleri 59
4.3 5 MW Kara Tipi Rüzgar Türbin Modeli 61
4.3.1 Kanat yapısal özellikleri 62
4.3.2 Nasel ve göbek özellikleri 62
4.4 Tam Sistem Modeli için Doğal Frekanslar 63
4.5 Yüklerin Tanımlanması 64
4.5.1 Rüzgar yükleri 64
4.5.1.1 TurbSim Modulü 64
4.5.1.2 FAST (Fatigue, Aerodinamik, Structures ve Turbulance) Kodu 66
4.5.2 Sismik Yükler 70
4.5.2.1 Yer hareketi kayıtlarının seçilmesi 72
4.6 Analiz 74
4.6.1 Türbin normal çalışma halinde iken depremin etki etmediği durum 75
4.6.2 Türbin park halinde iken depremin etki ettiği durum 78
4.6.3 Türbin rölanti durumunda iken rüzgar yüklerinin etki etmesi 78
4.6.4 Türbin normal çalışma halinde iken depremin etki ettiği durum 82
4.6.5 Türbin rölanti modunda iken depremin etki ettiği durum 87
4.7 Rüzgar ve Sismik Yüklerin Gerilme Kontrolü 91
4.8 İlk Tasarım için Önerilen Katsayılar 94
4.9 Yük Kombinasyonu 101
5. SONUÇLAR 105
5.1 Analiz Sonuçları 105
5.2 Gelecekteki Çalışmalar 107
KAYNAKLAR 109
EKLER 113
ÖZGEÇMİŞ 129

KISALTMALAR

ABD : Amerika Birleşik Devletleri
API : American Petrol Institue
ASCE : American Society of Civil Engineers
AWEA : American Wind Energy Association
BEM : Blade Element Theory (Kanat Eleman Teorisi)
CSMIP : California Strong Motion Instrumentation Program
DAF : Dinamik Büyütme Faktörü
DD-1 : Deprem Yer Hareketi Düzeyi 1
DD-2 : Deprem Yer Hareketi Düzeyi 2
DD-3 : Deprem Yer Hareketi Düzeyi 3
DD-4 : Deprem Yer Hareketi Düzeyi 4
DNV : Det Norske Veritas
DOWEC : Dutch Offshore Wind Energy Converter Project
FAST : (Fatigue, Aerodynamic, Structures, Turbulence)
GH : Garrad Hassan
GL : Germanischer Lloyd
GWEC : Global Wind Energy Council
IEC : International Electrotechnical Commission
MİLRES : Milli Rüzgar Enerji Sistemleri
NREL : National Renewable Energy Laboratory
PGA : Peak Ground Accelaration
RES : Rüzgar Enerji Santrali
SAF : Sismik Analiz Sistemi
SDOF : Single Degree of Freedom
TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TÜREB : Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği

SEMBOLLER

A : Normal kuvvettin etki ettiği kesit alanı

$\mathbf{A_{disk}}$: Aktüatör diskinin rüzgar hızı

A : Güç kanunu katsayısı

C : Kritik elastik burkulma katsayısı

$\mathbf{C_a}$: Kord uzunluğu [m]

$\mathbf{C_D(\alpha)}$: Aerodinamik sürüklenme katsayısı

$\mathbf{C_L(\alpha)}$: Aerodinamik kaldırma katsayısı

$\mathbf{C_p}$: Güç katsayısı

$\mathbf{C_s}$: Aerodinamik parametre

$\mathbf{c_w}$: Ölçek parametresi

D : Ölü yük

$\mathbf{D_{av}}$: Kule ortalama çapı = D-tw

$\mathbf{d_{dış}}$: Kesit dış çapı

$\mathbf{d_{iç}}$: Kesit iç çapı

$\mathbf{\Delta r}$: Kanat elemanının radyal uzunluğu

EI : Elastiste modulü

EI : Kule eğilme rijitliği

f : Rüzgar frekansı

$\mathbf{F_a}$: Emniyetli eksenel basınç gerilmesi

fa : Hesap basınç gerilmesi

$\mathbf{F_b}$: Emniyetli eğilme gerilmesi

fb : Hesap eğilme gerilmesi

$\mathbf{F_{ax}}$: Aktüatör diskin üzerindeki eksenel yük

$\mathbf{F_{doğal}}$: İlk doğal frekans

$\mathbf{F_L}$: Aerodinamik kaldırma kuvveti

$\mathbf{f_n}$: dış kuvvetin frekansı

$\mathbf{F_S}$: Aerodinamik sürüklenme kuvveti

F(t) : Harmonik kuvvet

$\mathbf{f_v}$: Maksimum kayma gerilmesi

$\mathbf{F_y}$: Akma dayanımı

F_{xc} : Elastik olmayan yerel burkulma gerilmesi

F_{xe} : Elastik yerel burkulma gerilmesi

h_t : Kulenin tepe noktasının yüksekliği

I : Atalet momenti

K : Yapı rijitliği

k_w : Şekil parametresi

L : Kule yüksekliği

L_K : İntegral uzunluk ölçeği parametresi

M : Yapının toplam kütlesi

M_{eff} : Efektif kütle

m_{top} : Yığılı kütle

μ : Herbir metredeki kule kütlesi

$Ø$: içeriye akış açısı

$Ø_e$: Deprem yükleri için güvenlik katsayısı

Ω : Açısal dönme hızı

$Ø_o$: Rüzgar yükleri için güvenlik katsayısı

r : Kanat elemanının dönme eksenine olan mesafesi

ρ : 1.0, arttırma faktörü.

$\rho_{çelik}$: Çelik yoğunluğu

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu

$S_{ae}(T)$: Yatay elastik tasarım spektral ivmesi

$S_{aeD}(T)$: Düşey elastik tasarım spektral ivmesi

$S_{aR}(T_p)$: Azaltılmış tasarım spektral ivmesi

S_{DS} : Kısa periyot bölgesi için tasarım spektral ivme katsayısı

S_{D1} : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı

σ_{mean} : Standart sapma

σ_u : Rüzgar hızındaki standart sapma

S_S : Kısa periyot bölgesi için harita spektral ivme katsayısı

$S_u(f)$: Kaimal spektrumu

T_A : Yatay elastik tasarım ivme sprektrumu köşe periyodu

T_{AD} : Düşey elastik tasarım ivme sprektrumu köşe periyodu

T_B : Yatay elastik tasarım ivme sprektrumu köşe periyodu

T_{BD} : Düşey elastik tasarım ivme sprektrumu köşe periyodu

θ : yunuslama açısı

$\mathbf{T_L}$	**:** Yatay elastik tasarım sprektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesinde geçiş periyodu
$\mathbf{T_{LD}}$	**:** Düşey elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu
$\mathbf{T_P}$	**:** Bina hakim doğal titreşim periyodu
$\mathbf{t_w}$	**:** Kule kesit kalınlığı
$\mathbf{U_{10}}$	**:** 10 dk'lık ortalama rüzgar hızı (m/s)
$\mathbf{V}$	**:** Kesitin orta noktasındaki rüzgar hızı
$\mathbf{V_{bağıl}}$	**:** Kanat kesitinin bağıl rüzgar hızı
$\mathbf{V_{disk}}$	**:** Kanat profilindeki rüzgar hızı
$\mathbf{V_{mean}}$	**:** Ortalama rüzgar hızı
$\mathbf{V_{rot}}$	**:** Kanat kesitinin lineer dönme hızı
$\mathbf{V_{tr}}$	**:** Kayma kuvveti
$\mathbf{V_w}$	**:** Yıllık ortalama rüzgar hızı
$\mathbf{V_{wake}}$	**:** Çalışan doğrultudaki kesit boyutu
$\mathbf{V_{w,r}}$	**:** z_r referans yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı
$\mathbf{V_w(z)}$	**:** z yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı
$\mathbf{V_0}$	**:** İlk hız
$\mathbf{z}_r$	**:** Referans yüksekliği
$\mathbf{z}_0$	**:** Yüzey pürüzlülüğü uzunluğu
Q_e	**:** Deprem eğilme momenti
Q_o	**:** Rüzgar koşullarında acil durum kapanmasından kaynaklanan moment

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Toplam kurulu gücün kara türbinleri için tarihsel gelişimi [28]. **.....12**
Çizelge 1.1 (devam) : Toplam kurulu gücün kara türbinleri için tarihsel gelişimi [28]. **.....13**
Çizelge 1.2 : Toplam kurulu gücün açıkdeniz türbinleri için tarihsel gelişimi [28]. **.13**
Çizelge 1.3 : Dünya birincil enerji tüketimi [2] **.....15**
Çizelge 3.1 : Kanatların çalışma bölgeleri. **.....36**
Çizelge 3.2 : Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları. **.....42**
Çizelge 3.3 : 1.0 saniye için yerel zemin etki katsayıları. **.....43**
Çizelge 3.4 : Yükler için kısmi emniyet faktörleri, IEC 61400-1 [8]. **.....47**
Çizelge 3.5 : Yükler için kısmi emniyet faktörleri, IEC 61400-1 [8]. **.....55**
Çizelge 4.1 : NREL 5MW taban rüzgar türbini modeli için brüt özellikler [56]. **.....61**
Çizelge 4.1 (devam) : NREL 5MW taban rüzgar türbini modeli için brüt özellikler [56]. **.....62**
Çizelge 4.2 : Kanat yapısal özellikleri [56]. **.....62**
Çizelge 4.3 : Nasel ve göbek özellikleri [56]. **.....63**
Çizelge 4.4 : Kule özellikleri [56]. **.....63**
Çizelge 4.5 : Türbin tam sistem modeli için doğal frekanslar. **.....64**
Çizelge 4.6 : Rüzgar türbinleri için temel parametreler [8]. **.....65**
Çizelge 4.7 : Seçilen yer hareketi kayıtları. **.....73**
Çizelge 4.8 : Rüzgar yüklemesinden oluşan maksimum taban momentleri. **.....76**
Çizelge 4.9 : Rüzgar yüklemesinden oluşan ortalama taban momentleri. **.....77**
Çizelge 4.10 : Kocaeli Düzce istasyonu kaydı analiz sonuçları. **.....78**
Çizelge 4.11 : Rüzgar yüklemesinden oluşan maksimum taban momentleri. **.....81**
Çizelge 4.12 : Rüzgar yüklemesinden oluşan ortalama taban momentleri. **.....81**
Çizelge 4.13 : Rüzgar ve deprem yüklemesinden oluşan maksimum taban momentleri. **.....84**
Çizelge 4.14 : Rüzgar ve deprem yüklemesinden oluşan ortalama taban momentleri. **.....84**
Çizelge 4.15 : Sismik analize göre katsayı önerilmesi. **.....86**
Çizelge 4.16 : Maksimum M_y taban momenti için analiz sonuçlarının karşılaştırılması. **.....87**
Çizelge 4.17 : Rüzgar ve deprem yüklemesinden oluşan maksimum taban momentleri (rölanti). **.....89**
Çizelge 4.18 : Rüzgar ve deprem yüklemesinden oluşan ortalama taban momentleri (rölanti). **.....89**
Çizelge 4.19 : Rölanti modu için sismik analize göre katsayı önerilmesi. **.....90**
Çizelge 4.20 : Normal çalışma koşullarında kule tabanı kesit kontrolü. **.....92**
Çizelge 4.21 : Basınç gerilmesi kontrolü. **.....92**
Çizelge 4.22 : Kayma gerilmesi kontrolü **.....93**
Çizelge 4.23 : Eğilme gerilmesi kontrolü. **.....93**

Çizelge 4.24 : Yönetmelik için yük katsayıları (Kocaeli Düzce Depremi). **102**
Çizelge 4.25 : Yönetmelik için yük katsayıları. **102**
Çizelge B.1 : Kaliforniya Chalfant Vadisi depremi Benton kaydı için taban moment değerleri. **122**
Çizelge B.2 : Kaliforniya Chalfant Vadisi depremi Benton kaydı için katsayılar... **122**
Çizelge B.3 : İran Manjil depremi Abbar kaydı için taban moment değerleri. **122**
Çizelge B.4 : İran Manjil depremi Abbar kaydı için katsayılar. **122**
Çizelge B.5 : Imperial Valley depremi Superstition kaydı için taban moment değerleri. **123**
Çizelge B.6 : Imperial Valley depremi Superstition kaydı için katsayılar. **123**
Çizelge B.7 : Imperial Valley depremi El Centro kaydı için taban moment değerleri. **123**
Çizelge B.8 : Imperial Valley depremi El Centro kaydı için katsayılar..... **123**
Çizelge B.9 : Superstition depremi El Centro kaydı için moment değerleri. **124**
Çizelge B.10 : Superstition depremi El Centro kaydı için katsayılar. **124**
Çizelge B.11 : Bem İran depremi Bem kaydı için taban moment değerleri..... **124**
Çizelge B.12 : Bem İran depremi Bem kaydı için katsayılar. **124**
Çizelge B.13 : Japonya Kobe depremi Amagasaki kaydı için taban moment değerleri. **125**
Çizelge B.14 : Japonya Kobe depremi Amagasaki kaydı için katsayılar..... **125**
Çizelge B.15 : Japonya Kobe depremi Nishi Akashi kaydı için taban moment değerleri. **125**
Çizelge B.16 : Japonya Kobe depremi Nishi Akashi kaydı için katsayılar. **125**
Çizelge B.17 : Hector Mine depremi Hector kaydı için taban moment değerleri. .. **126**
Çizelge B.18 : Hector Mine depremi Hector kaydı için katsayılar. **126**
Çizelge B.19 : Hector Mine depremi Amboy kaydı için taban moment değerleri. . **126**
Çizelge B.20 : Hector Mine depremi Amboy kaydı için katsayılar..... **126**
Çizelge B.21 : Landers depremi Joshua Tree kaydı için taban moment değerleri. . **127**
Çizelge B.22 : Landers depremi Joshua Tree kaydı için katsayılar. **127**
Çizelge B.23 : Landers depremi Morongo kaydı için taban moment değerleri. **127**
Çizelge B.24 : Landers depremi Morongo kaydı için katsayılar. **127**
Çizelge B.25 : Kocaeli depremi Yarımca kaydı için taban moment değerleri. **128**
Çizelge B.26 : Kocaeli depremi Yarımca kaydı için katsayılar..... **128**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : (a) 2016 sonu Türkiye elektrik enerjisi üretim oranları [2]**.....1**
(b) 2019 Şubat sonu elektrik enerjisi üretim oranları [3]**.....1**
Şekil 1.2 : Yıllara göre GW cinsinden kurulan tesis enerjileri [28]**.....11**
Şekil 1.3 : Yıllara göre GW cinsinden toplam kurulu tesis enerjileri [28]**.....11**
Şekil 1.4 : Rüzgar enerjisinin ülkelere göre büyüme oranları, 2018 [28]**.....12**
Şekil 1.5 : Türkiye'deki rüzgar enerjisi santralleri için yıllık kurulum [29]**.....14**
Şekil 1.6 : Türkiye'deki rüzgar enerjisi santralleri için kümülatif kurulum [29]**.....14**
Şekil 1.7 : RES'lerin bölgelere göre dağılımı [29]**.....16**
Şekil 1.8 : İşletmedeki RES'lerin illere göre dağılımı [29]**.....16**
Şekil 2.1 : 1959 yılında inşa edilmiş "Gedser" Türbini.**.....17**
Şekil 2.2 : (a) Düşey eksenli rüzgar türbini (b) Yatay eksenli rüzgar türbini.**.....18**
Şekil 2.3 : (a) Kara rüzgar türbini. (b) Açık deniz rüzgar türbini. **.....20**
Şekil 2.4 : Kule tiplerine göre rüzgar türbinleri. **.....21**
Şekil 2.5 : Rüzgar türbini bileşenleri, [32]**.....21**
Şekil 2.6 : Nasel elektromekanik bileşenleri, [33]. **.....22**
Şekil 2.7 : Temel tipleri, [34].**.....23**
Şekil 3.1 : Gerçek rüzgar hızı profili, [37].**.....26**
Şekil 3.2 : Logaritmik ve güç kanunu modeline göre rüzgar kayması, [37].**.....27**
Şekil 3.3 : 100 m göbek yüksekliğindeki açık deniz türbin sınıfları için türbülans yoğunlukları, [38]. **.....28**
Şekil 3.4 : Kaimal ve von Karman spektrumu, [39].**.....29**
Şekil 3.5 : Kara, kıyı ve açıdeniz bölgeleri için yıllık Weibull rüzgar dağılımı, [37]. **.....30**
Şekil 3.6 : Akış tüpündeki aktüatör disk.**.....32**
Şekil 3.7 : Rotorun en elverişsiz pozisyonu, [41]. **.....33**
Şekil 3.8 : (a) Türbin kanatları üzerindeki rüzgar akışı [42]. **.....33**
(b) Durgun haldeki kanat üzerindeki yükler [43]. **.....33**
Şekil 3.9 : Kaldırma kuvveti mekanizması, [43].**.....34**
Şekil 3.10 : a) Kanat üzerinde etkiyen kuvvetler sistemi [37]. **.....34**
b) X ekseni yönünde kaldırma ve sürüklenme yüklerinin bulunması [37]. **.....34**
Şekil 3.11 : NACA N63-212 kanat profilinin her bir α açısı için kaldırma katsayısı (C_L) ve sürüklenme katsayısı (C_D) eğrisi [37].**.....35**
Şekil 3.12 : Güç katsayısı (Cp) ve rüzgar hızı (V_0) öncesi ve sonrası ($V_{uç}$) arasındaki rotordan geçişi, [44].**.....37**
Şekil 3.13 : Güç eğrileri ve türbin çalışma bölgeleri [45]. **.....39**
Şekil 3.14 : Nasel sapma açısı için örnek kontrol sistemi [46].**.....39**
Şekil 3.15 : Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli haritası [47].**.....40**
Şekil 3.16 : Türkiye deprem tehlike haritası [48].**.....40**
Şekil 3.17 : Yatay elastik tasarım spektrumu [49]. **.....44**
Şekil 3.18 : Düşey elastik tasarım spektrumu.**.....45**

Şekil 3.19 : Tek serbestlik dereceli sistemin kütle-yay sönüm sistemi [37]. **49**
Şekil 3.20 : Yarı statik davranış [37]. **50**
Şekil 3.21 : Rezonans durumu [37]..... **50**
Şekil 3.22 : Atalet hakim davranış [37]..... **50**
Şekil 3.23 : 1.eğri : Her bir normalleştirilmiş frekans değerlerine karşı gelen dinamik büyütme faktörü. **51**
2.eğri : Her bir normalleştirilmiş frekans değerlerine karşı gelen faz gecikmesi..... **51**
Şekil 3.24 : Üç kanatlı, sabit hızlı rüzgar türbininin yumuşak - rijit frekans aralıkları [37]. **52**
Şekil 3.25 : 5 MW referans türbini için Campbell Diyagramı [52]. **53**
Şekil 3.26 : Esnek bir rüzgar türbinin yapısal modeli [37]. **54**
Şekil 4.1 : Türkiye rüzgar enerji potansiyeli haritası [47]..... **60**
Şekil 4.2 : Türkiye deprem tehlike haritası [48]. **60**
Şekil 4.3 : 5 MW rüzgar türbini modeli. **61**
Şekil 4.4 : (a) AeroDyn'de uygulandığı şekliyle TurbSim ızgaraları..... **65**
Şekil 4.5 : Analiz aşamaları. **66**
Şekil 4.6 : Rüzgar verileri..... **66**
Şekil 4.7 : FAST programı analiz akış diyagramı. **67**
Şekil 4.8 : 5 MW türbini için kanat profilleri [56]..... **68**
Şekil 4.9 : DU40 kanat profilinin düzeltilmiş katsayıları [56]. **68**
Şekil 4.10 : ElastoDyn çalışma mekanizması..... **69**
Şekil 4.11 : ServoDyn çalışma mekanizması. **70**
Şekil 4.12 : Türkiye deprem tehlike haritası. **71**
Şekil 4.13 : Yatay elastik tasarım ivme spektrumu..... **71**
Şekil 4.14 : Düşey elastik tasarım ivme spektrumu. **72**
Şekil 4.15 : Kocaeli Düzce İstasyonu kaydı. **73**
Şekil 4.16 : Yatay deprem kayıtlarının yatay tasarım spektrumu ile eşleştirilmesi... **74**
Şekil 4.17 : Düşey deprem kayıtlarının düşey tasarım spektrumu ile eşleştirilmesi. **74**
Şekil 4.18 : Rüzgar hızlarına göre rotor hızı ve üretilen enerji (depremsiz). **75**
Şekil 4.19 : Zamana ve rüzgar hızlarına göre X yönünde kule taban momentleri. ... **75**
Şekil 4.20 : Zamana ve rüzgar hızlarına göre Y yönünde kule taban momentleri. ... **76**
Şekil 4.21 : Zamana ve rüzgar hızlarına göre Z yönünde kule taban momentleri. **76**
Şekil 4.22 : Değişen hızlara göre rüzgar doğrultusundaki tepe noktası yer değiştirmeleri..... **77**
Şekil 4.23 : Değişen hızlara göre rüzgara dik doğrultudaki tepe noktası yer değiştirmeleri..... **78**
Şekil 4.24 : Rüzgar hızlarına göre rotor hızı ve üretilen enerji (depremsiz rölanti).. **79**
Şekil 4.25 : Zamana göre X yönünde kule taban momentleri. **79**
Şekil 4.26 : Zamana göre Y yönünde kule taban momentleri. **80**
Şekil 4.27 : Zamana göre Z yönünde kule taban momentleri..... **80**
Şekil 4.28 : Değişen hızlara göre rüzgar doğrultusundaki tepe noktası yer değiştimeleri. **81**
Şekil 4.29 : Değişen hızlara göre rüzgara dik doğrultudaki tepe noktası yer değiştimeleri. **82**
Şekil 4.30 : Rüzgar hızlarına göre rotor hızı ve üretilen enerji (depremli). **82**
Şekil 4.31 : Zamana ve rüzgara göre X yönünde kule taban momentleri. **83**
Şekil 4.32 : Zamana ve rüzgara göre Y yönünde kule taban momentleri. **83**
Şekil 4.33 : Zamana ve rüzgara göre Z yönünde kule taban momentleri..... **83**
Şekil 4.34 : Zamana ve değişen hızlara göre rüzgar doğrultusundaki tepe noktası yer değiştimeleri. **85**

Şekil 4.35 : Zamana ve değişen hızlara göre rüzgara dik doğrultudaki tepe noktası yer değiştimeleri. **85**
Şekil 4.36 : Zamana göre X yönünde kule taban momentleri..... **87**
Şekil 4.37 : Zamana göre Y yönünde kule taban momentleri..... **88**
Şekil 4.38 : Zamana göre Z yönünde kule taban momentleri. **88**
Şekil 4.39 : Zamana göre rüzgar doğrultusundaki tepe noktası yer değiştimeleri (rölanti)..... **89**
Şekil 4.40 : Zamana göre rüzgara dik doğrultudaki tepe noktası yer değiştimeleri (rölanti)..... **90**
Şekil 4.41 : 3 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **94**
Şekil 4.42 : 5 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **95**
Şekil 4.43 : 7 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **95**
Şekil 4.44 : 9 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **95**
Şekil 4.45 : 11 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **96**
Şekil 4.46 : 13 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **96**
Şekil 4.47 : 15 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **96**
Şekil 4.48 : 17 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **97**
Şekil 4.49 : 19 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **97**
Şekil 4.50 : 21 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **97**
Şekil 4.51 : 23 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **98**
Şekil 4.52 : 25 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **98**
Şekil 4.53 : 30 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **98**
Şekil 4.54 : 35 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **99**
Şekil 4.55 : 40 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **99**
Şekil 4.56 : 45 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **99**
Şekil 4.57 : 50 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri. **100**
Şekil 4.58 : Tez çalışmasına göre 3-23 m/s rüzgar hızları için genel katsayı değerleri. **100**
Şekil 4.59 : Tez çalışmasına göre 25-50 m/s için genel katsayı değerleri. **101**
Şekil 4.60 : Tez çalışmasına göre rüzgar hızları için yük katsayı değerleri. **103**
Şekil 4.61 : Tez çalışması ile yönetmelik önerisinin ortak sonucuna göre genel yük katsayısı değerleri. **104**
Şekil A.1: Chalfant Valley depremi Benton istasyonu kaydı. **115**
Şekil A.2: İran Manjil depremi Abbar istasyonu kaydı. **115**
Şekil A.3: İmperial Valley depremi Superstition istasyonu kaydı. **116**
Şekil A.4: İmperial Valley depremi El Centro istasyonu kaydı. **116**
Şekil A.5: Superstition depremi El Centro istasyonu kaydı. **117**
Şekil A.6: Bem İran depremi Bem istasyonu kaydı. **117**
Şekil A.7: Kobe Japonya depremi Amagasaki istasyonu kaydı. **118**
Şekil A.8: Va Kobe Japonya depremi Nishi Akashi istasyonu kaydı. **118**
Şekil A.9: Hector Mine depremi Hector istasyonu kaydı. **119**
Şekil A.10: Hector Mine depremi Amboy istasyonu kaydı. **119**
Şekil A.11: Landers depremi Joshua Tree istasyonu kaydı. **120**
Şekil A.12: Landers depremi Morongo istasyonu kaydı. **120**
Şekil A.13: Kocaeli depremi Yarımca istasyonu kaydı. **121**

RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SİSMİK VE RÜZGAR YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI

ÖZET

Dünyada birincil enerji kaynakları olarak fosil yakıtlar hala kullanılmaktadır. Fosil yakıtların geleceğe dair meydana getirdiği kaygılar, çevreye verdiği olumsuz ve geri dönüşümsüz zararlar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi arttırmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle artan enerji tüketimi, Kyoto protokolünün gereklilikleri bu yönelimi desteklemiştir. Bugün tüm dünyada rüzgar ve güneş enerjisinin üretim payı önemli bir büyüme yaşamaktadır. Ülkemizin üç tarafının denizlerle kaplı ve yüksek rüzgar potansiyeline sahip olması rüzgar enerjisinden faydalanmayı kaçınılmaz hale getirmiştir. Türkiye'de son 10 yılda rüzgar endüstrisinde yaşanan gelişmeler sayesinde enerji ihtiyacının %7.9'unu rüzgar enerjisi karşılamaktadır. Gelecekte bu payın önemli ölçüde büyümesi planlanmaktadır. Açık deniz rüzgar türbinleri daha yüksek elektrik üretimiyle bu büyümeye destek çıkabilecektir. Öte yandan, açık deniz rüzgar türbinleri kara türbinlerine göre daha maliyetlidirler. Buna rağmen avantajları da önemli ölçüde fazladır.

Rüzgar türbinlerinden istenilen verimin alınması için yüksek rüzgar hızlarına ve büyük rotor çaplarına ihtiyaç vardır. Rüzgar hızı genellikle yükseklik arttıkça artmaktadır. Çevresel bir koşul olan rüzgar hızına müdahale edilemezken rotor çapı büyütülebilir. Bu durumda daha büyük tepe noktası kütlesi oluşur ve kule yüksekliğinin de artması gerekir. Dolayısıyla sismik olarak aktif bölgeler için kule tabanında oluşan sismik talep artar. Tesadüf olarak Türkiye, güçlü rüzgar sahalarına sahip olmasının yanında aktif fay hatlarının bulunduğu bir kuşakta yer almaktadır. Yüksek rüzgar sahalarının bu fay hatları üzerinde yer alması ülkemizde yapılması planlanan türbinler için sismik analizi zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla 5 MW ölçekli yatay eksenli çelik bir rüzgar türbini için Gelibolu çevresindeki bir bölgede bir dizi rüzgar ve sismik yükler altında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çevresel etkiler türbinin farklı çalışma koşulları altında değerlendirilmiştir. Bu koşullar; türbin normal çalışma durumunda iken depremin etki etmediği, türbin park halinde iken depremin etki ettiği, türbin rölanti durumunda iken rüzgar yüklerinin etki etmesi, türbin normal çalışma halinde iken depremin etki ettiği ve türbin rölanti durumunda iken depremin etki ettiği durum olmak üzere 5 farklı şekilde ele alınmıştır.

Toplam beş bölümden oluşan tezin ilk bölümünde rüzgar türbinlerinin rüzgar ve sismik yükler altında yapılmış farklı çalışmaların bir özeti sunulmuştur. Avrupa'nın bir döneme kadar liderliğini sürdürdüğü rüzgar endüstrisindeki akademik çalışmalarda sismik yüklerin etkisine yer verilmemiştir. Bu durumun esas nedeni Avrupa'nın coğrafi konum olarak aktif deprem kuşaklarında yer almamasından kaynaklanmaktadır. Sismik olarak aktif bölgelere sahip coğrafyalarda rüzgar türbinlerinin inşa edilmesiyle sismik etkiler önem kazanmıştır. Bu tezde, yakın geçmişten bu yana sismik etkilerin dikkate alındığı çalışmalar detaylı incelenmiştir. Tüm dünyada ve ülkemizde geçmişten bugüne rüzgar endüstrisinde yaşanmış

gelişmeler de bu bölümde ele alınmıştır. Dünya'da ve Türkiye'de rüzgar endüstrisinin gelişimi yıllara göre grafiklerde sunulmuştur.

İkinci bölümde, rüzgar enerjisinin tarihsel gelişimi ile birlikte türbin karakteristikleri incelenmiştir. Bu amaçla, rüzgar türbini çeşitleri, sınıflandırılmaları ve türbin bileşenleri araştırılmıştır.

Üçüncü bölümde, mevcut kodlara göre türbin üzerindeki yüklemeler incelenmiştir. Rüzgar yükleri türbülanslı rüzgar modeli esasıyla ele alınacağı için türbülans sınıfları ve kullanılan spektrumlara yer verilmiştir. Türbinin maruz kaldığı en önemli yükleme olan rüzgar yükleri, türbin elemanlarının her biri için detaylı incelenmiştir. Aerodinamik yüklerin etkisiyle kanat üzerindeki hareket burada tanıtılmıştır. Türbin güç üretiminin en verimli şekilde olabilmesi için rüzgar yüklerinden doğru şekilde faydalanmayı sağlayan kontrol sistemleri ele alınmıştır. Bu çalışma kapsamında incelenen diğer bir yükleme çeşidi olan deprem TBDY 2018 yönetmeliğince sunulmuştur. Deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi araştırılmıştır. Rüzgar ve sismik çevresel yüklerinin yük kombinasyonunun nasıl olması gerektiği anlatılmıştır. Söz konusu olan çevresel yükler altında sistem dinamiği de bu bölümde anlatılmış ve Campbell diyagramında tanıtılmıştır. Tez kapsamında tasarım yapılmamasına rağmen etki eden yüklemeler altında kule üzerinde oluşabilecek gerilmelerin incelenmesi açısından Amerikan Petrol Enstitüsü (API RP-2A)'nün ilgili dökümanının önerileri ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde ise, projenin hükümleri belirlenmiş ve mevcut 5 MW ölçekli çelik rüzgar türbini özellikleri ortaya konulmuştur. Sistemin modal analizi sonucunda elde edilen kule, kanat ve aktarma organları modlarını içeren ilk 13 mod burada sunulmuştur. Tez kapsamında ele alınan yüklemelerin kule odaklı olmasından dolayı kule ilk iki modu dikkate alınmıştır. Rüzgar yükleri TurbSim adlı simülasyon programında türbülans modelini esas alarak simüle edilmiştir. Normal operasyonel koşulları için 3 m/s'den 23 m/s hızına kadar ikişer artışla türbülanslı rüzgar verileri kullanılmıştır. Türbin alabileceği en yüksek hız olan 25 m/s ve daha büyük hızlarda rölanti moduna geçer. Bu amaçla rölanti modu için 25 m/s-50 m/s aralığındaki türbülanslı rüzgar hızları beşer artışla sisteme etki ettirilmiştir. Sisteme etki edecek diğer bir dinamik yükleme olan deprem yükleri için deprem kayıtlarının seçimi TBDY 2018'e göre yapılmıştır. Hedef tasarım spektrumu belirlendikten sonra seçilen 14 farklı deprem kaydı tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilmiştir. Normal ve rölanti modunda kullanılacak on dört deprem kaydının büyüklüğü 6 ile 8 arasında değişmektedir. Bu deprem kayıtları uzak ve yakın fay etkisi dikkate alınarak seçilmiştir. Tüm bu analizler Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen FAST kodu ile analiz edilmiştir. FAST koduna sismik modülün eklenmesiyle birlikte aerodinamik yüklerle birlikte sismik yükler de dikkate alınmaya başlanıldı. Bu sayede iki önemli yüklemenin aynı anda etki etmesinin sonucundaki yapısal davranış ortaya konulmuş oldu. 5 farklı durum ile türbin üzerinde meydana gelen taban momentleri ve tepe noktası yer değiştirmeleri bu bölümde araştırıldı. Ayrıca türbin için en önemli durum olan güç üretiminin güçlü yüklemeler altındaki değişimi incelendi. Bir diğer husus ise sismik ve aerodinamik yüklerin birlikte etki etmesi durumunda kesitte oluşan gerilmenin emniyetli bölgede kalması gerektiği durumdu. Bu kapsamda basınç, kayma ve eğilme gerilmesi farklı deprem kayıtlarının etki etmesi sonucunda kontrol edilmiştir. Kesitin bu yüklemeler altında güvenli olduğu sonucuna varılmıştır.

Dördüncü bölümde yapılan analizler sonucunda tasarımcılara sadece sismik analiz yaparak aerodinamik etkilerin dikkate alınması için değişen rüzgar hızlarında ve deprem büyüklüklerinde kullanılmak üzere katsayılar önerilmiştir. Buradaki amaç, bilindik sonlu elemanlar programları ile rüzgar analizinin yapılması zorluğunu ortadan kaldırmaktır. Piyasada kullanılan programların maliyetli olması ve FAST gibi akademik yazılımların öğrenme zorluğu açısından bu katsayılar ön tasarımda büyük kolaylık sağlayacaktır. Tasarım için önerilen katsayıların yanı sıra yük kombinasyonunda kullanılmak üzere yük katsayısı önerilmiştir. ASCE/AWEA 2012 standartının önerdiği yük katsayısını da dikkate alarak yeni bir yük katsayısı önerisi yapılmıştır.

Son bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılmış ve önerilerde bulunulmuştur. Aerodinamik ve sismik yükler arasındaki etkileşim ile 5 MW referans türbininin yapısal dinamiği üzerindeki etkileri farklı çalışma koşullarında tartışılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda sismik yüklerin etkisiyle yapıdaki iç kuvvetlerin dikkate değer bir artış gösterdiği fakat güç üretiminin değişmediği söylenebilir. Sismik yüklerle birlikte uygulanan rüzgar hızı arttıkça moment değişimi nominal hız çevresinde farklılık gösterirken genellikle azalma eğilimi göstermiştir. Bunun yanı sıra hakim rüzgar yönünde iç kuvvetlerin artış oranı aerodinamik sönümleme ile daha düşük kalmıştır. %10-20 mertebelerinde bir aerodinamik sönümleme meydana gelmiştir. Tepe noktası yer değiştirmeleri sismik etkilerle birlikte büyük bir artış göstermiştir. Rölanti durumunda rotorda herhangi bir torkun oluşmamasından dolayı güç üretimi olmamıştır. Rotorun hareketsiz olması türbin üzerinde fazla yüklemelere engel olmuştur. Bu nedenle moment değerleri operasyonel duruma göre daha küçük çıkmıştır. Bu çalışmadan varılacak nihai sonuç, sismik aktivitesi yüksek bölgede inşa edilmesi planlanan türbinler için deprem yükleri mecburi dikkate alınmalıdır. İlk tasarım için dikkate alınan sismik yüklerin sonucunda elde edile kuvvetler ile çarpılarak aerodinamik etkileri dikkate alan katsayılar önerilmiştir. Ekonomik bir yaklaşım elde etmek açısından iki güçlü yüklemenin kombinasyonunda kullanılmak üzere yük katsayısı önerimi de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar sınırlı bir araştırma sonucunda ortaya konulmuştur. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda veri sayısını arttırmak ve farklı çevresel koşulları da dikkate alarak türbinin çeşitli çalışma koşullarında analizler gerçekleştirilmelidir.

BEHAVIOR OF WIND TURBINES UNDER SEISMIC AND WIND LOADS

SUMMARY

Fossil fuels are still used as primary energy sources in the world. Future concerns about fossil fuels, negative and irreversible damages to the environment have increased the trend towards renewable energy sources. Increasing energy consumption with the development of technology and the requirements of the Kyoto protocol supported this trend. Nowadays, the production share of wind and solar energy is growing significantly all over the world. The facts that our country is surrounded by sea from three sides and has high wind potential have made it inevitable to benefit from wind energy. In Turkey, due to development of wind industry in the last ten years, 7.4% of total energy demand is provided by wind. It is planned that this share will grow significantly in the future. Offshore wind turbines having higher electricity generation capacity, can support this growth effectively. On the other hand, offshore wind turbines are more costly than onshore wind turbines. However, its advantages are also considerably high.

High wind speeds and large rotor diameters are required to obtain the desired efficiency from wind turbines. Wind speed generally increases with increasing altitude. While wind speed, which is an environmental condition, cannot be intervened, the rotor diameter can be enlarged. In this case, a larger top mass is formed and the height of the tower must be increased. Therefore, the seismic demand at the base of the tower increases for seismically active regions. As coincidence, Turkey, besides having strong wind zones, is taken place in geopraphical location where active fault lines are passing through. Turkey, besides having strong wind zones, is taken place in geographical location where active fault lines are passing through. The presence of high wind zones on these fault lines necessitates seismic analysis for turbines planned to be built in our country. For this purpose, a 5 MW scale horizontal axis steel wind turbine was analyzed under a series of wind and seismic loads in a region around Gelibolu. These environmental effects were evaluated under different operating conditions of the turbine. These conditions; It has been handled in 5 different ways: earthquake does not affect when the turbine is in normal operation, earthquake affects when the turbine is parked, wind loads affect when the turbine is in idle mode, earthquake affects when the turbine is in normal operation and the impact of earthquake when the turbine is in idle mode.

In the first chapter of the thesis consisting of a total of five chapters, a summary of the different studies conducted under wind and seismic loads of wind turbines is presented. The effect of seismic loads has not been included in wind industry related academic studies carried out in Europe, where it was the leader for a period. The main reason for this situation is that Europe is not geographically located in active earthquake zones. Seismic effects have gained importance with the construction of wind turbines in geographies with seismically active regions. In this thesis, studies that have considered

the seismic effects have been examined in detail. The developments in the wind industry from past to present all over the world and in our country are also discussed in this section. The development of wind industry in the world is presented in charts according to years.

In the second chapter, the turbine characteristics are examined along with the historical development of wind energy. For this purpose, wind turbine types, their classification and turbine components were investigated.

In the third chapter, the loads applied on the turbine are examined according to the existing codes. Since wind loads will be handled on the basis of turbulent wind model, turbulence classes and spectra used are included. Wind loads, the most important loading that the turbine is exposed to, have been studied in detail for each of the turbine elements. The motion on the blade under the effect of aerodynamic loads is introduced here. In order for the turbine power generation to be more efficient, control systems that provide the right utilization of wind loads have been discussed. Earthquake, which is another type of loading analysed within the scope of this study, is presented in accordance with TBDY 2018 standard. System dynamics under the environmental loads are also described in this section. The selection and scaling of earthquake records have been investigated. The rules regarding the load combination of wind and seismic environmental loads are explained. System dynamics under the existing environmental loads are also described in this section and introduced in the Campbell diagram. Within the scope of the thesis, the recommendations of the relevant document of the American Petroleum Institute (API RP-2A) have been discussed in order to examine the stresses that may occur on the tower under the impact loads, although the design has not been conducted.

In the fourth chapter, the provisions of the project are determined and the features of the existing 5 MW steel wind turbine are presented. The first 13 modes including the tower, blade and drivetrain modes obtained as a result of the modal analysis of the system are presented here. The first two modes of the tower have been taken into consideration since the loadings in the scope of the thesis are tower-oriented. Wind loads were simulated in the simulation program named TurbSim based on the turbulence model. For normal operating conditions, turbulent wind data having 3 m/s to 23 m/s speed with 2 m/s increments was used. 25 m/s is the highest speed that wind tubine can generate energy at. The turbine switches to idle mode at speeds of 25 m/s and greater. For this purpose, the turbulent winds with speed in the range of 25 m/s - 50 m/s for idle mode were applied on the system with 5 m/s increments. The selection of earthquake records for earthquake loads, another dynamic loading that will affect the system, was made according to TBDY 2018. After the target design spectrum was determined, 14 different earthquake records were scaled according to the design spectrum. The magnitudes of fourteen earthquake records to be used in normal and idle mode range from 6 to 8. These earthquake records were selected taking the far and near fault effect into account. All of these analyses were carried out using FAST code developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL). With the addition of the seismic module to the FAST code, aerodynamic loads and seismic loads have been taken into account. In this way, the structural behavior as a result of the effect of two important loading at the same time was revealed. Base moments and peak displacements occurring on the turbine with 5 different situations are investigated in this section. In addition, the change in power generation, which is the most important

situation for the turbine, under strong loads was examined. Another issue was the situation that if the stress formed in the cross section when both seismic and aerodynamic loads act together remain in the safe zone. In this context, pressure, shear and bending stress were controlled as a result of the effect of different earthquake records. It is concluded that the cross section is safe under these loads.

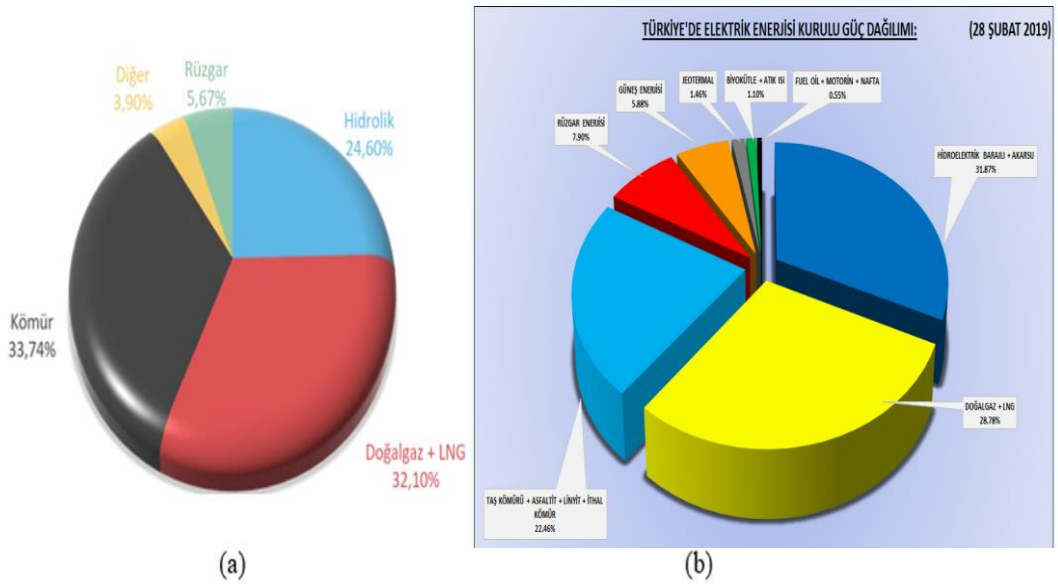
As a result of the analysis made in the fourth chapter, coefficients for use in varying wind speeds and earthquake magnitudes are proposed to the designers in order to take into account aerodynamic effects by performing only seismic analysis. The aim here is to eliminate the difficulty of performing wind analysis with familiar finite element programs. These coefficients will provide great convenience in preliminary design because the cost of the programs used in the market are high and it is difficult to learn academic software such as FAST. In addition to the coefficients suggested for the design, the load coefficient has been proposed for use in the load combination. A new load coefficient has been proposed, taking into account the load coefficient suggested by the ASCE / AWEA 2012 standard.

In the last chapter, the obtained results are discussed and suggestions are made. The interaction between aerodynamic and seismic loads and their effects on the structural dynamics of the 5 MW reference turbine are discussed under different operating conditions. As a result of these studies, it can be said that the internal forces in the structure increased considerably with the effect of seismic loads, but the power generation did not change. As the wind speed applied with seismic loads increased, the moment change varied around the rated speed and generally tended to decrease. In addition, the rate of increase of internal forces in the dominant wind direction was lower because of aerodynamic damping. Since there is no comprehensive recommendation for earthquake analysis in the standards commonly used for wind turbine design, according to the results of the analysis, certain coefficients based on the earthquake analysis are proposed to the designers. The final conclusion to be drawn from this study is that earthquake loads must be taken into consideration for turbines planned to be constructed in the region with high seismic activity. Aerodynamic damping occurred in the order of 10-20%. Top displacements increased significantly with seismic effects. There was no power generation due to the lack of any torque in the rotor during idle mode. When the rotor is not turning, it prevents over loading on the turbine. Therefore, the moment values in this mode are smaller than the operational situation. The final conclusion to be reached from this study is that for turbines planned to be built in a region with high seismic activity, earthquake loads should be taken into consideration. The coefficients considering the aerodynamic effects are proposed by multiplying the forces obtained as a result of the seismic loads considered for the first design. Load coefficient recommendation has also been made for use in combination of two strong loads in order to achieve an economical approach. The results obtained have been presented as a result of limited research. In future studies, analyzes should be carried out in various operating conditions of the turbine to increase the number of data and to take different environmental conditions into consideration.

1. GİRİŞ

Dünya, fosil yakıtların meydana getirdiği karbon salınımlarını durdurmak için harekete geçmiştir. Bu bilinçle uluslararası Kyoto protokolü anlaşması, sera gazı salınımı azaltmak için belli kurallar ortaya koymuştur. Enerji tüketimini azaltmak ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek birincil amaçlardandır [1].

Yenilebilir enerjinin öneminin anlaşılmasından sonra birçok ülke enerji politikalarında yenilenmeye gitmiştir. Fakat yapılan araştırmalara göre 2040 yılına kadar fosil yakıtlar hakim kaynaklar olmaya devam edecektir [2]. Ülkemizde de halen kömür, petrol ve doğal gaz Şekil 1.1'de görüldüğü gibi birincil enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Bu kaynakların hem tedariki konusu hem de çevreye verdikleri zararlar göz önüne alındığında kullanımı minimize etmek daha da önem kazanmaktadır. Bununla birlikte Şekil 1.1 (b) 'de gösterilen son 20 yılda %7.9'luk bir pay elde eden rüzgar enerjisi sektöründe kayda değer gelişmeler yaşanmıştır. Tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynakaları ise yıllık %9.8 büyüme payları ile en hızlı büyüme oranına sahip enerji kaynaklarıdır [2].



Şekil 1.1 : (a) 2016 sonu Türkiye elektrik enerjisi üretim oranları [2]

(b) 2019 Şubat sonu elektrik enerjisi üretim oranları [3]

Rüzgar enerjisi teknolojisinin gelişmesi, daha fazla enerji üretimi, daha az kurulum maliyetleri ve daha ucuz bakım yapmaya destek vermiştir. Ülkemizin önemli rüzgar sahalarına sahip olması bu enerji kaynağının karada birçok yerde kurulumuna itmiştir. Danimarka, Hollanda, Almanya ve İngiltere gibi Avrupa ülkelerinin liderliğinde bu enerji kaynağının kara üzerinde uygulanmasında kayda değer gelişmeler yaşamıştır. Bu doğrultuda destek yapılarının konfigürasyonu yüksek enerji üretimlerine izin vermektedir. Türkiye'de mevcut rüzgar enerjisi üretimi de bu doğrultudadır.

Bunun yanısıra Avrupa ülkelerinde fosil yakıtların kullanımını daha da azaltmak üzere bu teknolojiden kıyıdan uzaklarda açıkdenizde de faydalanılmak istenmiştir. Açık deniz rüzgar türbinleri yüksek enerji üretimine sahiptir. Avrupa ülkelerinden sonra bu teknolojilerden Amerika Birleşik Devletleri ve birçok Asya ülkeleri de faydalanmıştır. Ülkemizde ise henüz açıkdeniz yapısı mevcut olmamakla birlikte önümüzdeki yıllarda inşaası planlanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada, tekil kule tipinde bir çelik rüzgar türbini için rüzgar ve sismik analizler gerçekleştirilecektir. Sismik analizler için Gelibolu çevresinde bir bölge ve rüzgar analizi için türbülanslı rüzgar verileri seçilecektir.

Öncelikle FAST (Fatigue, Aerodynamic, Structures, Turbulence) kodunda 5 MW'lık çelik rüzgar türbinin kule özellikleri (kule çapı, ağırlığı ve kalınlığı, rotor çapı ve ağırlığı vb.) tanıtılacaktır. Kule tabanından tepe noktasına kadar kule çapı ve kalınlığı aynı oranda azaltılarak modellenecektir.

Kule üzerine gelen ve hataya neden olabilecek dinamik yükler araştırılacaktır. Tüm analizler sonucunda türbin için bu yükler altındaki davranış kontrol edilecek ve yorumlanacaktır.

Bu tez çalışması, sismik etkilerin yapısal tepkideki önemini anlamayı amaçlamıştır. Bilindik sonlu elemanlar programı ile rüzgar analizinin zor olması, piyasadaki türbin programlarının maliyetinin yüksekliği, tasarımcılara açık yazılımların öğrenilmesinin zorluğunu gidermek için birincil tasarımda sadece sismik analiz yapılarak türbin boyutlandırılmasını sağlamak amacıyla belirli çevresel koşullar için katsayı önerilmesi hedeflenmiştir. Bu katsayının yanı sıra ilgili yönetmeliklerin önerdiği yük katsayısı için de yeni bir yaklaşım getirilmeye çalışılacaktır. Bu doğrultuda farklı hızdaki

türbülanslı rüzgarlarla birlikte güçlü yer hareketleri beş farklı durum için yapıya etki ettirilecektir.

1.2 Literatür Araştırması

Rüzgar türbinlerinin sismik tepkisi güncel litaratürde aktif olarak ele alınmaktadır. Rüzgar türbini tasarımında deprem etkileri göz önüne alınarak boyutlandırma güncel olarak incelenmektedir. Türbinlere sismik yüklenmeyle ilgili ön sonuçların alındığı bazı araştırmalardan elde edilen sonuçlar yayınlanmıştır.

1.2.1 Mevcut kodlar ve standartlar

Üç ana standart veya kılavuz, rüzgar türbinlerinin sismik yüklemesi için doğrudan rehberlik sağlar: Rüzgar Türbinlerinin Tasarım İlkeleri (Risø, 2001); Rüzgar Türbinlerinin Sertifikasyonu İçin Rehber (GL, 2003); ve IEC 61400-1 Ed.3: Rüzgar türbinleri - Bölüm 1: Tasarım gereksinimleri (IEC, 2005). Üç türbin kılavuzunun tamamı, tüm dünyada sismik yüklere göre tasarım yapabileceği az sayıda bölge olduğunu göstermektedir. Ancak, 2007 yılında kurulan türbinlerin dörtte birinden fazlası, tümü sismik tehlikesi yüksek büyük bölgelere sahip olan ABD (ABD), Hindistan ve Çin'de kuruldu [4]. Her üç kılavuzda da, sismik analizler yalnızca sismik tehlikesi yüksek olan bölgelerde veya yerel makamlarca talep edildiği şekilde istenmektedir [5].

