

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR TÜRBİN KULELERİNİN TASARIMINDA KULLANILACAK
RÜZGAR YÜKLERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK BİR
KARŞILAŞTIRMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüsniye Senem BÜYÜKÇOLPAN

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

EYLÜL 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR TÜRBİN KULELERİNİN TASARIMINDA KULLANILACAK
RÜZGAR YÜKLERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK BİR
KARŞILAŞTIRMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hüsniye Senem BÜYÜKÇOLPAN
(301101023)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. Burak BARUTÇU

EYLÜL 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 301101023 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hüsniye Senem BÜYÜKÇOLPAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**RÜZGAR TÜRBİN KULELERİNİN TASARIMINDA KULLANILACAK RÜZGAR YÜKLERİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK BİR KARŞILAŞTIRMA**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yard. Doç. Dr. Burak BARUTÇU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Önder GÜLER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç Dr. Ercan Yüksel
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **28 Nisan 2015**
Savunma Tarihi : **10 Eylül 2015**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans yolculuğumun en başından beri beraber yol aldığımız; ilmi, deneyimleri ve yüksek entelektüel birikimi ile öğreten, yol gösteren ve hiçbir desteğini esirgmeden sabırla bugünlere gelmemi sağlayan değerli hocam ve tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU'ya;

Tez çalışmamız boyunca derin teknik bilgisi ve tecrübesi ile gerek laboratuvar gerekse uygulama konusunda danışmanlığını esirgemeyen İTÜ İnşaat Fakültesi öğretim üyesi Doç. Dr. Ercan YÜKSEL'e;

Tez çalışmamın sonundaki düğümü çözmemde bana yol gösteren cömert insan, İstanbul Kültür Üniveristesi öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Ahmet Anıl DİNDAR'a;

Miras verdikleri genler, ahlaki ve etik değerler ile bana olan inançlarını hiç yitirmeyen, hep yanımda ve destekçim olan canım ailem; babam Sedat TÜR KARSLAN, annem Dürüye TÜR KARSLAN ve ilham kaynağım olan kardeşlerim Yasemin TÜR KARSLAN ile Ayşenur TÜR KARSLAN'a;

Benim ve tez çalışmamın bu günlere gelmesinde gerek fiziksel gerek manevi katkıları ile pes ettiğimde itici gücüm, yoldaşım, biricik eşim Volkan BÜYÜKÇOLPAN'a;

Bu tez çalışmasının tamamlanmasında bir şekilde katkıda bulunmuş herkese sonsuz teşekkür ederim.

Eylül 2015

Hüsniye Senem BÜYÜKÇOLPAN
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Özeti	3
2. RÜZGAR ENERJİSİ.....	5
2.1 Giriş.....	5
2.2 Tarihçe.....	5
2.3 Günümüzde Rüzgar Türbinleri.....	7
2.4 Rüzgar Olayı	8
2.4.1 Atmosfer.....	8
2.4.2 Rüzgarın kaynağı ve oluşumu.....	8
2.4.2.1 Dünya'nın şekli ve hareketleri	8
2.4.2.2 Dünya'daki rüzgar sistemleri	9
Basınç gradyan kuvvetleri.....	9
Coriolis kuvveti.....	10
Atalet kuvvetleri.....	11
Sürtünme kuvvetleri	11
2.4.3 Rüzgarların sınıflandırılması.....	11
2.4.3.1 Küresel rüzgar sistemleri.....	11
Ticaret rüzgarları (Alize rüzgarları).....	11
Batılı rüzgarlar	12
Kutup rüzgarları	12
2.4.3.2 Mevsim rüzgarları (Muson rüzgarları).....	12
2.4.3.3 Günlük rüzgarlar	12
Kara ve deniz meltemleri	13
Dağ ve vadi meltemleri	13
2.4.3.4 Yerel rüzgarlar	14
Sam yeli.....	14
Fön	14
Bora.....	15
Mistral	15
Krivetz.....	15
Poyraz.....	15
2.4.4 Meteorolojik ve topografik yapının rüzgara etkisi.....	16
2.4.4.1 Atmosferik sınır tabakada rüzgar akışına etki eden faktörler	16
2.4.5 Yüzeyde rüzgar verisi ve ölçüm yöntemleri	17

2.4.5.1	Anemometreler.....	17
2.4.5.2	Anemograf.....	18
2.4.6	Rüzgar karakteristikleri.....	18
2.4.6.1	Kısa süreli rüzgar şiddeti değişimleri.....	18
2.4.6.2	Bir rüzgar türbininin karakteristik güç eğrisi.....	19
2.4.6.3	Düşey rüzgar profili.....	20
2.4.6.4	Rüzgar yönünün değişimi.....	20
2.4.6.5	Rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesi.....	21
2.4.6.6	Olasılık dağılım fonksiyonları (Weibull ve Rayleigh dağılımları)	22
2.4.6.7	Rüzgar karakteri üzerinde arazinin etkisi.....	25
2.5	Rüzgar Türbinleri Ve Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	26
2.5.1	Yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	26
2.5.1.1	Tek kanatlı rüzgar türbinleri.....	26
2.5.1.2	Çift kanatlı rüzgar türbinleri.....	26
2.5.1.3	Üç kanatlı rüzgar türbinleri.....	27
2.5.1.4	Çok kanatlı rüzgar türbinleri.....	27
2.5.1.5	Rüzgar üstü (upwind) türbinler.....	27
2.5.1.6	Rüzgar altı (downwind) türbinler.....	28
2.5.2	Dikey eksenli rüzgar türbinleri.....	28
2.5.2.1	Darrieus türbini.....	28
H-Darrieus türbini (Gyromill).....	29	
Δ -Darrieus türbini.....	29	
Helical-Darrieus türbini.....	30	
2.5.2.2	Savonius türbini.....	30
Helical-Darrieus türbini.....	30	
2.5.3	Eğik eksenli rüzgar türbini.....	31
2.6	Rüzgar Türbini Komponentleri.....	31
2.6.1	Temel.....	31
2.6.2	Nasel (Muhafaza).....	32
2.6.3	Rotor (Pervane).....	32
2.6.4	Elektrik sistemi dairesi.....	32
2.6.5	Kule.....	32
2.6.5.1	Rüzgar türbin kulesi tipleri.....	33
Çelik kafes tipi kuleler.....	33	
Çelik silindirik kuleler.....	34	
Betonarme kuleler.....	35	
Hibrit kuleler.....	35	
Gergili çelik kuleler.....	36	
3.	RÜZGAR TÜRBİN KULESİNİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ.....	37
3.1	Dayanım ve Rijitlik.....	37
3.1.1	Kopma dayanımı.....	37
3.1.2	Burkulma dayanımı.....	37
3.1.3	Yorulma dayanımı.....	37
3.2	Kule Doğal Frekansının Belirlenmesi.....	38
4.	YÜKLERİN BELİRLENMESİ VE MODELLEME