Bahsedilen üç standarttan, Rüzgar Türbinlerinin Tasarımı için Kılavuz İlkeleri en genel önerileri sunmaktadır [6]. Risø kuralları, sismik yükleme ile ilgili endişelere temel bir giriş işlevi görür. Bu standart, kule kütlesinin dörtte biri, nasel ve rotor kütlesinin tamamını kule tepesinde toplu kütle olarak modellemeyi önermiştir. Bu model tek serbestlik dereceli frekans alanı analizidir. Sönümleme oranı için bir öneride bulunulmamasına rağmen genel olarak 5% mertebesinde kabul edilebilir. Elde edilen spektral tepki ivmesinin tasarım yüklerine dönüştürülmesini önermez. Bunun yerine uygun bina kodlarının kullanılmasını önermektedir.

Risø yönergelerinin aksine, Germanischer Lloyd (GL) yönergeleri, deprem mühendisliği konusuna çok az yer vermiştir. İlkeleri, yerel inşaat kurallarının uygulanması gerektiğini veya Amerikan Petrol Enstitüsü'nün (API,2000) tavsiyelerini GL Wind'e göre uygulanmasını önermektedir. Risø yönergelerinde olduğu gibi GL yönergesinde de viskoz sönümleme ile ilgili bir tavsiyede bulunulmamıştır[7].

IEC kılavuzları sismik etkiler ile ilgili şartları açıkça ortaya koymaktadır [8]. Tasarım depremi için 475 yıllık tekrarlanma periyoduna sahip yer hareketi önermektedir. Ortaya çıkan yüklerin işletme yükleri ve acil durum kapatma yükleri ile birlikte ele alınmasını önermektedir. Analiz, zaman veya frekans tanım alanında gerçekleştirmeye izin verir. Rotor, nasel ve kule kütlesinin yarısını alarak kule tepesinde yığılı kütle olarak tanımlamayı önermiştir.

Sismik analizlerde yaygın kullanıma sahip diğer bir yönetmelik ise ASCE (American Society of Civil Engineers) tarafından rüzgar türbinlerinin kule yapılarının tasarımı için önerilen ASCE-AWEA RP2011 yayınıdır. Bu yönetmelik, kara tabanlı rüzgar türbinlerinin tam sistem modelini ele alarak türbin içerisindeki tüm dinamiklerin birbirleri ile etkileşimini ve yapısal sistemin cevabını değerlendirmeye çalışır. Diğer standartlarla birlikte kullanılmayı önerir. Rüzgar ve deprem çevresel yüklerinin 0.75 yük katsayısı ile kombine eder [9].

1.2.2 Türbin modelleme metotları

Sismik analiz yapmak için mevcut literatür iki model önermiştir. İlk olarak nasel ve rotor kütlesini kulenin tepe noktasında yığılı kütle olarak kabul ederek sadece kuleye odaklanan modeller; ikincisi ise türbin elemanlarının tamamının modellendiği ayrıntılı modellerdir. Basitleştirilmiş modeller, rotor modellemenin getirdiği karmaşıklığı ortadan kaldırdığı için daha çok tercih edilmektedir. Sistem tek serbestlik dereceli (SDOF) olarak modellendiğinden dolayı ilk kule modundan başka modlarda güvenilir olmayabilir.

Tam sistem modeli ise rotor dinamikleri, zemin-yapı etkileşimi, aerodinamik yükler ve elektrik sistemi dinamiğini de göz önüne alarak tüm olası faktörleri incelemeye yardımcı olur. Buna karşılık, bu modelin sonuçlarını yorumlamak daha karmaşıktır. Sistemde sismik yükleme için en kritik bölgenin zemin yapı birleşimi olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda tam sistem modeli zemin-yapı etkileşiminin doğuracağı sonuçları sunabilir.

1.2.2.1 Basit model

Risø Ulusal Laboratuvarı (Risø, 2001) ve IEC Ek C (IEC, 2005)'de bir rüzgar türbininin sismik davranışını incelemek için basitleştirilmiş prosedürler sunar. Bu iki standart arasındaki fark çok azdır. Risø prosedürü, tasarım iterasyonları sırasında

faydalı olabilecek ilk kulenin doğal periyodunu belirlemek için basitleştirilmiş bir model kullanır. IEC, ilk doğal periyodun mevcut analizlerce bilindiğini kabul eder. Her iki standart da bu ilk doğal titreşim periyodunu tasarım yanıt ivmesini yanıt spektrumdan çıkarmak için kullanır. Risø prosedürü, tasarım yanıt ivmesini sismik yüklere çevirmek için kullanılacak olan yöntem seçimini tasarımcıya bırakmıştır. IEC prosedürü ise bu ivmenin taban kesme kuvvetine ve momentine çevrilmesini önermektedir.

1.2.2.2 Tam sistem modeli

Rüzgar türbinleri, doğru aerodinamik analiz için tam sistem modeli gerektirir. Tam sistem modeli için genel olarak iki modelleme kodu kullanılmaktadır. Bunlardan ilki Garrad Hassan (GH) tarafından geliştirilen GH Bladed [10] ve ikincisi ise Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL)'nın geliştirdiği FAST kodudur [11].

GH Bladed kodunda sistem, sınırlı derecede serbestlik derecesi kullanarak modellenir. Modal hesaplamalar türbin bileşenleri için zaman alanında gerçekleştirilir. Sismik yükleme için ise iki yöntemi esas alır. İlk yöntem geçmişteki deprem kayıtlarını kullanarak time history analizi, ikincisi ise sentetik bir ivme zaman verileri üreterek elde edilen elastik response spektrum yöntemidir.

FAST kodu [11], bir türbinin dinamik davranışını simüle etmek için birleşik modal ve çok gövdeli bir dinamik formülasyonu kullanır. Kod, eklenen sismik analiz modülü ile sismik analiz yapma imkanı sağlar. FAST rüzgar analizi ve sismik analiz yapmak üzere bu tez kapsamında da kullanılacaktır.

1.2.3 Ek çalışmalar

Erken dönem çalışmalarından biri olan N. Bazeos ve arkadaşlarının [12] gerçekleştirdiği, 450 kW kapasiteli, 38 m kule yüksekliğinde çelik bir rüzgar türbininde statik ve sismik davranışlar incelenmiştir. Kule boyunca lokal burkulmaya karşı rijitliği arttırmak için dairesel kelepçeler kullanılmıştır. Bu anlamda yapının stabilite analizini yapma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada ele alınan analizlerin çoğunun altında yatan ana varsayım, herhangi bir yük kombinasyonunda (uygun herhangi bir yük güvenliği faktörü dahil), kulenin yük taşıyıcı yapı elemanlarının malzemesinin, gerilme-şekil değiştirme diyagramının doğrusal elastik bölgede kalması gerektiğidir. Bu durum yorulma hasarına karşı bir ölçüde önlem

sağlar. Zaman alanında sismik analiz, Yunan koduna göre yapılmıştır ve altı farklı birbirinden bağımsız yer hareketi kullanılmıştır. Yunan Sismik Kodu ile uyumlu yapay ivme çizelgeleri, SRP bilgisayar kodu yardımıyla geliştirilmiştir. Bu çalışmada sunulan statik, kararlılık ve sismik analizler, genel amaçlı program olan NISA II ile birlikte belirlenmiş bir eleman model kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Analizlerin sonucunda P-Δ etkisinin değerlendirilmesinde gerekli yük-yer değiştirme diyagramının, statik yük tasarımı değerlerinin çok üzerindeki seviyelerde bile temel olarak doğrusal davranışa sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, yüksek serbest titreşim modlarında zemin-yapı etkileşiminin daha da önem kazandığı görülmüştür. Basitleştirilmiş sayısal modellerin, bu tür yapılarda lokal burkulma olaylarıyla ilgili kritik durumları tahmin etmede kullanılabileceği anlaşılmıştır. Fazla bir kule yüksekliğine sahip olmayan bu türbinde sismik etkilerin kritik bir duruma sebep olmadığı anlaşılmıştır [12].

İlk kez tam ölçekli sarsma tablası deneylerini gerçekleştiren I. Prowell ve arkadaşları, 23 m kule yüksekliğine ve 65 kW'lık kapasiteye sahip rüzgar türbininin bu deneyden elde edilen sonuçlar kullanılarak, sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlardır. Deney, bugün 80 metreden yükseklere yaklaşan bu tür yapılar için tam ölçekli sismik testin uygulanabilirliğini göstermede etkili olmuştur. İki doğrultulu deprem hareketinin etkisine yönelik temel bilgilerin yanı sıra tasarım süreci için daha fazla araştırma yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Burada sunulan deneysel sonuçlar önemlidir ve rüzgar türbinlerinin sismik davranışlarının onaylanmasında ilk adım olarak görülür [13].

Ian Prowell ve P. Veers [14] bir başka çalışmada, rüzgar türbinlerin sismik davranışını üzerine geniş bir literatür taraması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında sismik riskin kule taban moment talebinin türbin boyutuna bağlı olarak tahmin edilmesi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada, rüzgar türbinleri için sismik yüklerin öngörülmesindeki belirsizliğin azaltılmasının yanı sıra, yüksek rüzgar modlarında deprem yükleri ile tipik rüzgar yükünü karşılaştırmayı amaçlamıştır. Sonuç olarak zemin-yapı etkileşiminin yüksek modlarda rüzgar yükünden daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Yapı boyutları büyüdükçe sismik etkinin de arttığı sonucuna varılmıştır.

Ma Hongwang [15], çalışmasında megawatt ölçekli hem yatay hem de dikey deprem hareketine maruz kalan bir türbinin yapı-zemin etkileşimini ve P-Δ etkilerini incelemiştir. Yapı-zemin etkileşiminin doğal frekans, kule üzerindeki yatay ivmelenme ve moment talebinde önemli bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Dikey yönde gelen deprem hareketine karşı yapı-zemin etkileşiminin etkisinin daha az olduğu görülmüştür.

T. Ishihara ve M. W. Sarwar, yaptıkları çalışmada rüzgar türbini kulelerinin sismik yük değerlendirmesi için yanıt spektrum analizine dayanan basitleştirilmiş bir formül sundular. Rüzgâr türbini tasarımında, Japon kodunun oldukça katı şartları altında sismik davranışı incelediler. Çalışmanın sonucunda, orta büyüklükteki türbinlerde sismik etkilerin oldukça az olmasına rağmen, yüksek türbinlerde bu etkinin önemli hale geldiği anlaşılmıştır. Japon koduna göre hazırlanan response spektrumun, türbinlerdeki gibi düşük sönümlü yapılarda belirli bir güvenlik katsayısı ile çarpılması gerektiğine karar verilmiştir [16].

Triantafyllos K. Makarios ve arkadaşları [17], düzensiz bir yapı olarak kabul edilen prototip rüzgar türbini kulesinin kuvvetli bir sismik hareketinin sonucunda oluşabilecek burulma-yerdeğiştirme davranışını incelemiştir. Bu çalışmaya göre, yüksek diyaframlarda ilave diyaframların kullanılması, kulenin burulma çökmesine karşı daha emniyetli bir tasarıma katkıda bulunduğu anlaşılmıştır.

Otoniel Díaz ve Luis E. Suárez [18], üç kanatlı bir yatay eksenli rüzgar türbininin yapısının davranışını ve yük kapasitesini, sonlu elemanlar ve uygun yapı kodları tarafından önerilen basitleştirilmiş modeller yardımıyla statik ve güçlü deprem yer hareketlerinin üç bileşenine göre sismik analizini incelediler ve bir formülasyon sundular. Türbinin aynı anda normal bir rüzgara ve güçlü bir depreme maruz kaldığı varsayılarak inceleme yapmışlardır.

Bu çalışmada türbinin sürekli çalışma durumunda olduğu ve bu nedenle kanatların hareketinin neden olduğu aerodinamik sönümleme etkileri açıklanmıştır. Kulenin yanal hareketinin, rezonans koşullarının başlamasına karşı daha hassas olduğu görülmüştür.

Fabio Santangelo ve arkadaşları [19], doğrusal olmayan temel modelinin de dahil edildiği bir kara rüzgar türbininin eşleşmemiş zamana bağlı analizlerinin nasıl uygulanabileceğini incelemişlerdir. Rüzgar türbininin çalışma esnasında meydana

gelen deprem hareketini göz önüne alınarak yapılmış bir analiz ile rüzgar ve depremin ayrı ayrı uygulanarak aerodinamik sönümlemenin de dikkate alınarak elde edilen tepkilerin doğrusal kombinasyonunu karşılaştırmışlardır.

Rüzgârın ve depremin ayrı ayrı hesaplandığı durumda, %4 aerodinamik sönüm ile etki ettirilen deprem hareketinin doğru sonuçlar verebileceği gözlemlenmiştir. Deprem hareketinin temelde doğrusal olmayan bir harekete neden olduğunun ve bu hareketlerin yapısal modelde yer alabildiği zaman alanlı eşleşmemiş analizlerin yapılması gerektiği ortaya konulmuştur.

Amir Reza Ghaemmaghami ve diğerleri [20], iki farklı rüzgar türbini modelinin 24 farklı yer hareketi altında üç farklı zemin türüne göre etkileşimini incelemişlerdir. Rüzgar türbini sonlu elemanlar metodu ile, temel ise koni modellerine dayanan karmaşık dinamik rijitlik fonksiyonları ile ifade edilmiştir.

Bu çalışma sonucunda, farklı zemin türlerinde yapının farklı davranışlar meydana getirdiği görülmüştür. Bu anlamda yapı zemin etkileşiminin birinci ve ikinci temel modal parametreler üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu anlaşılmıştır. Taban kesme kuvveti ve moment talebini ise önemli ölçüde etkilemiştir. En genel anlamda farklı zemin türü ve çeşitli sismik uyarma özelliklerine sahip rüzgâr türbinlerinde bir genelleştirilme yapılamayacağı anlaşılmıştır. Bu çalışma geniş ölçekli bir çalışma olmasından dolayı önem taşımaktadır.

Atul Patil ve diğerleri, rüzgâr türbininin depreme karşı yapısal performansını faya yakınlığına göre incelemiştir. Bu inceleme için kırılganlık eğrileri geliştirilmiştir. 15 yakın fay ve 17 uzak fay etkisi ile rüzgâr türbinine özgü limit durumlarını da dikkate alarak analiz yapılmıştır. Temel devrilmesi, mevcut araştırmada en kritik limit durum olarak belirlenmiştir. Akmadan kaynaklanan başarısızlık durumu da bir sonraki önemli kriter olmakla birlikte, yakın fay etkisinde kalıcı deformasyona ve global burkulmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Uzak fay etkisinde de bu limit durumların önem sırası değişmemekle birlikte, hasar olasılığının daha az olduğu sonucuna varılmıştır [21].

Raffaele De Risi ve arkadaşları, açık deniz çelik kazıklı bir rüzgar türbini üzerinde sismik performans değerlendirme çalışması gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, bu tür yapıların aşırı sismik olaylar altında kırılganlıklarını anlamak ve daha güvenilir tasarım prosedürlerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada beş güçlü deprem kaydı seti ele alınmıştır. İlk üç set, her biri otuz Japon kaydından oluşur; S1, S2 ve S3

sırasıyla kabuklu, levha ve arayüz alt depremlerinden oluşmaktadır. Üç kayıt türünün analizi, çok uzun süren ve uzun titreşim dönemlerinde yüksek spektral ivmelenme eğilimi gösteren ara yüzey depremleri gibi aşırı olayların sismik talep potansiyelinin karşılaştırılmasını kolaylaştırmıştır. S4 ve S5, Japonca ve PEER-NGA veri tabanlarından oluşan global kabuk kayıtlarından oluşmaktadır. Dünyanın büyük bir bölümünü kapsayan kayıtların kabul edilmesi, analiz edilen yapısal sistemlerin sismik davranışını daha geniş bir şekilde anlamak için kullanışlıdır. Modellemede, farklı zemin yapı etkileşimi modelleme yaklaşımları, farklı malzeme davranışları ve kule tabanındaki kapı açıklığının etkisi gibi önemli hususlar incelenmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonuçları, olasılıksal bir doğrusal regresyon modeline dayanan bulut analizi yaklaşımı ile yorumlanmıştır. Sonuç olarak; özellikle zemin-yapı etkileşimi açıkça modellenmişse, daha yüksek modlar ihmal edilemez ve deforme olabilen toprağa bağlı kayıtların frekans içeriği, daha rijit toprağa göre sismik kırılganlığın artmasına neden olur [22].

Yang Yang ve arkadaşları [23], zemin davranışlarını; rüzgâr, dalga ve deprem yüklerine maruz kalan açık deniz rüzgâr türbinlerinin tepkisine göre incelemişlerdir. Bu incelemeyi, FAST kodu için uygulanan Sismik Analiz Sistemi (SAF) yeni geliştrilmiş bir modül olan QuakeDyn ile gerçekleştirmişlerdir. SAF, bir deprem sırasında OWT temeli üzerindeki toprak etkilerinin doğrusal olmayan yanal yaylar kullanılarak doğru bir şekilde modellenmesini mümkün kılar.

Başka analiz programları yardımıyla SAF ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve sonuçların güvenli olduğu görülmüştür. Esnek bir zemin dikkate alındığında, deprem etkisi kule üzerinde daha şiddetli bir titreşime, rotor ve türbülanslı rüzgâr arasında daha yüksek bir etkileşime neden olmuştur. Yer hareketi ve rüzgâr etkisinin birlikte ele alınması, türbinin sismik hareketini anlamak adına gereklidir.

Öte yandan Adam Jan Sadowski ve arkadaşları, ince duvarlı, silindirik bir kabuk şeklinde modellenen ince bir metal rüzgar türbini kulesinin sismik davranışını 10 yakın fay ve 10 uzak fay etkisi ile yapılan kapsamlı bir doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz sonuçlarını sunmuşlardır [24].

Yakın zamanda çalışmış olan Alberto Maria Avossa ve arkadaşları, rüzgâr ve sismik yüklere maruz kala 5 MW'lık bir kara rüzgar türbininin olasılıksal değerlendirmesi üzerine çalışmışlardır. Burada, rotorun aerodinamik davranışı kulenin dinamik

davranışından ayrı bir şekilde incelenmiş ve daha sonra kule sonlu elemanlar modeline uygulanmasıyla değerlendirilmiştir. Tabanda oluşan maksimum eğilme momentinin deneysel ve olasılıksal tahmini, rüzgar ve sismik etkilerin birleşimine göre yapmışlardır. Sismik etkiler rüzgâr türbinleri park halindeyken daha yüksek olmuştur ve kırılganlığı daha yüksek seviyeye çıkmıştır. Bunun nedeni park halindeki bir rüzgar türbininde aerodinamik sönümlemeler minimum seviyeye inmektedir [25].

1.2.4 Deprem riski

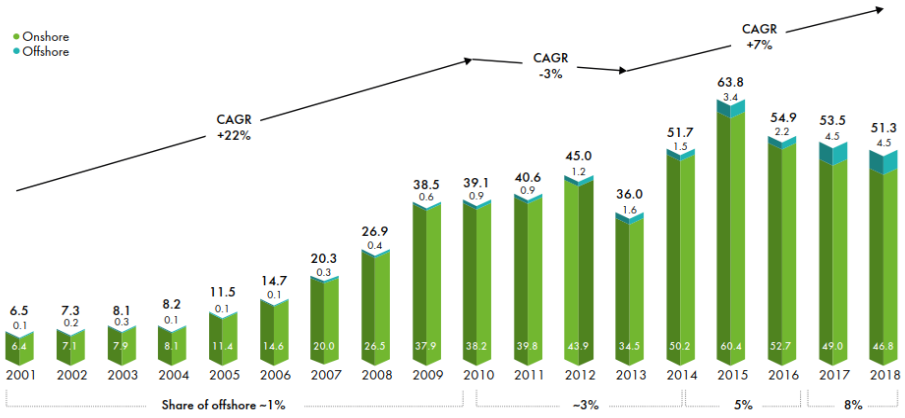
Aktif olarak fayda sağlayan rüzgar türbin sahaları az sayıda güçlü depremlere maruz kalmıştır. İlk sismik etki, 1986 North Palm Springs Depremi ve 1992 Northridge Depremi'dir. Her iki depremde de bu bölgelerden kayıtlar alınmıştır. North Palm Springs Depremi, Palm Springs bölgesinde bulunan rüzgar türbini tesislerinin çok yakınında gerçekleşti. Kaliforniya Güçlü Hareketli Aletler Programı (CSMIP) istasyonu 12149, bu rüzgar tesisinden 5 km uzaklıkta yer almaktadır.

Northridge depremi 6.7 büyüklüğüne sahip ve aynı zamanda nüfusun yoğun olduğu bir alana yakınlığından maddi zararlar daha üst boyuttaydı. North Palm Springs depremi ise 6.2 büyüklüğünde idi. Northridge depremi bu açıdan bakıldığında rüzgar türbinlerinin üzerindeki etkisi daha fazla olması bekleniyordu. Fakat kaydedilen kayıtlara göre bu durum tam olarak böyle değildi. Northridge rüzgar santrallerinin yakınında alınan kayıtta, yapılan araştırmalara göre 0.06 g lik bir tepe ivmesi meydana geldiği anlaşılmaktadır [26]. Bu da türbinlerde hasarın meydana gelmediğini destekler. North Palm Springs depremi için santralin yakınındaki bölgeden alınan kayıtta ise PGA 0.33 g idi ve bu değer önem arz etmekteydi [27]. Bu ivme değeri bölgedeki sivil yapılarla birlikte rüzgar türbinleri için de hasar görme ihtimalini arttırıyordu. O dönemde tutulan raporlarda herhangi bir rüzgar türbini hasarı raporlandırmasa bile o bölgedeki sivil yapıların hasarını belgelendiriyor. Bu durumdan anlaşılacağı üzere deprem merkez üssüne yakınlık, bir bölgede yaşanan PGA için birincil faktördür ve sahadaki rüzgar türbinleri için sismik yüklerin belirli değerlendirmelerinde göz önünde bulundurulmalıdır.

1.3 Kara ve Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Sektör Analizi

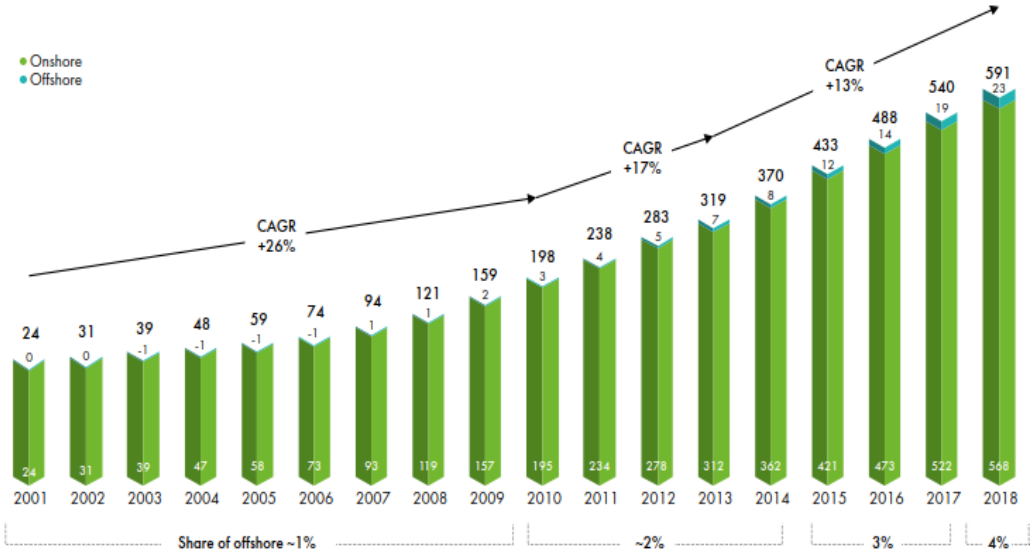
1.3.1 Dünya genelinde rüzgar enerjisi

Rüzgar enerjisi, tüm dünyada beklenen ilgiyi görmeye devam ediyor. Özellikle Japonya, Güney Kore, Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Tayvan ve Hindistan gibi ülkeler açık deniz rüzgar türbinleri üzerinde yaptıkları çalışmalar ile rüzgar enerjisi sektöründeki gelişmelere hız kazandırmıştır.



Şekil 1.2 : Yıllara göre GW cinsinden kurulan tesis enerjileri [28]

Rüzgar sektörü 2001 yılından 2012 yılına dek artan bir ilerleme gösterdi (Şekil 1.2). 2013 yılında yaşanan düşüşün ardından 2014 yılı içerisinde 51,473 MW'lık bir enerji artışı ile rekor kırdı. Bu durum yıllık pazarda %44'lük bir artışa imza attı. Toplam kümülatif tesisler 2014 yılı sonunda 369,597 MW seviyesine ulaştı (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 : Yıllara göre GW cinsinden toplam kurulu tesis enerjileri [28]

Çin ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Şekil 1.4'de grafikte görüldüğü gibi sırasıyla 21.2 GW ve 7.6 GW yeni kurulum kapasitesiyle sektörde yerini aldı. Avrupa'da %32 oranında düşüşle 9 GW'lık bir enerji sahası kuruldu. Asya, Avrupa ve Kuzey Amerika'daki olgun pazarlar istikrarlı bir şekilde büyümeye devam edecektir [27]. Tüm dünyada ise bu büyüme 2019 yılına kadar yaklaşık 591 GW kara ve 23 GW açık deniz rüzgar türbini ile önemli bir yere ulaşmıştır (Şekil 1.3).



Şekil 1.4 : Rüzgar enerjisinin ülkelere göre büyüme oranları, 2018 [28].

Global Wind Energy Council (GWEC) 2019 raporuna göre (Şekil 1.3) 2018 yılı rüzgar enerjisi için verimli bir yıl oldu. 2014'ten bu yana bazı sahalardaki düşüşlere rağmen yıllık kurulumlar 50 GW'ı aştı. GWEC, 2023 yılına kadar 55 GW' dana daha fazla deniz ve kara için tesislerin kurulmasını bekliyor [28].

Çizelge 1.1 : Toplam kurulu gücün kara türbinleri için tarihsel gelişimi [28].

MW, Kara	Yeni kurulum 2017	Toplam kurulum 2017	Yeni kurulum 2018	Toplam kurulum 2018
Toplam Kara Rüzgar Türbinleri	**48,996**	**521,774**	**46,820**	**568,409**
Amerika Ülkeleri	**10,572**	**123,091**	**11,940**	**135,041**
USA	7,017	89,047	7,588	96,635
Kanada	341	12,240	566	12,816
Brezilya	2,027	12,769	1,939	14,707
Meksika	478	4,006	929	4,935
Arjantin	24	228	494	722

Çizelge 1.1 (devam) : Toplam kurulu gücün kara türbinleri için tarihsel gelişimi [28].

MW, Kara	Yeni kurulum 2017	Toplam kurulum 2017	Yeni kurulum 2018	Toplam kurulum 2018
Şili	269	1,418	204	1,621
Diğer Amerika Ülkeleri	416	3,383	220	3,605
Afrika, Orta Doğu	**632**	**4,758**	**962**	**5,720**
Mısır	0	810	380	1,190
Kenya	0	26	310	336
Güney Afrika	618	2,085	0	2,085
Diğer Afrika Bölgeleri	14	1,837	272	2,109
Asya - Pasifik	**23,927**	**231,419**	**24,902**	**256,320**
Çin	18,499	185,604	21,200	206,804
Hindistan	4,148	32,938	2,191	35,129
Avustralya	501	4,813	549	5,362
Pakistan	199	789	400	1,189
Japonya	170	3,399	262	3,661
Güney Kore	103	1,102	127	1,229
Vietnam	38	197	32	228
Filipinler	0	427	0	427
Tayland	218	648	0	648
Diğer Asya Ülkeleri	51	1,502	141	1,643
Avrupa	**13,865**	**162,506**	**9,016**	**171,328**
Almanya	5,334	50,779	2,402	53,180
Fransa	1,692	13,757	1,563	15,307
İsviçre	197	6,499	717	7,216
Birleşik Krallık	2,641	12,412	589	13,001
Türkiye	766	6,872	497	7,370
Diğer Avrupa Ülkeleri	3,235	72,187	3,248	75,435

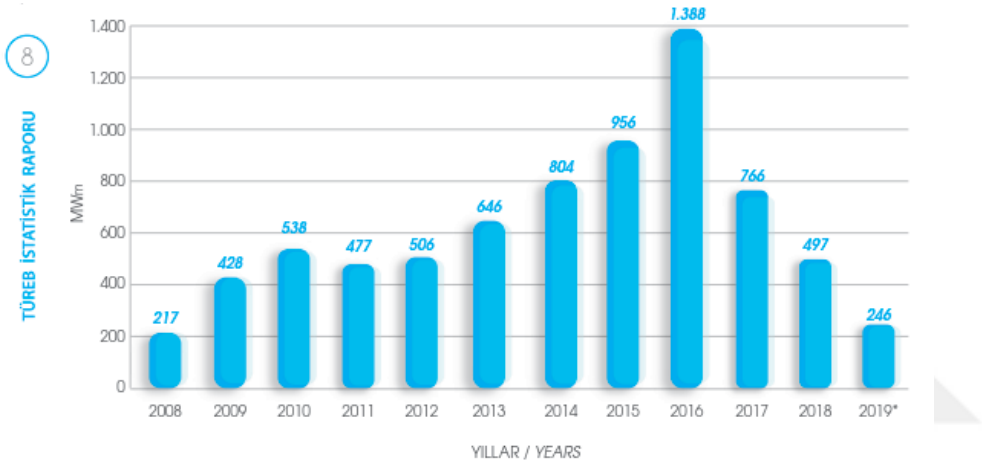
Çizelge 1.2 : Toplam kurulu gücün açıkdeniz türbinleri için tarihsel gelişimi [28].

MW, Açık Deniz	Yeni kurulum 2017	Toplam kurulum 2017	Yeni kurulum 2018	Toplam kurulum 2018
Toplam Açık Deniz Rüzgar Türbinleri	**4,472**	**18,658**	**4,496**	**23,140**
Avrupa	**3,196**	**15,630**	**2,661**	**18,278**
Birleşik Krallık	1,715	6,651	1,312	7,963
Almanya	1,253	5,411	969	6,380
Belçika	165	877	309	1,186
Danimarka	0	1,268	61	1,329
Hollanda	0	1,118	0	1,118
Diğer Avrupa Ülkeleri	63	305	0	302
Asya - Pasifik	**1,276**	**2,998**	**1,835**	**4,832**
Çin	1,161	2,788	1,800	4,588
Güney Kore	3	38	35	73
Diğer Asya Ülkeleri	112	172	0	171
Amerika Ülkeleri	**0**	**30**	**0**	**30**
USA	0	30	0	30

Çizelge 1.1 ve 1.2'de de görüldüğü gibi rüzgar enerjisi için en büyük Pazar 2009'dan beri Çin'e aittir. Çin'in rüzgar endüstrisindeki büyümesi Asya kıtasını birinci sıraya taşırken, ikinci sırayı Avrupa ve üçüncü sırayı ise Amerika almıştır.

1.3.2 Türkiye'de rüzgar enerjisi

Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB)'nin Temmuz 2019 raporuna göre Türkiye son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisinde düzenli bir gelişme göstermektedir (Şekil 1.6). Her yıl 1 GW'lık bir kurulum hedefi ile önümüzdeki yıllarda bu gelişmelerin desteklenmesi beklenmektedir. Bu hedef Türkiye'nin 10 yılda enerji ihtiyacının 10 GW'ını rüzgar enerjisinin karşılayacağını ortaya koymuştur.



Şekil 1.5 : Türkiye'deki rüzgar enerjisi santralleri için yıllık kurulum [29]



Şekil 1.6 : Türkiye'deki rüzgar enerjisi santralleri için kümülatif kurulum [29]

2008 yılından bu yana rüzgar türbinleri sayısındaki artış her yıl devam etmektedir. 2016 yılında 1388 rüzgar türbini kurulumu ile bu artış en büyük gelişmeyi yaşamıştır

(Şekil 1.5). 2019 Temmuz ayına kadar aynı yıl içerisinde 246 rüzgar türbini kurulumu ile bu gelişmeler desteklenmektedir.

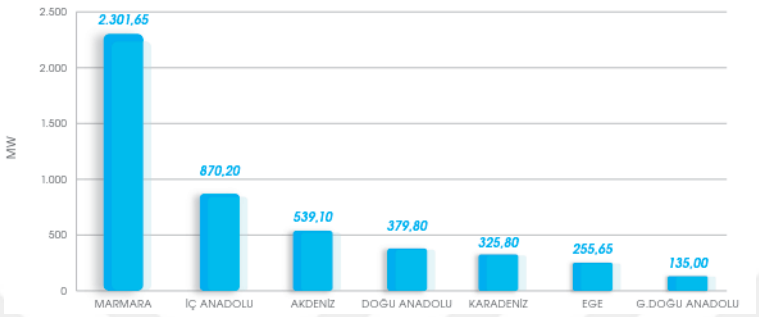
Türkiye'de rüzgar endüstrisine verilen önemin diğer bir kanıtı "Milli Rüzgar Enerji Sistemleri (MİLRES) Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi Projesi" kapsamındaki hedeflerdir. MİLRES projesi Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile TÜBİTAK Kamu Kurumları Araştırma ve Geliştirme Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenen Cumhuriyet tarihinin en büyük Ar-Ge projesidir. Bu projenin "Rüzgar Analizi ve Yapı Sistemleri" bölümünü İstanbul Teknik Üniversitesi yürütmüştür. Projede özgün ve yerli rüzgar endüstrisi teknolojinin geliştirlmesi ve rüzgar türbini prototiplerinin üretilmesi hedeflenmiştir. Bu yatırımdaki en büyük sebep Türkiye'nin yüksek enerji tüketimine sahip olmasıdır [30].

Türkiye, enerji tüketim bakımından Çizelge 1.3'de de görüldüğü üzere dünyada 19. sırada yer almaktadır [28]. Türkiye'de kurulu rüzgar enerji santrali 2019 yılında 7.615 GW gücüne ulaştı. Bu üretilen elektrik enerjisi, bugün Türkiye'nin ihtiyacının yaklaşık %7.9 ünü karşılıyor [29].

Çizelge 1.3 : Dünya birincil enerji tüketimi [2]

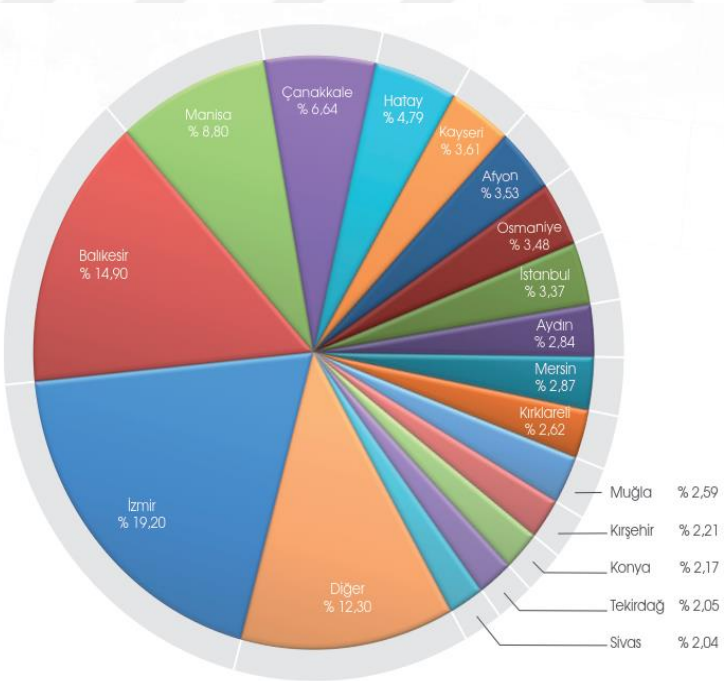
Ülke	2013	2014	2015	Dünya Toplamındaki Payı %	Sıra
Çin	2903.9	2970.3	3014.0	22.9%	1
ABD	2271.7	2300.5	2280.6	17.3%	2
Hindistan	626.0	666.2	700.5	5.3%	3
Rusya	688.0	689.8	666.8	5.1%	4
Japonya	465.8	453.9	448.5	3.4%	5
Kanada	335,0	335.5	329.9	2.5%	6
Almanya	325.8	311.9	320.6	2.4%	7
Brezilya	290.0	297.6	292.8	2.2%	8
Güney Kore	270.9	273.1	276.9	2.1%	9
İran	247.6	260.8	267.2	2.0%	10
Suudi Arabistan	237.4	252.4	264.0	2.0%	11
Fransa	247.4	237.5	239.0	1.8%	12
Endonezya	175.0	188.3	195.6	1.5%	13
Birleişk Krallık	201.4	188.9	191.2	1.5%	14
Meksika	188.9	190.0	185.0	1.4%	15
İtalya	155.7	146.8	151.7	1.2%	16
İspanya	134.2	132.1	134.4	1.0%	17
Avustralya	130.7	129.9	131.4	1.0%	18
Türkiye	120.3	123.9	126.9	1.0%	19
Tayland	120.3	123.4	124.9	0.9%	20
Güney Afrika	124.6	128.0	124.2	0.9%	21
Tayvan	109.9	111.4	110.7	0.8%	22
BAE	97.2	99.0	103.9	0.8%	23
Polonya	96.0	92.4	95.0	0.7%	24
Ukrayna	114.7	101.0	85.1	0.6%	25
TOPLAM	**12783.1**	**13020.6**	**13147.3**	**100.0%**	

Türkiye'de rüzgar enerji santralleri yoğunlukla Marmara Bölgesi'nde yer alıyor (Şekil 1.7). Avrupa'nın en yüksek rüzgar enerji potansiyeline sahip olan Türkiye, henüz açık denizde kurulu RES (Rüzgar Enerji Santrali) olmamasına rağmen diğer bölgelerle birlikte hızlıca büyüme yaşıyor. İlerleyen dönemlerde, özellikle Marmara Bölgesi'nde bu üretim gücünün açık deniz rüzgar türbinleri ile birlikte daha da artması beklenmektedir.



Şekil 1.7 : RES'lerin bölgelere göre dağılımı [29]

Şekil 1.8 Türkiye'deki işletim halinde olan rüzgar enerji santrallerinin şehirlere göre dağılımını göstermektedir.



Şekil 1.8 : İşletmedeki RES'lerin illere göre dağılımı [29]

2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KARAKTERİSTİKLERİ

2.1 Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi, hava akımından dolayı meydana gelen enerjiyi , elektrik veya mekanik enerjisine dönüştürülebilen bir hareket enerjisidir. Rüzgar enerjisi tarım arazilerinde su pompalama ve tahılları öğütmek için yüzyıllardır kullanılmaktaydı. Bu kullanımlar, rüzgar enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinelerle olmaktaydı. Bu makinelerden en bilineni yel değirmenleri oldu.

19. yüzyıl sonlarında rüzgar enerjisinden elektrik üretmenin yolları arandı. Toplumların artan elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgar tarafından karşılanması büyük bir gelişmeydi. Bu dönemde yaygın bir şekilde kullanılan elektrik jenaratörlerinin çalışması için gereken mekanik enerjinin rüzgar tarafından karşılanması, bu türdeki ilk denemeler oldu.

Elektrik üretim amacıyla rüzgar türbini kullanımının ilk örneği, 1888 yılında Charles Francis Brush tarafından ortaya konulmuştur. Brush bu elektrikten evinde ve laboratuvarında yararlanmıştır.

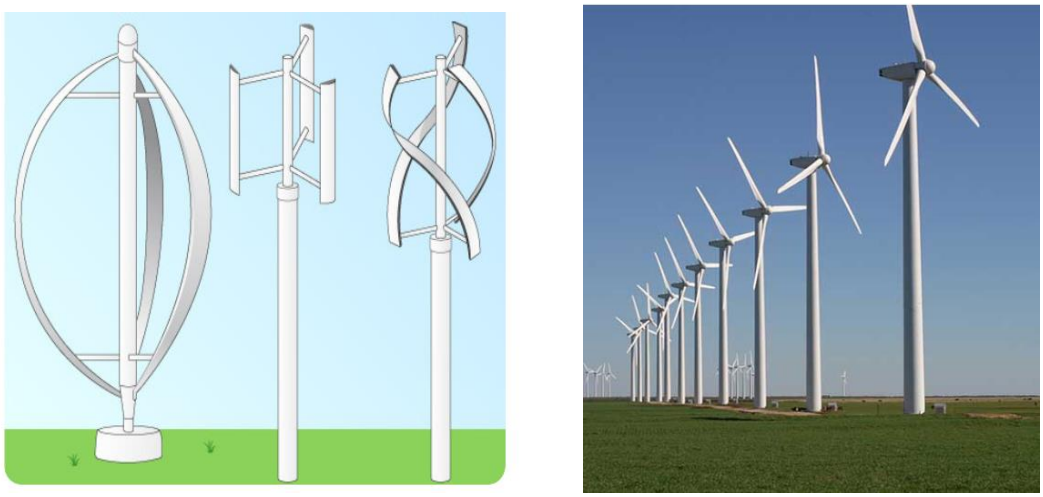


Şekil 2.1 : 1959 yılında inşa edilmiş “Gedser” Türbini.

1800'lerin sonlarına doğru, Danimarkalı Poul La Cour, modern aerodinamik çalışmalarını rüzgar türbinlerinde uygulayarak rüzgar türbini tasarımında bir devrim gerçekleştirdi. 1891 yılında, ilkel aerodinamik profiller kullanarak ilk 4 kanatlı elektrik üretebilen rüzgar türbinini ortaya koydu. Bu türbinden 1891-1918 yılları arasında 120 adet inşa edildi. Bu gelişme Danimarka'da 1918 yılında rüzgar enerjisinden 3 MW'lık bir elektrik üretim gücünü ortaya koydu.

1935-1970 yılları arasında ABD, Danimarka, Fransa, Almanya ve İngiltere'de rüzgar enerjisinden faydalanmak için birçok çalışma yapılmasına karşın başarılı bir türbin modeli ortaya konulamadı. II. Dünya Savaşı sonrasında Poul La Cour'un ilk öğrencilerinden Johannes Juul, 200 kW'lık bir türbin tasarladı. Bu türbin modern anlamda kabul edilebilcek ilk türbin oldu ve 1959 yılında Şekil 2.1'de görüldüğü gibi Danimarka'nın Gedser şehrinde inşa edildi.

Rüzgar enerjisi endüstrisi 1974-1978 yıllarındaki petrol bunalımıyla birlikte daha da rağbet gördü. Modern rüzgar türbini 1979'da Danimarkalı Kuriant, Vestas, Nordtank ve Bonus şirketleri tarafından üreilmeye başlandı. Erken türbinler dikey eksenli iken günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte yatay eksenli türbinler daha fazla kullanılır hale geldi (Şekil 2.2).



(a) (b)

Şekil 2.2 : (a) Düşey eksenli rüzgar türbini (b) Yatay eksenli rüzgar türbini.

2.2 Açık Deniz ve Kara Rüzgâr Türbinleri Hakkında Genel Bilgi

Karadaki rüzgâr türbinleri uzun yıllar boyunca önemli ölçüde kullanılmaktadır (Şekil 1.8). Düşük maliyetli olmasına karşın yüksek enerji ihtiyaçları açık deniz rüzgar çiftliklerine yönlendirmiştir. Kara rüzgar türbinlerinin birçok kısıtlaması da bu yönelmeyi desteklemiştir. Bu kısıtlamalardan bazıları aşağıdaki gibidir [31]:

- Arazi sınırlamaları, yerleşim bölgeleri ve nüfus yoğunlukları
- Türbin boyutlarından kaynaklanan nakliye problemleri
- Doğal görünümü bozma
- Yerleşim alanlarına yakın kurulduğunda gürültü kirliliğine neden olmaktadır.

Açık deniz teknolojisi, 1991'de Danimarka'da kurulan ilk açık deniz rüzgar türbini "Vindeby" nin kurulumundan bu yana hızlı bir büyüme yaşamıştır. Sayısız avantajı da bu büyümeyi destekler niteliktedir. Bu avantajlardan bazıları aşağıdaki gibidir [31]:

- Rüzgar etkisi kıyıdan uzaklaşarak artar ve bu da ünite başına düşen enerji üretiminin önemli ölçüde artmasına neden olur;
- Daha az türbülanslı rüzgar, türbin üzerindeki yorulma yüklerini azaltır;
- Daha kısa kulelerin kullanımına izin veren daha düşük rüzgar kesme kuvveti;
- Açık deniz rüzgar türbinlerinde boyut sınırlaması yoktur, çünkü bileşenlerin deniz yolu ile taşınması daha kolaydır;
- Rüzgar türbinlerinin görsel ve gürültü etkileri, türbinler kıyıdan yeterli bir mesafede kurulursa önlenebilir;
- Büyük sürekli alanlar mevcuttur, bu nedenle tesisatlar arazi kullanımlarını işgal ve müdahale etmeyecektir.

Avantajlarının yanı sıra, sermaye yatırımı ile alakalı açık deniz rüzgar türbinlerinin kurulumunda bazı dezavantajlar vardır:

- Bu tip yapılar için, temel ile ilgili maliyetler, tüm bileşenlerin yerleştirilen alana taşınması, deniz inşaat ekipmanları, kurulum ve hizmet dışı bırakma nedeniyle daha yüksek bir yatırım yapılması gerekmektedir;
- Bu yapıların sınırlı erişimi vardır, bu da keşif sırasında işletme ve bakım maliyetlerini arttırır;

- Açık deniz yapıların yaşam döngüsü, çok agresif olan deniz ortamına ve ekipmanın dayanıklılığını azaltan korozyona bağlı olarak karadan daha düşüktür. Genellikle türbin ömrü 20 yıl olarak öngörülmektedir;
- Bu yapıların tasarımı, rüzgar, dalgalar ve deniz akıntılarından gelen hidrodinamik yükler gibi çevresel yükler nedeniyle daha karmaşıktır;
- Şehir elektrik şebekesine bağlantı daha pahalıdır ve zayıf kıyı şebekelerinin kapasitelerinin büyütülmesine ihtiyaç duyulmaktadır.



(a) (b)

Şekil 2.3 : (a) Kara rüzgar türbini. (b) Açık deniz rüzgar türbini.

2.3 Rüzgar Türbini Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri birkaç farklı sınıfa ayrılabilir, bunlardan bazıları aşağıdakiler gibidir;

Uygulama yerlerine göre: Karada veya açık denizde.

Türbinlerin dönme eksenine göre: Yukarıda gösterildiği gibi düşey veya yatay eksenli türbinler.

Kullanılan kule tiplerine göre: Rüzgar türbinleri birçok kule tipine sahiptir.

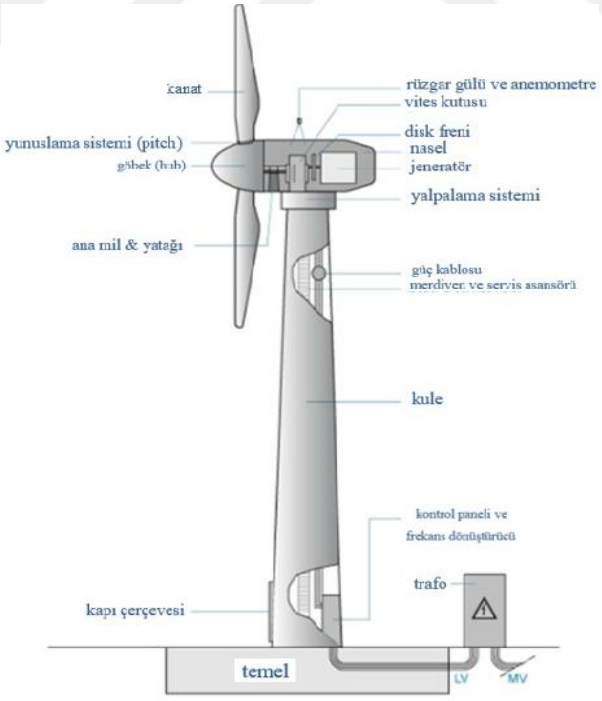
Kullanılan materyale göre ve yapısal şekline göre sınıflandırılabilir. Günümüzde çelik rüzgar türbinleri piyasaya hakimliğini sürdürüyor.



Şekil 2.4 : Kule tiplerine göre rüzgar türbinleri.

2.4 Rüzgar Türbini Bileşenleri

Yatay eksenli rüzgar türbinleri üç ana bileşenden, kule, nasel ve rotordan oluşur (Şekil 2.3). Kule, naseli destekler ve rotoru istenilen yüksekliğe çıkarır. Nasel, jenaratör, dişli kutusu ve rotoru desteklemek için gereken türbinin diğer mekanik bileşenlerini barındırır.

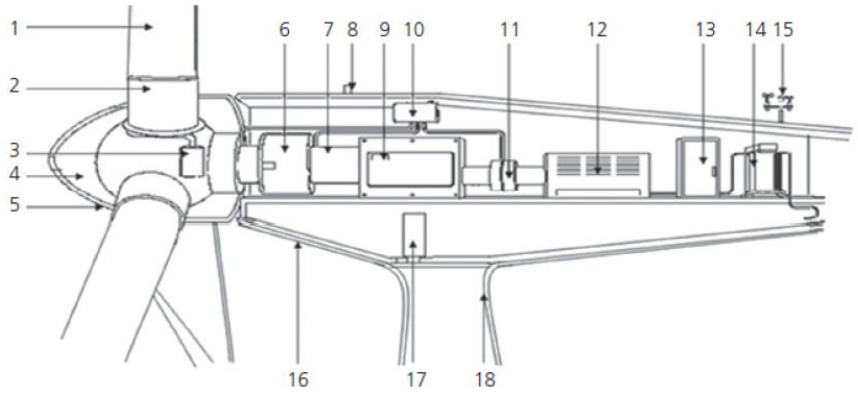


Şekil 2.5 : Rüzgar türbini bileşenleri, [32].

Ana bileşenlerin özellikleri aşağıda sunulacaktır [32]:

Nasel : Rüzgar türbininin elektromekanik bileşenlerini içerir. Mekanik rotasyonel enerjiyi rüzgardan elektrik enerjisine çeviren jeneratör bu bölgededir. Motorun üstünde, daha kolay bakım için isteğe bağlı bir helikopter sahası bulunabilir. Şekil 2.6 naselin içinde bulunan farklı tipteki bileşenleri göstermektedir.

Rotor : Göbek (hub) ve kanatları içerir. Bunlar, fiberglas ile güçlendirilmiş plastikten yapılabilir veya daha büyük türbinler için çelikten imal edilebilir. Kanatlar göbeğe bağlıdır. Dönme enerjisini ana şaft üzerinden şanzımana iletir. Kanatların boyutu genellikle 80 ila 100 metre çapındadır ve dönüş hızları 10 ila 30 rpm arasındadır. Kanatların boyutunun büyümesiyle daha fazla enerji elde edilebilir. 200 metreye kadar daha büyük rotor kanatları test aşamasındadır.



1. Kanat
2. Kanat desteği
3. Yunuslama açısı aktüatörü
4. Göbek (hub)
5. Döndürücü
6. Ana destek
7. Ana mil
8. Uçak ikaz lambaları
9. Mekanik frenler
11. Hidrolik soğutma cihazları
12. Jeneratör
13. Güç dönüştürücü ve elektrik kontrolü, koruma ve bağlantı kesme cihazları
14. Trafo
15. Rüzgarölçerler (Anemometre)
16. Makine dairesinin çevresi
17. Yalpalama tahrik cihazı
18. Destek kulesi

Şekil 2.6 : Nasel elektromekanik bileşenleri, [33].

Kule: Nasel, kanat ve göbek (hub) montajına destek sağlar. Yerleşim yerine ve yüksekliğine bağlı olarak, çelik veya betonarmeden yapılmış boru şeklinde bir yapıdır

ve çeşitli bölümler ile inşa edilmiştir. Tipik kule yükseklikleri 80 ila 130 metre arasındadır ve nasele ulaşmak için içinde bir merdiven veya asansör bulunur.

Geçiş parçası: Kuleyi temel ile birleştirir. Bu bileşen, bir tekne inişi, bir merdiven ve kulenin girişine erişim sağlayan bir platformla donatılmıştır. Bu eleman sadece kazık destek yapılarında kullanılır.

Temel : Rüzgar türbininin destek yapısına katkıda bulunur. Rüzgar türbinleri için birkaç farklı temel tipi Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



(a) Radye temel (b) Kazık tipi (c) Kapalı kazık gruplu (d) Bağlantılı radye temel

Şekil 2.7 : Temel tipleri, [34].

Türbin özelliklerine ve zemin koşullarına bağlı olarak, rüzgar türbini temelleri farklı tasarım ve konfigürasyonlara sahip olabilir. Bu tasarımlar, yayılı temeller, mono kazık, kapalı kazık grupları ve bağlantılı yayılı temeller olarak dört ana kategoride sınıflandırılabilirler [34].

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDEKİ YÜKLEMELER

Hem kara hem de açık deniz rüzgar türbinleri operasyonel ömrü boyunca çeşitli yüklere maruz kalmaktadır. Tasarımda dikkate alınan sabit ve hareketli yüklerin yanısıra bir de çevresel yükler türbin üzerinde önemli ölçüde hasarlar meydana getirebilir. Tüm bu yüklerin türbin üzerindeki etkileri doğru bir şekilde belirlenmelidir. Yapı dinamiğinin karmaşıklığını ortadan kaldırarak doğru tasarımın yapılması ve türbin servis ömrünü tamamlaması açısından bu yüklerin doğru anlaşıması büyük önem taşır.

Sabit yükler, büyüklük, konum veya yön bakımından değişmeyen yüklerdir. Türbin fiziksel bileşenlerinin kütlesine karşılık gelebilir. Hareketli yükler; sabit yüklerin aksine büyüklük, konum ve yön bakımından değişen yüklerdir. Hareketli yükler, kurulum aşamaları, personel, ekipman ve malzemelerin yükleri ile ilgilidir. Çevresel yükler ise, yapısal hasara neden olacak çevresel olgulardan kaynaklanır. 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; rüzgarlar, depremler, jeolojik koşullar ve sıcaklık olarak tanımlanabilir [35].

Tüm bu temel yüklemelerin yanında bir de beklenmedik etkiler de meydana gelebilir. Teknik arıza veya anormal bir olayın meydana gelmesiyle yangın, patlama veya türbin üzerinden düşen bir nesne büyük bir hasara neden olabilir. Bunun yanı sıra açık deniz türbinlerinde tercihen helikopter sahası olması nedeniyle helikopter çarpmasıyla oluşabilecek hasarlara da dikkat edilmelidir.

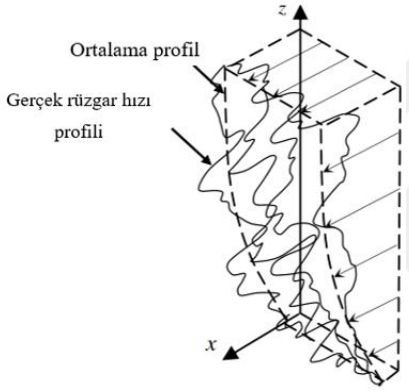
Yapının maruz kaldığı bu yüklere karşı bir tepkisi oluşacaktır. Bu tepki, hizmet verilebilirlik hasarına ve sistemin göçmesine neden olabilir. Rotor, nasel ve kule gibi fiziksel bileşenlerin farklı dinamik etkilerinin birbiri üzerinde dinamik etkileri oluşabilir [36]. Bu durum ilgili bölümde ele alınmıştır.

Bu tez kapsamında, mevcut bir rüzgar türbininin maruz kalabileceği rüzgar ve sismik yüklerin etkisi incelenecektir. Bu yapılar için en önemli çevresel yük rüzgar olmakla

birlikte jeolojik olarak sismik bölgelerde yer alan türbinler için sismik etkiler de büyük önem taşımaktadır.

3.1 Rüzgar

Rüzgar, türbinler için en önemli veridir. Rüzgar verilerini derlemek ve belirli bir dağılımda sunmak stokastiktik yapısı nedeniyle zordur. Rüzgarın yapısını ve profilini oluşturmak tasarımcılar için çok önemlidir. Rüzgar hızı yükseklik arttıkça artar. Şekil 3.1'de bu değişim modellenmiştir. Herhangi bir konumdaki rüzgar hızı, türbülans etkisiyle ortalama değerin mertebelerinde zaman ve yön bakımından değişiklik gösterir.



Şekil 3.1 : Gerçek rüzgar hızı profili, [37].

3.1.1 Rüzgar kayması

Rüzgar kayması, rüzgarın dünya yüzeyindeki sürtünmeden etkilenerek yüzeyde neredeyse sıfıra indirgenmesi olayına denir. Ortalama rüzgar hızı üzerindeki bu etkiyi belirlemek üzere logaritmik profil ve güç kanunnu profili en yaygın kullanılan modellerdir. Bu modeller rüzgar kayması etkisini eğrilerle temsil eder. Bu eğriler denklem 3.1'deki eşitliğe göre çizilir:

$$(a) \quad V_w(z) = V_{w,r}\frac{ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \qquad (b) \quad V_w(z) = V_{w,r}\left(\frac{z}{z_r}\right)^{a_{shear}} \qquad (3.1)$$

Burada;

$V_w(z)$: z yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı (m/s)

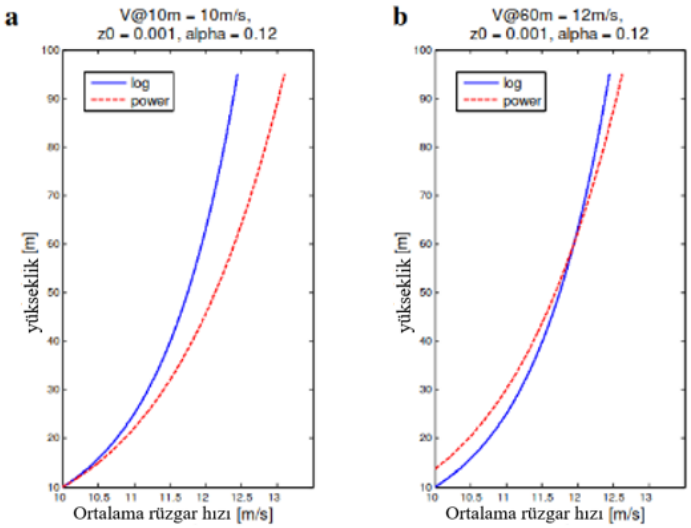
$V_{w,r}$: z_r referans yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı (m/s)

z_r : referans yüksekliği (m)

z_0 : yüzey pürüzlülüğü uzunluğu

α : güç kanunu katsayısı

Logaritmik ve güç kanunu profillerinin karşılaştırılması Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Bu profiller 10 m referans yüksekliğinde 10 m/s ortalama rüzgar hızı için ve 60 m referans yüksekliği için ise 12 m/s ortalama rüzgar hızı için gösterilmiştir [37].



a) 10 m referans yüksekliğinde 10 m/s hıza göre ortalama rüzgar hızı
b) 60 m referans yüksekliğinde 12 m/s hıza göre ortalama rüzgar hızı

Şekil 3.2 : Logaritmik ve güç kanunu modeline göre rüzgar kayması, [37].

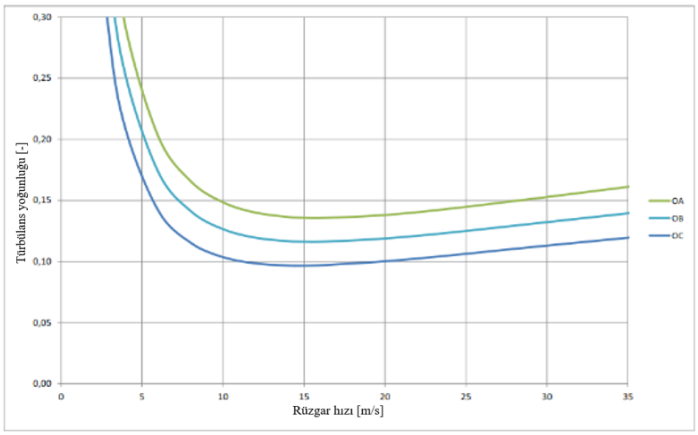
Şekil 3.2'de görüldüğü üzere göbek yüksekliği değiştikçe profil senaryoları değişiklik göstermektedir. Türbin tasarımında, hedeflenen elektrik üretim gücünü yakalamak için doğru bir model seçimi yapılmalıdır.

3.1.2 Türbülans

Herhangi bir bölgede ölçülen zamana bağlı rüzgar verilerinden standart sapma ve ortalama rüzgar hızı verileri elde edilebilir. İlgili yönetmeliklerin öngördüğü formüller yardımı ile türbülans yoğunluğu hesaplanabilir. DNV.GL standartına göre [38];

$$I = \frac{\sigma_{mean}}{V_{mean}} \tag{3.2}$$

Türbülans yoğunluğu, yüksekliğe ve bölgenin pürüzlülüğüne bağlıdır. Türbülans yoğunluğu engebeli arazi ve düşük yüksekliklerde artar. Şekil 3.3 farklı açık deniz rüzgar türbin sınıfları için türbülans yoğunluk eğrilerini gösterir:



Şekil 3.3 : 100 m göbek yüksekliğindeki açık deniz türbin sınıfları için türbülans yoğunlukları, [38].

3.1.2.1 Rüzgar spektrumları

Rüzgar hızı ve yönü, uzay zamanda değişir. Bir rüzgar türbinin üzerindeki rüzgar yükü, genellikle rüzgar hızının standart sapması σ_u ile birlikte bölgedeki 10 dakikalık ortalama rüzgar hızı U_{10} ile belirlenir. Ölçülen rüzgar hızı büyüklüğü ve zaman içindeki değişimi, rüzgar türbülansının enerjisinin farklı frekanslar arasında nasıl dağıldığını gösteren bir enerji yoğunluğu spektrumuna dönüştürülebilir. Şekil 3.4, rüzgar tünellerinde türbülansın iyi bir tanımına sahip olan von Karman spektrumu ve atmosferik türbülansta ampirik gözlemlere daha iyi uyan Kaimal spektrumunun en çok kullanılan iki spektrumunu göstermektedir [39]. Bu spektrumlar, 10 dakikalık ortalama rüzgar hızına, türbülans yoğunluğuna ve bir uzunluğa dayanır :

Kaimal Spektrumu: $$S_u(f) = \sigma_u^2 \frac{4\ x\ \frac{L_K}{U_{10}}}{\left(1 + 6\ x\ \frac{f\ x\ L_K}{U_{10}}\right)^{\frac{5}{3}}} \quad (3.3)$$

Von Karman Spektrumu: $S_u(f) = \sigma_u^2 \frac{4\,x\,\frac{L_K}{U_{10}}}{\left(1 + 70{,}8\,x\left(\frac{f\,x\,L_K}{U_{10}}\right)^2\right)^{\frac{5}{6}}}$ (3.4)

Burada;

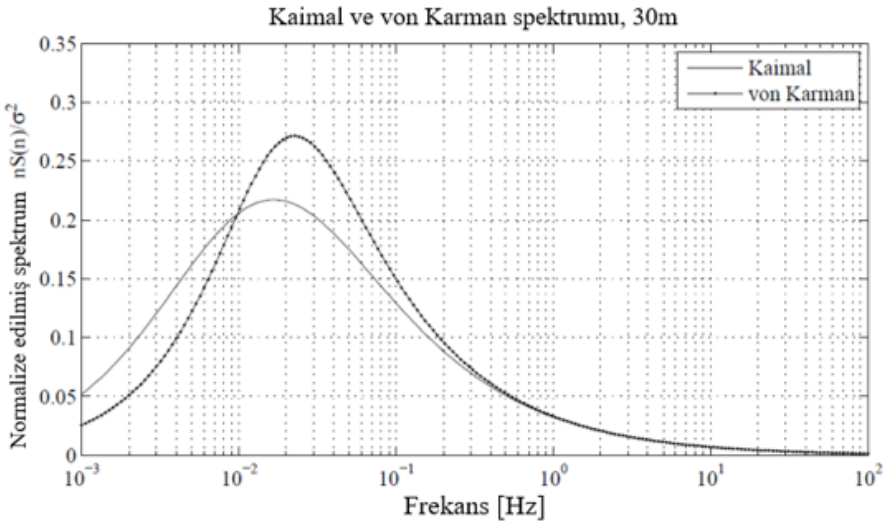
σ_u : Rüzgar hızındaki standart sapma (m/s)

L_K : İntegral uzunluk ölçeği parametresi (m)

$$L_K = \begin{cases} 5.67.z & için \;\; z < 60\,m \\ 340.2 & için \;\; z \geq 60\,m \end{cases}$$

U_{10} : 10 dk'lık ortalama rüzgar hızı (m/s)

f : Rüzgar frekansı (Hz)



Şekil 3.4 : Kaimal ve von Karman spektrumu, [39]**.**

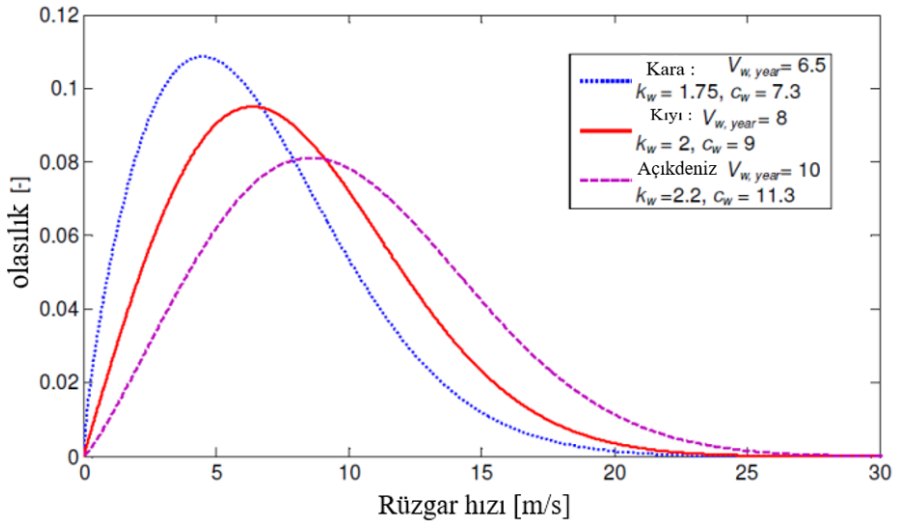
Rüzgar türbini tasarımında, tasarımcı için rüzgar hızlarının değişiminin bilinmesi çok önemlidir. Proje maliyetini öngörmek ve en aza indirmek için bu bilgilere ihtiyaç duyarlar. Bu rüzgar hızı değişimindeki tüm olasılıkları içeren birçok tür olasılık yoğunluk fonksiyonu bulunur. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı Weibull dağılımıdır. Rayleigh dağılımı genelde Weibull dağılımından sonra tercih edilir. Bu dağılımlar, belirli bir zaman dilimindeki ortalama rüzgar hızının parametrik açıklamasıdır. Weibull dağılımı, yıllık ortalama rüzgar hızı V_w ile ilişkili ölçek parametresi c_w ve şekil parametresi k_w ile tanımlanır. Bu verileri kullanarak yıllık ortalama rüzgarın aşılma olasılığı aşağıdaki gibi hesaplanır [38]:

$$F(V_w) = \frac{k_w}{c_w}\left(\frac{V_w}{c_w}\right)^{k_w-1} exp\left(-\left(\frac{V_w}{c_w}\right)^{k_w}\right) \quad (3.3)$$

Yıllık ortalama hız analitik olarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$V_{w,yıllık} = c_w \, (0.568 + 0.433/k_w)^{\frac{1}{k_w}} \tag{3.4}$$

Şekil 3.5'de, açık deniz, kıyı ve karadaki rüzgar türbinleri için bu dağılımlar gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Kara, kıyı ve açıdeniz bölgeleri için yıllık Weibull rüzgar dağılımı, [37].

k_w için tipik değerler bölgelere göre değişmektedir. Dağılımlar bu değerlere göre oluşturulmuştur. İç bölgelerde 1.75, deniz kıyısında 2.0 ve açık denizde bu değer 2.2 olmaktadır. Bu değer arttıkça dağılımın tepe noktası değeri düşmekte ve eğrinin bitiş kısmının daha düz olmasına neden olur. Bu tür bölgelerde aşırı yüksek veya düşük değerlere daha az rastlanır. Açık deniz bölgeleri için bu durum geçerlidir.

3.2 Aerodinamik Yükler ve Konseptleri

Bu alt bölümde, aerodinamik yüklerin türbin üzerinde etki ettiği elemanların davranışı incelenmiştir. Rüzgar, kanat ve kule gibi fiziksel bileşenler üzerinde önemli etkilere sahiptir. Aerodinamik yükler, türbinin çalışır olma durumunun yanı sıra türbin tamamen durmuş olduğu durumda da rotor üzerindeki rüzgar kaynaklı yüklerden oluşur.

3.2.1 Kule üzerindeki rüzgar yükü

Rüzgar hızının türbinin istenilen her noktasında hesaplanabilmesinden sonra, kule üzerindeki rüzgar kuvveti API (Amerikan Petrol Enstitüsü) standartının öngördüğü şekilde hesaplanır [40]:

$$F = \frac{1}{2} \times \rho_{hava} \times C_{aero} \times A \times V^2 \quad [N] \tag{3.5}$$

Burada:

ρ : Havanın yoğunluğu [kg/m^3]

C_s : Aerodinamik parametre (DNV) (şekil,yüzeye bağlı)

A : Normal kuvvetin etki ettiği kesit alanı [m^2]

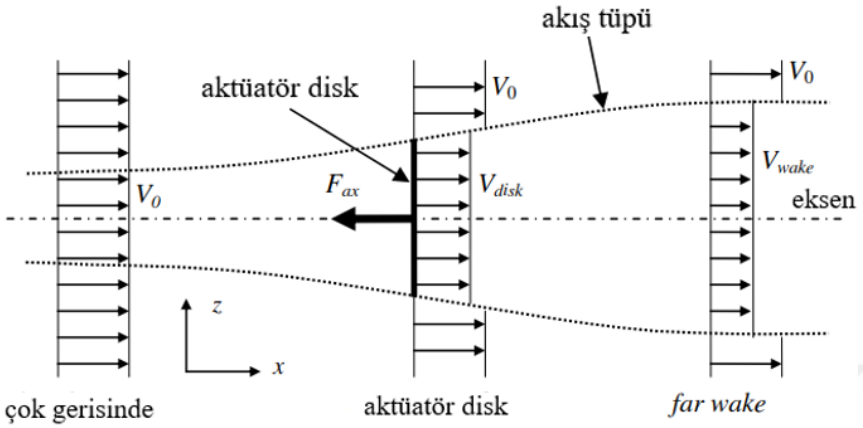
V : Kesitin orta noktasındaki rüzgar hızı [m/s]

3.2.2 Rotor üzerindeki rüzgar yükü

Rüzgar türbini kanatları üzerindeki yükleri hesaplamak için en eski ve en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri kanat elemanı momentumu (BEM) teorisidir. Bu teorem ünlü Alman fizikçi Albert Betz ve Hermann Glauert'in teoremlerine dayanmaktadır. Betz, rüzgar kuvvetinden sağlanan kinetik enerji mekanik enerjiye dönüştürülürken bu enerjinin bir kısmının çevreye yayıldığını, basınç veya momentum kaybı meydana geldiğini öne sürdü. Glauert ise Betz'in bu teorisine ek olarak rotor sonrasında oluşan türbülanslı akımı da dikkate aldı. Enerji kaybının rotor düzleminden geçirilen hava akımının kanat elemanlarını üzerinden geçen hava akımından kaynaklandığı düşünülür. BEM teorisi kullanılarak, eksenel ve teğet hava akımlarında kaybedilen momentumdan indüklenen hızlar hesaplanabilir. Bu teori, aerodinamik yükleri ve ayrıca rotorun çevresinde indüklenen hızları belirlemek için yinelemeli bir süreç oluşturur ve Şekil 3.6'da gösterilen bir akış tüpünü esas alır. Türbin, burada tüp içerisinden akan hava akımınındaki basınç süreksizliğine neden olan tek tip bir "aktüatör diski" ile temsil edilir.

Diskten geçen akış hızı diskin her noktasında aynıdır. Akış hızı aynı olmasına rağmen diskin bazı bölgelerinde basınç düşmesi meydana gelebilir. Basıncın ani olarak değişmesi basınç farkıyla kinetik enerjiyi arttırır. Betz teoremi, buradaki akışın sürekli,

homojen ve sıkıştırılamaz olduğu, basınç değişiminin tüp boyunca aynı olduğunu kabul eder. Diskin önünde ve arka kısmında türbülanslı rüzgar akışı olmadığını varsayar. Diskin üzerindeki rüzgar hızı diskin başındaki ve sonundaki hızların ortalaması olarak basitçe hesaplanabilir.



Şekil 3.6 : Akış tüpündeki aktüatör disk.

İndüksüyon faktörü a, yine aktüatör diskinin hava akımı üzerindeki eksenel yükü, sıkıştırılamaz, homojen ve yatay akışı esas alan momentum teorisi kullanılarak denklem 3.6'daki eşitlik ile hesaplanabilir:

$$a = \frac{V_0 - V_{disk}}{V_0} \tag{3.6}$$

Aktüatör diskin üzerindeki F_{ax} eksenel yükü hesaplamak için diskin giriş ve çıkışındaki akış esas alınır. Bernoulli eşitliğine göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F_{ax} = \frac{1}{2} A_{disk} \rho_{hava} V_0^2 . 4a(1 - a) \text{ [N]} \tag{3.7}$$

Burada:

a : indüksiyon faktörü [-]

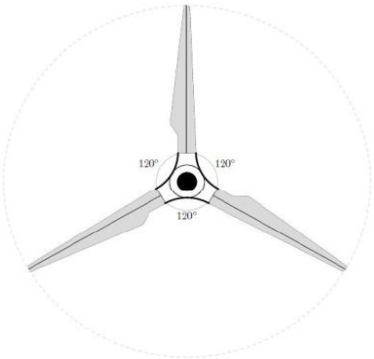
V_0 : kesintisiz rüzgar hızı [m/s]

V_{disk} : aktüatör diskinin rüzgar hızı [m/s]

A_{disk} : rotor diskinin alanı [m^2]

Normal şartlarda, aero-jeneratör durma rüzgar hızı 25 m/s'dir. Bu hızda oluşabilecek beklenmedik gerilmelere karşı, rotor dönüş hızını yavaşça azaltarak durdurabilecek mekanizmaya sahiptir. Yatay eksenli 3 kanatlı bir rüzgar türbininde oluşabilecek en olumsuz pozisyonlarından biri Şekil 3.7 gibidir. Burada kanatlardan birinin yukarı

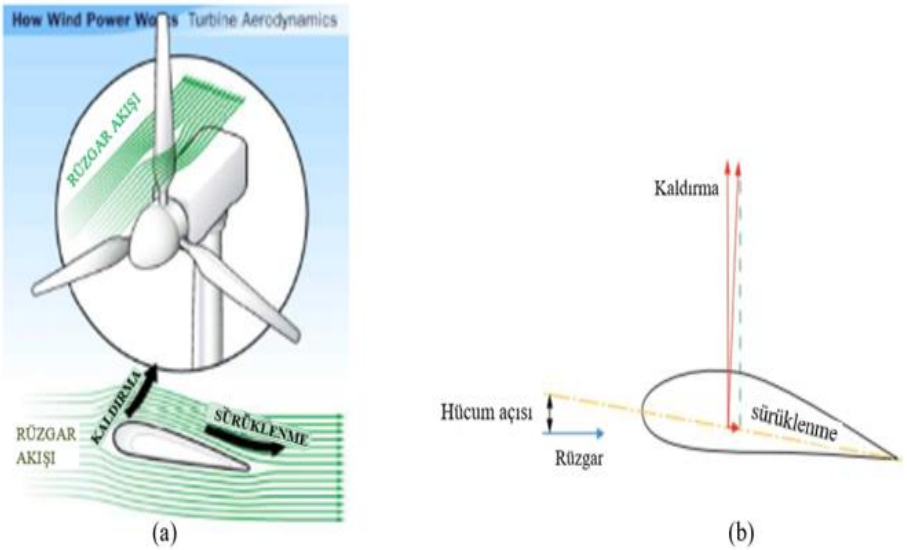
yönde yönde kuleye pararlel olması türbin üzerinde beklenmeyen gerilmelere yol açacaktır. Kanatların bu pozisyona göre oluşacak yükler ilerleyen sayfalarda anlatılmıştır.



Şekil 3.7 : Rotorun en elverişsiz pozisyonu, [41].

3.2.3 Kanatların üzerindeki aerodinamik yükler

Elverişsiz kanat pozisyonunda etki eden rüzgar mekanizması aşağıda tartışılmaktadır. Etki eden rüzgardan elde edilecek enerji miktarı, kanat geometrisine ve pozisyonuna bağlıdır. Aşağıda gösterilen Şekil 3.8, türbin kanatlarına etki eden yükleri ve kanatların enine kesitlerini göstermekte ve bu durumda yatay eksenli bir rüzgar türbininde oluşacak yükler üzerinde tartışılmaktadır.



Şekil 3.8 : (a) Türbin kanatları üzerindeki rüzgar akışı [42].

(b) Durgun haldeki kanat üzerindeki yükler [43].

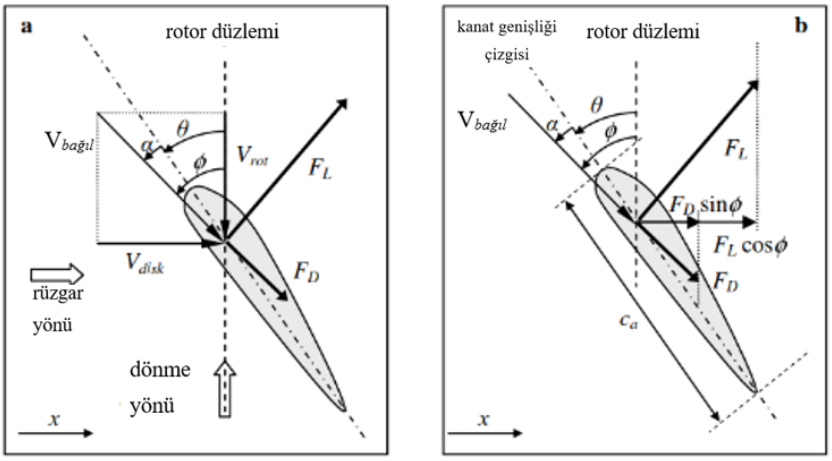
Sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri, türbine uygulanan rüzgar kuvveti etkisiyle oluşur. Sürüklenme kuvveti, rüzgar doğrultusunda oluşurken, kaldırma kuvveti aşağıdaki şekilde gösterilen etkiler sonucunda oluşur.



Şekil 3.9 : Kaldırma kuvveti mekanizması, [43].

Kanat ön, arka kenarlarının ve alt, üst bölgelerinin rüzgar etkisiyle kat edecekleri mesafelerin farklı olması tasarımda dikkate alınır. Kanat tasarımın bu etkilerin oluşacağı şekilde tasarlanması sonucunda, kanadın üst tarafında daha yüksek rüzgar akış hızı ve buna bağlı olarak daha düşük basınç oluşurken, alt tarafında ise daha düşük rüzgar akış hızı ve yüksek basınç oluşur. Dolayısıyla kaldırma kuvvetleri Şekil 3.9'da gösterildiği yönde etki eder.

Kanadın hücum açısı arttıkça daha yüksek kaldırma kuvveti oluşabilmektedir. Rotorun dönme hızı da kaldırma kuvvetine bağlı olarak artmaktadır. Hücum açısı belirli bir sınıra kadar kaldırma kuvvetini arttırır. Sınır seviyesinden sonra açı arttıkça kaldırma kuvveti azalır. Oluşan kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin yönleri aşağıdaki gibidir (Şekil 3.10):



Şekil 3.10 : a) Kanat üzerinde etkiyen kuvvetler sistemi [37].

b) X ekseni yönünde kaldırma ve sürüklenme yüklerinin bulunması [37].

Kaldırma ve sürüklenme yükleri denklem 3.8'deki eşitliğe göre hesaplanabilir:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L(\alpha)\, \rho_{hava} V_{bağıl}^2 c_a \Delta r \qquad F_D = \frac{1}{2} C_D(\alpha)\, \rho_{hava} V_{bağıl}^2 c_a \Delta r \qquad (3.8)$$

Burada;

F_L : Aerodinamik kaldırma kuvveti [N]

F_D : Aerodinamik sürüklenme kuvveti [N]

$C_L(\alpha)$: Aerodinamik kaldırma katsayısı [-]

$C_D(\alpha)$: Aerodinamik sürüklenme katsayısı [-]

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu [kg/m^3]

c_a : kord uzunluğu [m]

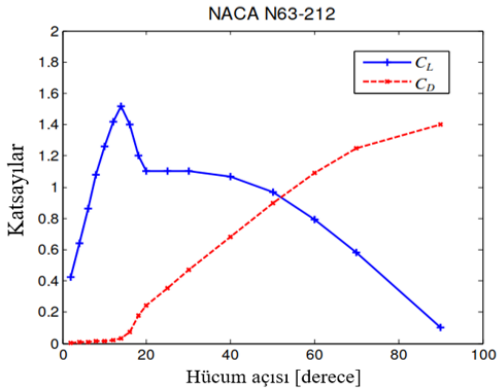
Δr : kanat elemanının radyal uzunluğu [m]

α : hücum açısı [derece]

θ : yunuslama açısı [derece]

$\emptyset$: içeriye akış açısı [derece]

Aerodinamik kaldırma ve sürüklenme katsayıları, Reynolds sayısına ve hücum açısına bağlı olarak değişir. Bu katsayılar kanat üreticilerinin rüzgar tünellerinde yaptıkları testlerden elde ettikleri grafiklerden çıkarılır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 : NACA N63-212 kanat profilinin her bir α açısı için kaldırma katsayısı (C_L) ve sürüklenme katsayısı (C_D) eğrisi [37].

Kanat elemanlarının hepsinin kanat profilinin karakteristiklerini taşıdığı düşünülerek aerodinamik yükler hesaplanır. Bu elemaların sonsuz uzunlukta olduğu ve birbirleri

ile etkileşimde bulunmadığı varsayılır. Üzerlerindeki yükler, rüzgar hızından ve rüzgar hızına bağlı olarak ortaya çıkan dönme hızından kaynaklanan kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri bağıl rüzgar hızında denklem 3.10'daki gibi birleştirilir:

$$V_{bağıl} = \sqrt{V_{disk}^2 + V_{rot}^2} \tag{3.9}$$

$$V_{disk} = V_0(1-a) \quad \text{ve} \quad V_{rot} = \Omega.r \tag{3.10}$$

$$\Omega = \frac{W}{2\pi} \tag{3.11}$$

$$W = 2\pi f \tag{3.12}$$

$$f = \frac{Rotor\ hızı}{Zaman} \tag{3.13}$$

Burada:

$V_{bağıl}$: Kanat kesitinin bağıl rüzgar hızı [m/s]

V_{disk} : Kanat profilindeki rüzgar hızı [m/s]

V_{rot} : Kanat kesitinin lineer dönme hızı [m/s]

Ω : Açısal dönme hızı [rad/s]

r : Kanat elemanının dönme eksenine olan mesafesi [m]

Kanatların hücum açısının bir fonksiyona bağlı olarak davranışı Çizelge 3.1'deki gibi üç bölgeye ayrılabilir:

Çizelge 3.1 : Kanatların çalışma bölgeleri.

Hücum Açısı	Bölge
$30^o < \alpha < 90^o$	Lineer
$-15^o < \alpha < 15^o$	Hız düşmesi
$15^o < \alpha < 30^o$	Durması

Hücum açısı, rüzgardan en efektif şekilde faydalanmak için sürüklenme ve kaldırma katsayılarına göre seçilir. Bu kuvvetlerin birbirleriyle etkileşimlerinin en az olacağı şekilde hücum açısı 10^o mertebelerinde olmalıdır.

Akış açısı (*Ø*), tasarımcı tarafından kanat uç bölgesindeki hız oranına (λ) ve uç bölgedeki dönme akışına bağlı olan rüzgar türbini akış alanını tanımlayan dönme indüksiyon faktörü (*a*') ile hesaplanır.

$$\lambda = \frac{\Omega \times R}{V_0} \tag{3.14}$$

$$a' = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda^2} \times a \times (1 - a)} \quad (3.15)$$

$$tan\,\emptyset = \frac{V_0 \times (1-a)}{(1-a) \times \omega \times r} \quad (3.16)$$

Akış açısını hesapladıktan sonra her kanat elemanı için x yönündeki yük denklem 3.17'deki gibi hesaplanır:

$$F_x = F_L \cos\emptyset + F_D \sin\emptyset \quad (3.17)$$

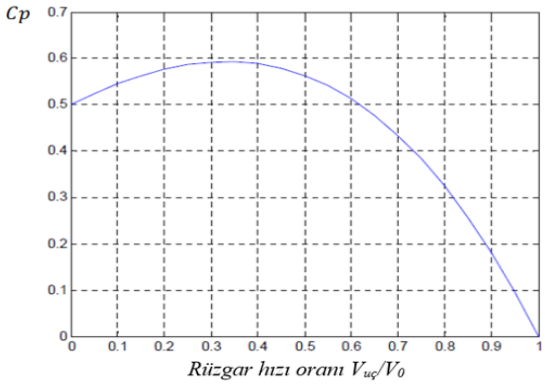
3.2.4 Türbin güç üretimi

Betz teoremi, hiçbir rüzgar türbinin rüzgarda kinetik enerjinin %59.3'ünden daha fazlasını mekanik enerjiye çeviremeyeceğini söyler. Bu Betz'in güç katsayısı olarak bilinen, 1/3'e eşit bir eksenel indüksiyon faktörü için elde edilen C_p = 0.593 sayısı ile açıklanır ve denklem 3.19'da uygulanır.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times V_0^3} \quad (3.18)$$

$$C_p = 4 \times a \times (1 - a)^2 \quad (3.19)$$

Güç katsayısı C_p, aktüatör diski boyunca rüzgarın geçişi nedeniyle hızda 1/3 oranında bir azalmaya neden olan yukarı ve aşağı akış hızı arasındaki oranın bir fonksiyonu olarak grafiksel gösterilebilir (3.12).



Şekil 3.12 : Güç katsayısı (Cp) ve rüzgar hızı (V_0) öncesi ve sonrası ($V_{uç}$) arasındaki rotordan geçişi, [44].

Rüzgar türbininin kanatları tarafından yakalanan mekanik güç aşağıdaki iki denklem ile elde edilebilir:

$$P = 2 \times \rho \times A_{disk} \times V_0^3 \times a \times (1 - a)^2 \quad (3.20)$$

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times C_p \times A_{disk} \times V_0^3 \quad (3.21)$$

ρ : Havanın yoğunluğu [kg/m^3]

A_{disk} : Rüzgar türbini rotorun taradığı alan [m^2]

V_0 : Türbin rotorundaki yüksek rüzgar hızı [m/s]

a : Eksenel indüksiyon faktörü [-]

3.2.5 Türbin kontrol sistemleri

Rüzgar türbinlerinin güvenli bir şekilde çalışmasını ve elde edilecek elektriksel gücün kalitesini sağlamak, doğru optimizasyonu ortaya koymak için kontrol sistemleri gereklidir. Bu bakımdan 6 çeşit kontrol sistemi burada incelenmiştir. Türbinin ne zaman çalışmaya başlayıp ne zaman duracağını belirleyen açma ve kesme hızları, bunun yanısıra operasyonel kontrol sistemleri mevcuttur. Bunlar jeneratör tork, yunuslama açısı ve nasel sapma açısı kontrolcüleridir. Bu kontrol sistemleri sayesinde maksimum aerodinamik güç elde edilir. Rüzgardan en iyi şekilde faydalanıp üretilebilecek en yüksek enerji miktarının üretilmesi hedeflenir.

Açma rüzgar hızı (cut-in): Rüzgar türbininin çalışması için gerekli olan rüzgar hızıdır ve yaklaşık olarak 3 m/s'dir. Bu hızın altında türbinde enerji üretimi gerçekleşmez.

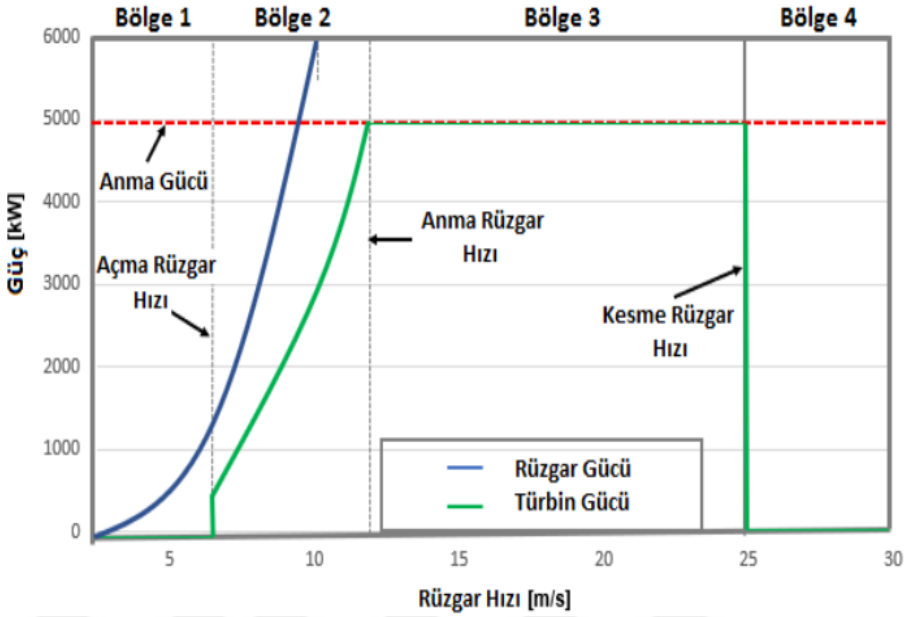
Nominal rüzgar hızı (rated): Rüzgar türbinin nominal üretebileceği güç için gerekli olan nominal rüzgar hızıdır. Türbin rotoru yüksek hızlara maruz kalır ve daha fazla enerji üretebilir.

Kesme rüzgar hızı (cut-out): Rüzgar türbininin güvenli bir şekilde çalışabileceği maksimum rüzgar hızıdır. Türbin bu hıza gelene kadar nominal hızdan daha yüksek hızlara maruz kalabilir. Türbin, güvenlik nedeniyle yavaşça fren yapacak bir sisteme sahiptir. Aksi takdirde, uyarım frekansı, yapının doğal frekansına yaklaştığında, rezonans nedeniyle yapının tamamen göçmesine neden olabilir.

Durdurma kontrolü : Durdurma kontrolü, kanatların aerodinamik kaybının kanat şekillerinin tasarımı ile kontrol eder. Kanatların tasarım şekliyle girdapların oluşturulması ve türbinin açısal hızını azaltan çekme kuvvetinin arttırılmasını kontrol eden pasif bir sistemdir meydana getirilir.

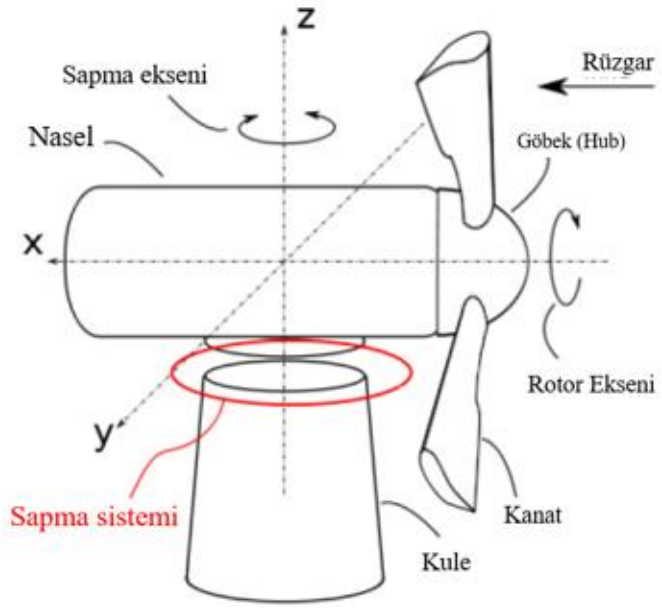
Yunuslama açısı kontrolü : Kanatların rüzgara karşı dik olarka konumlandırılmasını ve rotor şaftını nominal rotor devrinde döndürerek, türbinden nominal gücünde elektrik üretiminin sağlamasına yardımcı olur.

Açma, nominal ve kesme kontrol hızlarına göre türbinler üç bölgede çalışabilirler (Şekil 3.13);



Şekil 3.13 : Güç eğrileri ve türbin çalışma bölgeleri [45].

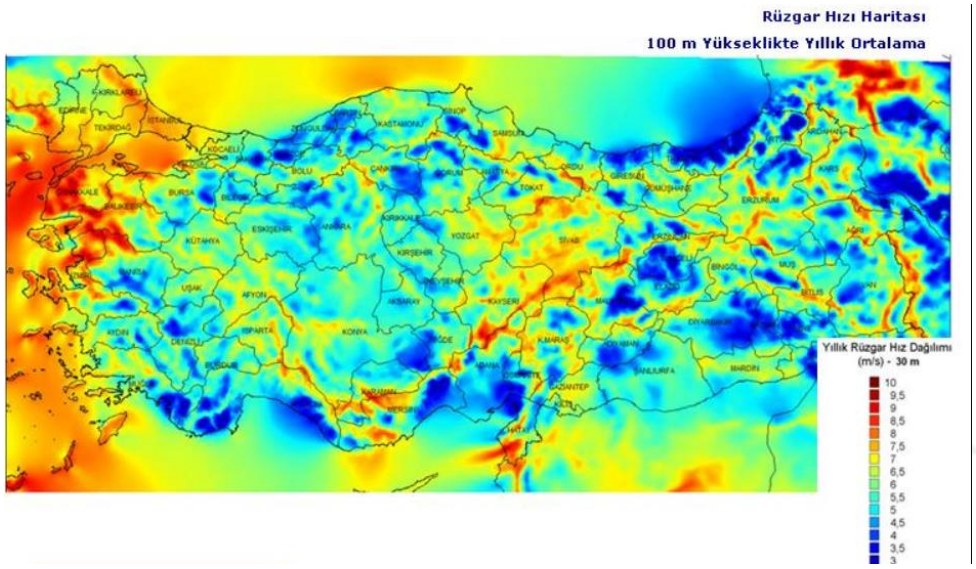
Nasel sapma açısı kontrolü (yaw system) : Türbin naselinin rüzgarın geldiği yönde hareket etmesini sağlayarak mevcut durumdaki rüzgardan en efektif şekilde yararlanılmasını sağlayan sistemdir. Genellikle, nasel üzerine monte edilen bir sensör ile bu hareket kontrol edilir (Şekil 3.14).



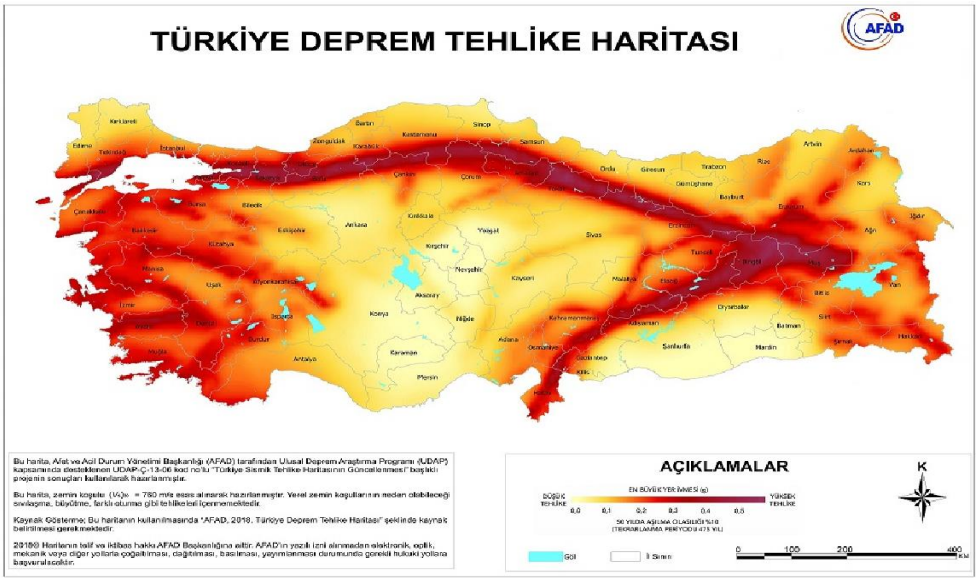
Şekil 3.14 : Nasel sapma açısı için örnek kontrol sistemi [46].

3.3 Deprem

Sismik etkiler, rüzgar yükünün etkileri yanında daha az öneme sahip olabilir. Genellikle sismik aktivitenin düşük olduğu bölgelerde inşa edilen türbinlerde rüzgar yükü etkisi daha fazladır. Zamanla sismik aktivitenin yüksek olduğu bölgelerde rüzgar türbini inşası başlamasıyla sismik etkiler dikkate alınmaya başlamıştır. Şekil 3.15'de verilen Türkiye rüzgar potansiyeli haritasına bakıldığında rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu bölgeler Şekil 3.16'da da görüldüğü gibi etkin fay hattı üzerinde yer almaktadır. Bu bölgede yapılması planlanan türbinlerde deprem yüklerinin sistem üzerinde meydana getirebileceği olumsuz etkiler araştırılmalıdır.



Şekil 3.15 : Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli haritası [47].



Şekil 3.16 : Türkiye deprem tehlike haritası [48].

Türbinin çalışır veya park halinde olması durumunda sismik etkilerin farklı sonuçlar verebileceği düşünülmektedir. Bu anlamda bu çalışma kapsamında iki durum da ele alınmıştır.

3.3.1 Deprem yer hareketi düzeyleri

TBDY-2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) kapsamında aşağıda belirtilen dört farklı deprem yer hareketi düzeyi tanımlanmıştır [49].

3.3.1.1 Deprem yer hareketi düzeyi-1 (DD-1)

DD-1 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %2 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu çok seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, gözönüne alınan en büyük deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır.

3.3.1.2 Deprem yer hareketi düzeyi-2 (DD-2)

DD-2 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, standart tasarım deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır.

3.3.1.3 Deprem yer hareketi düzeyi-3 (DD-3)

DD-3 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %50 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 72 yıl olduğu sık deprem yer hareketini nitelemektedir.

3.3.1.4 Deprem yer hareketi düzeyi-4 (DD-4)

DD-4 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %68 (30 yılda aşılma olasılığı %50) ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 43 yıl olduğu çok sık deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, servis deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır.

3.3.2 Deprem Yer Hareketi Spektrumları

TBDY-2018'de deprem yer hareketi spektrumları, belirli bir deprem yer hareketi düzeyini esas alarak yapının yapılacağı bölgenin zemin özellikleri ve faya olan

uzaklıkları dikkate alınarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım ile spektrumların kısa periyot ve bir saniye periyot için belirlenen harita spektral ivme katsayıları, faya yakınlık katsayısı ve yerel zemin etki katsayıları gibi değişkenlere bağlı olarak oluşturulması, gerçeğe daha uygun sonuçlar alınmasını sağlayacaktır. Spektrumlar yatay ve düşey olarak tanımlanarak her üç yönde de uygulanabilecektir.

3.3.2.1 Harita spektral ivme katsayıları ve tasarım spektral ivme katsayıları

TBDY-2018'de birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem etkilerinin geometrik ortalamasına karşı gelen kısa periyot harita spektral ivme katsayısı S_s ve 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı S_1, belirli bir deprem yer hareketi düzeyi için referans zemin koşulu [$(V_s)_{30}$ = 760 m/s] esas alınarak %5 sönüm oranı için bu katsayıların yerçekimi ivmesine bölünmesi ile boyutsuz katsayılar olarak tanımlanmıştır. Harita spektral ivme katsayıları Ss ve S_1, denklem 3.22 ve 3.23'deki gibi tasarım spektral ivme katsayıları S_{DS} ve S_{D1}'e dönüştürülür. Burada F_S ve F_1 Çizelge 3.2'de verilen yerel zemin etki katsayılarıdır.

$$S_{DS} = S_S F_S \tag{3.22}$$

$$S_{D1} = S_1 F_1 \tag{3.23}$$

3.3.2.2 Yerel zemin etki katsayıları

Yerel zemin sınıflarına bağlı olarak yerel zemin etki katsayıları F_s ve F_1 TBDY-2018'de Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3' de sunulmuştur. Tablolarda harita spektral ivme katsayılarının ara değerleri için doğrusal enterpolasyon yapılabilir [49].

Çizelge 3.2 : Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları.

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	*Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.*					

Çizelge 3.3 : 1.0 saniye için yerel zemin etki katsayıları.

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2
ZF	*Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.*					

3.3.2.3 Yatay elastik tasarım spektrumu

Herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için doğal titreşim periyoduna (T) karşılık gelen yatay elastik tasarım ivme değerleri $S_{ae}(T)$ doğal titreşim periyoduna bağlı olarak TBY-2018'e göre aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanır [49]:

$$S_{ae}(T) = \left(0.4 + 0.6\frac{T}{T_A}\right) S_{DS} \qquad (0 \leq T \leq T_A) \tag{3.24}$$

$$S_{ae}(T) = S_{DS} \qquad (T_A \leq T \leq T_B) \tag{3.25}$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \qquad (T_B \leq T \leq T_L) \tag{3.26}$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}T_L}{T^2} \qquad (T_L \leq T) \tag{3.27}$$

$$T_A = 0.2\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad ; \quad T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad ; \quad T_L = 6s \tag{3.28}$$

Burada,

S_s: Kısa periyot harita tasarım spektral ivme katsayısı [-]

S_1:1.0 saniye periyot için harita tasarım spektral ivme katsayısı [-]

F_s: Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı

F_1:1.0 periyot için yerel zemin etki katsayısı

S_{D1}:1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [-]

S_{DS}: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [-]

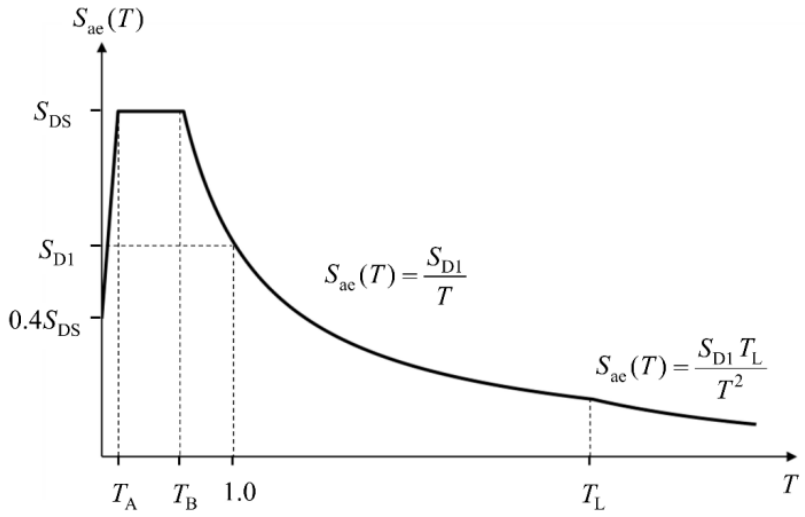
T: Doğal titreşim periyodu [s]

T_A: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]

T_B: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]

T_L: Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu [s]

Tüm bu denklemlerin çözümü ile spektrum için farklı bölgelere elde edilmiştir. Elde edilerin grafiksel gösterimi Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17 : Yatay elastik tasarım spektrumu [49].

3.3.2.4 Düşey elastik tasarım spektrumu

Benzer şekilde düşey elastik tasarım spektrumu da TBDY-2018'e göre ele alının herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için düşey elastik tasarım ivme spektrumunun ordinatları olan düşey elastik tasarım spektral ivmeleri $S_{aeD}(T)$, yatay deprem yer hareketi için tanımlanan kısa periyot spektral ivme katsayısına ve doğal titreşim periyoduna bağlı olarak g cinsinden aşağıdaki denklemler yardımı ile tanımlanabilir [49];

$$S_{aeD}(T) = \left(0.32 + 0.48\frac{T}{T_{AD}}\right) S_{DS} \qquad 0 \le T \le T_{AD} \qquad (3.29)$$

$$S_{aeD}(T) = 0.8S_{DS} \qquad T_{AD} \le T \le T_{BD} \qquad (3.30)$$

$$S_{aeD}(T) = 0.8S_{DS}\frac{T_{BD}}{T} \qquad T_{BD} \le T \le T_{LD} \qquad (3.31)$$

$$T_{AD} = \frac{T_A}{3};\ T_{BD} = \frac{T_B}{3};\ T_{LD} = \frac{T_L}{2} \qquad (3.32)$$

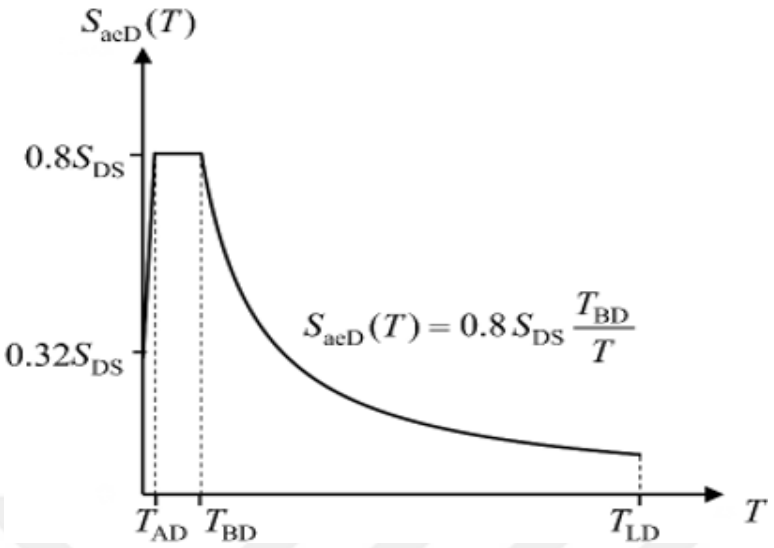
Burada;

T_{AD} : Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]

T_{BD} : Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]

T_{LD} : Düşey elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu [s]

Verilen denklemlere göre TBDY-2018'de beliritlen düşey elastik tasarım spektrumu Şekil 3.18'deki gibi çizilir [49]:



Şekil 3.18 : Düşey elastik tasarım spektrumu.

3.3.3 Deprem yer hareketlerinin tanımlanması

Deprem yönetmelikleri, belirli bir bölgedeki olası sismik tehlikeyi tasarım ivme spektrumları ile belirler. Bununla birlikte kullanılacak olan ivme kayıtları tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu olmalıdır. Deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları bu "Sismik Tehlike Analizi" sonucunda belirlenen tasarım ivme spektrumları ile uyumlu olması gerekir. Bu bakımdan kullanılacak kayıtlar; tasarım ivme spektrumu ile uyumlu yapay kayıtlar, benzeştirilmiş (simule edilmiş) kayıtlar ve deprem esnasında kaydedilen gerçek ivme kayıtları olmak üzere üç farklı şekilde temin edilebilir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte gerçek deprem ivme kayıtları kolaylıkla kaydedilebilir hale gelerek veri tabanları zenginleşmiştir.

Bu çalışma kapsamında gerçek ivme kayıtlarından faydalanarak analiz yapılmıştır.

3.3.3.1 Gerçek deprem kayıtlarının seçilmesi

TBDY-2018 gerçek deprem kayıtlarının belirli kurallar doğrultusunda seçilmesini ve ölçeklendirilmesini önermektedir. Burada, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak kayıtların seçilmesi önerilmiştir. Depremin büyüklüğü yer hareketinin frekans içeriğini ve süresini önemli ölçüde etkilediği için

uygun büyüklükteki deprem kayıtlarının kullanılması daha doğrudur. Yakın fay etkisi dikkate alınacak olursa fay-saha mesafesinin uygun olması daha da önem taşır. Bu etki diğer etkilerden daha farklı sonuçlar doğurabilir. Yapının yapılacağı bölgeye uyumlu geçmiş deprem kayıtlarının bulunması durumunda öncelikle bu kayıtların kullanılması gerekir.

Yönetmelik yeterli sayıda veya özellikte deprem kaydı olmaması durumunda zaman tanım alanında benzeştirilmiş yer hareketi kayıtları kullanmaya izin verir. Bu kayıtların kullanılması durumunda, yapının bulunduğu bölgenin sismik kaynak, dalga yayılım ve yerel zemin özellikleri dikkate alınmalıdır.

TBDY-2018'e göre deprem kaydı takımlarının sayısı en az onbir olmalıdır. Aynı depremden seçilecek kayıt veya kayıt takımı sayısı üçü geçmemelidir [49].

3.3.3.2 Yer hareketini ölçekleme yöntemleri

Gerçek deprem kayıtlarını tasarım ivme spektrumuna uygun bir şekilde ölçeklenmek için kullanılan yöntemler iki gruba ayrılabilir. Bunlar, zaman tanım alanındaki yöntemler ile frekans tanım alanındaki yöntemlerdir. Zaman tanım alanında ölçeklenme yönteminde, hedeflenen periyot aralığında deprem kaydı sabit bir katsayıyla çarpılarak hedef tasarım ivme spektrumu ile eşleştirme yapılabilir. Kaydın frekans içeriği değişmezken, genliği değişmiştir. Frekans tanım alanında kaydın ölçeklenmesi, hedef tasarım ivme spektrumu ile mükemmel bir eşleşme sağlayarak gerçek ivme kayıtlarını benzer hareketin üretilmesini sağlar. Bu yöntem mükemmel bir eşleşme sağlamasına rağmen yer hareketinin frekans içeriğini değiştirmesinden dolayı yer hareketinin doğal özelliklerini bozar.

TBDY-2018, basit ölçeklendirme yöntemleri kullanarak aşağıdaki belirli kuralların dikkate alınmasını önermiştir [49]:

(a) Seçilen deprem kayıtlarına ait spektrumların ortalamasının $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, yatay ve düşey tasarım spektrumlarının aynı periyot aralığındaki genliklerinden daha küçük olmaması koşulu ile deprem yer hareketinin genlikleri ölçeklendirilmelidir.

(b) Üç boyutlu hesap için seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilmelidir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının $0.2T_p$ ve

$1.5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, yatay ve düşey tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilmelidir. Her iki yatay bileşenin ölçeklendirilmesi aynı ölçek katsayıları ile yapılmalıdır.

Mevcut deprem verileri ile bina özelliklerinin gerekli kılması ve sahaya özel deprem yer hareketi spektrumu belirlenmesi durumunda, binanın belirli sayıda titreşim periyodu ile ilişkilendirilen *koşullandırılmış ortalama spektrumlar*'dan yararlanılarak, deprem kayıtlarının analiz sonuçlarında daha az saçılmayı sağlayacak şekilde seçilerek ölçeklendirilmesine yönetmelik izin vermektedir.

3.4 Yük Kombinasyonu

Türbin kulesinin doğru bir şekilde tasarımını gerçekleştirmek için, limit durumu tasarım yönteminin tüm gerçekçi kombinasyonlarını içerisinde barındıran bazı kısmi güvenlik faktörlerinin kullanılması IEC tarafından önerilir. Burada iki limit durumu esas alınır: Nihai Limit Durumu ve Servis Verilebilirlik Limit Durumu. IEC bu durumlar için, bir rüzgar türbinin operasyonel ömrü boyunca karşılaşabileceği tüm yük durumlarını içerisinde barındıran bazı kısmi güvenlik faktörlerini Çizelge 3.4'de gösterildiği gibi tanımlamıştır.

Çizelge 3.4 : Yükler için kısmi emniyet faktörleri, IEC 61400-1 [8].

Elverişsiz yükler			**Uygun yükler**
Tasarım durumu türleri			Tüm tasarım durumları
Normal (N)	Normal olmayan (A)	Taşıma ve montaj	
1.35	1.1	1.5	0.9

Deprem ve rüzgar yüklerinin kombinasyonu için genellikle olası operasyonel durumlar için denklem 3.33'deki gibi doğrusal bir toplama ele alınır [8].

$$u = Ø_e Q_e + Ø_o Q_o \tag{3.33}$$

Burada $Ø_e$ ve $Ø_o$ değişem deprem talebi için güvenlik katsayıları, Q_e ve Q_o operasyonel talep için güvenlik katsayılarıdır. Genellikle her iki $Ø_e$ ve $Ø_o$ faktörleri için de IEC 61400, 1.0 değerini önerir. Q_o burada benzetilmiş rüzgar koşullarında acil durum kapanmasından kaynaklanan talep olarak ele alınacaktır. Q_e ise deprem eğilme

momentini temsil edecektir. Bu IEC'ye göre denklem 3.34'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$Q_e = h_t M_{eff} A \tag{3.34}$$

Bu denklemde h_t kulenin tepe noktasına kadar olan yüksekliğidir. M_{eff} efektif kütle ve A tasarım ivmesidir. M_{eff} basitçe rotor, nasel ve kule kütlesinin yarısı olarak alınabilir [8].

IEC, DNV gibi yönetmeliklerin çoğu sismik etkilerin yerel kodlara göre de dikkate alınmasını önerir. Ülkemizde mevcut kullanılan TS500 gibi yapısal tasarım kodlarında rüzgar ve deprem yüklerini birleştiren herhangi bir öneri bulunmamaktadır [50]. Bu standartlardan biri dikkate alınarak tasarım esasları belirlenir. Aynı şekilde ASCE-7-10 (2010) yönetmeliğinde de benzer durum söz konusudur [51]. Büyük kara rüzgar türbini destek yapıları için tasarım ve öneriler alanında kullanılan ASCE/AWEA (2012) standardı, sismik ve operasyonel yükler için belirli katsayılar önerir [9]. Bu katsayılar denklem 4.1 ve 4.2'de gösterilmiştir. Her iki çevresel yükün kullanılması aşırı yüklemeler çıkmasına neden olabilir.

$$U = (1.2 + 0.2S_{DS})D + 0.75(\rho Q_E + 1.0M) \tag{4.1}$$

$$U = (0.9 - 0.2S_{DS})D + 0.75(\rho Q_E + 1.0M) \tag{4.2}$$

Burada,

D : Ölü yük

M : Aşağıdakilerden daha fazlasına eşit operasyonel yükleme:

1) Nominal rüzgar hızında normal güç üretimi sırasında oluşan yükler.

2) Nominal rüzgar hızında acil kapatma için hesaplanan karakteristik yükler.

Q_E : Deprem yükü

ρ : 1.0, arttırma faktörü.

Bu denklemden anlaşılacağı üzere her iki yükün aynı anda etki ettirilmesi sistemde ekonomik olmayan çözümler doğurabilir. İlgili standart bu iki yüklemeyi azaltarak dikkate almayı önerir. Hem deprem hem de operasyonel yüklerde 0.75 yük faktörünün kullanılması 65 kW ila 5 MW arasında değişen rüzgar türbinlerinin tepki geçmişinin analizini destekler. Bu sonuçlar 100 farklı deprem yer hareketi kaydının değişen yönlerinin dikkate alınması sonucu Prowell tarafından ortaya konmuştur. Sismik ve

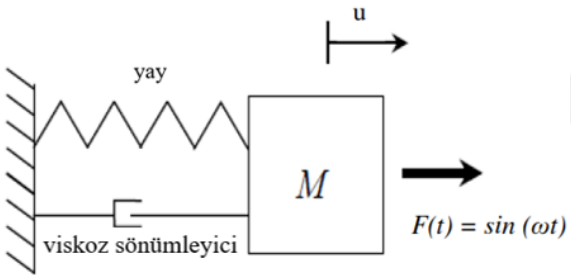
rüzgar yüklerinin aynı yönden etki etmesi ihtimalinin her zaman yüksek olmayacağı analizler sonucu 0.75 katsayısı ile desteklenir.

3.5 Sistem Dinamiği

Sistem yapısal dinamiğini etkileyen fiziksel bileşenlerin doğru ve ayrıntılı modellenmesi büyük önem taşır. Rotor, nasel, kule gibi bu elemanlar için en iyi gösterim Şekil 3.19'daki gibi tek bir serbestlik dereceli kütle yay-sönüm sistemi ile açıklanabilir.

Kütleye bir harmonik F(t) kuvveti uygulandığında, yer değiştirmenin büyüklüğü ve fazı uyarma sıklığına bağlıdır. Bu kuvvetin uygulanması sonucunda;

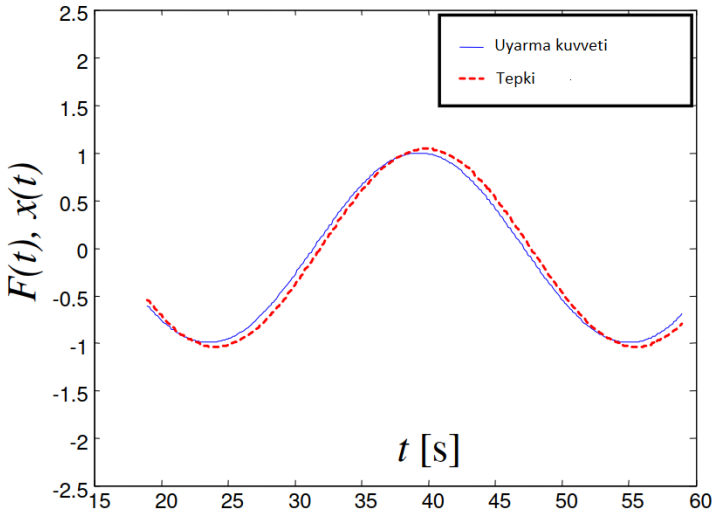
- Yarı-statik ($f < f_n$) (f = yapının doğal frekansı, f_n = dış kuvvetin frekansı)
- Rezonans ($f = f_n$)
- Ataletin hakim olduğu ($f > f_n$) üç farklı cevap bölgesi oluşabilir.



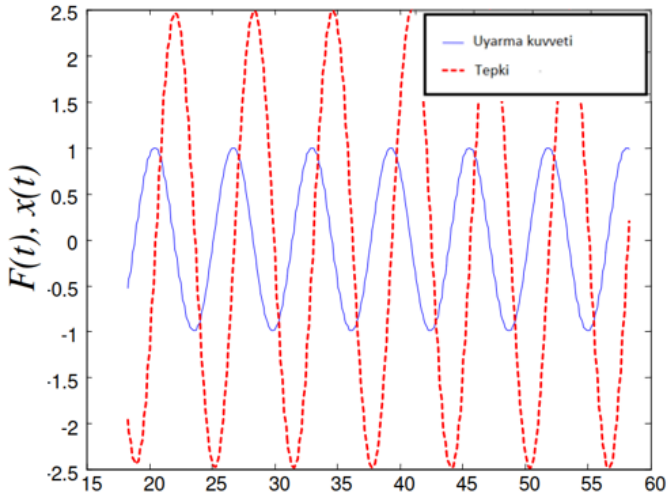
Şekil 3.19 : Tek serbestlik dereceli sistemin kütle-yay sönüm sistemi [37].

Yarı-statik davranış, sistemin doğal frekansının uyarma frekansından çok daha düşük olduğu zamanlarda meydana gelir ve kütlenin yer değiştirmesi neredeyse zamana bağlı değişen kuvveti izliyor gibi olur. Yani sistem statik bir kuvvet tarafından uyarılmış gibi hareket eder (Şekil 3.20).

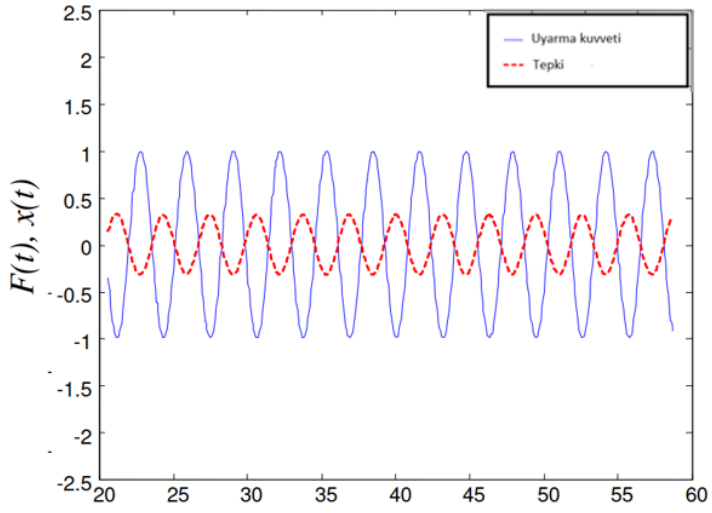
Şekil 3.21 uyarma frekansı ile sistemin frekansı neredeyse aynı olduğu durumlarda meydana gelir. Bu durumda, yay kuvveti ile atatlet kuvveti neredeyse iptal olur ve sistem yanıtı birkaç kat büyür. Ortaya çıkan genlik, sistemde mevcut sönümleme tarafından yönetilir. Şekil 3.22'de ise uyarma frekansının doğal frekanstan daha büyük olduğu durumlara oluşur. Kütle hareketi takip edemez ve sistemin ataleti tepki ye hakim olur.



Şekil 3.20 : Yarı statik davranış [37].

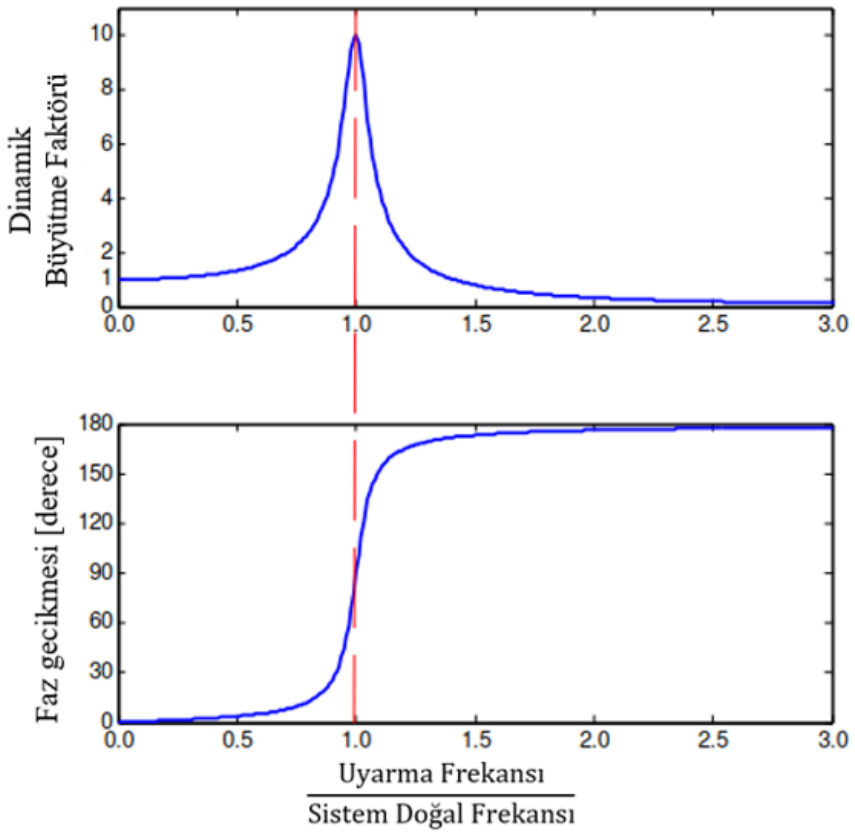


Şekil 3.21 : Rezonans durumu [37].



Şekil 3.22 : Atalet hakim davranış [37].

Yukarıda gösterilen her üç şekil, kararlı bir durumda sinüzoidal uyarım kuvveti F(t)'nin doğrusal bir sisteme uygulanmasında, sistemin aynı frekans, farklı büyüklük ve fazda çıktılar üreteceğini temsil etmektedir [37]. Büyüklük ve fazı tek bir frekans tepki fonksiyonunda özetlenebilir. Bu fonksiyon, dinamik büyütme faktörü (DAF) ve faz gecikmesinin bir grafiği ile açıklanabilir (Şekil 3.23). DAF, aynı büyüklükteki bir yüklemenin sonucunda oluşan yapının dinamik ve statik yanıt büyüklüklerinin oranı olarak ifade edilebilir.



Şekil 3.23 : 1.eğri : Her bir normalleştirilmiş frekans değerlerine karşı gelen dinamik büyütme faktörü.

2.eğri : Her bir normalleştirilmiş frekans değerlerine karşı gelen faz gecikmesi.

Şekil 3.23'deki pik nokta sistemin doğal frekansına karşılık gelir ve bu değer sönümleme ile belirlenebilir. Oluşabilecek herhangi bir rezonans durumu ciddi hatalara sebep olabilir. Yapıda bu durum, sönümleme ile kontrol edilmesi gerekir. Beklenen uyarımların frekansının ve yapının frekansının bilinmesi ve yapının uyarımlara karşı beklenen cevabı vermesi ayrıntılı olarak incelenmelidir.

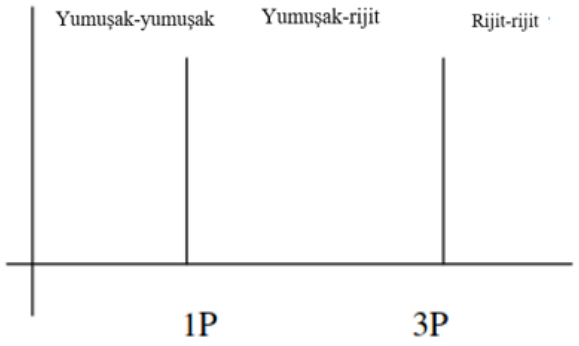
Sonuç olarak rüzgar türbinlerinin dinamiğinin incelenmesi zamanla değişen yüklere maruz kalan bu yapının ömrünün doğru belirlenme ve tasarımının doğru yapılması konusunda önem taşır.

3.5.1 Soft ve rijit rüzgar türbini sistemleri

Rüzgar türbini yapıları tekil ince yapılarına rağmen yüksek çevrimsel yüklere maruz kalırlar. Yapı bu yüklere karşı oldukça duyarlı tasarlanmalıdır. Maruz kalınan yükler nedeniyle yapının rezonansa ve yorulma etkilerine karşı belirli frekans aralıklarında kalmasına dikkat edilmelidir. Çünkü tüm bu dinamik etkiler uyarım frekansının sistem doğal frekansına yaklaşması sonucu ortaya çıkar. Bu nedenle yapının frekansı ile gelebilecek uyarım frekanslarının çakışmamasına dikkat edilmelidir.

3.5.1.1 Uyarım

Bir rüzgar türbininde türbülanslı veya normal rüzgar etkileri gibi birçok etkiye maruz kalan kısım rotor bölümüdür. Şekil 3.24'deki gibi üç kanatlı bir rotor için 1P ve 3P frekanslarında gelen uyarım için tepe noktaları oluşur.



Şekil 3.24 : Üç kanatlı, sabit hızlı rüzgar türbininin yumuşak - rijit frekans aralıkları [37].

Burada yatay eksen frekansı [Hz], düşey eksen ise değeri olmayan rastgele bir yanıtı gösterir. Böyle bir yapıda, rezonans etkisinin oluşmaması için yapı doğal frekansının 1P ile 3P arasında olması istenir.

Bu etkinin dikkate alınması için üç tip tasarım yöntemi önerilir. Bunlar aşağıdaki gibidir:

- **Yumuşak-yumuşak tasarım:** İlk doğal frekansı 1P'nin altında olan yapılardır. Çok esnek yapılardır.

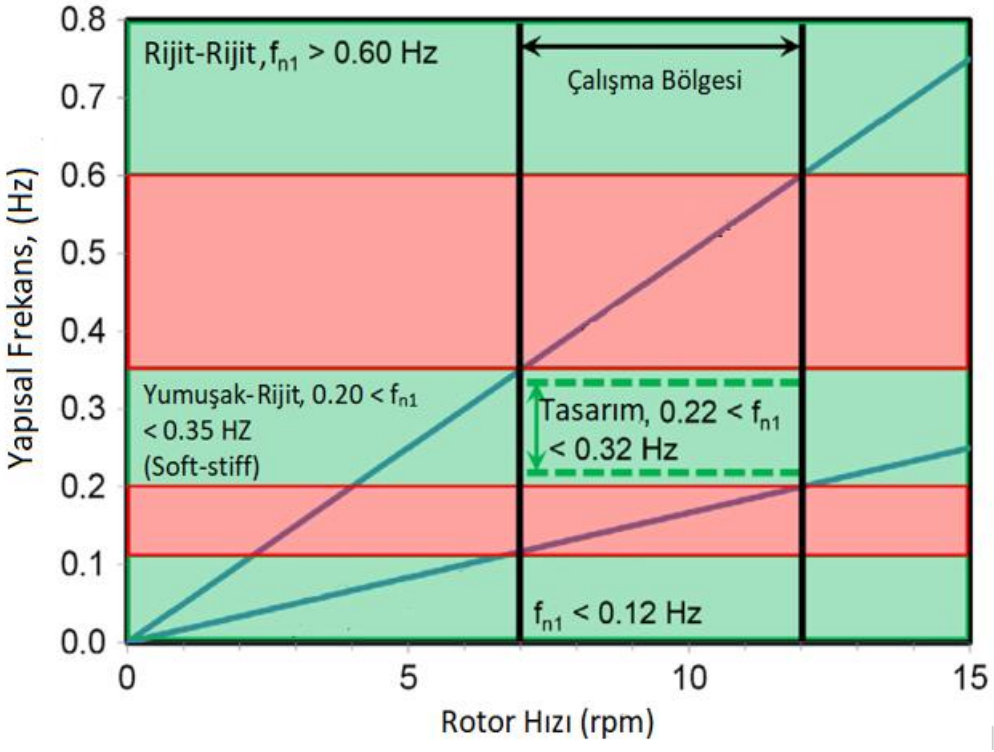
- **Yumuşak-rijit tasarım:** İlk doğal frekansının 1P ile 3P arasında olduğu yapılardır. Önerilen tasarım bu yöndedir.
- **Rijit-rijit tasarım:** İlk doğal frekansı 3P'den büyük olan yapılardır. Çok rijit bir destek yapısı gerektirir.

3.5.1.2 Campbell Diyagramı

Türbin, farklı dinamik özelliklere sahip parçalardan oluşmaktadır. Rotorun, naselin ve destek yapısının dinamiğinin birbirleriyle etkileşimi rezonans açısından önemlidir. Destek yapısının tasarımında, rotor dinamiğinden kaynaklanabilecek rezonans durumundan kaçınılmalıdır. Bu durum yapıyı kararsızlığa sürükler. Kanatlarda, destek yapısında önemli hasarlara neden olabilir.

Şekil 3.25'de bu tez kapsamında kullanılan 5 MW rüzgar türbini için Campbell diyagramı oluşturulmuştur. Mavi ve kırmızı kesikli çizgiler, türbinin nominal rotor hızına (yani, iki dikey çizgi arasındaki aralık) kadar çeşitli rotor hızları için 1P ve 3P frekanslarını tanımlar. Rezonans koşulları, yapısal frekans gri alanda olduğunda ortaya çıkar. Şekil 3.24'te de gösterildiği gibi yapısal frekans üç beyaz alanda olmalıdır.

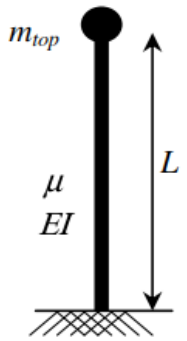
Bunlar aşağıdan yukarıya sırasıyla; rijit-rijit, yumuşak-rijit ve yumuşak-yumuşak tasarımdır:



Şekil 3.25 : 5 MW referans türbini için Campbell Diyagramı [52].

3.5.1.3 Destek yapısı

Türbin Şekil 3.26'daki gibi tepe noktasında yığılı bir kütle ile tek serbestlik dereceli basit bir sisteme dönüştürülebilir. Bu model yardımı ile sistemin ilk doğal frekansını belirlemek mümkündür.



Şekil 3.26 : Esnek bir rüzgar türbinin yapısal modeli [37].

Ankastre bir temele bağlı bu sistem için ilk doğal frekans aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$f_{doğal}^2 \cong \frac{3.04}{4\pi^2} \frac{EI}{(m_{top}+0.227\mu L)L^3} \tag{3.35}$$

Burada;

$F_{doğal}$:ilk doğal frekans [Hz]

m_{top}: yığılı kütle [kg]

μ: herbir metredeki kule kütlesi [kg/m]

L:kule yüksekliği

EI: kule eğilme rijitliği [Nm^2]

İlk doğal frekans 3.36 denklemindeki parametreler kullanılarak da hesaplanabilir:

$$I \cong \frac{1}{8}\pi D_{av}^3 t_w \quad ve \quad \mu = \rho_{çelik}\pi D_{av} t_w \quad ve \quad a = \frac{m_{top}}{\rho_{çelik}\pi D_{av} t_w L} \tag{3.36}$$

$$f_{doğal} = \frac{D_{av}}{L^2}\sqrt{\frac{E}{104(a+0.227)\rho_{çelik}}} \tag{3.37}$$

Burada:

t_w : kule kesit kalınlığı

D_{av} : kule ortalama çapı = D-t_w

$\rho_{çelik}$: çelik yoğunluğu

Diğer bir hesap yöntemi ise;

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{K}{M}} \tag{3.38}$$

K : Yapı rijitliği [kN/m]

M : Yapının toplam kütlesi [kN]

Örnek olarak yapılmış tasarımda 2 kanatlı bir türbin için frekans aralıklarına göre türbin kule çapı değişimi gözlenmiştir [48]. Dönme frekansı 1P 0.3 Hz, kanat geçiş frekansı 2P 0.6 Hz'dir. Kesit kalınlığı türbin yüksekliği boyunca sabit kalır ve 75 mm'dir. Sistem 130.000 kg'lık bir tepe kütlesine sahiptir. Denklem 3.37'ye göre belirtilen doğal frekanslara karşılık gelen D çapı hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 : Yükler için kısmi emniyet faktörleri, IEC 61400-1 [8].

Tür	$f_{doğal}$	Çap
Yumuşak-yumuşak	0.25 Hz	2.4 m
Yumuşak-rijit	0.5 Hz	4.2 m
Rijit-rijit	1.0 Hz	7.4 m

Türbin kulelerinin tedarik ve montaj maliyeti esas olarak çaptan etkilenmektedir. Burada en düşük çap en yumuşak tasarımda sağlanmıştır. En yumuşak kule tasarımı burada en mantıklı olanıdır. Buradaki durum söz konusu örenk proje için geçerlidir. Gerçek bir türbin tasarımında bu frekans aralıkları için birçok etken daha dikkate alınmalıdır.

3.6 Dengelenme Koşulları

Yukarıda bahsedilen çalışma için seçilen kule tasarımı yumuşak-yumuşak bölgede kalır. Burada daha az çelik kullanılmış ve tasarım daha az maliyetli olmuştur. Bu aralıkta türbinlerde büyük rotorlar ve değişken hızlar, uygulanan kuvvetler nedeniyle rezonans riskini arttırmaktadır. Bu durumu türbin üzerinde meydana gelen iki durum kontrol edebilir. Bunlar aerodinamik sönümleme ve değişken hızlı türbinlerdir. Bu iki parametre türbin dinamiğini önemli ölçüde etkileyebilirler.

3.6.1 Aerodinamik sönümleme

Bu türbin roturunun 1P'lik frekansı tarafından rezonansa uğrama durumu söz konusudur. Rezonans davranışı meydana gelme ihtimali olmasına rağmen aerodinamik sönümleme ile dinamik tepki büyük ölçüde azaltılabilir. Bu sönümle Şekil 3.22'de gösterilen tepe noktası değerini aşağı düşürür. Buna bağlı olarak tepe noktası yer değiştirmesi ve yorulma yükleri etkisi azalmış olur. Bununla birlikte aerodinamik sönümleme, türbin park modundayken mevcut değildir. Enerji üreten bir türbinin park durumundaki türbine göre yorulma ömrünün iki katına çıkacağı bu türbin için hesaplanmıştır [53].

3.6.2 Değişken hızlı türbinler

Bu tür sistemlerde, optimum hızı kontrol etmek adına birçok kontrol sistemi mevcuttur. Hız değişimi, güvenli frekans aralıklarını daraltırken, bu kontrol sistemleri yeni aralıklar oluşturmaya çalışır. Tasarım aşamasında analiz programları tarafından belirlenen ilk doğal periyot, sahadaki değere göre farklı olabilir. Bu yüzden sahada destek yapısının kurulumundan sonra frekansın ölçülmesi daha doğru sonuçlar verebilir. Zemin koşulları ve kurulum detayları bu frekans değerini etkileyebilir. Bundan dolayı kontrol sistemleri destek yapısının kurulumundan sonra ölçülen frekans değerine göre ayarlanır [54].

3.7 Gerilme Kontrolü

Kule yapılarının tasarımında çevresel yüklerden dolayı oluşabilecek gerilmelerin kontrol edilmesi gerekir. Bu çalışmada tasarım yapılmamasına rağmen yapının maruz kaldığı etkileri normal çalışma durumunda ve bu durumda iken depremin etki etmesi halindeki gerilmelerin kontrolü API RP-2A yönetmeliğinin öngördüğü şekilde yapılacaktır [55]. Aşağıdaki denklemler API RP-2A dökümanının üçüncü bölümünde silindirik kesitler için tanımlanmıştır. Denklemler, kullanılan türbin için sadece kule kesitinin yüksek gerilmelere maruz kalan taban kesiti için uygulanacaktır.

- Emniyetli çekme gerilmesi;

$$F_t = 0.6F_y \tag{3.39}$$

Burada;

F_y = akma gerilmesi (F_y = 250 MPa)

- Emniyetli basınç gerilmesi;

$$Kl/r < C_c \text{ için} \qquad F_a = \frac{\left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{5/3 + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}} \tag{3.40}$$

$$Kl/r > C_c \text{ için} \qquad F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(Kl/r)^2} \tag{3.41}$$

Burada;

$$C_c = \left(\frac{2\pi^2 E}{F_y}\right)^{\frac{1}{2}}$$

E = Elastiste Modulü (E = 210000 MPa)

K = Efektif uzunluk faktörü (K=1)

l = uzunluk (l=90 m)

r = dönme yarıçapı (r = 2.17 m)

- Emniyetli elastik yerel burkulma gerilmesi

$$F_{xe} = 2CEt/D \tag{3.42}$$

Burada;

C = Kritik elastik burkulma katsayısı (C = 0.6)

D = dış çap (D = 6 m)

t = kesit kalınlığı (t = 0.027 m)

- Emniyetli elastik olmayan yerel burkulma gerilmesi

$$F_{xc} = F_y \times [1.64 - 0.23(D/t)^{1/4}] \leq F_{xe} \tag{3.43}$$

- Emniyetli eğilme gerilmesi

$$\frac{3000}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 300 \quad için; \qquad F_b = \left[0.72 - 0.58\frac{F_y D}{Et}\right] F_y \tag{3.44}$$

- Emniyetli kayma gerilmesi

$$F_v = 0.4F_y \tag{3.45}$$

- Maksimum kayma gerilmesi

$$f_v = \frac{V_{tr}}{0.5 * A} \tag{3.46}$$

Burada;

V_{tr} = kayma kuvveti

A = Enkesit alanı (A = 1.20 m^2)

- Kayma gerilmesi için denklem 3.47'deki şart sağlanmalıdır:

$$f_v < F_v \tag{3.47}$$

- Basınç gerilmesi için denklem 3.48'deki şart sağlanmalıdır:

$$f_a < F_a \tag{3.48}$$

Son olarak eksenel basınç ve eğilme gerilmesinin birleşik etkisinin kontrolü;

$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \tag{3.49}$$

Burada;

fbx ve fby = hesaplanan eğilme çekme gerilmeleri, $f_b = \frac{M*y}{I}\ MPa$

I = atalet momenti, $I = \pi(d_{dış}^4 - d_{iç}^4)/64\ m^4$

4. ANALİZ

4.1 Genel Hususlar

Bu bölüm, türbinin farklı koşullarda rüzgar ve sismik çevresel yüklerine maruz kalmasının sonuçlarını araştıracaktır. Türbin normal operasyonel durumunda iken, türbin operasyonel durumda iken belirli bir süre sonra güçlü yer hareketinin etki etmesi durumunda, türbin park halinde iken depremin etki etmesi ve türbin rölanti modunda iken depremin etki ettiği ve etmediği olmak üzere beş ayrı durum incelenecektir. Burada 14 farklı yer hareketi üç farklı yönde, rüzgar ise 3 m/s'den 23 m/s hıza kadar 2'şer artış aralığıyla etki ettirilecektir. Türbin tepe ivmesinin 2 m/s^2 değerine ulaşmasıyla türbin jeneratörü kapanır ve kanatlar eğim açısını arttırarak rölanti moduna geçer. Kullanılan 5 MW türbininin alabileceği en yüksek hız 25 m/s olarak belirlenmiştir. Bu ve daha büyük hızlarda türbin enerji üretimi gerçekleştirmez, rölanti haline geçer. Bu hali göz önüne alabilmek için türbine 25 m/s hızından 50 m/s hızına kadar beşer artışla rüzgar hızları etki ettirilmiştir.

Rüzgar türbini analizlerinde kullanılan NREL tarafından geliştirilmiş FAST kodu, rüzgar ve sismik analizini aynı çalışma içerisinde gerçekleştirebilmektedir. Farklı alt modulleri sayesinde türbülanslı rüzgarı oluşturabilmekte ve kanat üzerindeki kaldırma ve sürüklenme yüklerini hesaplayabilmektedir. Bu çalışmada da FAST programı, TurbSim, Sismik, AeroDyn, ElastoDyn ve ServoDyn alt modulleriyle birlikte kullanılacaktır.

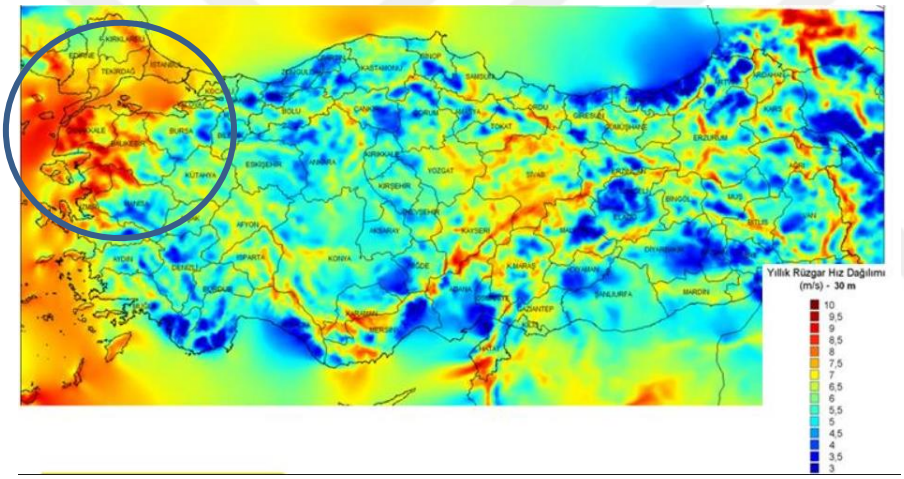
4.2 Projenin İlk Hükümleri

Bu çalışmanın amacı, sismik aktivitesi yüksek bölgelerde inşa edilmesi planlanan türbinler için öneri sunmaktır. İki ayrı dinamik yükün aynı anda etki etmesi yapı üzerinde önemli hasarlar meydana getirebilir. Türbinler maliyetli yapılar olduğu için tasarım aşamasında hasarların öngörülmesi gerekmektedir.

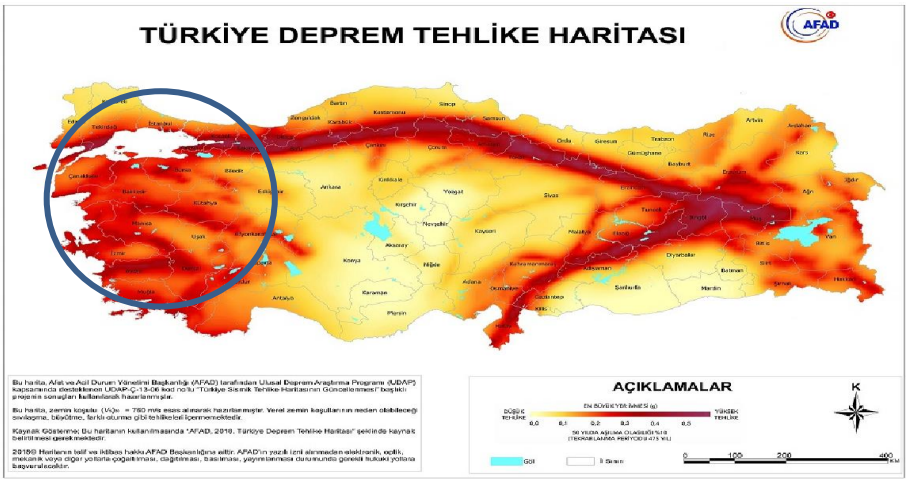
Bir türbin için en önemli iki kriter verimlilik ve ekonomidir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri tarafından üretilebilecek güç, rüzgar hızı ve rotorun çapı ile orantılıdır. Bu

nedenle, rüzgar türbinlerinin kapasitesini arttırmak için, rüzgar hızı ve çevre koşulları üzerinde kontrol olmadığından rotor çapının boyut olarak artması gerekir. Rotor çapını artmasıyla, türbin kule tepe noktasındaki kütle artar ve bu da daha yüksek sismik yüklere neden olur. Tesadüf olarak, yüksek rüzgar kaynakları potansiyeline sahip alanların çoğu, yüksek sismik tehlikeye sahiptir. Türkiye Rüzgar haritasına göre de, rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu bölgeler aktif deprem kuşaklarının içerisinde yer almaktadır.

Çalışma, Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nde yer alan Gelibolu ve çevresini esas almaktadır. Bu bölge coğrafi özellikleri bakımından önemli bir konumda yer alır. Şekil 4.1 ve 4.2'de görüldüğü gibi seçilen bölge yüksek rüzgar potansiyeli ile birlikte Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın üzerinde yer almaktadır. Bu bölge etrafında da mevcut türbin santralleri çalışmasını sürdürmektedir.



Şekil 4.1 : Türkiye rüzgar enerji potansiyeli haritası [47].

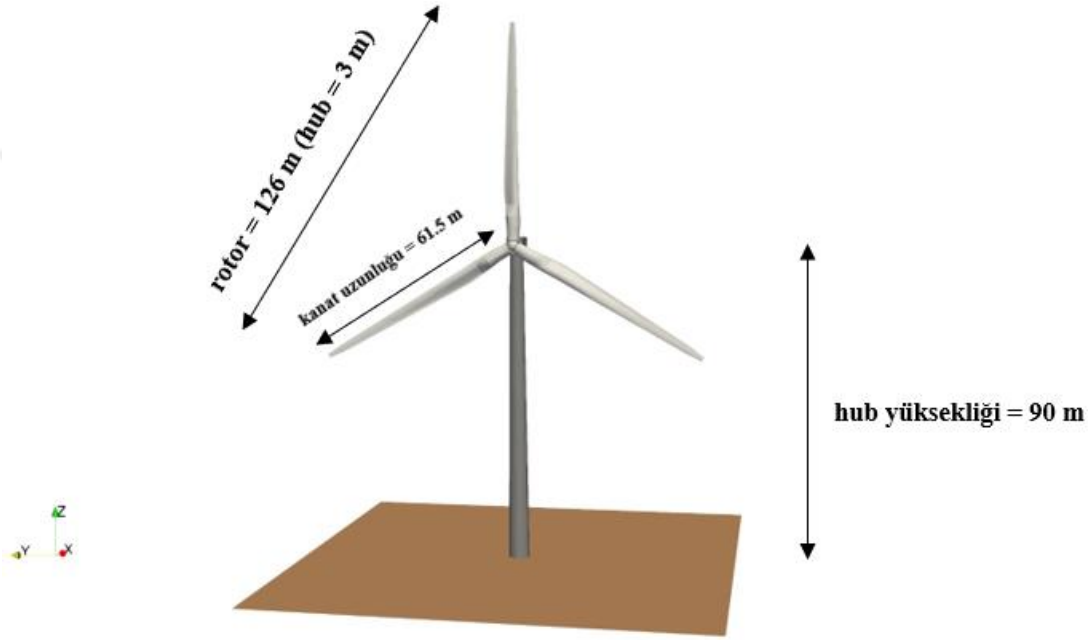


Şekil 4.2 : Türkiye deprem tehlike haritası [48].

4.3 5 MW Kara Tipi Rüzgar Türbin Modeli

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından modellenen 5 MW üretim gücüne sahip yatay eksenli karasal rüzgar türbini bu çalışmada referans türbin olarak seçilmiştir. Kule temeli ankastre mesnet koşulları dikkate alınarak incelenmiştir. Sismik yüklerin analizi için zemin türü ZC olarak kabul edilmiştir.

Söz konusu rüzgar türbini Şekil 4.3'de gösterildiği gibidir. Türbin özellikleri ise Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : 5 MW rüzgar türbini modeli.

Çizelge 4.1 : NREL 5MW taban rüzgar türbini modeli için brüt özellikler [56].

Güç	5 MW
Rotor Yönü, Konfigürasyonu	Rüzgara 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 Rüzgar 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

Çizelge 4.1 (devam) : NREL 5MW taban rüzgar türbini modeli için brüt özellikler [56].

Konsol, Şaft Eğimi, Precone	5 m, 5^o, 2.5^o
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)

4.3.1 Kanat yapısal özellikleri

NREL kara tabanlı 5 MW rüzgar türbini üç kanatlıdır. Her bir kanadın yapısal özelliklerini DOWEC çalışmasında kullanılan 62.6 m uzunluğunda LM Glasfiber bıçağın yapısal özelliklerine dayandırılmıştır. DOWEC çalışmasındaki kanatlar, gerçek REpower 5M makinesinde kullanılan 61.5 m uzunluğunda LM Glasfiber kanatlarından 1.1 m daha uzun olduğundan dolayı yapısal özellikleri elde etmek için 62.5 m olan kanatlar 61.5-m'de elde edilmiştir. Çizelge 4.2 kanat yapısal özellikleri listelemektedir.

Çizelge 4.2 : Kanat yapısal özellikleri [56].

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%

4.3.2 Nasel ve göbek özellikleri

NREL 5MW türbin modeli, DOWEC çalışması tarafından kullanılan kulenin tepesinden göbek yüksekliğine kadar aynı dikey mesafeyi (2,4 m) kullanır. Türbin sapma yatağının tabana olan uzaklığı 87.6 m olarak belirlenmiştir. Göbek yüksekliği ise 90 m'dir. Nacelle ve hub özellikleri, aşağıdaki Çizelge 4.3'te özetlenmiştir. Kule özellikleri ise Çizelge 4.4'deki gibidir.

Çizelge 4.3 : Nasel ve göbek özellikleri [56].

Sapma Yatağının Zeminden Yüksekliği	87.6 m
Sapma Yatağının Şaft'a Sapma Ekseni 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 Kütlesi	56,780 kg
Düşük Hızlı Milin Göbek Ataleti	115,926 kg.m^2
Nasel Kütlesi	240,000 kg
Sapma Ekseninde Nasel Ataleti	2,607,890 kg.m^2
Nacelle CM Konumu (Sapma Ekseni Rüzgar 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 4.4 : Kule özellikleri [56].

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

4.4 Tam Sistem Modeli için Doğal Frekanslar

Kule tam sistem modeli ile türbin elemanlarının doğal frekansları FAST koduyla hesaplanabilir. Böylece Çizelge 4.5'de türbin için ilk 15 mod verilmiştir. Frekans içeriklerinin belirlenmesi rezonans koşullarının dikkate alınmasında gereklidir. Bir önceki bölümde ele alınan mühendisler için bir tanı aracı Campbell Diyagramı dikkate alındığında kule frekansının istenilen aralıkta $0.22 < f_{n1} < 0.32$ Hz (1P-3P) olduğu söylenebilir. Bu tez çalışmasında yapılan analizlerde kule modları esas alınmıştır.

Çizelge 4.5 : Türbin tam sistem modeli için doğal frekanslar.

Mod	Frekans Tanım Bölgesi	Frekans
1	1.Kule Rüzgar Doğrultusunda (Fore-Aft)	0.324
2	1.Kule Rüzgara Dik Doğrultuda (Side-to-Side)	0.312
3	1.AktarmaElemanlarındaBurulma	0.6205
4	1. Kanat Asimetrik Düzlemdışı Sapma	0.664
5	1. Kanat Asimetrik Düzlemdışı Eğim	0.6675
6	1. Kanat Ortak Hareket	0.6993
7	1. Kanat Asimetrik Kenar Eğim	1.0793
8	1. Kanat Asimetrik Kenar Sapma	1.0898
9	2. Kanat Asimetrik Düzlemdışı Sapma	1.9337
10	2. Kanat Asimetrik Düzlemdışı Eğim	1.9223
11	2. Kanat Ortak Hareket	2.0205
12	2.Kule Rüzgar Doğrultusunda (Fore-Aft)	2.9003
13	2.Kule Rüzgara Dik Doğrultuda (Side-to-Side)	2.9361

4.5 Yüklerin Tanımlanması

Çalışma kapsamında türbin kendi ağırlığının yanında çevresel yüklere de maruz bırakılmıştır. Daha önce bahsedildiği gibi çevresel yüklemelerden olan sismik ve rüzgar yükleri esas alınmıştır.

4.5.1 Rüzgar yükleri

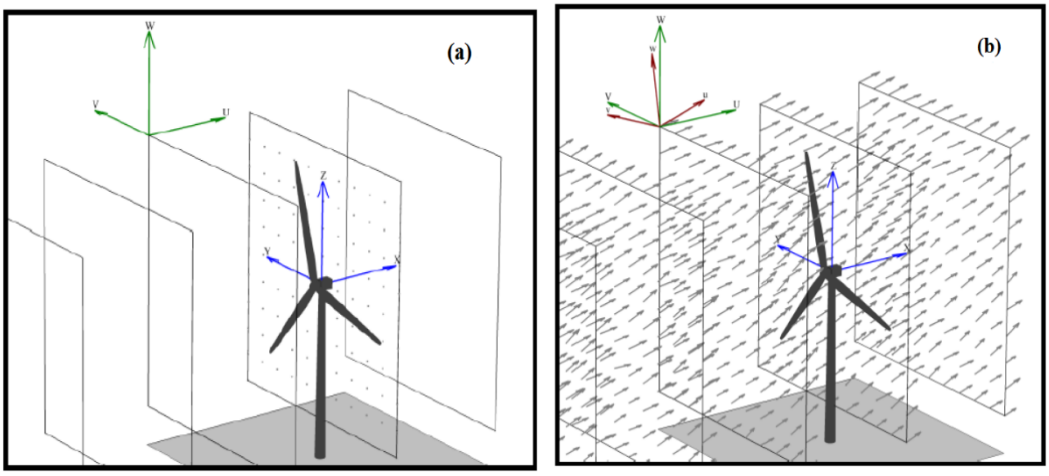
4.5.1.1 TurbSim Modulü

Operasyonel durum için 3 m/s'den 23 m/s hızına kadar ikişer artışla, rölanti durumu için ise 25 m/s'lik hızdan 50 m/s'lik hıza kadar beşer artışla rüzgar hızları seçilmiştir. Seçilen bu rüzgar verileri atmosferik türbülansa uyumlu Kaimal spektrumu ile modellenmiştir. 10 dakikalık rüzgar verileri esas alınmıştır. Türbin çalışmaya başladığında ilk saniyelerde kararsız olmasından dolayı başlangıç 30 saniye dikkate alınmamıştır. Bundan dolayı üretilen veriler 630 s olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.6'da ifade edilen türbin sınıfları IEC 61400-1'e göre türbülans yoğunluğu 15 m/s'de 0.14 olan orta turbülans karakterlerini ifade eden B sınıfı seçilmiştir. Dikkate alınan bu koşullar kullanılan simülasyon programında tanımlanmıştır.

Çizelge 4.6 : Rüzgar türbinleri için temel parametreler [8].

Rüzgar türbini sınıfları		I	II	III	S
Vref	(m/s)	50	42,5	37,5	
A	I_{ref}(-)		0,16		Tasarımcı tarafından belirtilen özel değerler
B	I_{ref}(-)		0,14		
C	I_{ref}(-)		0,12		

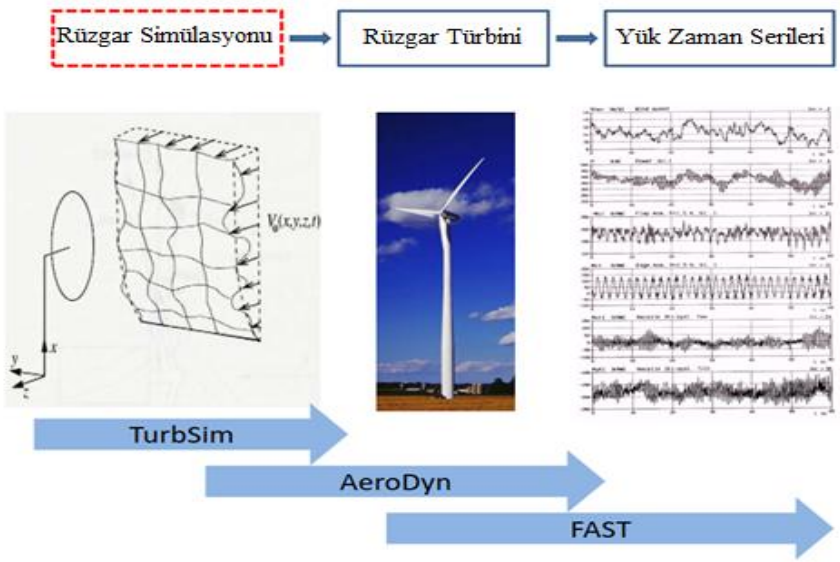
Rüzgar verileri, rüzgar simülasyonu programı olan TurbSim [57] koduyla modellenir. TurbSim stokastik, tam alanlı, türbülanslı bir rüzgar simülatörüdür. Uzayda sabitlenmiş iki boyutlu bir dikey dikdörtgen bir ızgaranın bölünmüş noktalardaki üç bileşenli rüzgar hızı vektörlerinin zaman serilerini sayısal olarak simüle etmek için istatistiksel bir model (fizik tabanlı bir modelin aksine) kullanır. Şekil 4.4 bir simülasyon örneğini temsil eder. Burada gösterilen simülasyon örneğinde rüzgar sadece x yönünde etki ettirilmiştir. Üç yönde rüzgar etki etmesi halinde ızgara üzerindeki her bir noktada üç rüzgar vektörü oluşturulur.



Şekil 4.4 : (a) AeroDyn'de uygulandığı şekliyle TurbSim ızgaraları.

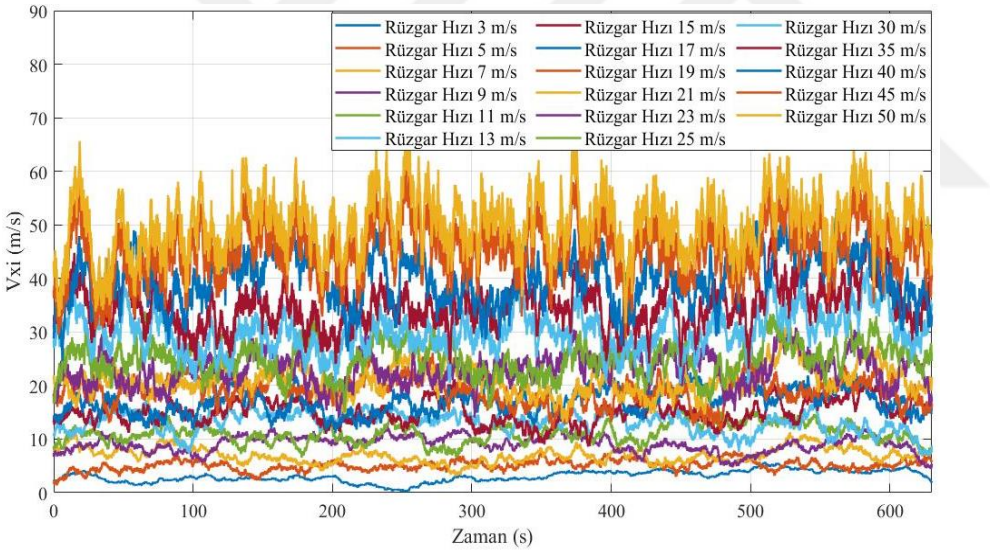
(b) Düşey yönde 8º ve yatay yönde 15º açılı aynı rüzgar alanı.

TurbSim'de simüle edilen veriler AeroDyn alt modulü sayesinde okunur. AeroDyn, yatay eksenli rüzgar türbini konfigürasyonlarının aeroelastik simülasyonları için aerodinamik hesaplamaları gerçekleştirmek için yazılmış bir seri rutindir ve BEM teorisi ile yükleri hesap eder. Daha sonra FAST programı bu yükleri türbin elemanları üzerindeki analizini gerçekleştirir. Şekil 4.5 bu akışı temsil eder. Bu çalışmada rüzgar yükleri bu akış altında incelenmiştir.



Şekil 4.5 : Analiz aşamaları.

Bu çalışmada TurbSim alt modulü sayesinde rüzgar yükleri Kaimal spektrumunu esas alarak simüle edilmiştir. Simüle edilen veriler Şekil 4.6'da zamana bağlı gösterilmiştir.

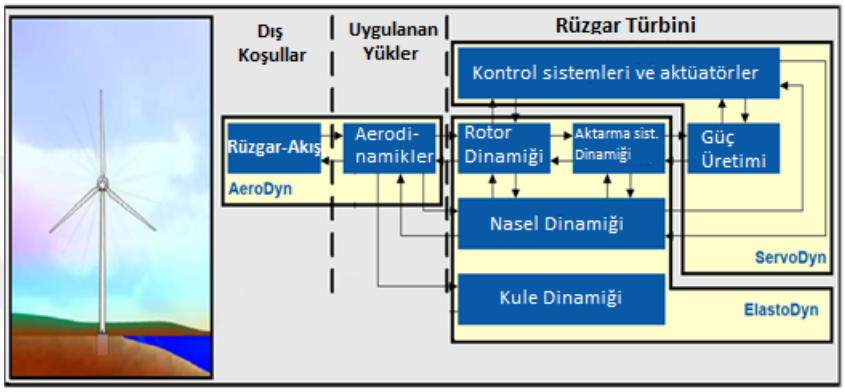


Şekil 4.6 : Rüzgar verileri.

4.5.1.2 FAST (Fatigue, Aerodinamik, Structures ve Turbulance) Kodu

İki ve üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinlerinin hem aşırı hem de yorulma yüklerini tahmin edebilen kapsamlı bir aeroelastik simülatördür [11]. Kanatlarda meydana gelen kaldırma ve sürüklenme yüklerinin etkilerini doğrudan inceleyebilir. Standartların öngördüğü farklı çalışma modlarının (acil kapanma, operasyonel, rölanti ve park modu vb.) modellenmesine izin verir. Bu yaklaşım ile birlikte öngörülen türbin ömrünün gerçeğe uygun olarak tahminini mümkün kılar.

Türbin kendi içerisinde farklı dinamik yapıları bulundurur. Çalışma esnasında yapı içerisinde oluşması beklenecek gerilmelerin tahmininde, yapısal davranışta bu dinamik katkıların bilinmesi hayati önem taşır. Türbin kule, nasel ve rotor dinamiğinin birbirleri üzerindeki etkisi bir önceki bölümde ele alınmıştı. Doğru olmayan bir etkileşim sonucu yapıda rezonans durumunu meydana gelebilir. Yapısal dinamiği alt modulleriyle gösterebilen FAST, kontrol sistemleriyle de türbin için en az yükleme ile en çok enerji üretimini hedef kılar. FAST kodunun kendi içerisindeki çalışma prensibi aşağıda Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



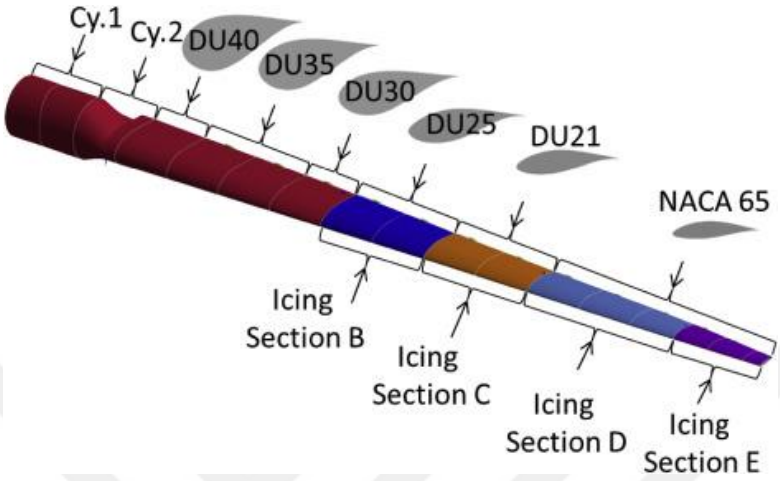
Şekil 4.7 : FAST programı analiz akış diyagramı.

FAST bu sistemlerin çalışmasını AeroDyn, ElastoDyn, ServoDyn alt modulleri ile sağlar. Bir de bu çalışmada kullanılan son yıllarda eklenen sismik modülü ile rüzgar ve sismik yüklerin etkisini birarada inceleme imkanı doğmuştur.

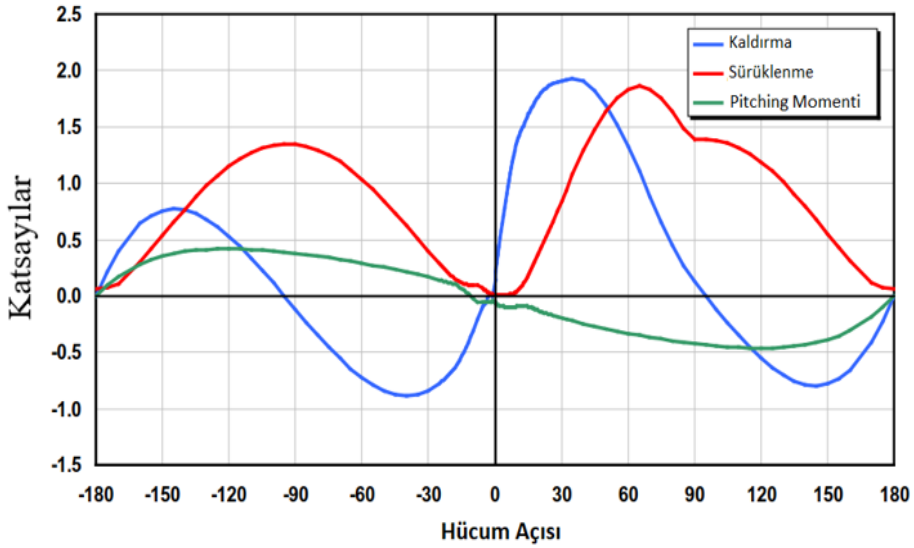
AeroDyn

AeroDyn, yatay eksenli rüzgar türbini konfigürasyonlarının aeroelastik simülasyonları için aerodinamik hesaplamaları gerçekleştirmek için yazılmış bir seri rutindir. AeroDyn rüzgar türbini kanatları boyunca aerodinamik kaldırma, sürüklenme kuvvetleri ve eğim (pitching) momentini hesaplayabilme özelliklerine sahiptir. Bunları öncelikle her bir kanat için AeroDyn giriş dosyasında tanıtıldığı gibi kanatları bölerek yapar. 5 MW türbini için kanat profilleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir. AeroDyn, türbin geometrisi, çalışma koşulu, kanat elemanı hızı, konumu, giriş dosyalarından ve aeroelastik simülasyon programından gelen rüzgar akışı hakkında aynı anda bilgi toplar. Daha sonra bu bilgiyi aeroelastik simülasyon programı tarafından türbin kanatları üzerindeki dağıtılmış kuvvetleri her bölümdeki çeşitli kuvvetleri hesaplamak için kullanır. AeroDyn modelleri iki boyutlu yerel akışa dayalı ilişkileri kullanır ve kanat boyunca kanatların özellikleri tipik olarak rüzgar tüneli testlerinde ölçülen

kaldırma, sürüklenme kuvvetleri ve eğim (pitching) momenti katsayıları ile temsil edilir [58]. Bu çalışmada kullanılan kanat profillerinden bir tanesi için bu katsayıların gösterimi Şekil 4.9'da örnek olarak sunulmuştur [56]. Buradaki hesaplamalar önceki bölümde bahsedilen denklem 3.8'deki eşitlikleri dikkate alır.



Şekil 4.8 : 5 MW türbini için kanat profilleri [56].



Şekil 4.9 : DU40 kanat profilinin düzeltilmiş katsayıları [56]

ElastoDyn

Elastodyn alt modülü, FAST programının çalışma esasını oluşturur. Verilen girdi dosyalarından yüklemeleri ve kontrol sistemlerinin etkisini dikkate alarak hareket denklemi esasıyla üç kanatlı bir rüzgar türbini için 24 serbestlik dereceli sistemi çözebilen bir modüldür. Kanatların, kulenin ve diğer modal dinamik yapıların birbirleriyle olan yapısal dinamik etkilerini ortaya koyar. Yapıdaki atalet, rijitlik ve

sönümleme etkilerini de dikkate alır. Analiz sonucunda yer değiştirmeleri, hızları, ivmelenmeleri ve iç kuvvetleri ElastoDyn hesaplar [11]. Diğer modüllerin çalışması için olmazsa olmazdır.

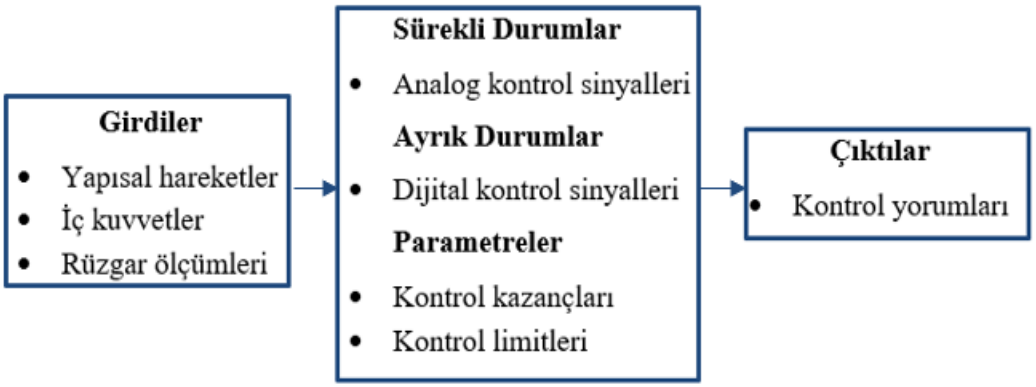
Çalışma esası Şekil 4.10'daki akış diyagramı ile özetlenebilir;



Şekil 4.10 : ElastoDyn çalışma mekanizması.

ServoDyn

ServoDyn alt modülü kontrol sistemlerini içerisinde barındırır. Kontrol sistemleri türbin çalışmasında büyük önem arz eder. Türbinin ömrünü kontrol eden bu sistemler sayesinde oluşabilecek elverişsiz yüklemelerden kaçınılır. Türbin operasyonel durumda iken rüzgar hızına göre rotorun konumlanmasını sağlayan bir sapma sistemine ve rotorun rüzgar yönünde sapmasıyla kanatların eğim yapabilmesini sağlayan bir kanat eğim sistemine sahiptir. Bu sayede rüzgardan en iyi şekilde faydalanılırken kanatlarda oluşabilecek fazla yüklerden kaçınılır. Türbin üzerindeki yüklemeler en aza indirilirken enerji üretimi maksimum seviyeye çıkarılmaya çalışılır. Diğer bir kontrol sistemi ise rüzgar hızı ile ilgilir. Türbin belirli bir rüzgar hızı seviyesinden sonra oluşabilecek hasarları önlemek için kendi kendini aerodinamik frenleme ile kapatma sistemine sahiptir. ServoDyn bu kontrol sistemleri ile türbin enerji üretiminin nominal seviyede devam etmesini sağlar [11]. Bu çalışmada rüzgar tek yönde geldiği için rotor sapma sistemi efektif çalışmazken, kanatlar rüzgar hızına göre eğim yaparak nominal hızdan sonra enerji üretimini sabit tutmaya çalışacaktır. Türbin maksimum 25 m/s hızda çalıştığı için bu hızdan sonra rotor dönmesini durduracaktır. Şekil 4.11'de ServoDyn çalışma sistemi özetlenmiştir;



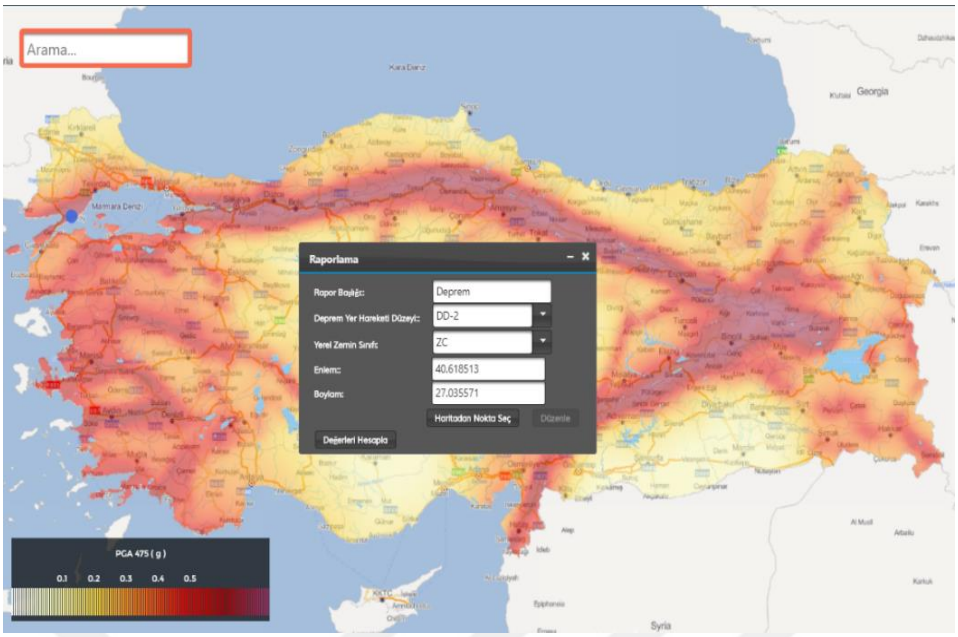
Şekil 4.11 : ServoDyn çalışma mekanizması.

Sismik Modülü

Rüzgar türbinlerinde sismik etkilerin incelenmesi erken dönemlerde yalnızca kule odaklıydı. Türbin kütlesi kule üzerinde yığılı kütle modeliyle ele alınıyordu. Bu durum türbin elemanlarının dinamik etkilerinin göz ardı edilmesine neden oluyor ve gerçekçi sonuçlar vermeyebiliyordu. FAST koduna sismik modülün eklenmesiyle birlikte rotor bölgesinde dinamik etkilerin de dikkate alınmaya başlamasını sağladı. Bu modül ile aerodinamik ve türbin kontrolü, yüksek modların geliştirilmiş gösterimi ve kule yükleri dışındaki yükler de dahil edildi. Sismik modülü üç yönlü deprem analizine izin verir ve platform için üç yönde serbestlik tanımlayarak analizi mümkün kılar [59].

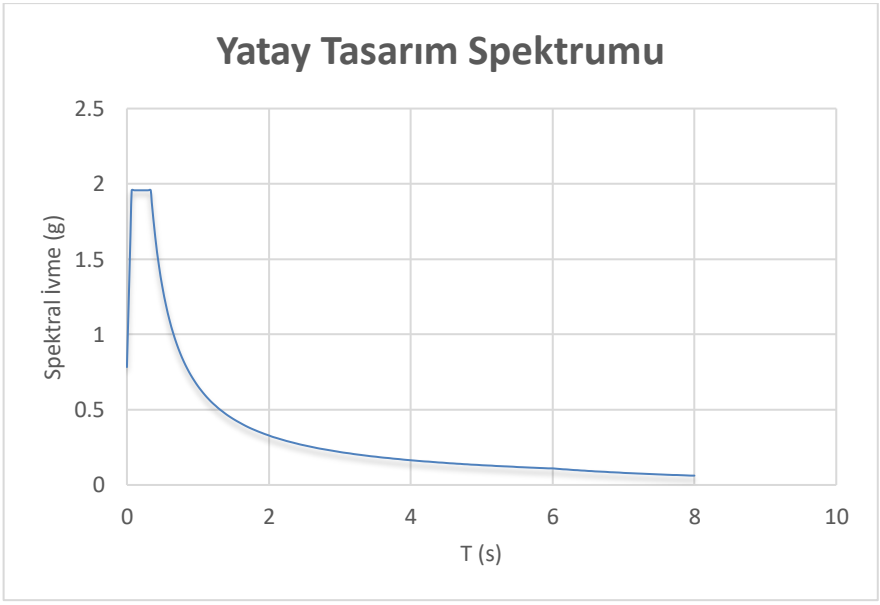
4.5.2 Sismik Yükler

Zaman tanım alanında hesap yöntemi için seçilecek deprem kayıtlarının türbinin bulunduğu bölgeyle uyumlu olması gerekir. Öncelikle seçtiğimiz bölgenin hedef tasarım spektrumu TBDY 2018'in öngördüğü gibi Şekil 4.12'de gösterilen Türkiye Deprem Tehlike Haritası'ndan belirlenmiştir. Yer hareketi düzeyi DD-2 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) ve yerel zemin sınıfı ZC (çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar) olarak seçilmiştir. Referans türbin için temel bağlantısı ankastre mesnet koşullarına göre modellenmiştir. Sismik analiz için bölge seçimi ve kayıt seçimlerinde öncelik zemin sınıfı ZC olarak kabul edilmiştir. Yetersiz kayıt seçiminde ZD zemin sınıfına ait kayıtlar da bu çalışmada kullanılmıştır. Haritadan seçilen bölge 40.62 enleminde ve 20.04 boylamında aktif deprem kuşağında yer almaktadır.



Şekil 4.12 : Türkiye deprem tehlike haritası.

Elde edilen rapora göre PGA değeri 0.667, PGV değeri 55.645, S_S değeri 1.631, F_S değeri 1.2, S_1 değeri 0.438, F_1 değeri 1.5, S_{D1} değeri 0.657, S_{DS} değeri 1.957 olarak bulunmuştur. Bu doğrultuda düşey ve yatay tasarım spektrumları Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Yatay tasarım spektrumu için köşe periyotları T_A ve T_B sırasıyla 0.05 ve 0.335 s; düşey tasarım spektrumu için bu değerler sırasıyla 0.05 ve 0.112 s'dir.



Şekil 4.13 : Yatay elastik tasarım ivme spektrumu.



Şekil 4.14 : Düşey elastik tasarım ivme spektrumu.

4.5.2.1 Yer hareketi kayıtlarının seçilmesi

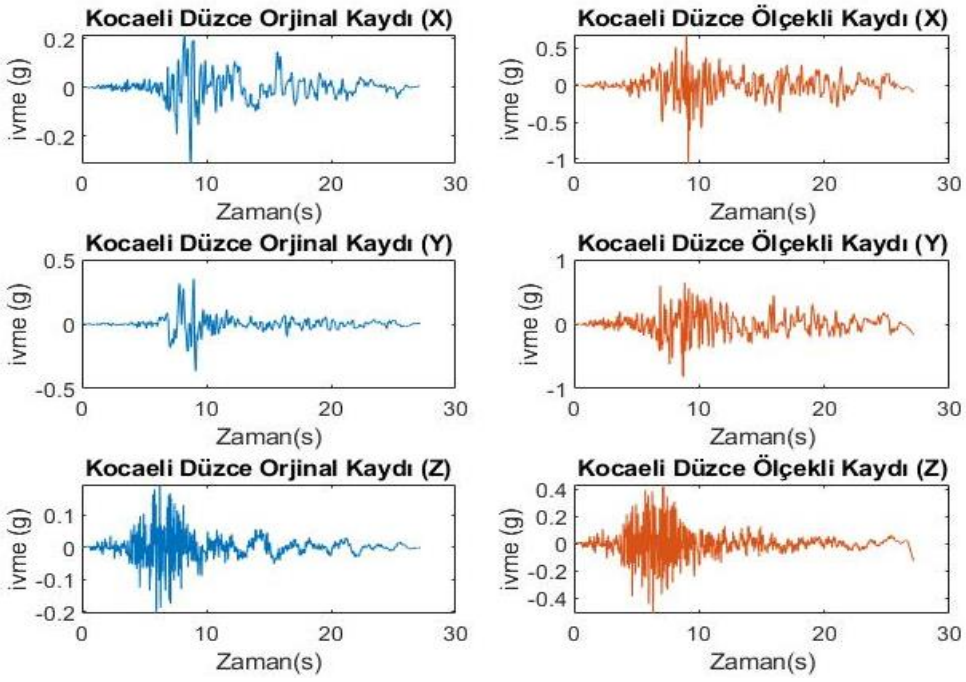
Zaman tanım alanında hesap için TBDY 2018 yönetmelik benzeştirilmiş veya kaydedilmiş deprem kayıtları seçmeyi önerir. Kaydedilmiş deprem kayıtları hem tasarım yapılacak bölgeye hem de hedef tasarım spektrumu ile uyumlu olarak seçilmelidir. Bu çalışmada kaydedilmiş deprem kayıtları yönetmeliğin kuralları dikkate alınarak seçilmiştir. Deprem ivme kayıtları seçiminde farklı etkileri dikkate alabilmek için hem yakın hem de uzak fay türleri seçilmiştir. Zemin sınıfı olarak türbinlerin yüksek yapılar olması nedeniyle öncelikle ZC sınıfı seçilmiş ve kayıtların yetersiz kaldığı durumlarda ZD zemin sınıfına göre filtrelenmiştir. Deprem büyüklükleri 6 ile 8 moment büyüklüğünde değişmektedir. Yönetmelik gereğince en az 11 deprem yer hareketi seçilmesi gerekir. Bu çalışmada 14 güçlü yer hareketi kaydı seçilmiş ve bir deprem için en fazla iki farklı istasyon kaydı kullanılmıştır. Dikkate alınan tüm bu seçeneklere göre Çizelge 4.7'de seçilen deprem kayıtları listelenmiştir.

Seçilen deprem kayıtları TBDY 2018 yönetmeliğine göre tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirme yöntemi olarak ilgili yönetmeliğin önerdiği yöntemlerden biri olan zaman tanım alanında ölçeklendirme yapılmıştır. Bu şekilde kaydın frekans içeriğini değiştirmeden genliğini değiştirerek spektrumlar ile benzeştirilmiştir. Ölçekleme işlemleri Seismomatch programı yardımı ile yapılmıştır. Gerçek deprem kayıtları ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtları aşağıda Şekil 4.15'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 : Seçilen yer hareketi kayıtları.

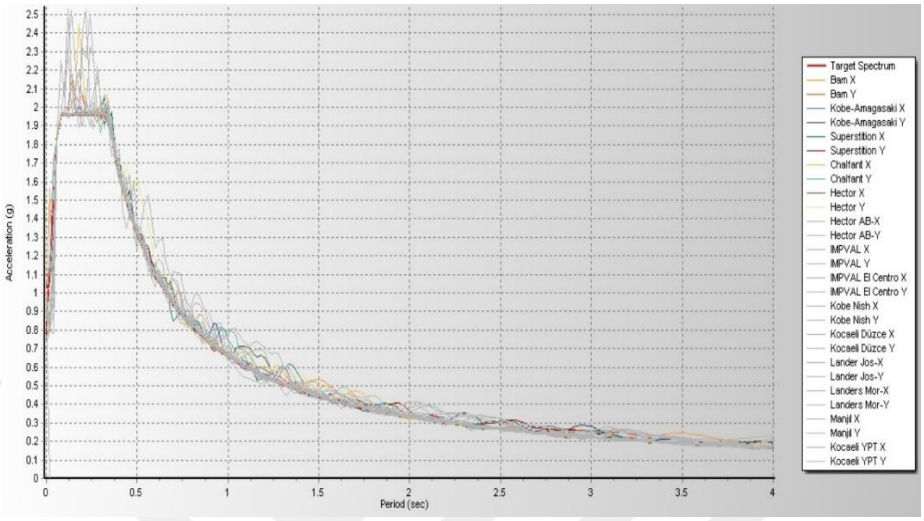
Deprem	Mw	İstasyon	Zemin Sınıfı	Fay Uzaklığı (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Ölçek Faktörü
Chalfant Vadisi, Kaliforniya ABD	6.2	Benton	ZC	22	0.21	13.67	2.93	3.6
Manjil, İran	6.2	Abbar	ZC	13	0.5	50.6	23.81	1.6
Imperial Valley	6.5	Superstition Mtn	ZC	25	0.2	8.92	2.77	3.8
Imperial Valley	6.5	El Centro	ZC/ZD	19.76	0.38	44.61	21.32	2.2
Superstition, Kaliforniya	6.6	El Centro	ZD	18.2	0.35	48	19.27	2.1
Bem, İran	6.6	Bem	ZC	0.05	0.808	124.12	33.94	1.1
Kobe, Japonya	6.9	Amagasaki	ZD	11.34	0.33	44.84	27.8	2.5
Kobe, Japonya	6.9	Nishi-Akashi	ZC	17.36	0.48	46.83	8.41	1.6
Hector Mine	7.1	Hector	ZC	11	0.328	44.78	10.7	2.6
Hector Mine	7.1	Amboy	ZC	42	0.18	27.61	13.66	5.0
Landers	7.3	Joshua Tree	ZC	31.06	0.28	42.6	15.78	2.8
Landers	7.3	Morongo	ZC	17.36	0.223	29.94	5	3.4
Kocaeli, Türkiye	7.5	Düzce	ZC	13.6	0.31	58.87	44.06	2.6
Kocaeli, Türkiye	7.5	Yarımca	ZC/ZD	17	0.32	60.5	54.7	3.7

Burada örnek olması açısında yakın fay etkisinin dikkate alındığı Kocaeli depreminin Düzce istasyonu kaydı orijinal kayıt ve eşleştirilmiş kayıt olmak üzere her üç yön için Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Diğer deprem kayıtları için orijinal ve eşleştirilmiş kayıtlar EK A'da listelenmiştir.

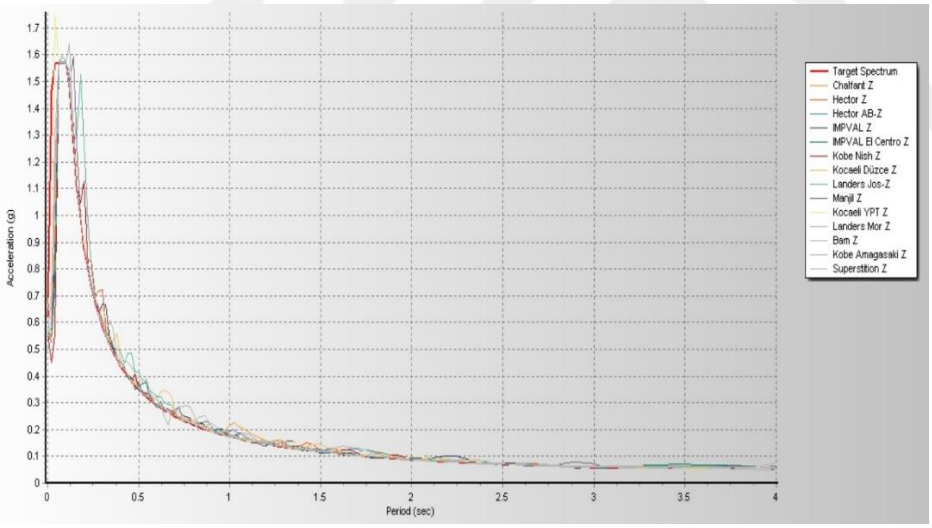


Şekil 4.15 : Kocaeli Düzce İstasyonu kaydı.

SeismoMatch programı yardımıyla hedef tasarım spektrumu ile eşleştirilmiş 14 x ve 14 y doğrultusunda olmak üzere 28 farklı yatay yer hareketi kaydı Şekil 4.16'da ve aynı şekilde 14 düşey yer hareketi kayıtları Şekil 4.17'deki gösterildiği gibi eşleştirilmiştir.



Şekil 4.16 : Yatay deprem kayıtlarının yatay tasarım spektrumu ile eşleştirilmesi.



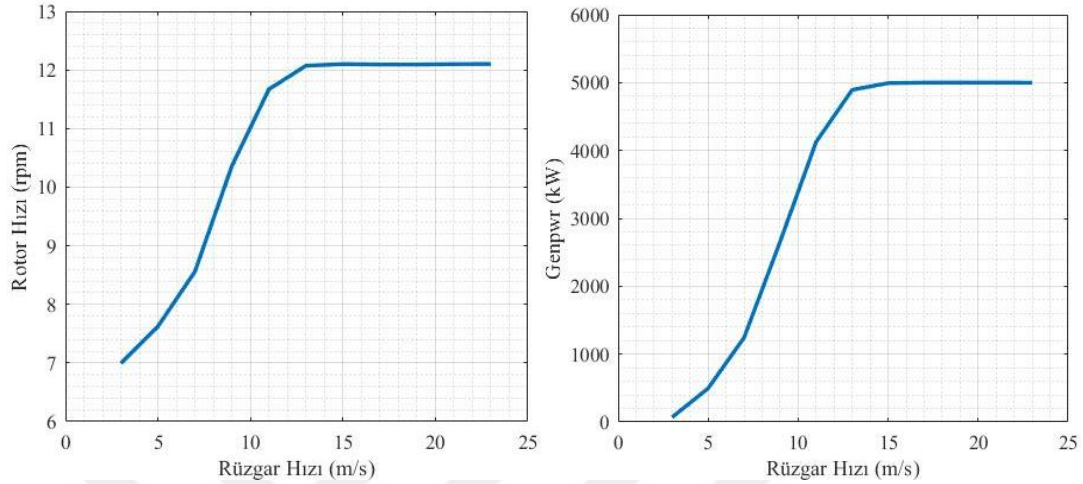
Şekil 4.17 : Düşey deprem kayıtlarının düşey tasarım spektrumu ile eşleştirilmesi.

4.6 Analiz

Mevcut 5 MW yatay eksenli çelik rüzgar türbini beş farklı durum için analiz edilmiştir. Bunlardan ilki normal çalışma durumunda iken depremin etki etmediği, türbin park durumunda iken depremin etki ettiği, bir diğeri normal çalışma durumunda iken bir süre sonra depremin etki ettiği ve türbin rölanti modunda iken depremin etki ettiği ve etmediği durumlardır.

4.6.1 Türbin normal çalışma halinde iken depremin etki etmediği durum

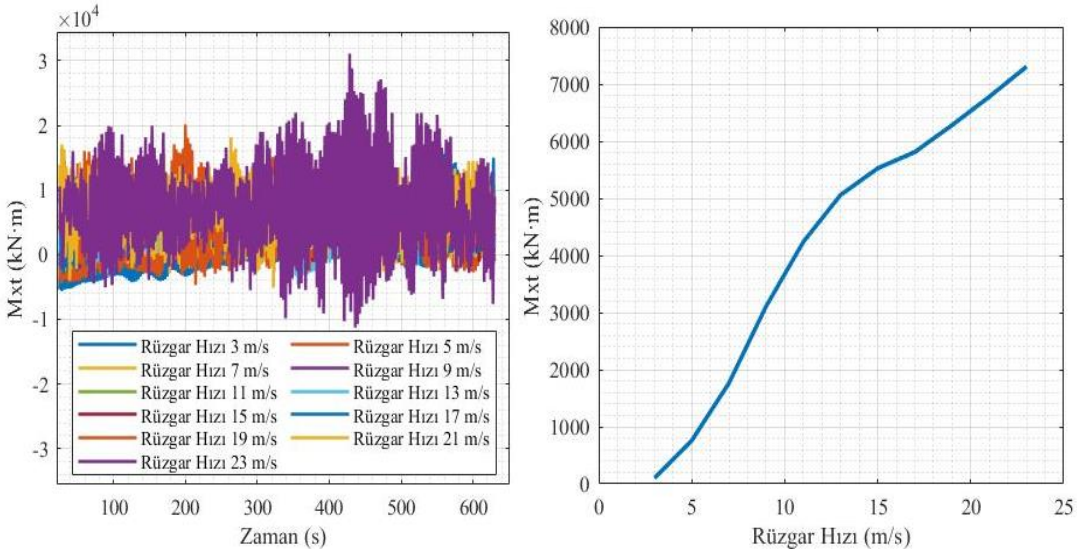
Bir sonraki analiz seçeneği için karşılaştırmalı bir çalışma olması amacıyla öncelikle türbin için normal çalışma koşulları belirlenmelidir. 3 m/s'den 23 m/s'ye kadar değişen 11 farklı rüzgar hızları için bir dizi analiz yapılmıştır.



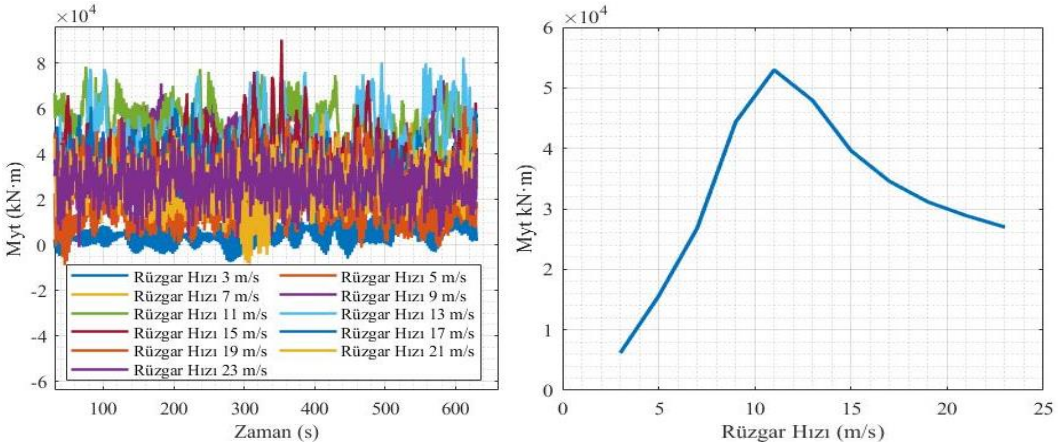
Şekil 4.18 : Rüzgar hızlarına göre rotor hızı ve üretilen enerji (depremsiz).

Türbin için maksimum rotor hızı 12.1 rpm ve bu rotor hızında türbin maksimum üretim gücüne sahip olmuştur. Şekil 4.18'de değişen hızlara göre ortalama rotor hızı ve üretim gücü gösterilmiştir. Türbin için maksimum enerji üretimi 11.4 m/s rüzgar hızında olmaktadır. Bu hızda türbin 12.1 rpm'lik rotor hızına da ulaşmış olur.

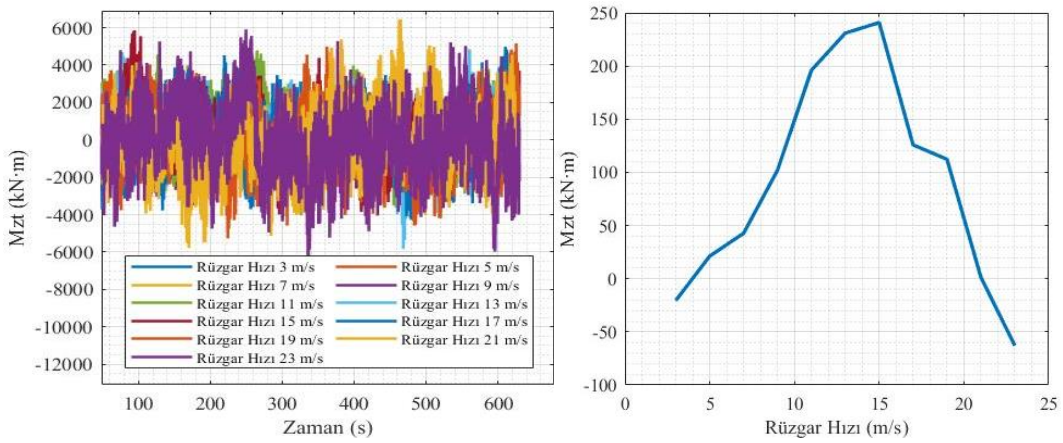
Belirtilen rüzgar hızlarının türbine etki ettirilmesinin sonucunda kule tabanında oluşan momentler Şekil.4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.19 : Zamana ve rüzgar hızlarına göre X yönünde kule taban momentleri.



Şekil 4.20 : Zamana ve rüzgar hızlarına göre Y yönünde kule taban momentleri.



Şekil 4.21 : Zamana ve rüzgar hızlarına göre Z yönünde kule taban momentleri.

Çizelge 4.8 hızlara göre üç yönde oluşan maksimum ve ortalama taban momentleri tablo olarak göstermektedir. Burada rüzgar hızı arttıkça hakim rüzgar yönü olan X'in meydana getirdiği maksimum M_y taban momentlerinde belirli bir akış olmadığı söylenilebilir.

Çizelge 4.8 : Rüzgar yüklemesinden oluşan maksimum taban momentleri.

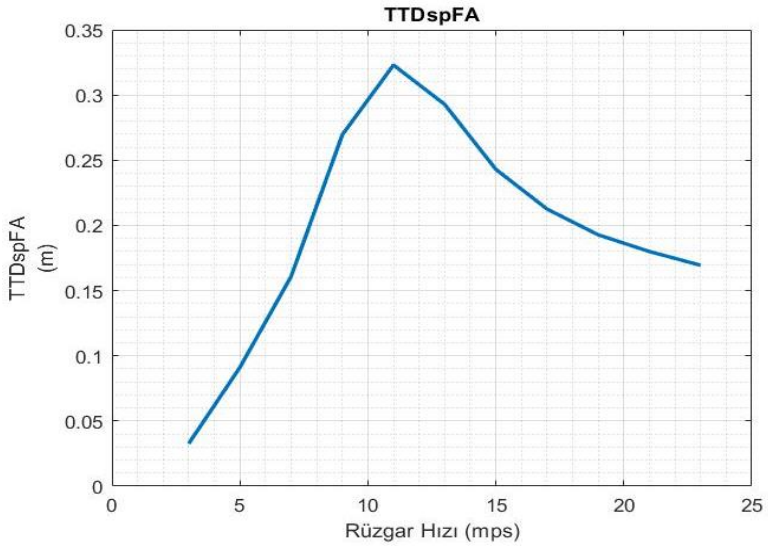
Rüzgar yüklerinden oluşan maksimum taban momentleri			
Rüzgar Hızı (m/s)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)
3	5605.1	22173	1487.8
5	6058.8	37521	3575.5
7	6961	53931	3340.5
9	7638.9	72846	3790.7
11	10335	78377	4789.5
13	12866	82328	5832.2
15	13451	90235	5859.2
17	15627	62629	4977.3
19	20144	61149	5263
21	18157	57602	6455.5
23	31103	59099	6658.3

Nominal hızdan (11.4 m/s) sonra türbin kontrol sistemleri aşırı yüklemeden dolayı rotordaki rüzgar yüklerini azaltmak için belirli açılar ile kule tepesinde sapmalar meydana getirir. Bu sapmalar ile kuledeki iç kuvvetler kontrol altına alınmış olur. Maksimum taban momentleri için düzgün bir akış görülemezken ortalama taban momentlerinde nominal hızdan sonra M_y değerleri Çizelge 4.9'da da görüldüğü gibi azaldığı söylenebilir. M_x ve M_z taban momentlerinde oluşan dalgalanmanın nedeni türbülanslı rüzgar verilerinin o yönlerdeki etkileridir.

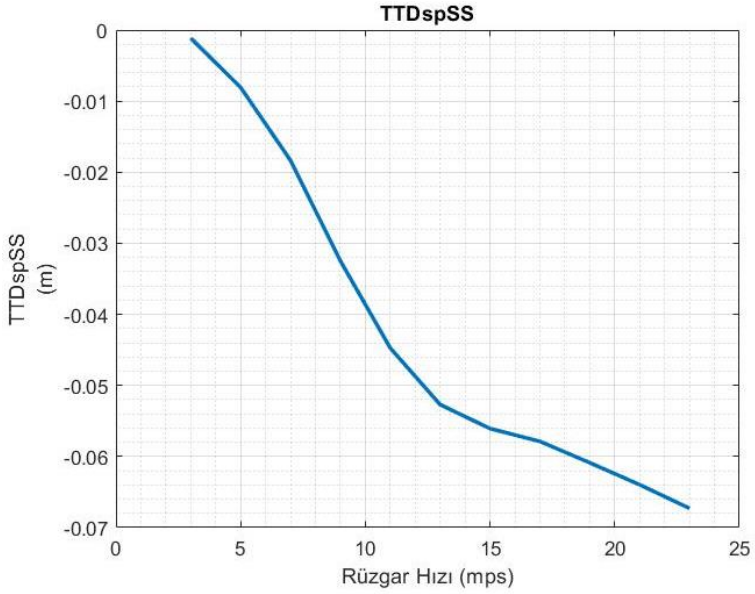
Çizelge 4.9 : Rüzgar yüklemesinden oluşan ortalama taban momentleri.

Rüzgar yüklerinden oluşan ortalama taban momentleri			
Rüzgar Hızı (m/s)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
3	1288.9	6585.8	313.38
5	1479.3	15648	690.35
7	1981.3	26856	878.85
9	3179.2	44351	887.06
11	4236.6	52962	1082.4
13	5156.1	47917	1025.3
15	5532.9	39610	1107.9
17	5852.6	34542	1228.5
19	6405.6	31132	1210.3
21	6832.5	28864	1385.6
23	7923.4	26973	1529.1

3-23 m/s arasındaki rüzgar hızlarında kule tepe noktası için rüzgar doğrultusunda (fore-aft) ve rüzgara dik doğrultudaki (side to side) yer değiştirmeleri Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22 : Değişen hızlara göre rüzgar doğrultusundaki tepe noktası yer değiştirmeleri.



Şekil 4.23 : Değişen hızlara göre rüzgara dik doğrultudaki tepe noktası yer değiştirmeleri.

4.6.2 Türbin park halinde iken depremin etki ettiği durum

Bu analiz seçeneğinde yalnızca deprem yüklerinin etki etmesiyle tekil sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun temel sebebi rüzgar ve deprem yüklerinin birlikte etki etmesi durumunda yapı davranışının nasıl değiştiğini ortaya koymaktır. Bu analizler sonucunda tasarımcılar için belirli katsayıların önerilmesi planlanmaktadır.

Burada 14 farklı deprem kaydının üç yönlü analizi gerçekleştirilmiştir. Tabandaki momentler esas alınarak katsayı önerilecektir. Çizelge 4.10'da Kocaeli depreminin Düzce istasyonu kaydının tabanda oluşturduğu momentler gösterilmiştir. Diğer deprem kayıtları için analiz sonuçları Ek B'de sıralanmıştır.

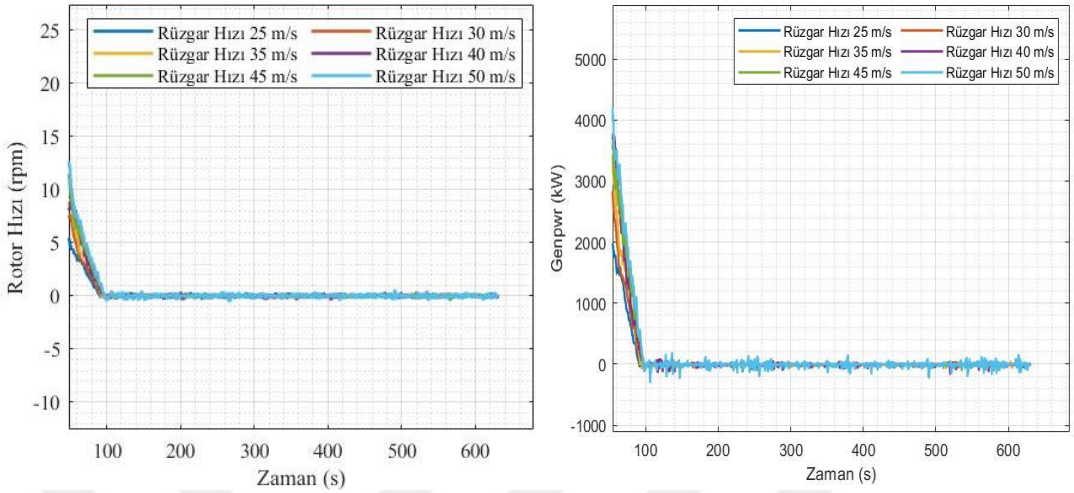
Çizelge 4.10 : Kocaeli Düzce istasyonu kaydı analiz sonuçları.

Ortalama taban momentleri			Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
9132	17421	80	116100	159910	1779

4.6.3 Türbin rölanti durumunda iken rüzgar yüklerinin etki etmesi

5 MW yatay eksenli türbinin alabileceği maksimum rüzgar hızı 25 m/s idi. Bu hızda kule tepe noktasındaki ivme 2 m/s^2 değerine ulaşır. Böylece kanatların sapma açısı 90^o olur ve türbin rölanti moduna geçer, kanatlar rüzgara paralel olacak şekilde konumlanır. Kanatlara uygulanan kaldırma yükü minimum seviyeye iner ve rotor

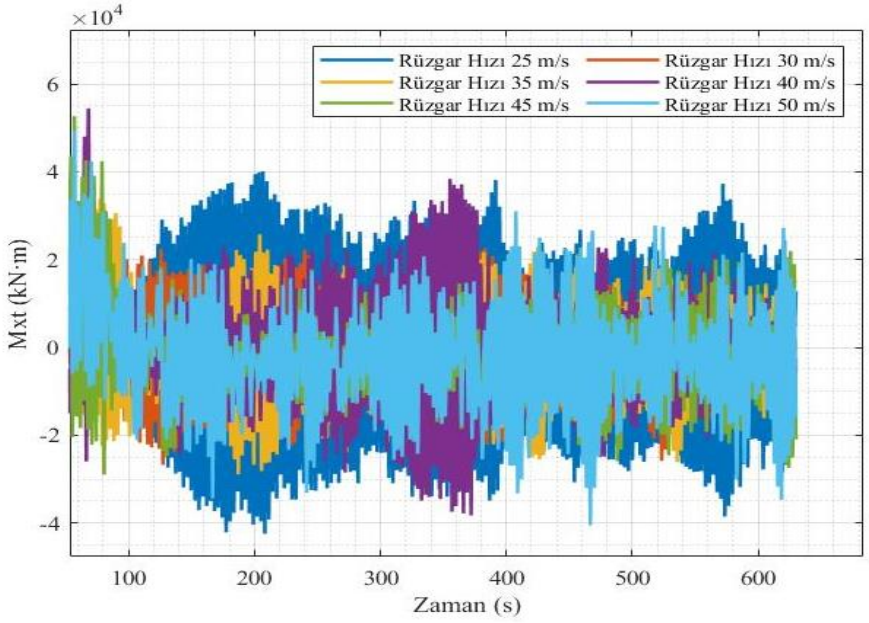
dönmeyi durdurur. Rotor dönmediği için herhangi bir güç üretimi olmaz. Burada türbin tam olarak park moduna geçmez, kanatlar eğim açısını arttırdığı için herhangi bir tork üretimi olmaz. Bu durum rölanti modu olarak adlandırılabilir.



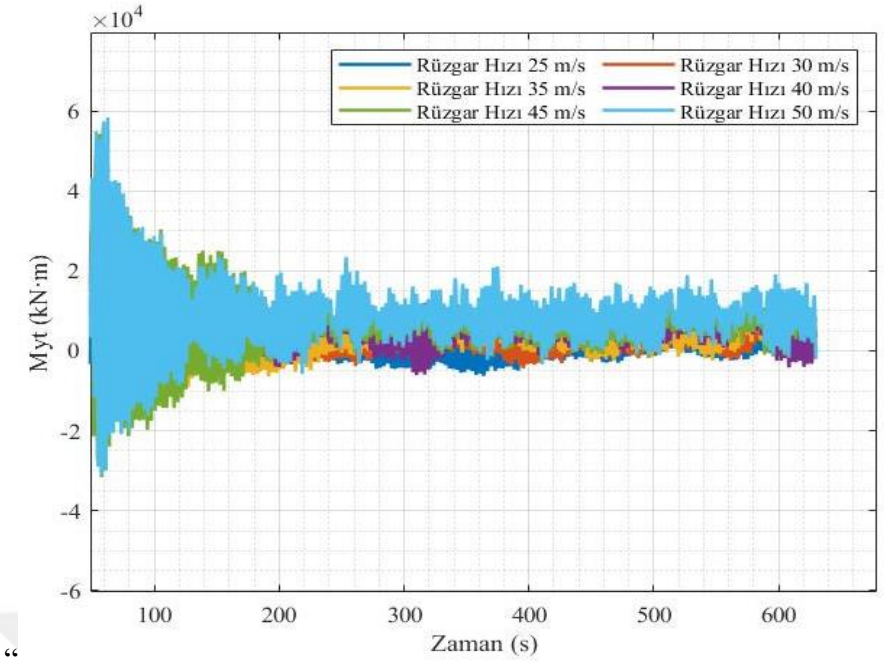
Şekil 4.24 : Rüzgar hızlarına göre rotor hızı ve üretilen enerji (depremsiz rölanti).

Burada rölanti modunun etkilerini görmek için türbine 25 m/s'den 50 m/s hızına kadar beşer artışla türbülanslı rüzgar hızları etki ettirilmiştir. Türbin bu hal için enerji üretimi gerçekleştiremez (Şekil 4.24).

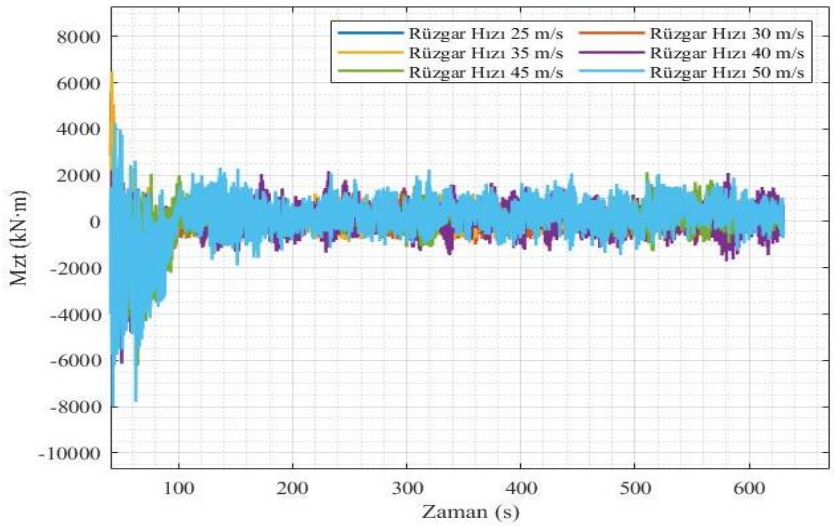
Yüksek rüzgar hızlar için türbin kule tabanında her üç yönde de moment oluşumu Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27deki gibi gerçekleşmiştir.



Şekil 4.25 : Zamana göre X yönünde kule taban momentleri.



Şekil 4.26 : Zamana göre Y yönünde kule taban momentleri.



Şekil 4.27 : Zamana göre Z yönünde kule taban momentleri.

Rölanti durumunda uygulanan yüksek rüzgarların meydana getirdiği ortalama taban momentlerine bakıldığında genel olarak rüzgar hızıyla doğru orantılı bir şekilde artış meydana gelmiştir. X ve Y yönündeki moment değerlerinin Z yönüne göre büyük olmasının temel sebebi X yönünde etki eden rüzgarın türbülanslı rüzgar olmasından kaynaklanmaktadır. Z yönünde oluşan taban momentleri rotor hareketinden dolayı meydana gelmektedir. Bu durum için rotor çalışmamaktadır. Başlangıçta bir süre

rotorun çalışması sonucu Z yönünde tabanda moment oluşturmuştur. Maksimum ve ortalama taban mometleri Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de ifade edilmiştir.

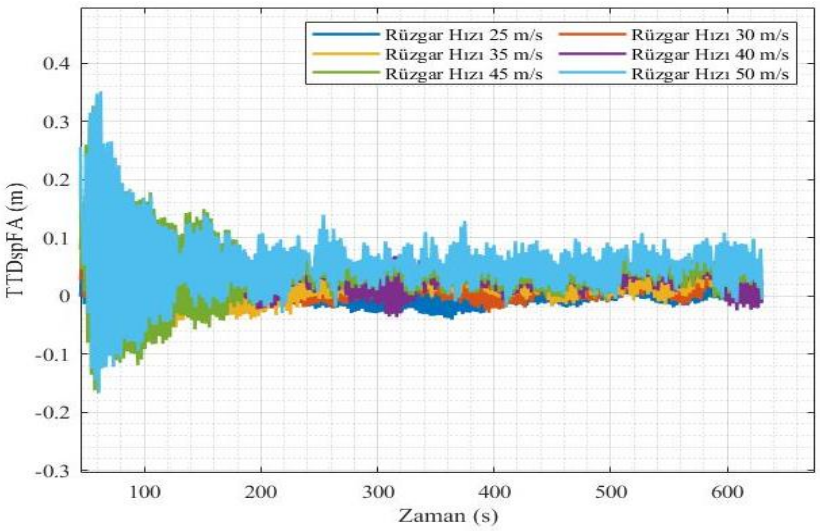
Çizelge 4.11 : Rüzgar yüklemesinden oluşan maksimum taban momentleri.

Rölanti Modunda Deprem Etki Etmediği Durumdaki Maksimum Taban Momentleri			
Rüzgar Hızı (m/s)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
25	42459	39810	3385.1
30	31153	44250	6725.8
35	33840	36015	7867.3
40	54427	45843	8046.3
45	52672	57402	8361
50	59349	69160	9409.1

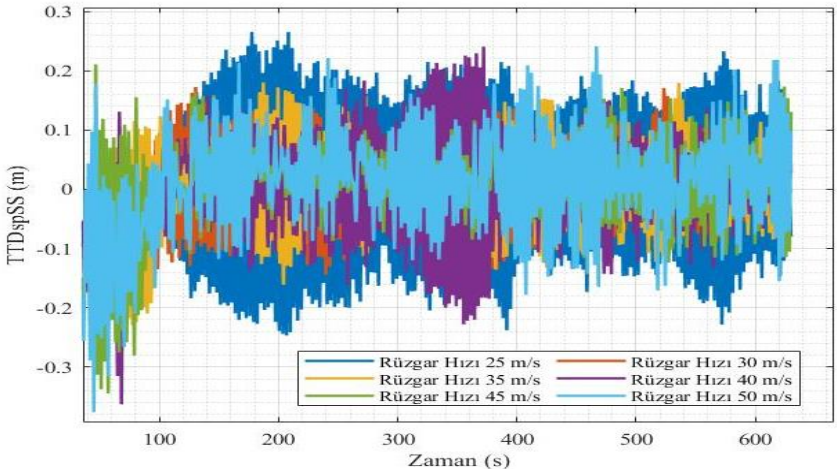
Çizelge 4.12 : Rüzgar yüklemesinden oluşan ortalama taban momentleri.

Rölanti Modunda Deprem Etki Etmediği Durumdaki Ortalama Taban Momentleri			
Rüzgar Hızı (m/s)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
25	15990	2829.2	262.75
30	8452.6	3490	372.15
35	8720.4	4880.5	427.02
40	9723.2	5728.3	575.64
45	9253.3	8724.9	580.96
50	9738.8	10238	681.88

Rölanti durumunda Şekil 4.28 ve 4.29'da görüldüğü gibi tepe noktası ortalama yer değiştirmeleri rotor hareketi olmadığından dolayı çok küçük mertebelerde kalmıştır.



Şekil 4.28 : Değişen hızlara göre rüzgar doğrultusundaki tepe noktası yer değiştimeleri.

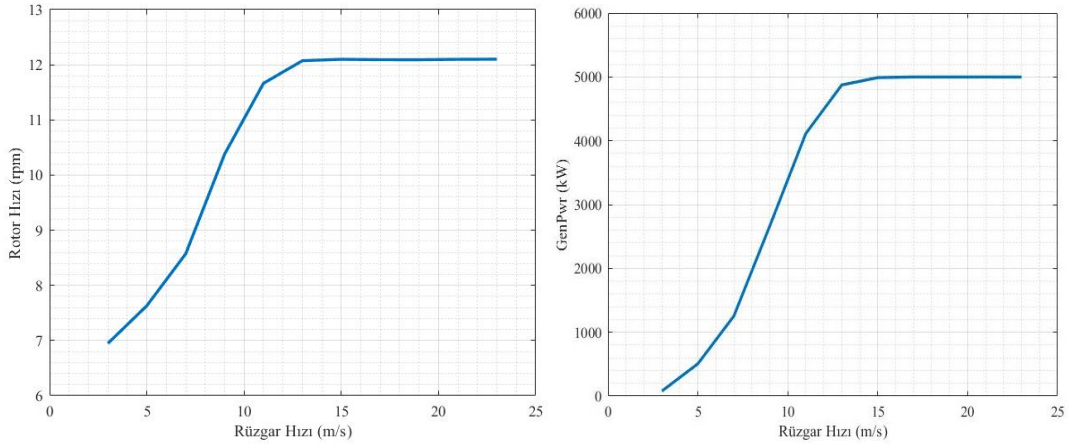


Şekil 4.29 : Değişen hızlara göre rüzgara dik doğrultudaki tepe noktası yer değiştimeleri.

4.6.4 Türbin normal çalışma halinde iken depremin etki ettiği durum

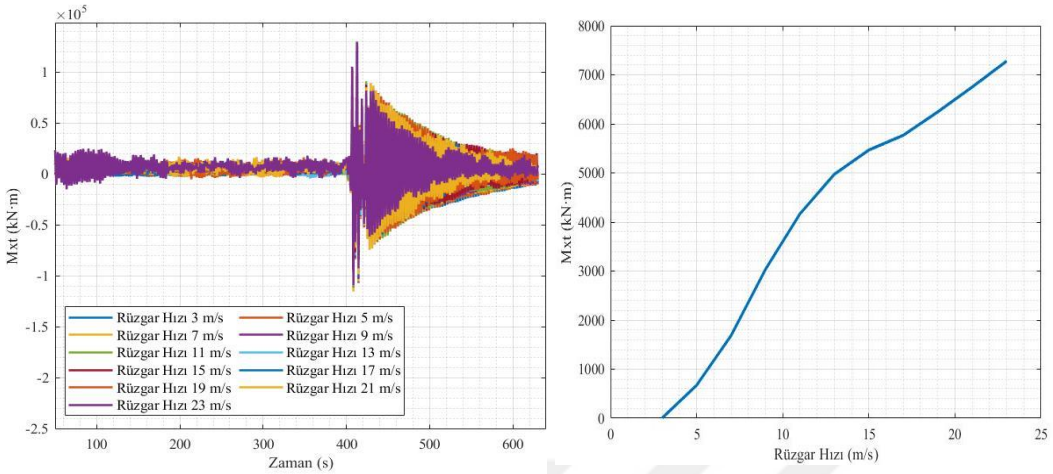
Çalışmanın bu bölümünde aerodinamik etkilerle birlikte sismik koşulları incelemek için FAST ile derlenen sismik modülü kullanılarak 10 dakikalık rüzgar analizinin 400.saniyesinde 14 farklı güçlü yer hareketi kayıtları sisteme üç yönde etki ettirilmiştir. Bu durumda deprem yükünün hakim yük olması beklenmektedir.

Seçilen yer hareketi kayıtlarından Türkiye 1999 yılında meydana gelen 7.5 büyüklüğündeki Kocaeli depreminin Düzce istasyonu kaydı örnek olarak sunulacaktır. Depremin etki ettiği ve etmediği normal çalışma koşullarında türbin için üretilen gücün değişmediği Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Bu grafikler Şekil 4.18 ile benzerdir. Buradan anlaşılacağı üzere sismik yükler türbinin enerji üretiminde olumsuz koşullar meydana getirmez.

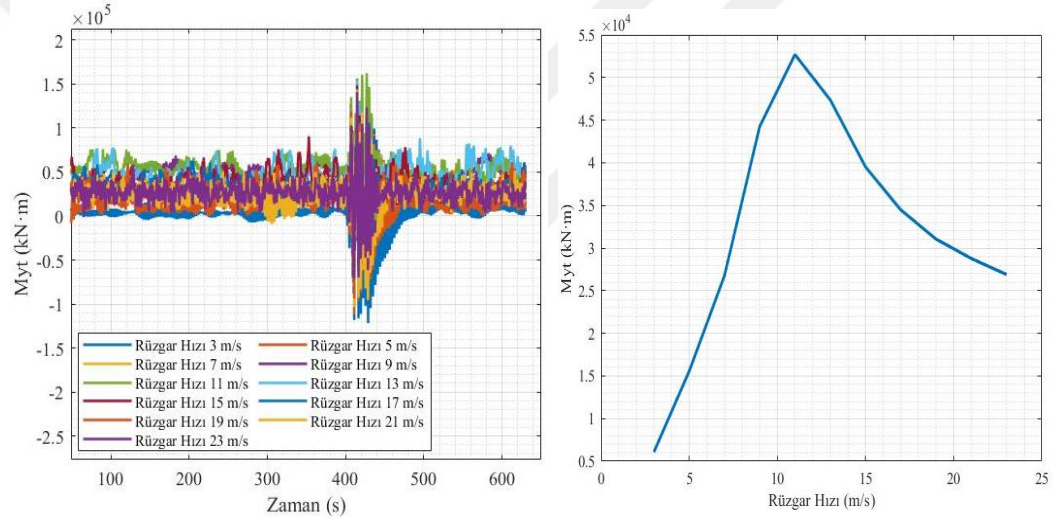


Şekil 4.30 : Rüzgar hızlarına göre rotor hızı ve üretilen enerji (depremli).

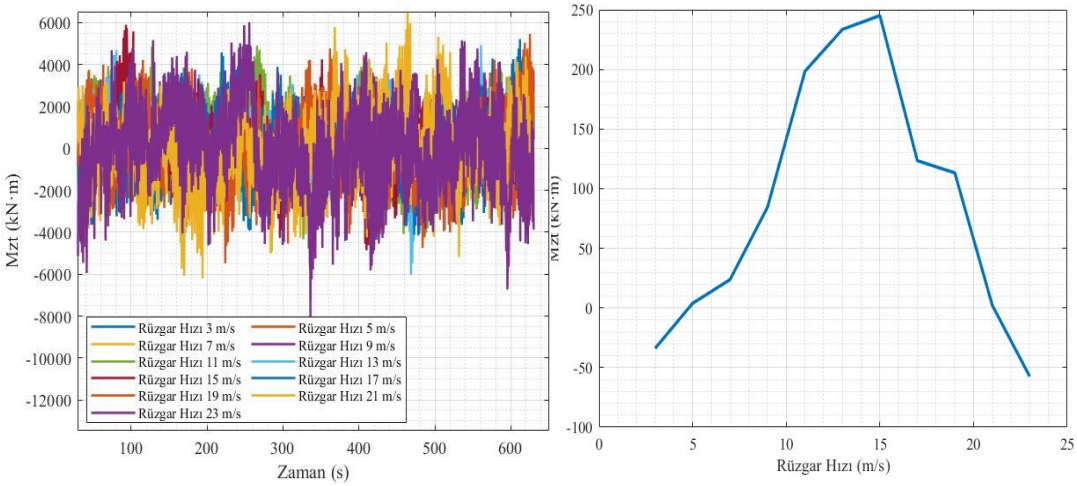
Daha önce bahsedildiği gibi sismik etkiler rüzgar analizinin 400.saniyesinden sonra başlatılmıştır. Burada tabanda oluşan momentler dikkate alındığında analizin 400.saniyesinde momentlerde dikkate değer bir büyüme söz konusudur.



Şekil 4.31 : Zamana ve rüzgara göre X yönünde kule taban momentleri.



Şekil 4.32 : Zamana ve rüzgara göre Y yönünde kule taban momentleri.



Şekil 4.33 : Zamana ve rüzgara göre Z yönünde kule taban momentleri.

Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de deprem etkisiyle momentlerde büyüme gözlenirken rüzgar hızının artışıyla belirli bir aerodinamik sönümleme ile moment büyümesinde azalma etkisi görülmektedir. Dolayısıyla 23 m/s'lik rüzgar hızında en küçük moment salınımı olduğu söylenebilir. Şekil 4.33'de ise sismik etkilerin baskın olduğu söylenemez. Şekil 4.33'deki Z yönündeki taban momentleri rotor üzerinde meydana gelen rüzgar yüklerinden kaynaklanmaktadır.

X,Y ve Z yönünde oluşan taban momentlerinin ortalamaları ve maksimumları Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'de gösterilmiştir. X yönünde oluşan ortalama taban momentlerinde rüzgar hızının artmasıyla momentin arttığı görülmektedir. Y yönünde oluşan ortalama taban momentlerinde ise nominal hıza kadar bir artış varken bu hızdan sonra aerodinamik sönümlemeden kaynaklanan bir moment azalışı söz konusudur.

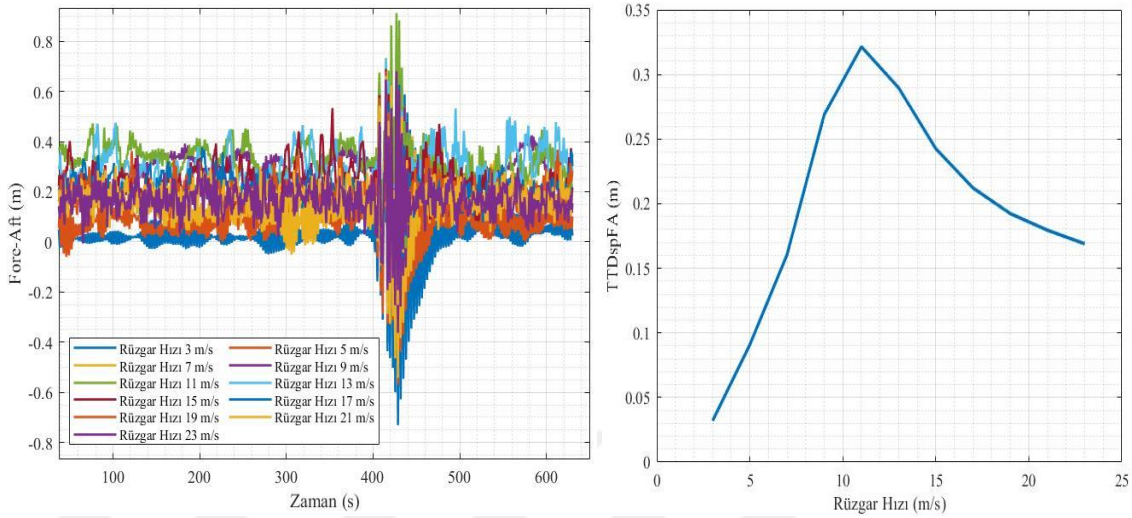
Çizelge 4.13 : Rüzgar ve deprem yüklemesinden oluşan maksimum taban momentleri.

Deprem+rüzgar maksimum taban momentleri			
Rüzgar Hızı (m/s)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)
3	115140	140890	3363
5	115230	134920	3811
7	114970	144040	3354
9	113830	143540	3609
11	111500	162580	4907
13	115900	154060	6032
15	116540	148700	5900
17	122240	144850	5216
19	123050	144030	5479
21	122830	143860	6493
23	129970	141180	8087

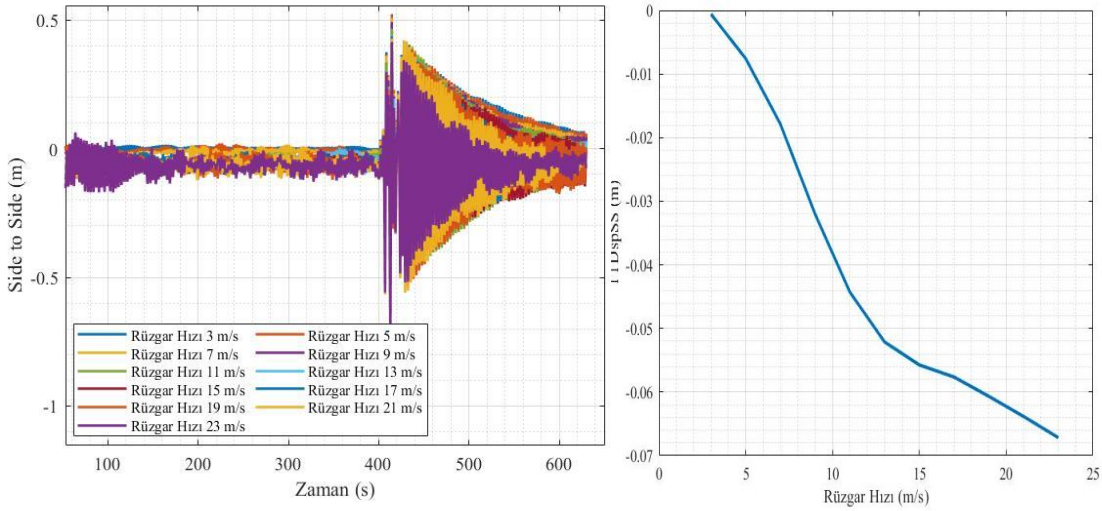
Çizelge 4.14 : Rüzgar ve deprem yüklemesinden oluşan ortalama taban momentleri.

Deprem+rüzgar ortalama taban momentleri			
Rüzgar Hızı (m/s)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)
3	8583	10491	356
5	8957	17791	717
7	9305	28532	888
9	10155	45161	896
11	11157	53197	1105
13	10678	48268	1030
15	11905	40034	1113
17	11150	35089	1235
19	12327	31739	1220
21	12061	29485	1395
23	11254	27666	1538

Z yönünde oluşan momentlere bakıldığında ise bir artış görülmektedir. Bunun nedeni etki eden rüzgar hızlarından dolayı rotorda meydana gelen rüzgar yükleridir. Rüzgar hızının artmasıyla momentlerde artış gözlemlenmiştir.



Şekil 4.34 : Zamana ve değişen hızlara göre rüzgar doğrultusundaki tepe noktası yer değiştimeleri.



Şekil 4.35 : Zamana ve değişen hızlara göre rüzgara dik doğrultudaki tepe noktası yer değiştimeleri.

Normal çalışma durumunda sadece x yönünde uygulanan rüzgar hızlarının meydana getirdiği bu yöndeki tepe noktası ortalama yer değiştirmesi sismik etkilerle birlikte değişmemiştir. Şekil 4.22'de gösterilen grafik ile Şekil 4.34'deki grafik değerleri benzerdir. Rüzgar yönüne dik doğrultudaki tepe noktası yer değiştirmesi için de aynı durumun söz konusu olduğu Şekil 4.23 ile Şekil 4.35'ün karşılaştırılmasından anlaşılmaktadır. Fakat her iki durum için de sismik etkilerle birlikte tepe noktası salınımında aşırı büyümeler meydana gelmiştir.

Normal çalışma durumunda rüzgar yükleriyle birlikte sismik yüklerin etki ettiği ve etmediği durumlarının karşılaştırılması sonucunda tasarımcılara yardımcı olması açısında sismik etkilerin tek başına alındığı bir analiz için katsayı önerilmesi düşünülmüştür. Katsayılardaki amaç; bilindik sonlu elemanlar programları ile sismik analiz yapılması kolaylığının yanı sıra türbinin karmaşık yapısından dolayı rüzgar analizi yapmaktan kaçınarak rüzgar etkilerini dikkate almaktır. Böylece sadece sismik analiz yapılarak elde edilen taban momentleri Çizelge 4.15'deki katsayılar ile rüzgar etkilerini de dikkate almamızı sağlar.

Çizelge 4.15 : Sismik analize göre katsayı önerilmesi.

Katsayılar			
Rüzgar Hızı (m/s)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)
3	1.0	0.9	1.9
5	1.0	0.8	2.1
7	1.0	0.9	1.9
9	1.0	0.9	2.0
11	1.0	1.0	2.8
13	1.0	1.0	3.4
15	1.0	0.9	3.3
17	1.1	0.9	2.9
19	1.1	0.9	3.1
21	1.1	0.9	3.6
23	1.1	0.9	4.5

Çizelge 4.15'de M_x taban momenti için rüzgar hızlarına göre katsayı değerlendirmesinin genel olarak 1 olması M_x momentine etki eden baskın bir rüzgar olmamasından kaynaklanmaktadır. Sismik analiz sonucunda elde edilen taban momenti değerleri tasarım için kullanılabilir. M_y taban momentinde ise hakim rüzgar yönümüzün X olmasından dolayı meydana gelen bir aerodinamik sönümleme söz konusu olur. Yaklaşık %10 mertebelerinde bir moment azalması meydana gelmiştir. Z yönündeki değişimler sismik etkilerden dolayı meydana gelmemektedir. Şekil 4.33'de 400.saniyede bir moment değişimi gözlemlenmemiştir. Sonuç olarak M_z momentinin etkisi rotorun çalışmasıyla ilgilidir. Bu çalışmada M_y momenti esas alınarak katsayı önerilir. M_y momenti için depremin etki ettiği ve etmediği durumlar ile birlikte katsayılar Çizelge 4.16'de toplanmıştır. Burada hem analiz sonucuyla elde edilen hem de ayrı ayrı rüzgar ve deprem yüklerinin hesaplanarak süperpoze edilmesi durumu gösterilmiştir. Süperpoze durumu iki yükün birlikte etki etmesini

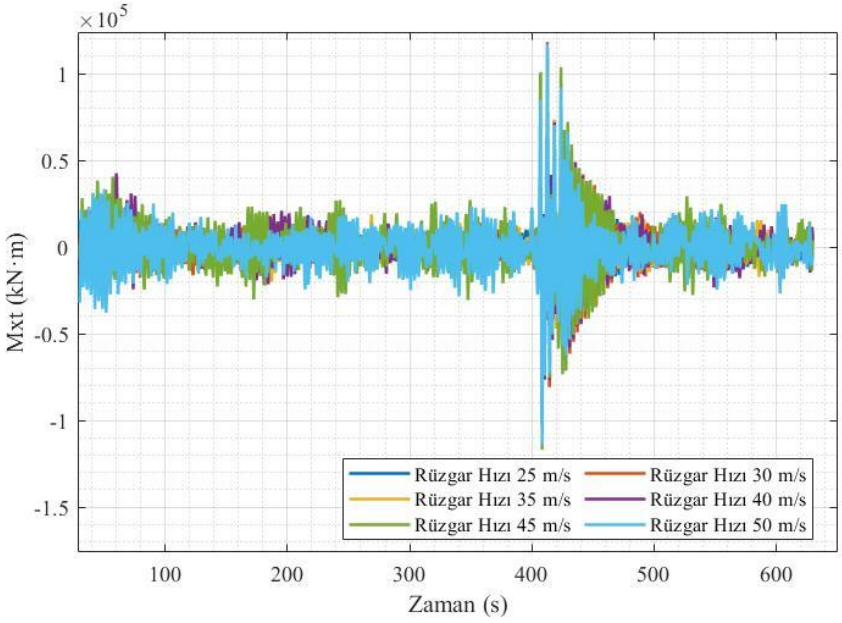
karşılamamaktadır. Diğer analiz sonuçlarına göre katsayı sonuçları Ek B'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.16 : Maksimum M_y taban momenti için analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

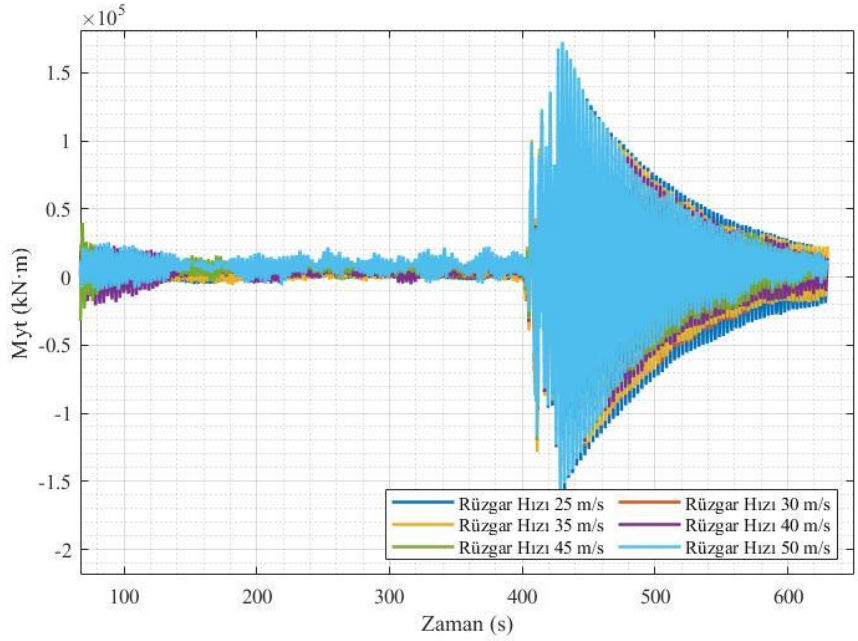
	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem		
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My(kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar
3	115140	5605	159910	165515	0.9
5	115230	6059		165969	0.8
7	114970	6961		166871	0.9
9	113830	7639		167549	0.9
11	111500	10335		170245	1.0
13	115900	12866		172776	1.0
15	116540	13451		173361	0.9
17	122240	15627		175537	0.9
19	123050	20144		180054	0.9
21	122830	18157		178067	0.9
23	129970	31103		191013	0.9

4.6.5 Türbin rölanti modunda iken depremin etki ettiği durum

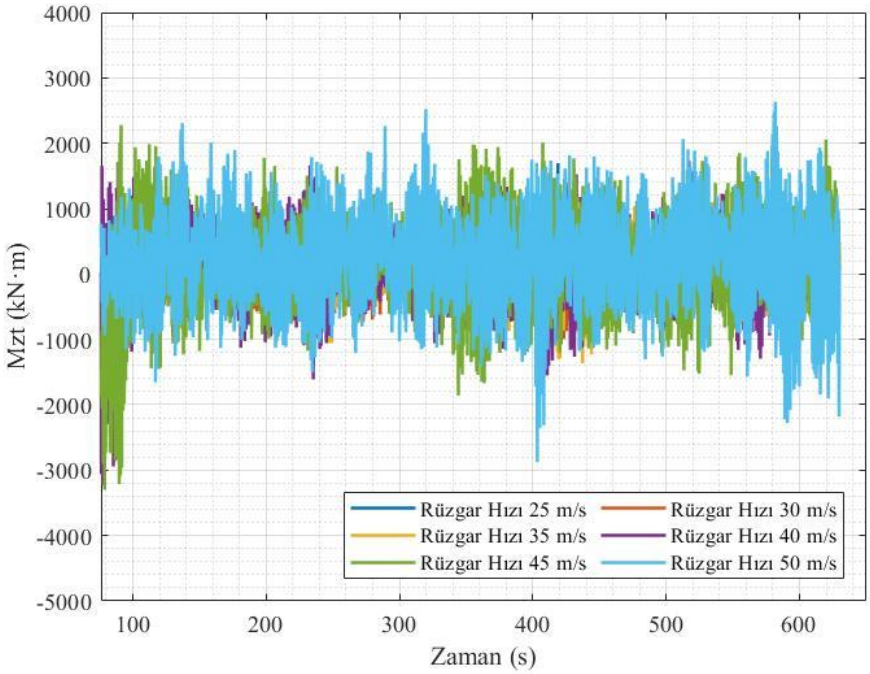
Türbinin rölanti modu için de Kocaeli depreminin Düzce istasyonundan alınan kaydı örnek olarak sunulmuştur. Kule tabanında oluşan moment grafikleri Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de gösterilmiştir.



Şekil 4.36 : Zamana göre X yönünde kule taban momentleri.



Şekil 4.37 : Zamana göre Y yönünde kule taban momentleri.



Şekil 4.38 : Zamana göre Z yönünde kule taban momentleri.

Rotor hareketinin olmaması rüzgar etkisinden dolayı meydana gelecek moment değerlerini sismik etkilerin yanında küçük bıraktı. 400.saniyede deprem yükleriyle beraber büyük bir moment artışı gözlenmiştir. My momenti grafiğinde görüldüğü gibi en büyük moment oluşumu 25 m/s'de olur iken 50 m/s'ye kadar küçük miktarda bir sönümlemeyle moment azalması meydana gelmiştir. Mz momenti grafiğinde ise deprem etkileri belirgin olarak görülmemiştir.

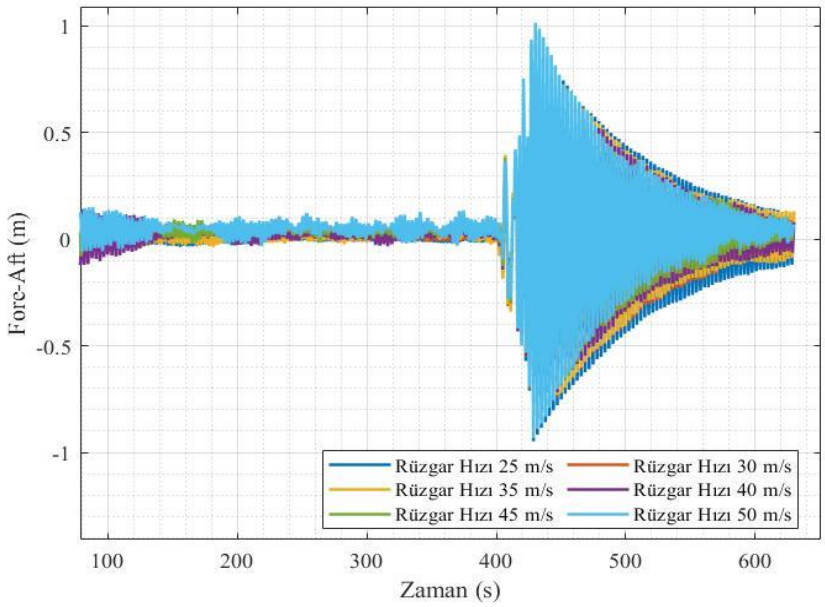
Moment değerlerinin hızlara göre ortalama ve maksimum değerlerinin değişimi Çizelge 4.17 ve 4.18'de tablolaştırılmıştır. Maksimum ve ortalama momentlerde hızla birlikte büyük bir değişim görülmemiştir.

Çizelge 4.17 : Rüzgar ve deprem yüklemesinden oluşan maksimum taban momentleri (rölanti).

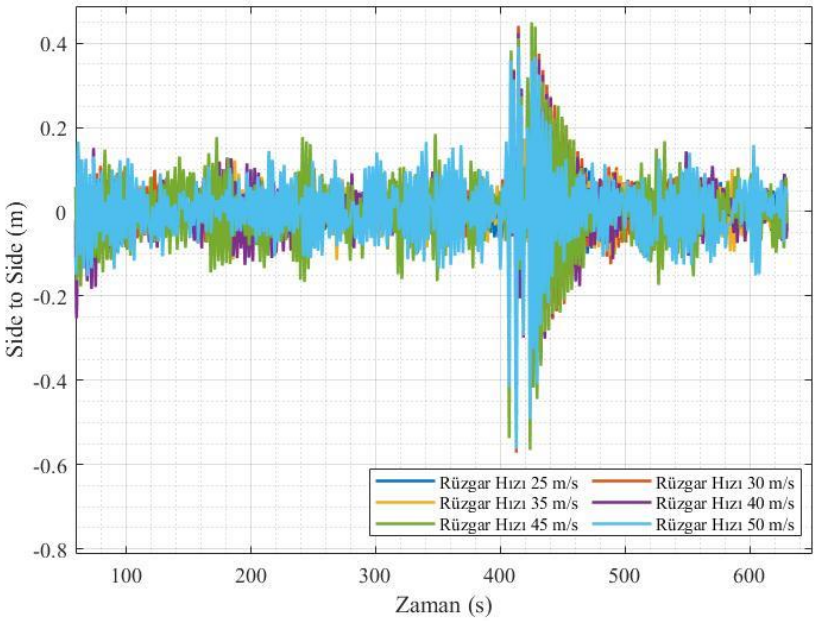
Deprem+rüzgar maksimum taban momentleri			
Rüzgar Hızı (m/s)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
25	110440	161870	5210
30	118360	159010	6163
35	109000	156990	10215
40	115710	164160	9556
45	116990	167640	8237
50	117220	172570	2877

Çizelge 4.18 : Rüzgar ve deprem yüklemesinden oluşan ortalama taban momentleri (rölanti).

Deprem+rüzgar ortalama taban momentleri			
Rüzgar Hızı (m/s)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
25	6139	17778	234
30	6979	16495	356
35	6825	18023	434
40	8245	18598	514
45	9991	18711	640
50	9490	19392	547



Şekil 4.39 : Zamana göre rüzgar doğrultusundaki tepe noktası yer değiştimeleri (rölanti).



Şekil 4.40 : Zamana göre rüzgara dik doğrultudaki tepe noktası yer değiştimeleri (rölanti).

Şekil 4.39 ve 4.40'da tepe noktası yer değiştirmeleri depremin etki etmesi ile birlikte büyümüştür. Rüzgar hızının artmasıyla bu büyüme normal çalışma durumundaki sönümleme etkisi gibi olmasada bir miktar azalmıştır.

Normal çalışma durumunda önerildiği gibi benzer sebepten ötürü rölanti modu için de Çizelge 4.19'daki gibi katsayı önerilmesi yapılmıştır. Normal çalışma durumundan farklı olarak rölanti modunda bu katsayılar yaklaşık 1 olarak elde edilmiştir. Rüzgarların türbülanslı rüzgar olması X yönündeki momentte belirli bir sönümleme meydana getirebilir. Burada Y yönünde beklenen moment azalmasının olmamasının temel nedeni rotoun hareketsiz olmasından kaynaklanmaktadır. Rotorun dönmemesi Z yönünde etki eden depremi sönümleyememiştir, tam aksine bu yönde Şekil 4.38'de görüldüğü gibi bir moment artışına sebep olmuştur.

Çizelge 4.19 : Rölanti modu için sismik analize göre katsayı önerilmesi.

Katsayılar			
Rüzgar Hızı (m/s)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
25	1.0	1.0	2.9
30	1.0	1.0	3.5
35	0.9	1.0	5.7
40	1.0	1.0	5.4
45	1.0	1.0	4.6
50	1.0	1.1	1.6

4.7 Rüzgar ve Sismik Yüklerin Gerilme Kontrolü

Kule tabanında oluşan gerilmelerin kontrolü API RP2A-WSD yönetmeliğinin 3.2. bölümüne göre yapılmıştır [55]. Yönetmeliğin esasları bir önceki bölümde açıklanmıştır.

Emniyetli basınç gerilmesi, eğilme gerilmesi ve kayma gerilmesi aşağıdaki denklemlere göre hesaplanmıştır.

$$F_{xe} = 2CEt/D = 1134 \text{ MPa}$$

$$F_{xc} = F_y \times \left[1.64 - 0.23(D/t)^{1/4}\right] = 188MPa$$

$$F_y = min(F_{xe}; F_{xc}) = 188\ MPa$$

$$C_c = \left(\frac{2\pi^2 E}{F_y}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{2\pi^2 21000}{188}\right)^{\frac{1}{2}} = 148.5$$

$$F_a = \frac{\left[1-\frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2}\right]F_y}{5/3+\frac{3(Kl/r)}{8C_c}-\frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}} = 108\ MPa$$

$$F_b = \left[0.72 - 0.58\frac{F_y D}{Et}\right]F_y = 142\ MPa$$

$$F_v = 0.4F_y = 100 \text{ MPa}$$

$$F_{bx} = \left[\frac{M * y}{I}\right]$$

$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0$$

Normal çalışma durumunda elde edilen yüklere ve 14 farklı deprem ve değişen rüzgar hızlarının etkisiyle oluşan yüklere göre gerilme kontrolü yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar çizelgeler halinde sunulacaktır.

Öncelikle 3-23 m/s hızlarının normal çalışma koşullarında etki etmesiyle kule tabanında oluşan gerilmelerin kontrolü Çizelge 4.20'de verilmiştir. Çizelgeye göre kesitin güvenli olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.20 : Normal çalışma koşullarında kule tabanı kesit kontrolü.

Normal Çalışma Durumu						
Rüzgar Hızları (m/s)	**Basınç Gerilmesi Kontrolü**		**Kayma Gerilmesi Kontrolü**		**Eğime Gerilmesi Kontrolü**	
	Emniyetli Gerilme (MPa)	Analiz sonucu (MPa)	Emniyetli Gerilme (MPa)	Analiz sonucu (MPa)	Emniyetli Gerilme (MPa)	Analiz sonucu (MPa)
3	109	5.72	100	0.451	142	30.763
5		5.74		0.789		31.513
7		5.77		1.027		32.113
9		5.80		1.461		32.714
11		5.80		1.515		35.565
13		5.82		1.585		28.812
15		5.81		1.773		27.461
17		5.79		1.268		26.861
19		5.80		1.179		25.511
21		5.82		1.097		26.261
23		5.83		1.158		25.961

14 farklı güçlü yer hareketinin rüzgar yükleri ile birlikte etki etmesinin sonucunda oluşan gerilmeler değişen deprem ve rüzgar hızlarına göre farklı gerilme kontrolleri çizelgeler halinde verilmiştir. Çizelge 4.21 basınç gerilmesi kontrolünü, Çizelge 4.22 kayma gerilmesi kontrolünü ve Çizelge 4.23 eğilme gerilmesi kontrolünü göstermektedir.

Çizelge 4.21 : Basınç gerilmesi kontrolü.

Basınç Gerilmesi Kontrolü = 108 MPa											
Depremler	**3**	**5**	**7**	**9**	**11**	**13**	**15**	**17**	**19**	**21**	**23**
Chalfant	9.26	9.27	9.29	9.28	9.29	9.28	9.29	9.27	9.30	9.26	9.23
Manjil	8.96	8.97	8.98	9.01	9.03	8.99	8.98	9.00	9.00	9.00	9.03
Imperial-Supers	8.73	8.74	8.75	8.76	8.80	8.76	8.74	8.76	8.75	8.74	8.72
Imperial-El Centro	8.60	8.62	8.63	8.65	8.69	8.64	8.61	8.61	8.60	8.59	8.57
Superstition-El Centro	9.57	9.56	9.56	9.55	9.56	9.58	9.55	9.56	9.51	9.53	9.52
Bem İran	9.03	9.05	9.04	9.04	9.04	9.04	9.04	9.03	9.01	9.03	9.06
Kobe-Amagasaki	9.38	9.39	9.40	9.40	9.44	9.39	9.38	9.39	9.36	9.40	9.36
Kobe-Nishi Akashi	8.60	8.62	8.61	8.64	8.66	8.62	8.63	8.65	8.66	8.63	8.65
Hector Mine-Hector	9.04	9.06	9.06	9.09	9.08	9.09	9.04	9.06	9.08	9.08	9.09
Hector Mine-Amboy	9.11	9.13	9.13	9.14	9.16	9.15	9.13	9.12	9.12	9.12	9.14
Landers-Joshua	8.76	8.76	8.76	8.77	8.75	8.75	8.74	8.75	8.75	8.75	8.78
Landers-Morongo	8.80	8.81	8.80	8.83	8.84	8.80	8.81	8.81	8.79	8.82	8.84
Kocaeli-Düzce	8.54	8.55	8.55	8.55	8.60	8.56	8.56	8.55	8.56	8.51	8.54
Kocaeli-Yarımca	8.70	8.72	8.73	8.73	8.75	8.72	8.72	8.71	8.71	8.71	8.72

Çizelge 4.22 : Kayma gerilmesi kontrolü

Kayma Gerilmesi Kontrolü = 100 MPa											
Depremler	**3**	**5**	**7**	**9**	**11**	**13**	**15**	**17**	**19**	**21**	**23**
Chalfant	4.4	4.2	4.6	4.9	5.1	4.8	4.8	4.5	4.6	4.5	4.5
Manjil	5.7	6.1	5.9	6.2	6.3	5.4	5.5	5.2	5.0	5.4	4.9
Imperial-Supers	6.0	6.0	5.9	6.2	6.2	5.8	5.7	5.2	5.4	5.5	5.4
Imperial-El Centro	5.6	5.2	5.0	5.0	5.1	4.8	4.7	4.7	4.6	4.9	4.7
Superstition-El Centro	6.9	6.4	6.4	6.3	6.4	6.5	6.5	6.4	6.5	6.5	6.5
Bem İran	4.7	4.4	4.4	4.3	4.3	4.4	4.4	4.4	4.3	4.2	4.4
Kobe-Amagasaki	4.9	4.8	4.8	4.9	5.2	5.0	4.9	4.8	4.6	4.7	5.0
Kobe-Nishi Akashi	3.9	3.8	3.7	4.0	4.2	3.7	3.8	3.8	3.5	3.8	3.8
Hector Mine-Hector	6.1	5.9	5.6	6.0	6.2	5.5	5.5	5.6	5.3	5.8	5.4
Hector Mine-Amboy	11.5	11.5	11.2	10.6	10.1	8.5	8.3	8.3	8.2	8.4	8.6
Landers-Joshua	8.7	8.0	8.1	8.1	7.1	7.5	7.2	7.3	7.1	7.2	7.2
Landers-Morongo	4.7	4.7	4.5	4.8	5.2	4.7	4.5	4.7	4.9	4.7	4.7
Kocaeli-Düzce	5.9	5.7	5.6	4.9	5.0	4.6	4.5	4.8	4.9	4.5	4.4
Kocaeli-Yarımca	6.2	6.3	6.2	6.6	6.8	7.1	6.6	6.7	6.4	6.3	6.2

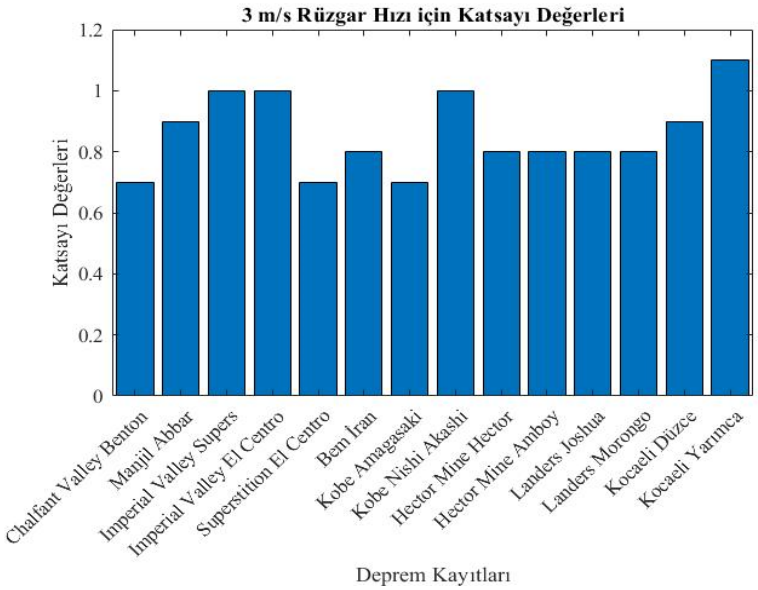
Çizelge 4.23 : Eğilme gerilmesi kontrolü.

Eğilme Gerilmesi Kontrolü = 142 MPa											
Depremler	**3**	**5**	**7**	**9**	**11**	**13**	**15**	**17**	**19**	**21**	**23**
Chalfant	17.7	19.0	19.6	20.0	22.4	18.8	18.8	16.7	17.0	18.8	16.0
Manjil	23.1	24.5	23.6	26.7	29.3	29.0	25.4	26.4	23.6	23.3	23.3
Imperial-Supers	21.8	21.2	21.5	25.4	26.6	23.0	22.8	20.7	19.5	22.2	23.3
Imperial-El Centro	23.0	23.0	23.1	24.8	25.5	24.3	23.3	23.0	19.8	22.4	22.1
Superstition-El Centro	21.3	17.1	16.1	15.9	15.5	15.9	16.4	16.8	19.1	20.1	18.9
Bem İran	21.3	17.3	17.3	17.4	17.4	16.8	16.7	18.2	19.1	20.1	18.9
Kobe-Amagasaki	25.1	22.5	23.1	24.6	25.8	23.9	24.0	23.4	21.9	22.4	24.9
Kobe-Nishi Akashi	13.4	16.1	16.1	18.3	19.5	18.3	19.1	17.1	18.2	18.2	19.5
Hector Mine-Hector	31.8	33.9	33.2	37.5	38.7	34.5	34.7	33.6	31.2	35.1	32.1
Hector Mine-Amboy	85.8	86.0	83.0	79.2	64.1	60.0	60.6	59.3	57.2	55.1	56.6
Landers-Joshua	46.1	42.6	42.6	41.4	42.9	40.4	37.4	38.4	36.3	35.6	35.7
Landers-Morongo	21.8	22.7	20.6	23.4	26.7	21.8	20.7	20.1	20.1	20.6	19.4
Kocaeli-Düzce	21.2	20.3	21.6	21.6	24.5	23.1	22.4	21.8	21.6	21.6	21.2
Kocaeli-Yarımca	25.7	27.2	26.7	29.0	30.5	33.5	30.5	30.9	28.8	29.3	27.9

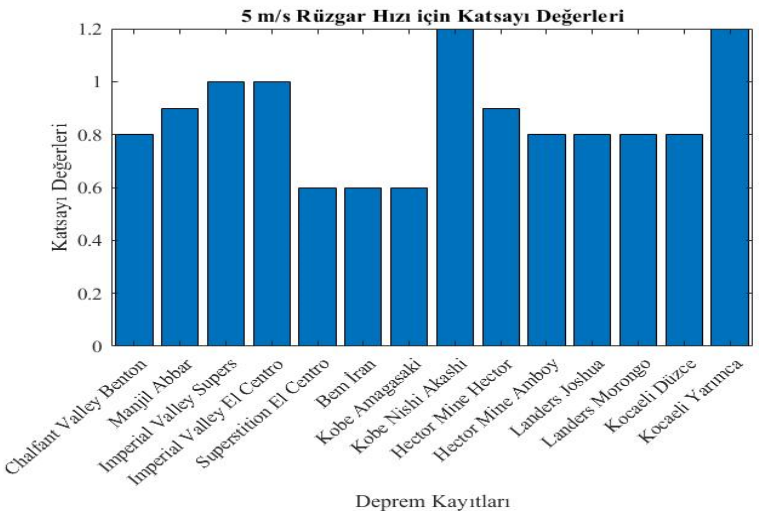
Her üç tabloda da elde edilen gerilmelerin emniyet gerilmesinden düşük olması sonucunda kule taban kesitinin güvenli olduğu sonucuna varıldı.

4.8 İlk Tasarım için Önerilen Katsayılar

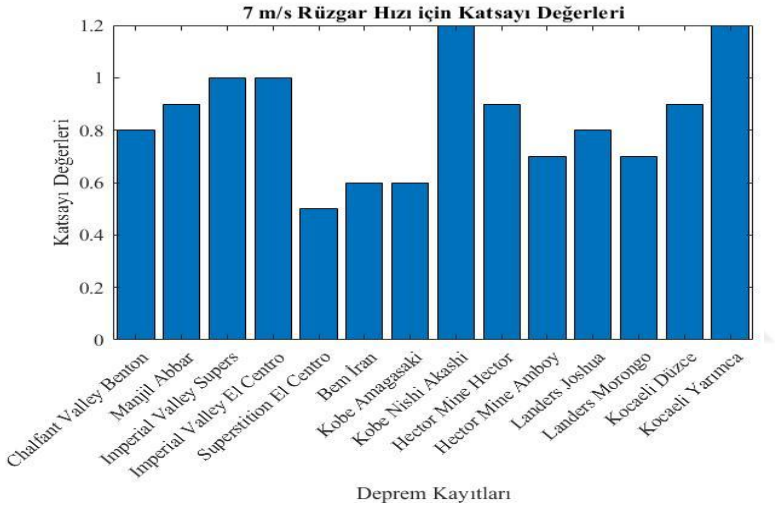
Bilindik sonlu elemanlar programlarında rüzgar yüklerinin analizinin zorluğu ve tecrübe gerektirmesi, türbin yapısının simülasyonunun bu programlar ile modellenememesi tasarım aşamasında güçlük çıkarmaktadır. Rüzgar türbini farklı dinamik özelliklere sahip elemanlardan oluşması nedeniyle özel bir yapıdır. Çalışma koşullarında rüzgar yüklerinin sistemde farklı tepkiler oluşturması yapısal programların birçoğunda gözlemlenmeyebilir. Bu etkilerin dikkate alındığı türbin yapısı için özel olarak kullanılan programların maliyetli olması ve açık kaynaklı programlarının öğrenme zorluğu bu çalışmada farklı çözümler arayışı meydana getirmiştir. Söz konusu duruma çözüm olması açısından ilk tasarımda kullanılmak üzere sismik yüklerin analizinin imkanından faydalanarak rüzgar analizi yapılmadan rüzgar yüklerinin etkisi dikkate alınmaya çalışıldı. Rüzgar yüklerinin sistem üzerindeki etkisini dikkate alabilen ve sadece sismik yüklerin kullanılmasını sağlayan katsayılar elde edildi. Katsayılar rüzgar ve sismik yüklerin aynı anda etki etmesi durumu ile sadece sismik yüklerin etki etmesi durumları ele alınarak ortaya konulmuştur. Kule tasarımı için ön boyutlandırmada kullanılmak üzere belirlenen katsayılar, Ek B'de sunulmuştur. Ayrıca çalışmada elde edilen katsayılar her hız için değişen deprem kayıtlarına göre genel bir grafikte Şekil 4.41'dan Şekil 4.57'ye kadar özetlenmiştir.



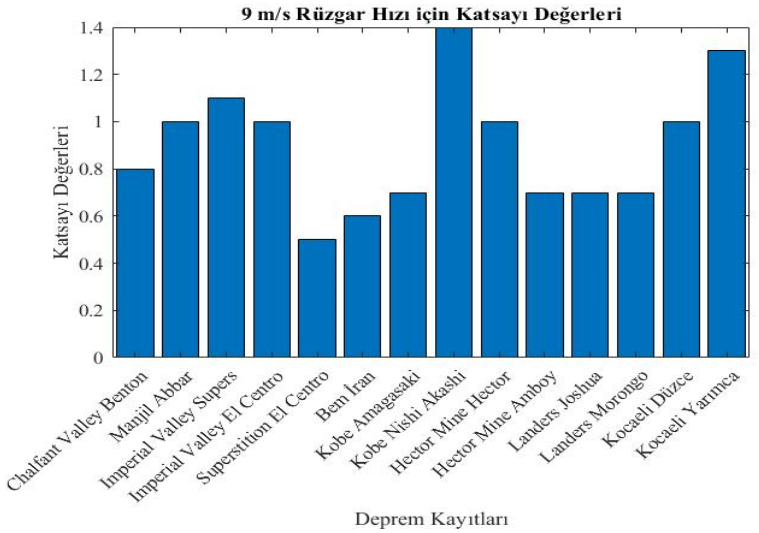
Şekil 4.41 : 3 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



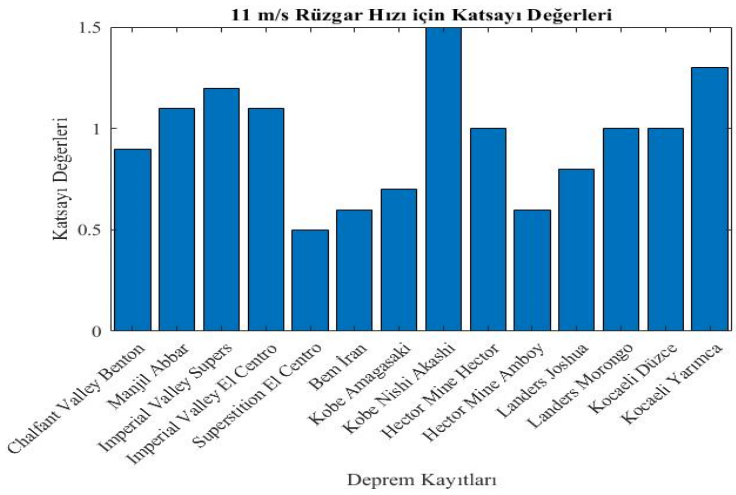
Şekil 4.42 : 5 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



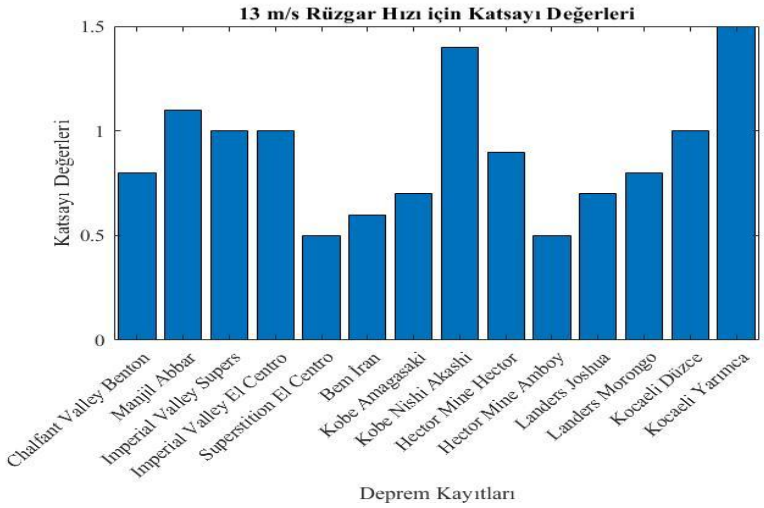
Şekil 4.43 : 7 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



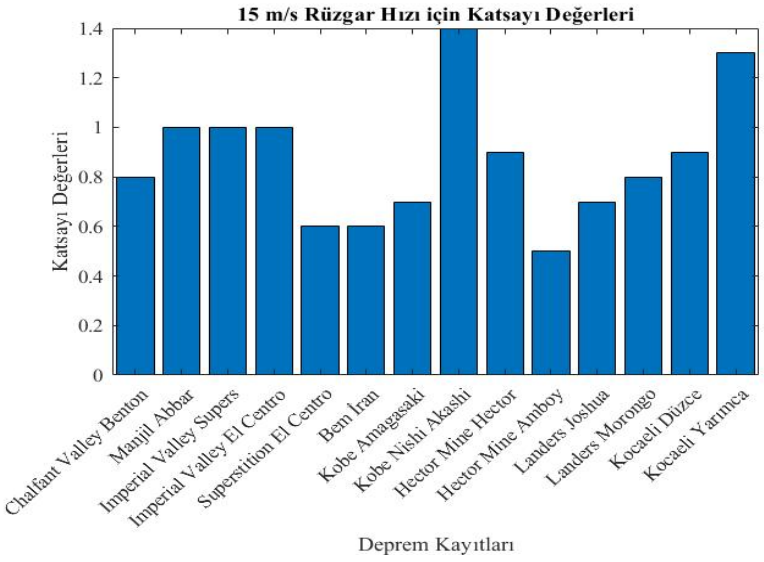
Şekil 4.44 : 9 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



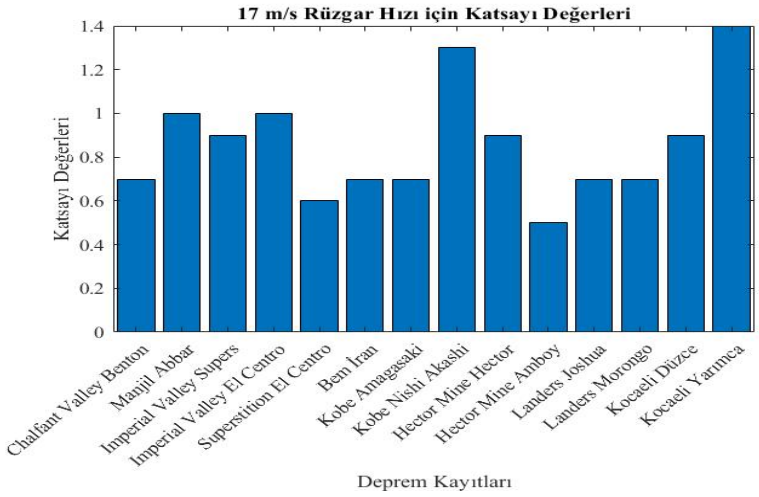
Şekil 4.45 : 11 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



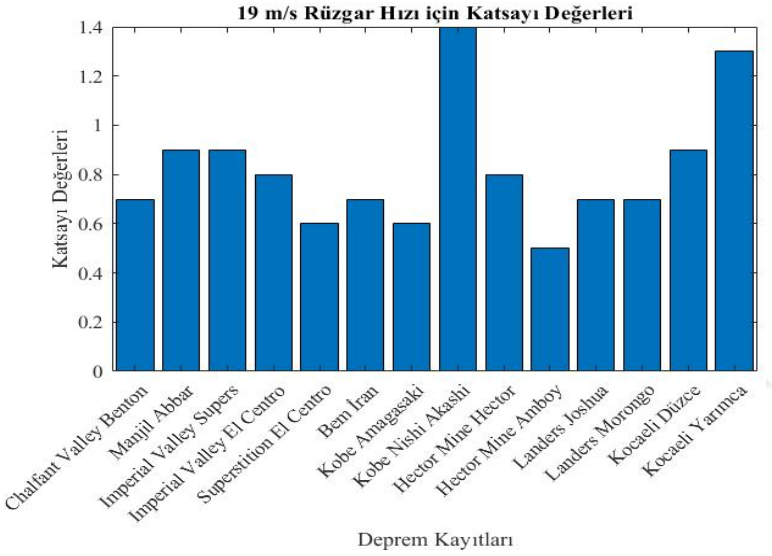
Şekil 4.46 : 13 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



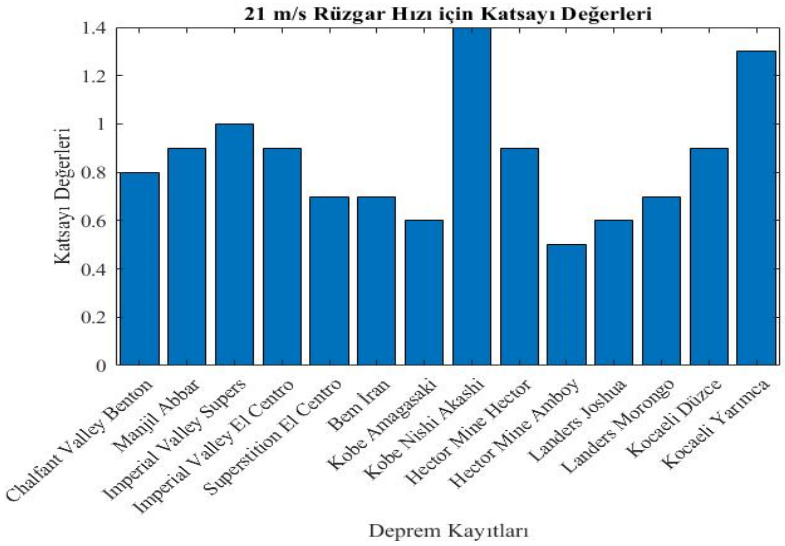
Şekil 4.47 : 15 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



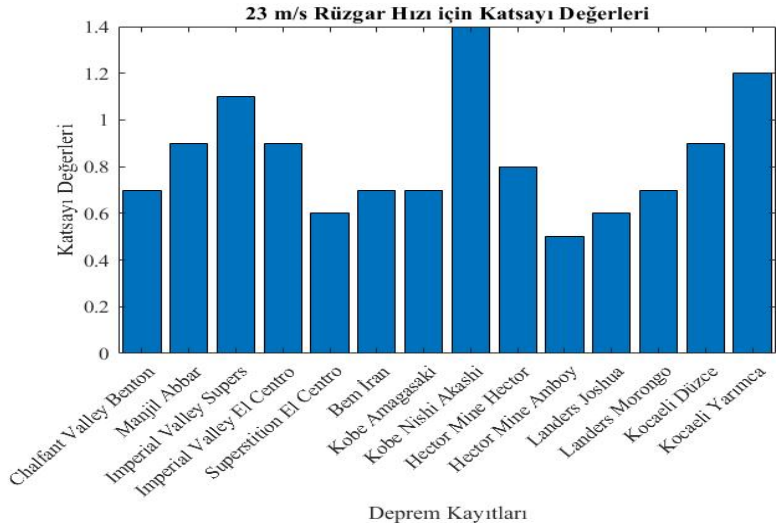
Şekil 4.48 : 17 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



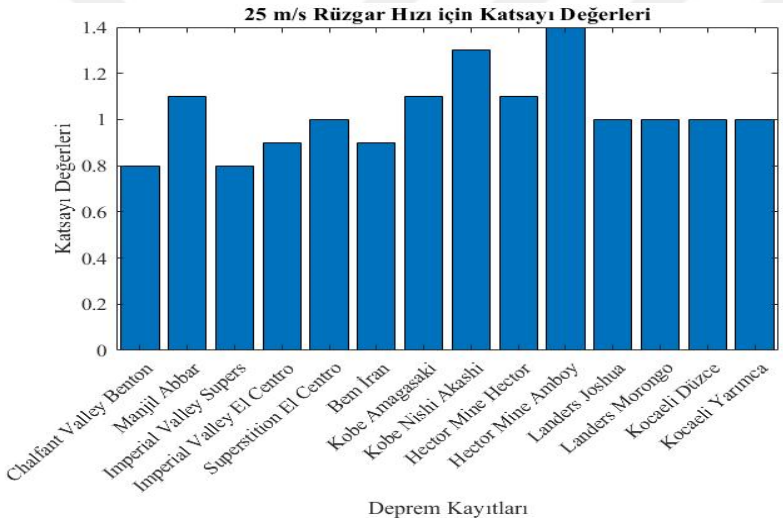
Şekil 4.49 : 19 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



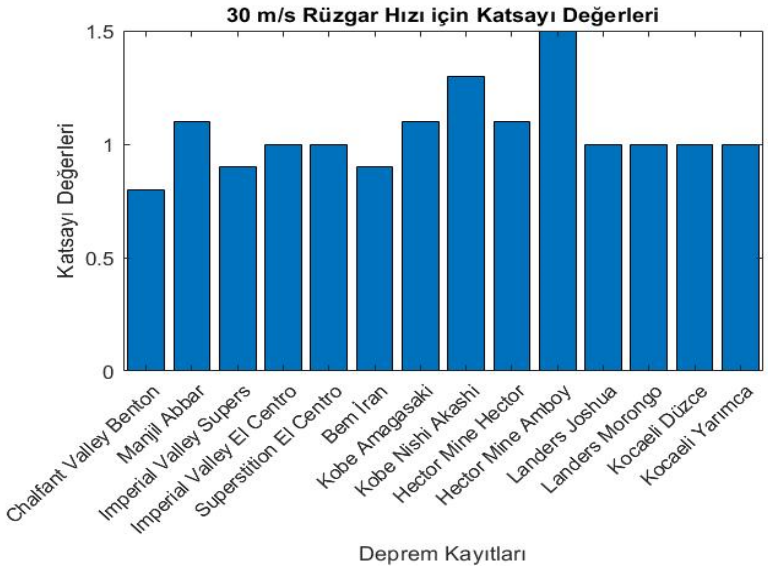
Şekil 4.50 : 21 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



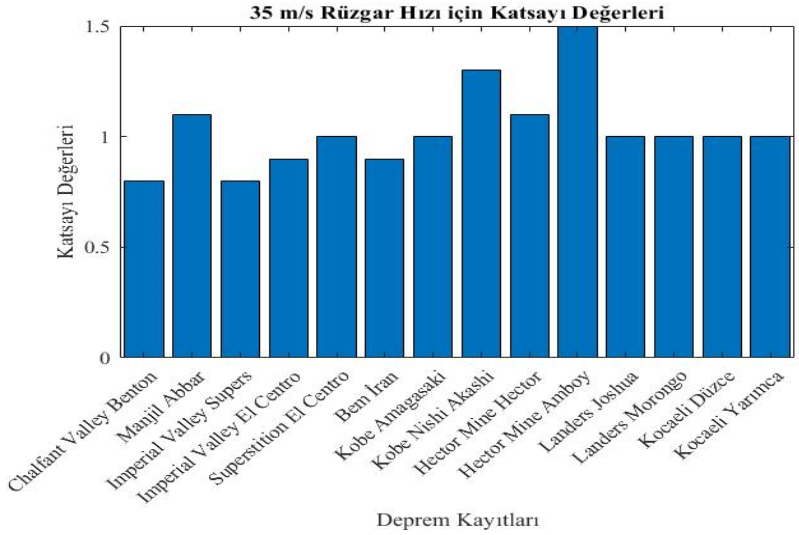
Şekil 4.51 : 23 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



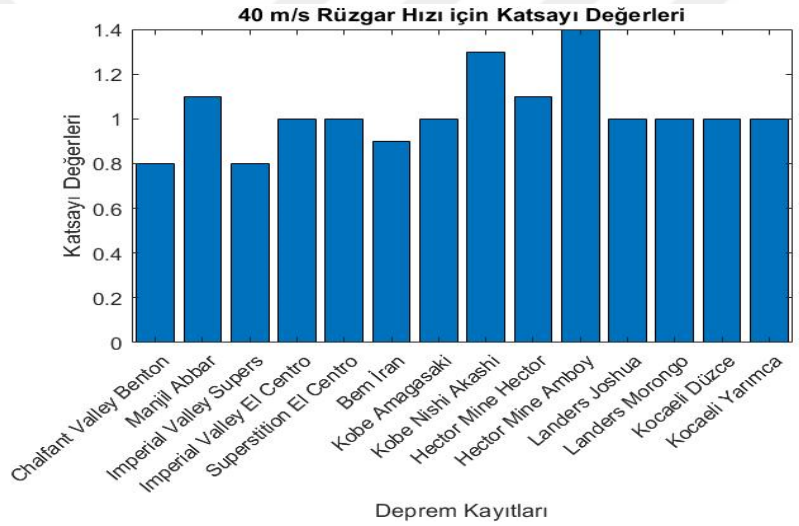
Şekil 4.52 : 25 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



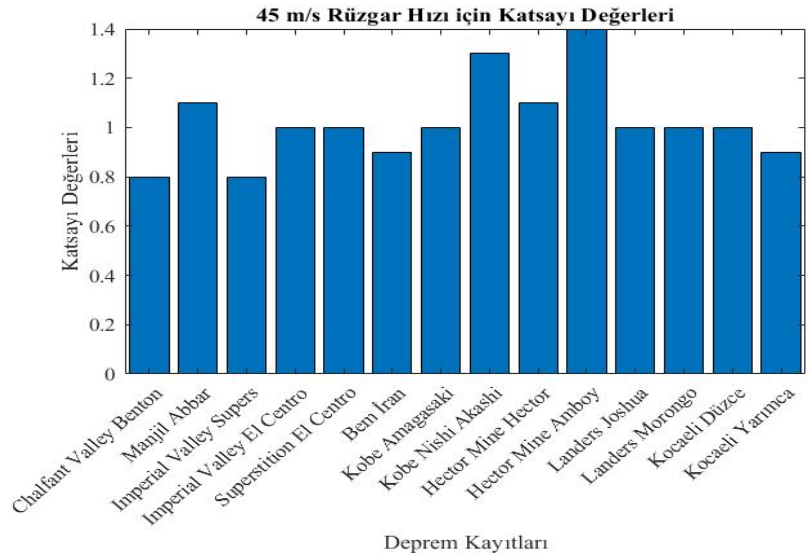
Şekil 4.53 : 30 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



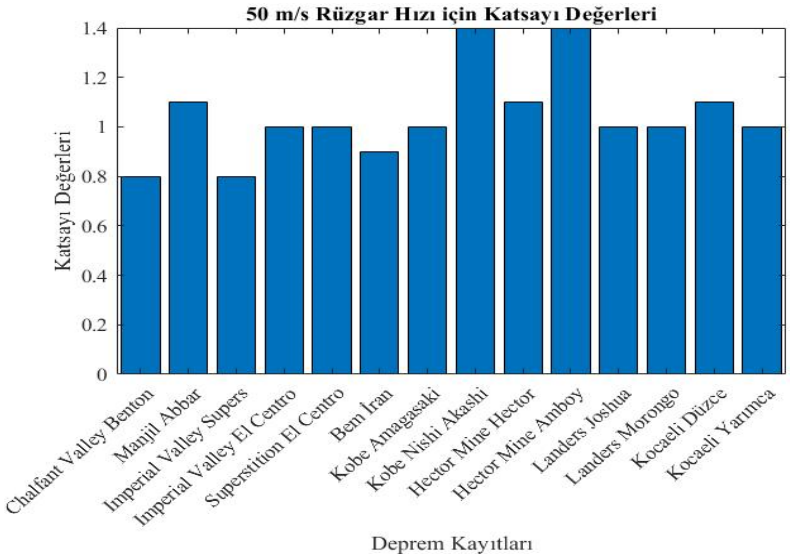
Şekil 4.54 : 35 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



Şekil 4.55 : 40 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.

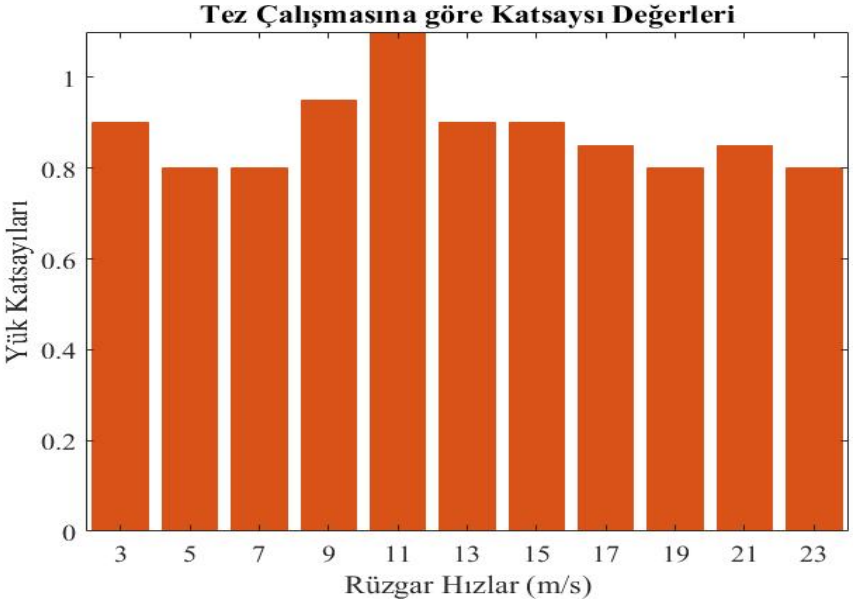


Şekil 4.56 : 45 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.



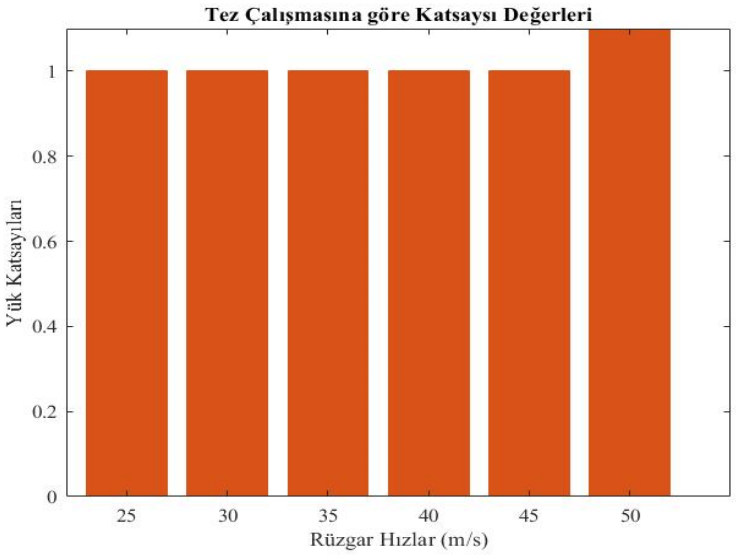
Şekil 4.57 : 50 m/s rüzgar hızı için katsayı değerleri.

3 m/s'den 23 m/s'ye kadar normal çalışma durumunu içeren katsayılarda zaman zaman azalmaların rotordan kaynaklanan aerodinamik sönümlemeden kaynaklandığı daha önce belirtilmişti. Şekil 4.58'de 14 farklı yer hareketi sonucunda elde edilen katsayılar için değişen hızlara göre 6 ile 8 büyüklüğündeki depremler için bir öneri sunulmuştur. Burada 11 m/s hızı için bu katsayının diğerlerine göre büyük olduğu görülür. Bu durumun esas nedeni türbin için nominal hızın 11.4 m/s olmasından kaynaklanmaktadır. Türbin burada rotor hızının maksimum seviyeye ulaşmasından dolayı diğer rüzgar hızlarına göre daha büyük yüklemelere maruz kalmaktadır.



Şekil 4.58 : Tez çalışmasına göre 3-23 m/s rüzgar hızları için genel katsayı değerleri.

Şekil 4.58'de elde edilen katsayılar daha öncede belirtildiği gibi belirli rüzgar ve deprem koşullarına göre rüzgar türbinleri için ilk tasarımda kullanılabilir. Bu katsayılar ile tasarımcılar rüzgar analizi yapmadan sadece deprem analizi ile elde ettiği iç kuvvetleri çarparak gerçekçi yaklaşım ile birincil tasarımı yapabilir.



Şekil 4.59 : Tez çalışmasına göre 25-50 m/s için genel katsayı değerleri.

25-50 m/s hızları arasındaki katsayı değerleri incelendiğinde hızlara göre dikkate değer bir değişim göstermeden genel olarak 1 olduğu söylenebilir (Şekil 4.59). Rölanti durumunda rotorun hareket etmemesi ve kanatların büyük yüklemelere maruz kalmaması tabanda oluşan momentlerin sismik yükler kaynaklı olduğunu gösterir. Bu nedenle rölanti durumu için tasarımda elde edilen sismik yükler herhangi bir katsayı ile çarpılmadan kullanılabilir.

4.9 Yük Kombinasyonu

ASCE/AWEA 2012 yönetmeliğinin önerdiği 0.75 katsayısının deprem ve rüzgar yüklerinin aynı doğrultudan etki etmesinin olasılığını içeriyordu. Bu çalışmada ise deprem ve rüzgar yükleri x doğrultusu için aynı yönlü kabul edildi. Elde edilen katsayılar için genel bir sonuç ortaya konulması için 0.75 katsayısı ile aerodinamik sönümlemeden kaynaklı elde ettiğimiz katsayıların ortak bir sonucu sunulmalıdır. Bu çalışmada rüzgar ve deprem yüklerininin birlikte etki ettiği analiz sonuçları ile deprem ve rüzgar yüklerinin ayrı ayrı etki edip doğrusal olarak toplamlarının karşılaştırılması ile yeni bir yük katsayısı için de hesaplamalar yapıldı. Çizelge 4.24 bu hesaplamalara Kocaeli depremi Düzce istasyonu için bir örnektir.

Çizelge 4.24 : Yönetmelik için yük katsayıları (Kocaeli Düzce Depremi).

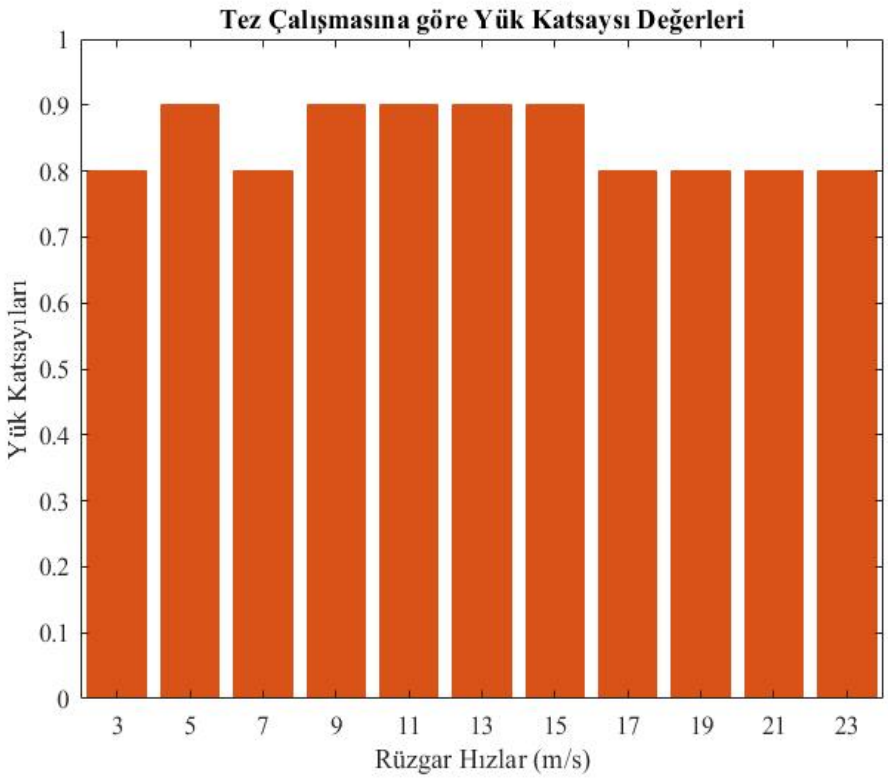
	Rüzgar +Deprem (Analiz)	Rüzgar + Deprem (Süperpoze)			Rüzgar +Deprem (Analiz)	Rüzgar + Deprem (Süperpoze)	
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	Yük Katsayısı	Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	Yük Katsayısı
3	115140	165515	0.7	25	161870	199720	0.8
5	115230	165969	0.7	30	159010	204160	0.8
7	114970	166871	0.7	35	156990	195925	0.8
9	113830	167549	0.7	40	164160	205753	0.8
11	111500	170245	0.7	45	167640	217312	0.8
13	115900	172776	0.7	50	172570	229070	0.8
15	116540	173361	0.7				
17	122240	175537	0.7				
19	123050	180054	0.7				
21	122830	178067	0.7				
23	129970	191013	0.7				

Her deprem kaydı için Çizelge 4.24'de gösterilen hesaplamalar yapıldı. Değişen hız ve depremlere göre katsayılar Çizelge 4.25'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.25 : Yönetmelik için yük katsayıları.

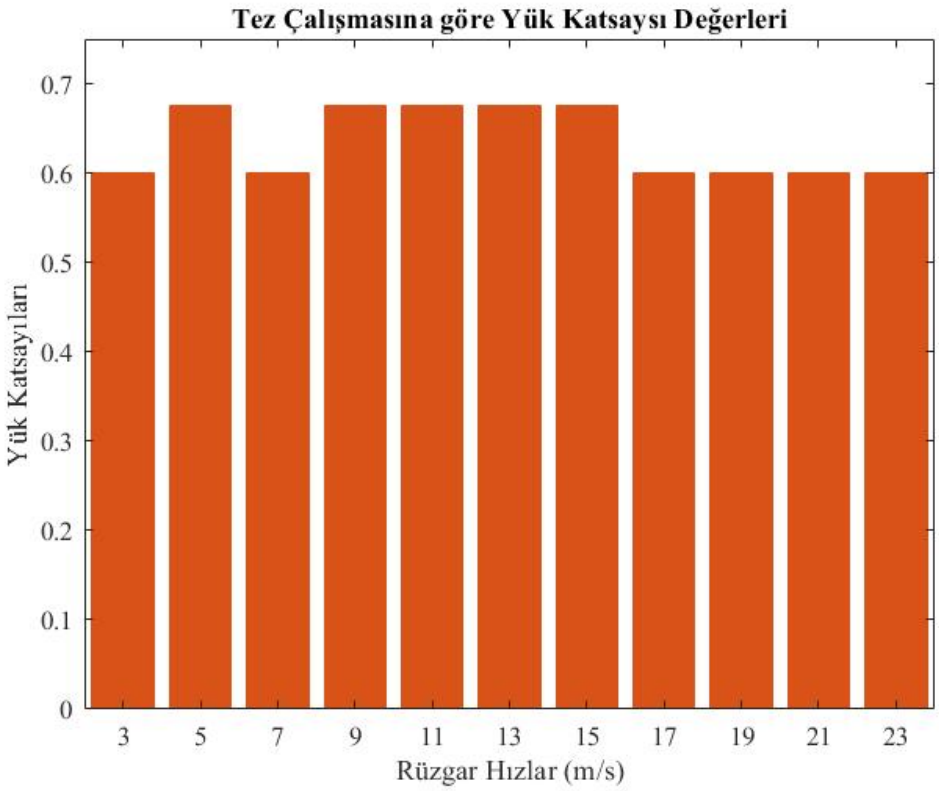
Depremler	**3**	**5**	**7**	**9**	**11**	**13**	**15**	**17**	**19**	**21**	**23**
Chalfant	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7
Manjil	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9
Imperial-Supers	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.1
Imperial-El Centro	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	0.8	0.9	0.9
Superstition-El Centro	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6
Bem İran	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
Kobe-Amagasaki	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7
Kobe-Nishi Akashi	1.0	1.2	1.2	1.4	1.5	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.5
Hector Mine-Hector	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8
Hector Mine-Amboy	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Landers-Joshua	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6
Landers-Morongo	0.8	0.8	0.7	0.8	1.0	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7
Kocaeli-Düzce	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Kocaeli-Yarımca	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.5	1.3	1.4	1.3	1.3	1.2

Her hız için deprem kayıtlarına göre elde edilen yük katsayıları genel bir tabloda ortaya konuldu. Hızlara göre katsayılar Şekil 4.60'da gösterildiği gibidir. Bu grafikten de anlaşılacağı üzere yaklaşık %10-20'luk bir aerodinamik sönümleme meydana geldiği söylenebilir. Bu oran türbin tasarımlarında ekonomik olarak fayda sağlayabilecek düzeydedir.



Şekil 4.60 : Tez çalışmasına göre rüzgar hızları için yük katsayı değerleri.

Rüzgarla ve deprem yüklerinin aynı anda etki etmesi durumunun; süperpoze edilen rüzgar ve deprem analizi ile karşılaştırılmasından elde edilen katsayılar yönetmelikte önerilen 0.75 yük katsayısıyla birleştirilmiştir. Böylece deprem ve rüzgar yüklerinin farklı yönlerde etki etmesi ihtimali ile aynı yönde etkimesi durumunda meydana gelebilecek aerodinamik sönümleme etkileri birlikte incelenmiş oldu. Elde edilen sonuçlar 65 KW-5 MW enerji üretim kapasiteli türbinlere 6-8 moment büyüklüğündeki depremlerin ve 3-23 m/s rüzgar hızlarının etki etmesi durumuna göre Şekil 4.61'de verilen nihai katsayılar özetlenmiştir.



Şekil 4.61 : Tez çalışması ile yönetmelik önerisinin ortak sonucuna göre genel yük katsayısı değerleri.

Şekil 4.61'de bulunan katsayı değerlerine göre Şekil 4.60 grafiği değerleri daha küçük elde edilmiştir. Şekil 4.61'deki katsayılar hem aerodinamik sönümleme etkilerini hem de rüzgar ile deprem yüklerinin aynı doğrultuda gelme olasılıklarını içermektedir. İki önemli çevresel yükün aynı anda dikkate alınması devasa boyuttaki yapı elemanları ile birlikte büyük ekonomik getiriler sunar. Bu bakımdan küçülen bu değerler türbin gibi maliyetli bir yapı için bu duruma ekonomik bir çözüm sağlar.

Şekil 4.61'e göre yük katsayısı 3, 7 ve 17-23 m/s hızları için 0.60; 5 ve 9-15 m/s hızları için ise yaklaşık 0.70 değerinde alınabilir.

5. SONUÇLAR

5.1 Analiz Sonuçları

Bu tez, Türkiye'nin sismik aktivitesi yüksek bir bölgesi için kara 5 MW yatay eksenli rüzgar türbini üzerindeki sismik ve rüzgar yüklerinin birlikte etki etmesi durumunu farklı çalışma koşullarında incelemeyi amaçlamıştır.

Mevcut araştırma, kara rüzgar türbinlerinin tasarımı için geniş bir literatür taramasına ve sunulan çeşitli sonuçlarla öneri fırsatları sağlamıştır. Sismik yüklerin, yüksek yapılar olan türbinler için güvenilirlik ve maliyet üzerinde önemli etkiler doğurduğu sonuçlarda görülmüştür. Bilindik sonlu elemanlar programlarının yanı sıra FAST programı sayesinde türbin tabanına uygulanan üç bileşenli deprem kayıtları ile rotor üzerinde oluşan aerodinamik yüklerin etkileşimi incelenebilmiştir. Türbin normal çalışma durumunda iken depremin etki ettiği ve etmediği, rölanti durumunda iken depremin etki ettiği ve etmediği, türbin park halinde iken depremin etki ettiği olmak üzere beş farklı durum değişen rüzgar hızlarında ve farklı yer hareketi kayıtlarıyla analiz edilmiştir. Farklı çevresel koşullar dikkate alınarak yapılan analizlerin sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Normal çalışma koşullarında sismik yüklerin etki etmediği durumda nominal hızın türbine etki etmesiyle türbin enerji üretim kapasitesine ulaşır ve maksimum hız etkiyinceye kadar kontrol sistemlerinin yardımıyla enerji üretimi sabit tutulur.
- Normal çalışma koşullarında sismik yüklerin etki etmesiyle enerji üretiminde bir değişim görülmemiştir.
- Sismik yükleme ile normal çalışma koşullarında moment değerlerinde önemli bir artış meydana gelir. Uygulanan rüzgar hızı arttıkça moment değişimi nominal hız çevresinde farklılık gösterirken genellikle azalma eğilimi göstermiştir.

- Yalnızca deprem etkilerinin dikkate alındığı analiz sonucunda moment değerleri daha büyük gelirken rüzgar ve deprem yüklerinin birlikte etki etmesiyle yaklaşık %10-20 mertebesinde bir aerodinamik sönümleme olduğu söylenebilir.
- Tepe noktası yer değiştirmeleri her analiz koşulu için sismik etkilerle birlikte dikkate değer bir artış göstermiştir.
- Rölanti durumunda kanatların eğim açısının artması rüzgarın kanatlara kaldırma ve sürüklenme etkilerini ortadan kaldırmıştır. Bu yüzden rotorda tork oluşmaz ve enerji üretimi gerçekleştirilemez.
- Türbin rölanti durumuna geçmeden önce rotorda bir miktar hareket vardı. Bu yüzden başlangıç moment değerleri ilerleyen basamaklar göre daha fazla elde edilmiştir. Fakat rotorda sonrasında herhangi bir hareketin olmaması tabanda moment oluşumunu azaltmıştır.
- Rölanti modunda iken deprem yüklerinin etki ettirilmesi ile hakim moment değerleri bu yüklerden ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi bir önceki maddede bahsedildiği gibi rotorun hareketsiz olmasından kaynaklanmaktadır.
- Yapılan analizler sonucunda rüzgar analizi yapılmadan sadece sismik analiz ile belirli katsayıların yardımıyla sismik etkiler dikkate alınması amaçlanmıştır. Bu amaçla değişen çevresel koşullara göre normal çalışma durumu için birincil tasarım için katsayılar önerildi.
- Rölanti durumunda x doğrultusunda etki eden rüzgar hızının taban momentlerinde önemli bir değişime sebep olmadı. Elde edilen katsayıların 1 olmasıyla, bu durumda sadece sismik yüklerin etkin olduğu sonucuna varıldı.
- Katsayılardan görüldüğü üzere iki çevresel yükün birlikte etki etmesi halinde moment talebinin aerodinamik sönümleme ile azalacağı görüldü.
- Elde edilen katsayılar ASCE/AWEA yönetmeliğinin ön gördüğü yük kombinasyonu katsayısı olan 0.75 ile birlikte düşünülerek yeni bir katsayı önerilmiştir. Bu katsayı içerisinde hem aerodinamik sönümleme etkilerini hem de rüzgar ile depremin aynı doğrultuda etki etme olasılığını içerir.
- Bu doğrultuda daha ekonomik sonuçlar ortaya konulmuş olur.

5.2 Gelecekteki Çalışmalar

Rüzgar endüstrisi dinamik bir gelişme içerisindedir. Gelecekteki çalışmalarda farklı türbin modellerinin dinamik özelliklerini farklı zemin koşullarında inceleyerek bu gelişime katkı sağlanmalıdır. Birçok çevresel faktör ile (sıcaklık, rüzgar hızı, türbülans, sismik) yapının cevabı incelenmelidir. Açık deniz rüzgar türbinlerinin değişen çevresel koşullarına karşı enerji üretim eğrileri araştırılmalıdır. Ayrıca bir diğer önemli konu ise zemin yapı etkileşimidir. Bu etkinin yapıda meydana getirdiği dinamik cevap dikkate alınması gereken diğer bir husustur.

Bu çalışma, 6 ile 8 moment büyüklüğündeki 14 farklı güçlü yer hareketi kayıtları dikkate alınarak 5 durum için incelenmiştir Dikkate alınan yönetmelik katsayısı 0.75, 65 kW-5 MW ölçekli türbinleri içerir. Gelecekte farklı ölçekli türbinler için sismik ve rüzgar yüklerinin etki etme doğrultularının olasılığı incelenmelidir. Ayrıca farklı büyüklüklerde deprem kayıtları, incelenen durumlara ek olarak sismik yük kaynaklı acil kapatma durumu ile ele alınarak aerodinamik sönümleme etkileri de bu çalışmayla incelenebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Kyoto Protokolü, url:** http://www.mfa.gov.tr/kyoto-protokolu.tr.mfa

[2] **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,** *"Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü"*, Ocak 2017

[3] **Kıbrıs Türk Elektrik Kurumu Raporu**

[4] **DOE (2008).** *"20% wind energy by 2030: Increasing wind energy's contribution to U.S. electricity supply."*, Report No. DOE/GO-102008-2567, Department of Energy., İstanbul.

[5] **Prowell, I.** "*An Experimental and numerical study of wind turbine seismic behavior"*, 2011, Uc San Diego.

[6] **Risø (2001).** *"Guidelines for Design of Wind Turbines",* Wind Energy Department of Risø National Laboratory and Det Norske Veritas, Copenhagen, Denmark.

[7] **GL (2003).,** *"Guidelines for the Certification of Wind Turbines",* Germanischer Lloyd, Hamburg, Germany.

[8] **IEC (2005)., "***IEC 61400-1 Ed. 3: Wind Turbines - Part 1: Design Requirements",* International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.

[9] **ASCE/AWEA (2012),** *"Recommended practice for compliance of large onshore wind turbine support structures", ASCE/AWEA RP2011, Reston, VA.*

[10] **Bossanyi, E. A.** Bladed for Windows User Manual. Garrad Hassan and Partners, Bristol, UK, 2000.

[11] **Jonkman, J.M. and Buhl Jr., M.L.,** *"FAST user's guide".* Report No: NREL/EL-500-38230, National Renewable Energy LAboratory, 2005.

[12] **Bazeos N., Hatzigeorgiou G.D., Hondros I.D., Karamaneas H., Karabalis D.L., Beskos D.E.,** *"Static, seismic and stability analyses of a prototype wind türbine steel tower",* University of Patras, Greece February 2002.

[13] **Prowell I., Veletzos M., Elgamal A., Restrepo.,** "Shake Table Test Of A 65kw Wınd Turbıne And Computatıonal Sımulatıon", University of California, San Diego 2008.

[14] **Prowell I., Veers P.,** *"Assessment of Wind Turbine Seismic Risk: Existing Literature and Simple Study of Tower Moment Demand",* Sandia Report 2009.

[15] **Hongmang M.,** *"Seismic Analysis For Wind Turbines İncluding Soil-Structure İnteraction Combining Vertical And Horizontal Earthquake"* Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, China 2012.

[16] **Ishihara T., Sarwar M.W., "***Numerıcal And Theoretıcal Study On Seısmıc Response Of Wınd Turbınes",* Department of Civil Engineering, The University of Tokyo.

[17] **Makarios T.K., Efthymiou E., Baniotopoulos C.C.,** *"On the Torsional–Translational Response of Wind Turbine Structures"* King Fahd University of Petroleum & Minerals 2015.

[18] **Díaz O., Suárez L.E.,** *"Seismic Analysis of Wind Turbines"*, Earthquake Engineering Research Institute, 2014.

[19] **Santangelo F., Failla G., Santini A., Arena F.,** *"Time-Domain Uncoupled Analyses For Seismic Assessment Of Land-Based Wind Turbines",* Università di Reggio Calabria, Italy 2015.

[20] **Ghaemmaghami A.R., Mercan O., Kianoush R.,** *"Seismic Soil–Structure İnteraction Analysis Of Wind Turbines İn Frequency Domain",* Canada 2016.

[21] **Patil A., Jung S., Kwon O., "***Structural Performance Of A Parked Wind Turbine Towet Subjected to Strong Ground Motions",* USA 2015.

[22] **De Risi R., Bhattacharya S., Goda K.,** *"Seismic Performance Assessment Of Monopile-Supported Offshore Wind Turbines Using Unscaled Natural Earthquake Records",* UK 2018.

[23] **Yang Y., Bashir M., Li C., Wang J.,** *"Analysis Of Seismic Behaviour Of An Offshore Wind Turbine With A flexible Foundation",* UK 2019.

[24] **Sadowski J.A., Camara A., Málaga-Chuquitaype C., Dai K.,** *"Seismic Analysis Of A Tall Metal Wind Turbine Support Tower With Realistic Geometric Imperfections",* London UK 2019.

[25] **Avassa A.M., Demartino C., Cantestabile P., Ricciardelli F., Vicinanza D.,** *"Some Results on the Vulnerability Assessment of HAWTs Subjected to Wind and Seismic Actions"*, Italy 2017.

[26] **Zhao, X. and Maißer, P. (2006).** *"Seismic response analysis of wind turbine towers including soil-structure interaction"*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 220(1), 53–61.

[27] **Ritschel, U., Warnke, I., Kirchner, J., and Meussen, B. (2003).,***"Wind turbines and earthquakes"*, 2nd World Wind Energy Conference, Cape Town, South Africa. World Wind Energy Association, 1–8.

[28] *Global Wind Report (GWEC) 2018*, April 2019.

[29] **Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TUREB),** *"Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu Temmuz 2019".*

[30] **Proje Kurum/No : TÜBİTAK 110G120,** *"Milli Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi (MİLRES)",* 15 Temmuz 2011-25 Aralık 2018.

[31] **Leite O. B.,** *"Review of Design Procedures for Monopile Offshore Wind Structure"*, University of Porto, June 2015

[32] **P. de Valk,** *"Accuracy of Calculation Procedures for Offshore Wind Turbine Support Structures - Master of Science Thesis"*, Netherlands, 2013.

[33] **M. Arshad and B. C. O'Kelly,** *"Offshore wind-turbine structures: a review - Article"*, vol. 166, no. EN4, 22 10 2013.

[34] **Austin S., Jerath S.,** *"Effect of soil-foundation-structure interaction on the seismic response of wind turbines"*,Ain Shams Engineering Journal 8 (2017) 323-331.

[35] **Hau, E.,** *"Wind Turbines-Fundamentals, Technologies, Application, Economics"* IEEE Electrical Insulation Magazine, 19(2), 48, 2003.

[36] **Sassi, M.A.,** *"Nonlınear Dynamıc Analysıs Of Wınd Turbıne Towers Subject To Desıgn Wınd And Seısmıc Loads"*, Colorado School of Mines.

[37] **van der Tempel, J.,** *"Design of Support Structures for Offshore Wind Turbines - PhD Thseis,"* 2006.

[38] **DNVGL-ST-0437,** *"Loads and site conditions for wind turbines",* November 2016.

[39] **S. Nallayarasu,** *"OFFSHORE STRUCTURES - Analysis and Design (PhD Thesis),"* India.

[40] **Amerikan Petrol Enstitüsü (API),** *"Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design",* November 2014.

[41] **J. F. M. HENRIQUES,** *"Projecto de Torres Eólicas Reticuladas de Grande Atura (150M) - Master Thesis,"* Porto, 2012.

[42] **M. Ragheb,** *"Aerodynamics of Rotor Blades - Technical report*," 2013.

[43] **M. Ragheb and A. M. Ragheb,** *"Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio - Paper,"* Intech, 2011.

[44] **A. Kalmikov and K. Dykes,** *"Wind Power Fundamentals - Report".*

[45] **Şahin M., 2018,** *"Dynamic Modeling, Control and Adaptive Envelope Protection System for Horizontal Axis Wind Turbines, PhD Thesis, Department of Aerospace Engineering",* Middle East Technical University, Ankara.

[46] **R. M. d. C. D. Alves,** "*Acções Dinâmicas em Estruturas Offshore: Torres Eólicas em Plataformas Flutuantes - Master Thesis,"* Lisboa, 2011.

[47]**Url-1**<*https://suatakdag.wordpress.com/2013/12/25/turkiye-ruzgar-enerjisi-potansiyel-haritasi/*>, erişim tarihi 25.12.2013.

[48] **Url-2<** https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>

[49] **TBDY,** *"Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (2018)."* T.C. Resmî Gazete, 30364, 18 Mart 2018.

[50] **TS500,** *"Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları",* Türk Standardı Şubat 2000.

[51] **ASCE-7-2010,** *"Binalar ve Diğer Yapılar için Minimum Tasarım Yükleri", Amerikan İnşaat Mühendisliği Topluluğu, Reston, Virginia.*

[52] **Myers A.T., Arwade S.R., Valamanesh V., Hallowell S., Carswell W. ,** *"Strength, stiffness, resonance and design of offshore wind turbine monopiles",* Engineering Structures 13 Haziran 2015.

[53] **Ferguson, MC (ed.),** *"Opti-OWECS Final Report Vol.4: A typical Design Solution for an Offshore Wind Energy Conversion System Institute for Wind Energy",* Delft University of Technology 1998.

[54] **Zaaijer, MB**, "*Sensitivity analysis for foundations of offshore wind turbines, Section Wind Energy",* WE 02181, Delft 2000.

[55]**American Petrol Institue (API),** *"Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design",* API RP-2A-WSD, October 2010.

[56] **Jonkman J., Butterfield, Musial W., Scott G.,** *"Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development",* Technical Report NREL/TP-500-38060 Şubat 2009.

[57] **Jonkman B.J., Kilcher L.** *"TurbSim User's Guide",* Technical Report NREL Eylül 2012.

[58] **Moriarty P.J, Hansen A.C.,** *"AeroDyn Theory Manuel",* Technical Report NREL/EL-500-36881 NREL December 2005.

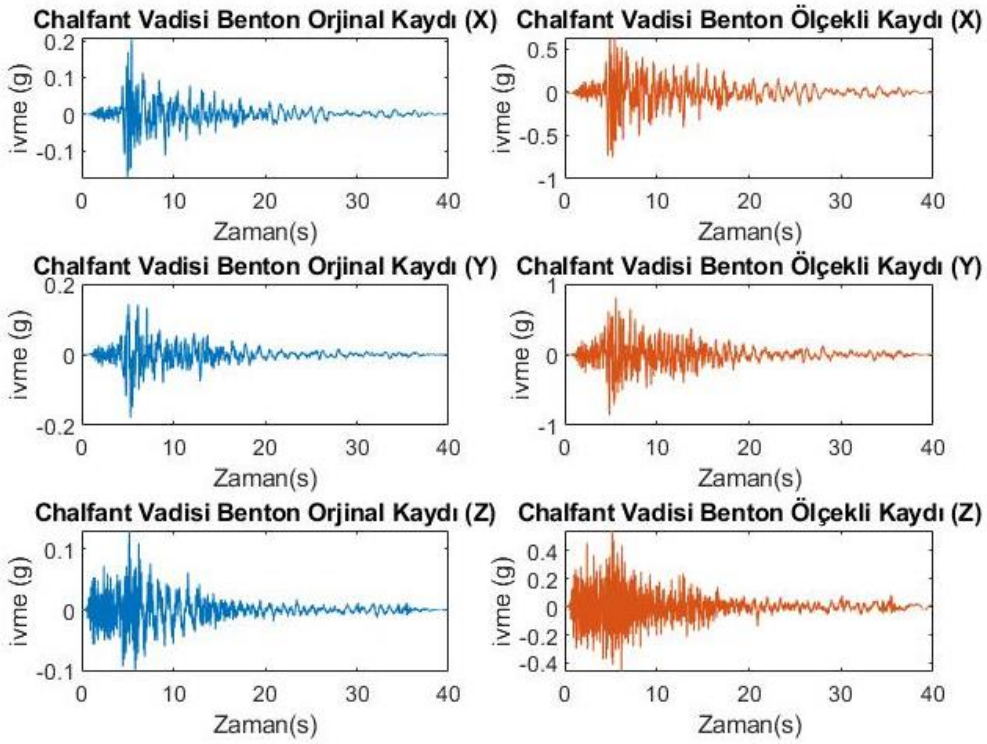
[59] **Asareh M.A., Prowell I.,** *"Seismic Loading for FAST",* Subcontract Report NREL/SR-5000-53872 NREL August 2011.

EKLER

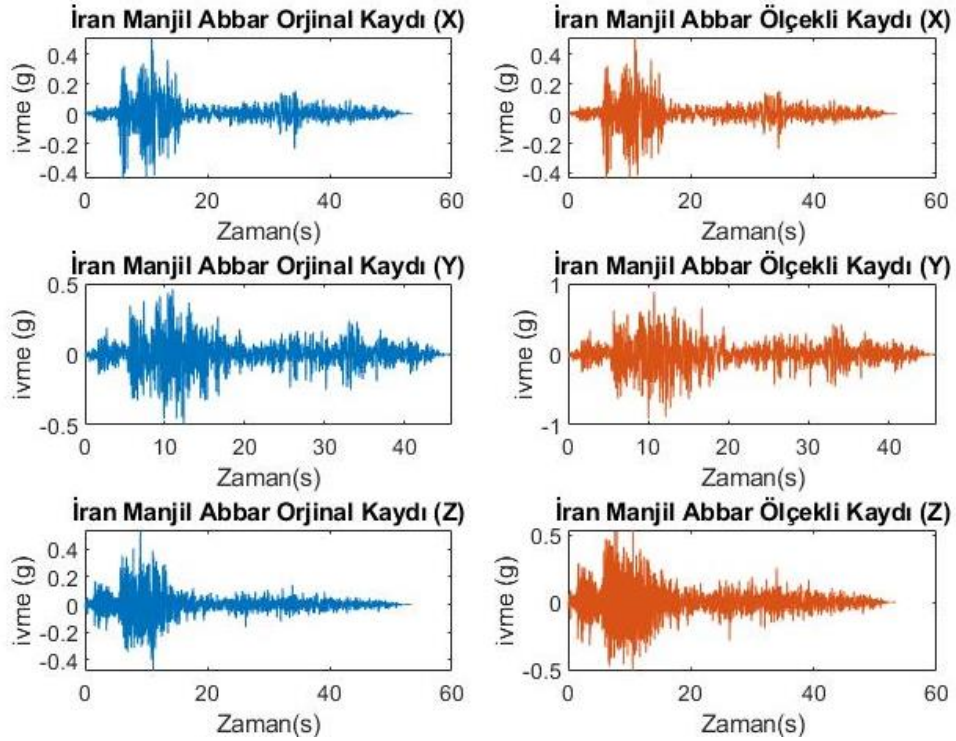
Ek A : Orijinal ve ölçekli deprem kayıtlarının grafikleri.

Ek B : Deprem analizlerinin sonucunda tabanda oluşan maksimum momentler ve önerilen katsayılar.

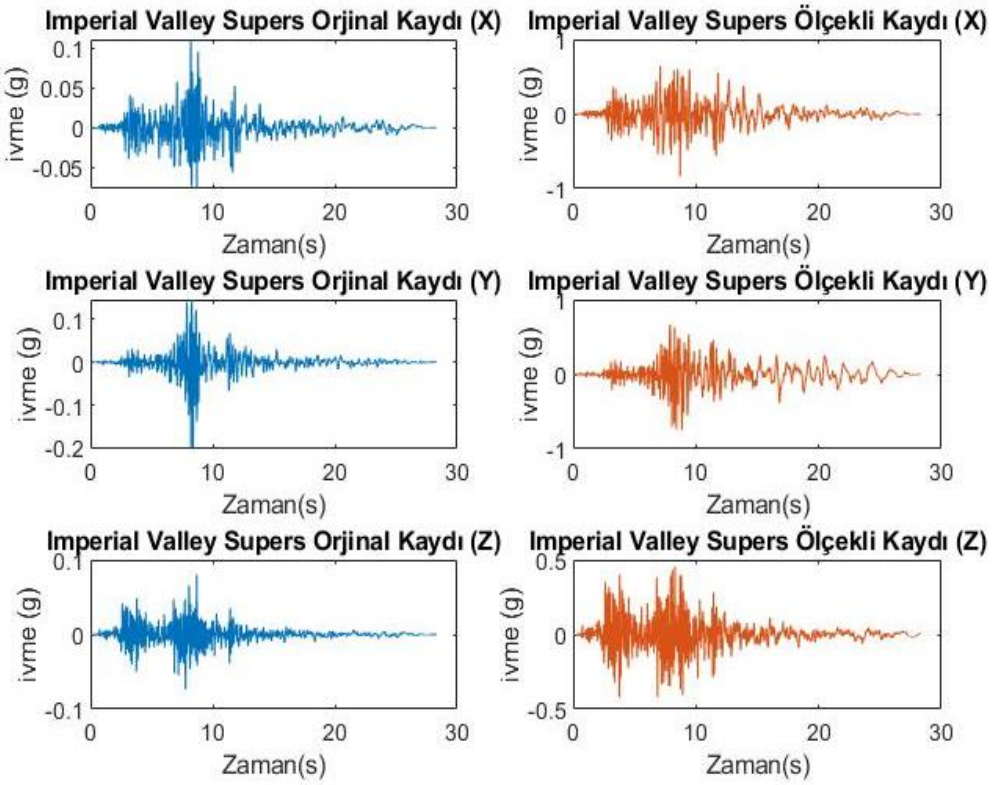
EK A:



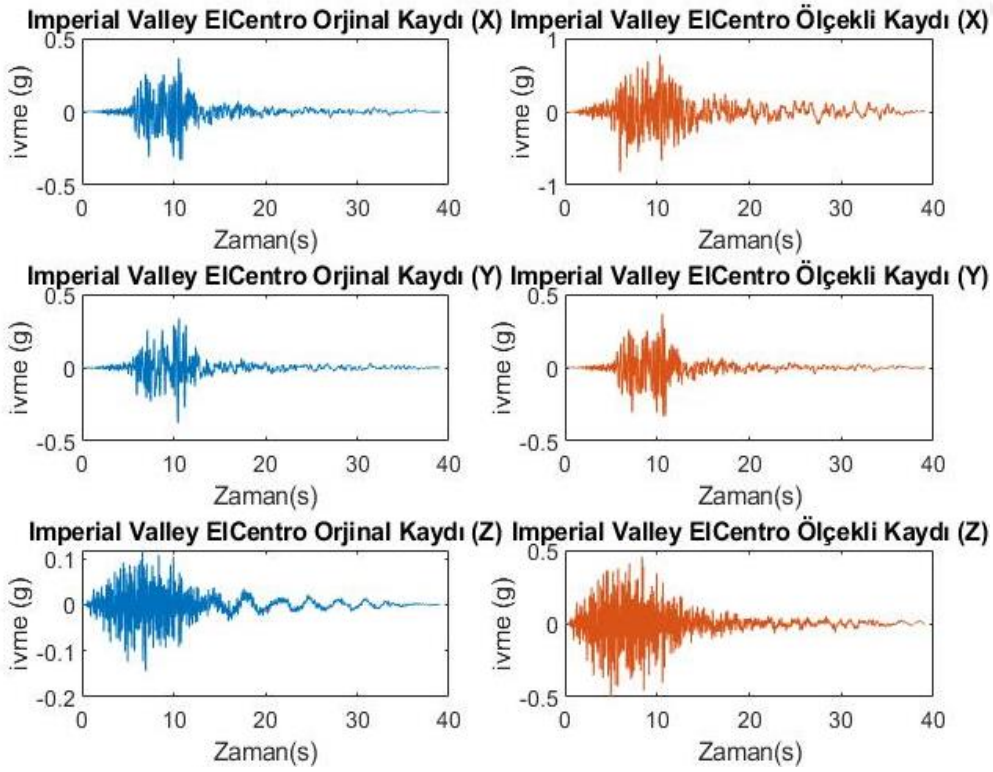
Şekil A.1: Chalfant Valley depremi Benton istasyonu kaydı.



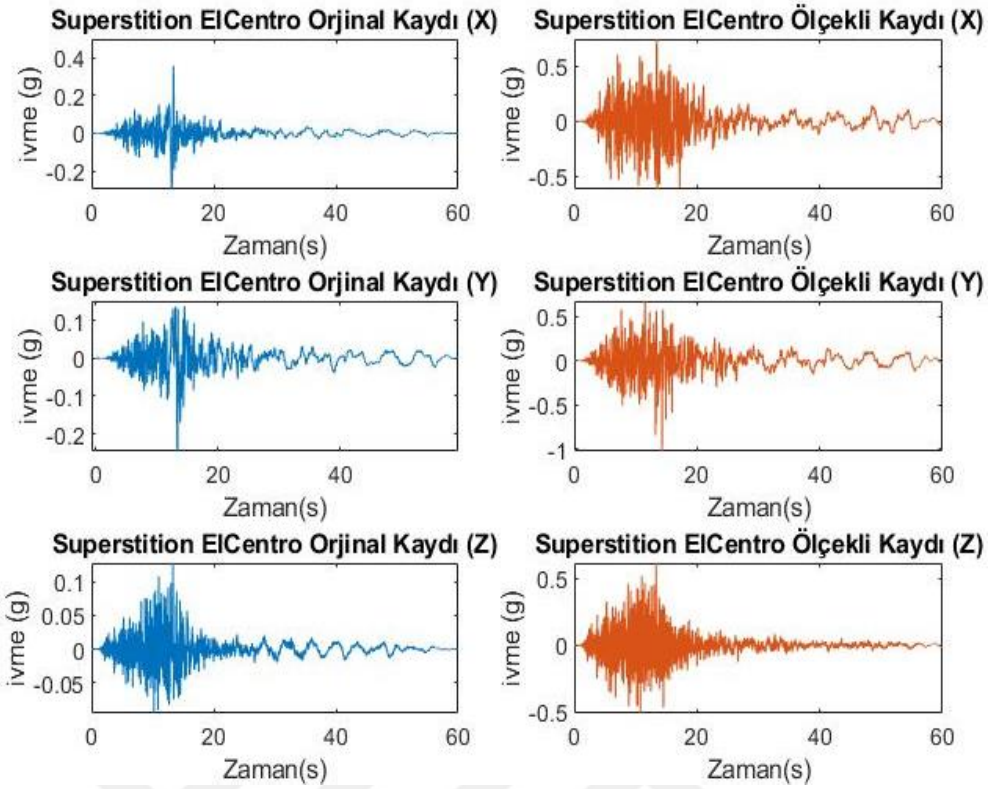
Şekil A.2: İran Manjil depremi Abbar istasyonu kaydı.



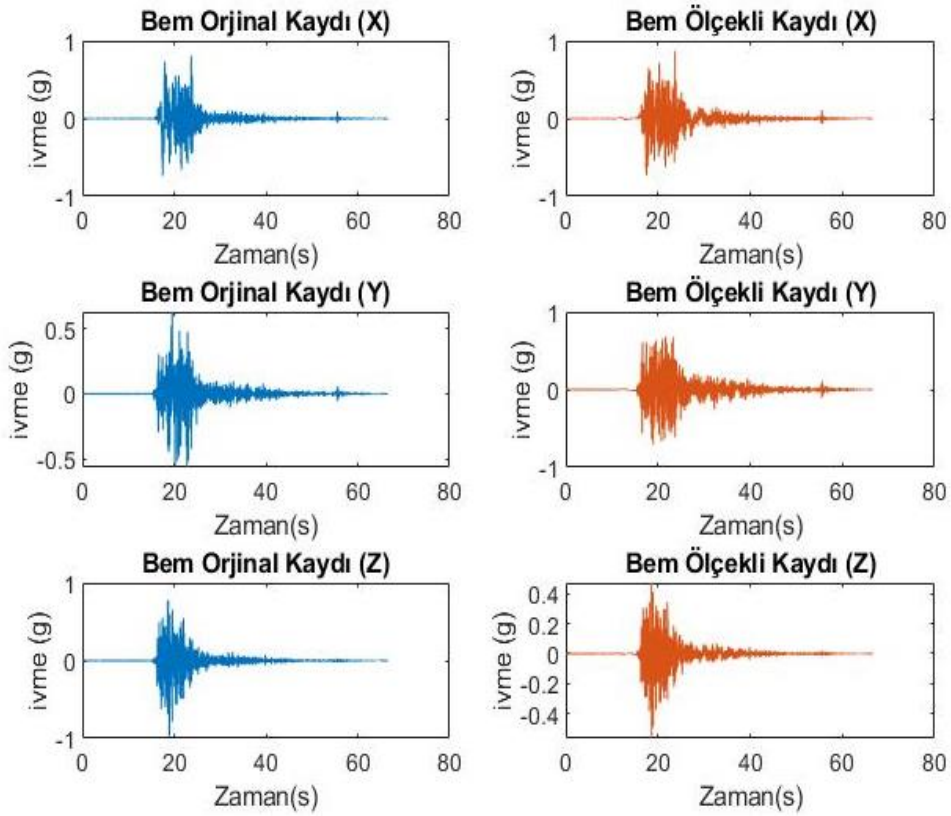
Şekil A.3: İmperial Valley depremi Superstition istasyonu kaydı.



Şekil A.4: İmperial Valley depremi El Centro istasyonu kaydı.

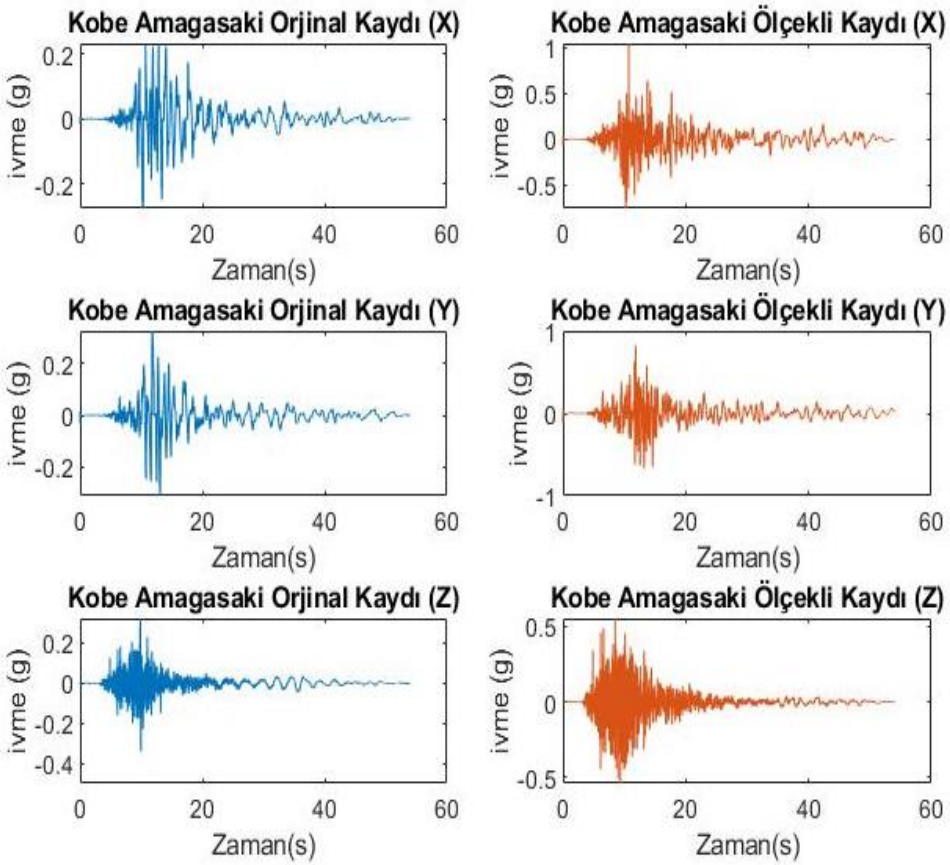


Şekil A.5: Superstition depremi El Centro istasyonu kaydı.

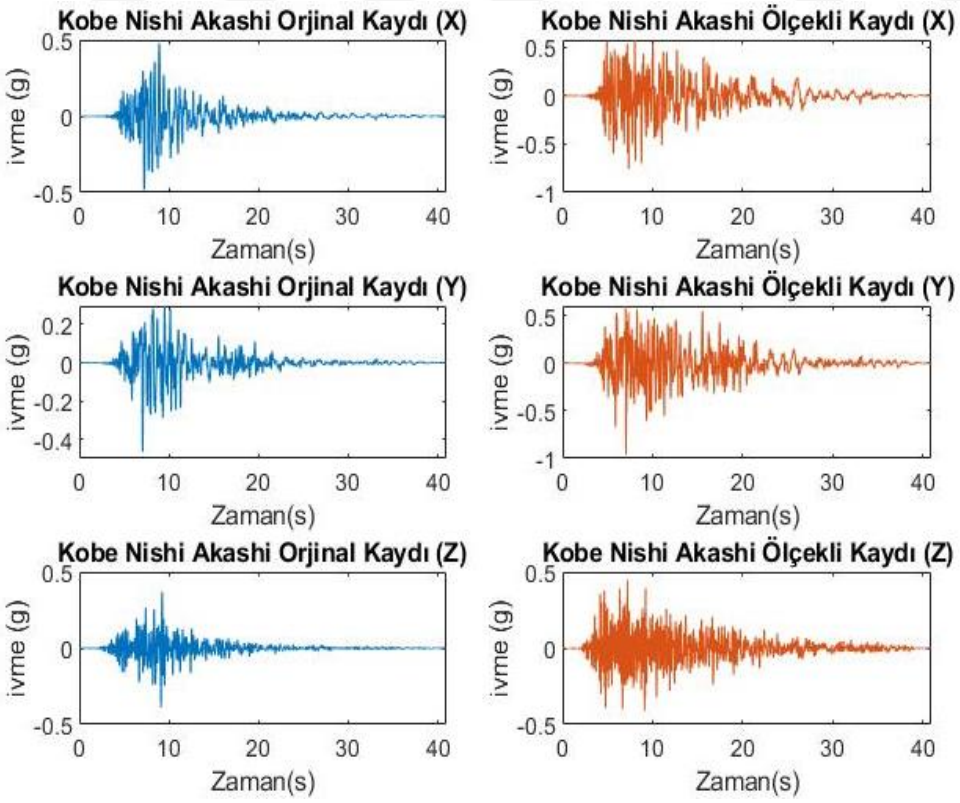


Şekil A.6: Bem İran depremi Bem istasyonu kaydı.

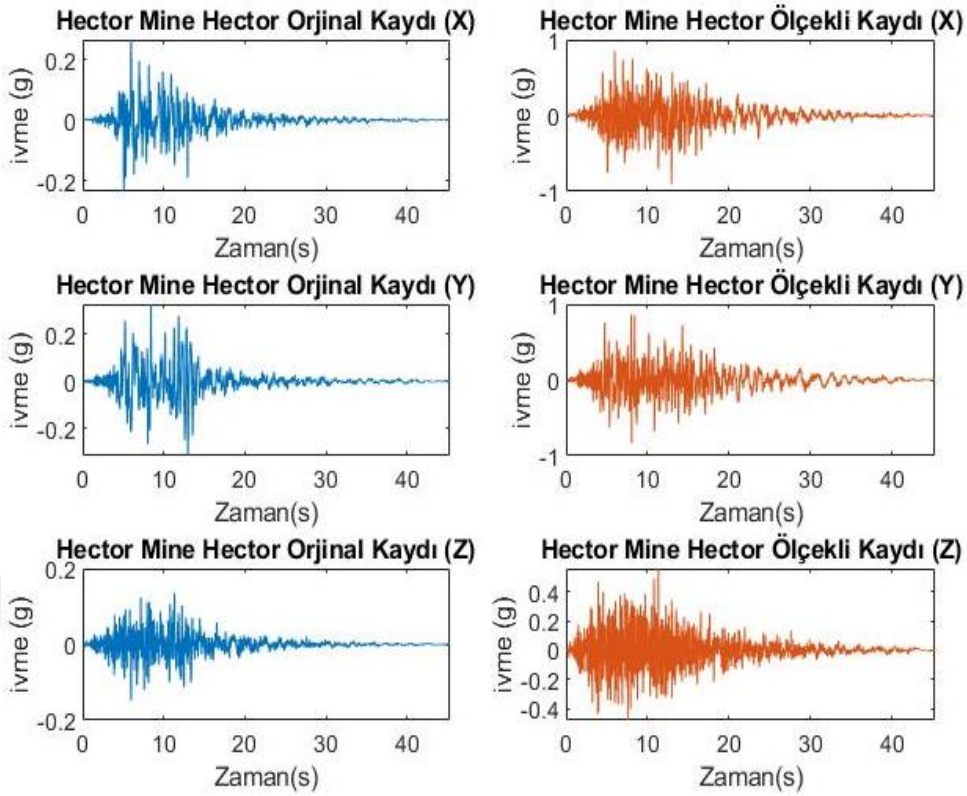
.



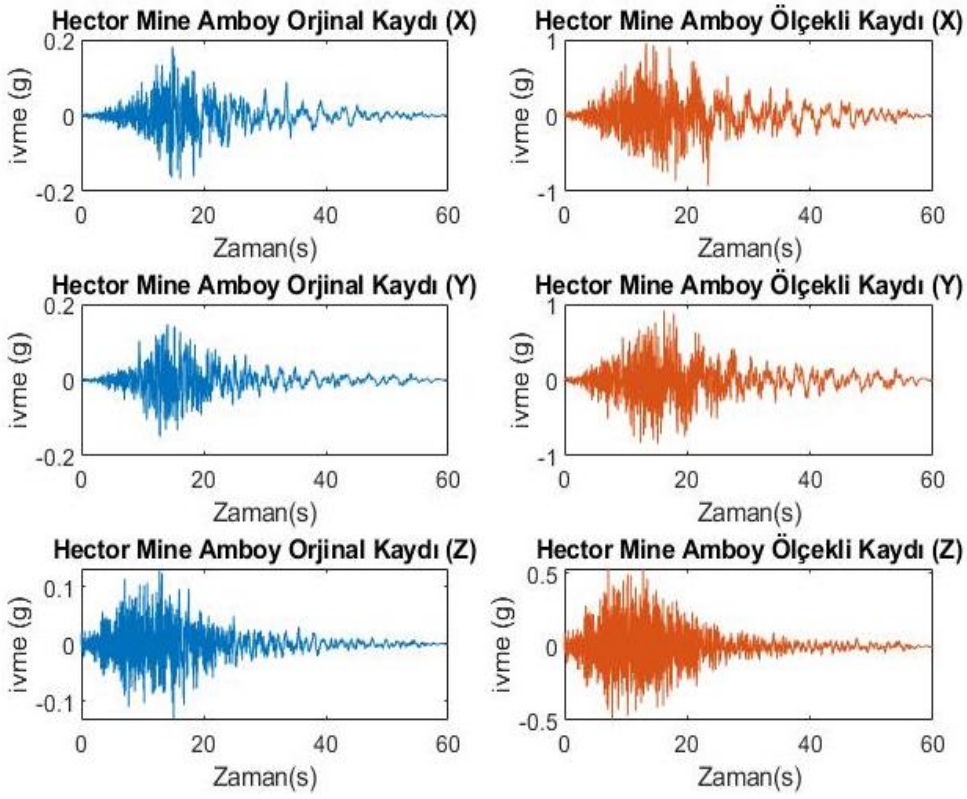
Şekil A.7: Kobe Japonya depremi Amagasaki istasyonu kaydı.



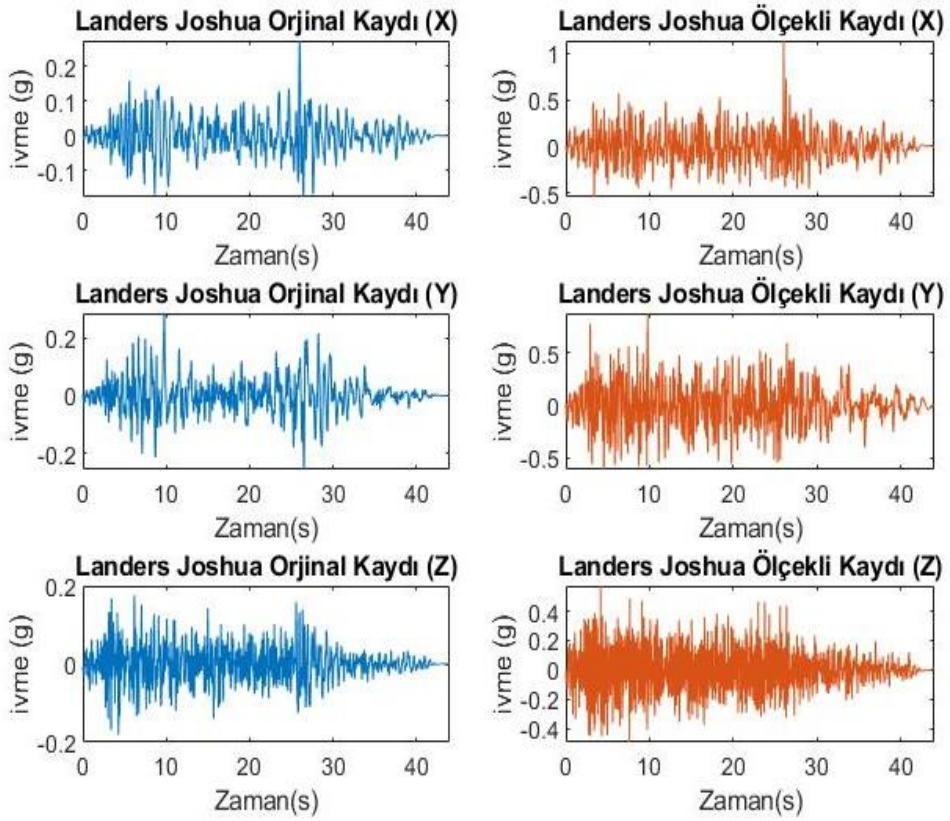
Şekil A.8: Kobe Japonya depremi Nishi Akashi istasyonu kaydı.



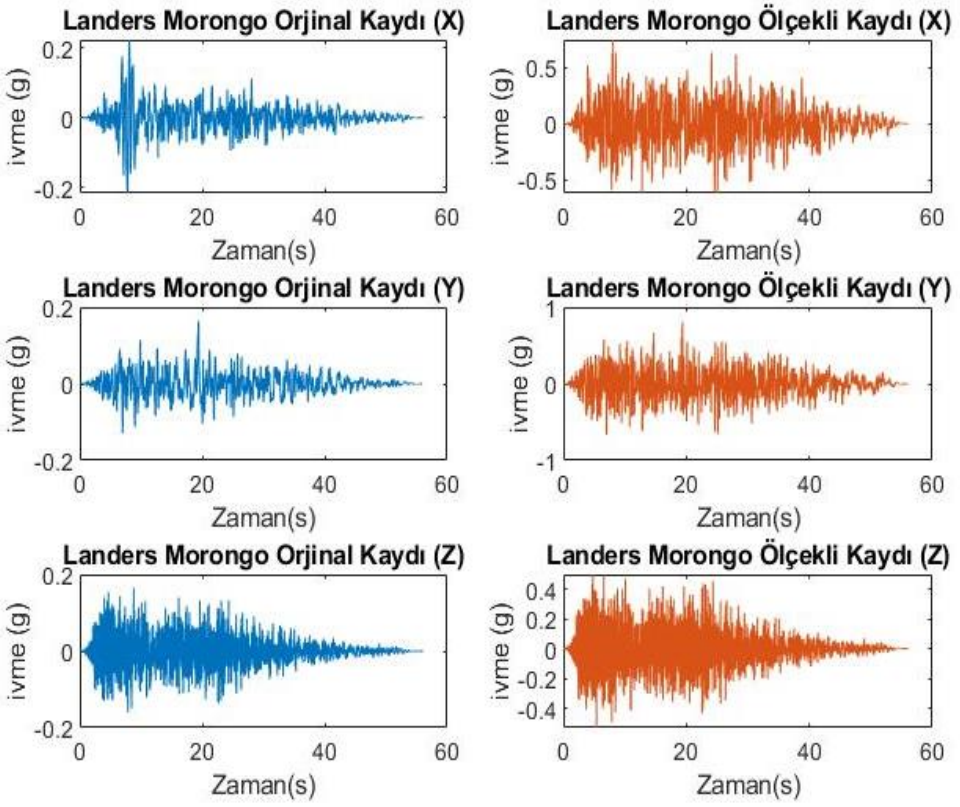
Şekil A.9: Hector Mine depremi Hector istasyonu kaydı.



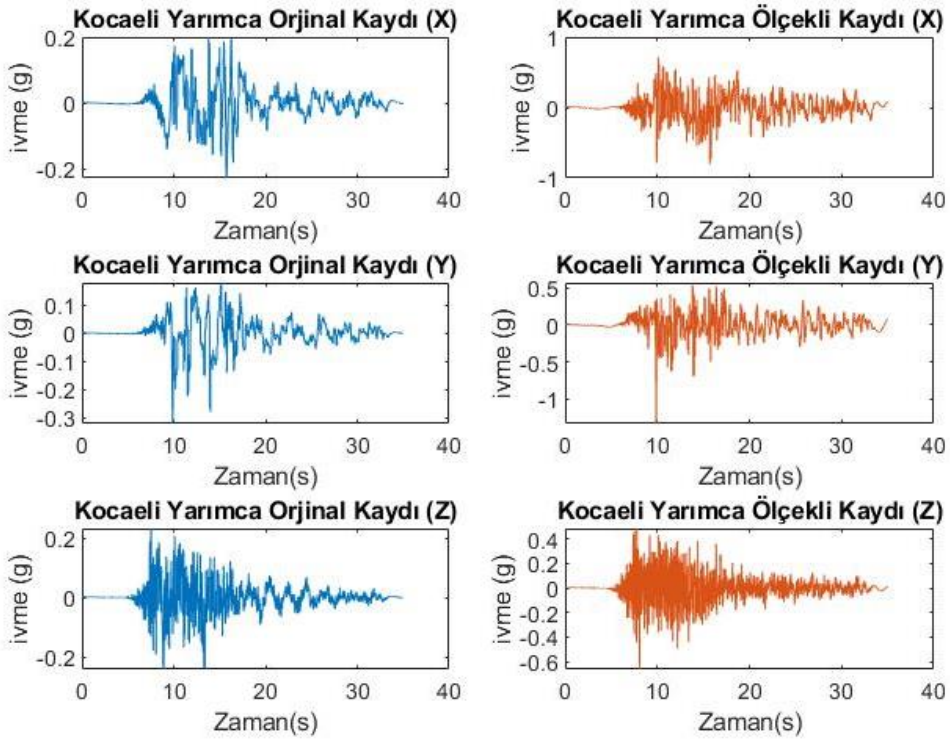
Şekil A.10: Hector Mine depremi Amboy istasyonu kaydı.



Şekil A.11: Landers depremi Joshua Tree istasyonu kaydı.



Şekil A.12: Landers depremi Morongo istasyonu kaydı.



Şekil A.13: Kocaeli depremi Yarımca istasyonu kaydı.

EK B:

Çizelge B.1 : Kaliforniya Chalfant Vadisi depremi Benton kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
2.55E+05	1.58E+05	2450.70

Çizelge B.2 : Kaliforniya Chalfant Vadisi depremi Benton kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	118030	22173	158060	180233	0.7	25	0.8
5	126610	37521		195581	0.8	30	0.8
7	130470	53931		211991	0.8	35	0.8
9	133260	72846		230906	0.8	40	0.8
11	149020	78377		236437	0.9	45	0.8
13	125340	82328		240388	0.8	50	0.8
15	124970	90235		248295	0.8		
17	111170	62629		220689	0.7		
19	113300	61149		219209	0.7		
21	125280	57602		215662	0.8		
23	106810	59099		217159	0.7		

Çizelge B.3 : İran Manjil depremi Abbar kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
157560	175750	1750

Çizelge B.4 : İran Manjil depremi Abbar kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	153780	22173	175750	197923	0.9	25	1.1
5	162500	37521		213271	0.9	30	1.1
7	157240	53931		229681	0.9	35	1.1
9	177510	72846		248596	1.0	40	1.1
11	195180	78377		254127	1.1	45	1.1
13	192760	82328		258078	1.1	50	1.1
15	169160	90235		265985	1.0		
17	175440	62629		238379	1.0		
19	157270	61149		236899	0.9		
21	155410	57602		233352	0.9		
23	155300	59099		234849	0.9		

Çizelge B.5 : Imperial Valley depremi Superstition kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
72157	147410	1413

Çizelge B.6 : Imperial Valley depremi Superstition kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	142710	22173	147410	169583	1.0	25	0.8
5	145010	37521		184931	1.0	30	0.9
7	144850	53931		201341	1.0	35	0.8
9	158240	72846		220256	1.1	40	0.8
11	179470	78377		225787	1.2	45	0.8
13	159010	82328		229738	1.0	50	0.8
15	155240	90235		237645	1.0		
17	148590	62629		210039	0.9		
19	161620	61149		208559	0.9		
21	156470	57602		205012	1.0		
23	150720	59099		206509	1.1		

Çizelge B.7 : Imperial Valley depremi El Centro kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
254970	158060	2451

Çizelge B.8 : Imperial Valley depremi El Centro kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	152790	22173	158060	180233	1.0	25	0.9
5	152880	37521		195581	1.0	30	1.0
7	153600	53931		211991	1.0	35	0.9
9	165110	72846		230906	1.0	40	1.0
11	169410	78377		236437	1.1	45	1.0
13	161490	82328		240388	1.0	50	1.0
15	154600	90235		248295	1.0		
17	152680	62629		220689	1.0		
19	132420	61149		219209	0.8		
21	149240	57602		215662	0.9		
23	146670	59099		217159	0.9		

Çizelge B.9 : Superstition depremi El Centro kaydı için moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
108280	197750	1771

Çizelge B.10 : Superstition depremi El Centro kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	142250	22173	197750	219923	0.7	25	1.0
5	113530	37521		235271	0.6	30	1.0
7	106650	53931		251681	0.5	35	1.0
9	105700	72846		270596	0.5	40	1.0
11	103280	78377		276127	0.5	45	1.0
13	105900	82328		280078	0.5	50	1.0
15	108870	90235		287985	0.6		
17	111670	62629		260379	0.6		
19	126490	61149		258899	0.6		
21	133760	57602		255352	0.7		
23	125990	59099		256849	0.6		

Çizelge B.11 : Bem İran depremi Bem kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
187900	182470	1724

Çizelge B.12 : Bem İran depremi Bem kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	141910	22173	182470	204643	0.8	25	0.9
5	114950	37521		219991	0.6	30	0.9
7	115080	53931		236401	0.6	35	0.9
9	115690	72846		255316	0.6	40	0.9
11	116230	78377		260847	0.6	45	0.9
13	111910	82328		264798	0.6	50	0.9
15	111170	90235		272705	0.6		
17	120480	62629		245099	0.7		
19	126480	61149		243619	0.7		
21	133730	57602		240072	0.7		
23	125990	59099		241569	0.7		

Çizelge B.13 : Japonya Kobe depremi Amagasaki kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
207830	237950	2475

Çizelge B.14 : Japonya Kobe depremi Amagasaki kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	167130	22173	237950	260123	0.7	25	1.1
5	150390	37521		275471	0.6	30	1.1
7	153660	53931		291881	0.6	35	1.0
9	163980	72846		310796	0.7	40	1.0
11	171520	78377		316327	0.7	45	1.0
13	158560	82328		320278	0.7	50	1.0
15	159770	90235		328185	0.7		
17	156010	62629		300579	0.7		
19	146360	61149		299099	0.6		
21	148710	57602		295552	0.6		
23	165560	59099		297049	0.7		

Çizelge B.15 : Japonya Kobe depremi Nishi Akashi kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
143570	87762	1545

Çizelge B.16 : Japonya Kobe depremi Nishi Akashi kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	88683	22173	87762	109935	1.0	25	1.3
5	106860	37521		125283	1.2	30	1.3
7	107210	53931		141693	1.2	35	1.3
9	121830	72846		160608	1.4	40	1.3
11	130150	78377		166139	1.5	45	1.3
13	121900	82328		170090	1.4	50	1.4
15	126610	90235		177997	1.4		
17	113890	62629		150391	1.3		
19	120490	61149		148911	1.4		
21	121300	57602		145364	1.4		
23	129420	59099		146861	1.5		

Çizelge B.17 : Hector Mine depremi Hector kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
186040	259710	2526

Çizelge B.18 : Hector Mine depremi Hector kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	211500	204850	259710	464560	0.8	25	1.1
5	225940	210130		469840	0.9	30	1.1
7	221120	214160		473870	0.9	35	1.1
9	249510	218350		478060	1.0	40	1.1
11	258110	236690		496400	1.0	45	1.1
13	229910	191610		451320	0.9	50	1.1
15	230450	183230		442940	0.9		
17	224300	179090		438800	0.9		
19	207990	169540		429250	0.8		
21	233900	175250		434960	0.9		
23	214120	173290		433000	0.8		

Çizelge B.19 : Hector Mine depremi Amboy kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
377960	738950	7692

Çizelge B.20 : Hector Mine depremi Amboy kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	572270	204850	738950	943800	0.8	25	1.5
5	573210	210130		949080	0.8	30	1.5
7	552770	214160		953110	0.7	35	1.5
9	527910	218350		957300	0.7	40	1.4
11	426720	236690		975640	0.6	45	1.4
13	400230	191610		930560	0.5	50	1.4
15	404420	183230		922180	0.5		
17	394370	179090		918040	0.5		
19	381460	169540		908490	0.5		
21	367360	175250		914200	0.5		
23	377370	173290		912240	0.5		

Çizelge B.21 : Landers depremi Joshua Tree kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
231090	372450	4035

Çizelge B.22 : Landers depremi Joshua Tree kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	306530	204850	372450	577300	0.8	25	1.0
5	284240	210130		582580	0.8	30	1.0
7	284100	214160		586610	0.8	35	1.0
9	275850	218350		590800	0.7	40	1.0
11	286190	236690		609140	0.8	45	1.0
13	269100	191610		564060	0.7	50	1.0
15	249200	183230		555680	0.7		
17	255540	179090		551540	0.7		
19	242310	169540		541990	0.7		
21	236590	175250		547700	0.6		
23	238340	173290		545740	0.6		

Çizelge B.23 : Landers depremi Morongo kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
174380	183410	2138

Çizelge B.24 : Landers depremi Morongo kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	144840	204850	183410	388260	0.8	25	1.0
5	150590	210130		393540	0.8	30	1.0
7	136820	214160		397570	0.7	35	1.0
9	155490	218350		401760	0.8	40	1.0
11	177940	236690		420100	1.0	45	1.0
13	144670	191610		375020	0.8	50	1.0
15	138070	183230		366640	0.8		
17	134190	179090		362500	0.7		
19	134340	169540		352950	0.7		
21	136650	175250		358660	0.7		
23	129420	173290		356700	0.7		

Çizelge B.25 : Kocaeli depremi Yarımca kaydı için taban moment değerleri.

Maksimum taban momentleri		
Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
153380	151690	1807

Çizelge B.26 : Kocaeli depremi Yarımca kaydı için katsayılar.

	Rüzgar+Deprem	Rüzgar	Deprem				
Rüzgar Hızı (m/s)	My (kNm)	My (kNm)	My (kNm)	Rüzgar+Deprem Matematiksel	Katsayılar (Normal)	Rüzgar Hızı (m/s)	Katsayılar (Rölanti)
3	230340	204850	151690	356540	1.1	25	1.0
5	218840	210130		361820	1.2	30	1.0
7	239590	214160		365850	1.2	35	1.0
9	251810	218350		370040	1.3	40	1.0
11	250870	236690		388380	1.3	45	0.9
13	230570	191610		343300	1.5	50	1.0
15	231230	183230		334920	1.3		
17	221640	179090		330780	1.4		
19	208250	169540		321230	1.3		
21	222130	175250		326940	1.3		
23	218890	173290		324980	1.2		

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Elif ALTUNSU
Doğum Tarihi ve Yeri **:** 01.10.1993 RİZE
E-posta **:** elifaltunsu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU :

- **Lisans** **:** 2017, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği.

MESLEKİ DENEYİMİ :

- 2020-Halen : İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi.

YAYINLAR :

- Altunsu E., Gunes O., Sarı A., " *Rüzgar Türbinlerinin Sismik Davranışı*". (3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2019, Ankara, Türkiye, 11 - 13 October 2019.)
- Gunes O., Altunsu E., Sarı A., " *Yorulma Etkisindeki Rüzgar Türbinlerinin Yaşam Ömürlerinin Değerlendirilmesi*".(3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2019, Ankara, Türkiye, 11 - 13 October 2019.)
- Gunes O., Altunsu E., Sorosh S., Sarı A., *"Evaluation of Existing Fatigue Cracks on Wind Turbines Subjected to Earthquake and Wind Loads ".*
  (Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering, Life-cycle performance assessment of civil engineering system, IALCCE 2020, Shanghai, China, 23-27 October 2020.)

Devam Eden Çalışmalar

- Güneş O., Altunsu E., Sarı A., *"Special Design Cases of Wind Turbines"*. (Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE)
- Altunsu E., Günes O., Sorosh S., Sarı A., *"Effects of Seismic and Aerodynamic Loads on a 5 MW Scale Steel Wind Turbine"*. (9th Turkish

Conference on Earthquake Engineering, 1-3 June 2020, Istanbul Technical University)

- Sorosh S., Sarı A., Altunsu E., *"Investigating the lateral load behavior of tunnel type rocking walls"*.
  (14th International Congress on Advances in Civil Engineering, 16-18 September 2020, Istanbul Turkey)
- Güneş O., Altunsu E., Sorosh S., Sarı A., *"Investigation of structural Dynamics of 5 MW Onshore Wind Turbine"*. (14th International Congress on Advances in Civil Engineering, 16-18 September 2020, Istanbul Turkey)
- Altunsu E., Güneş O., Sorosh S., Sarı A., *"Investigation of the behavior of offshore wind turbines under environmental loads"*. (14th International Congress on Advances in Civil Engineering, 16-18 September 2020, Istanbul Turkey)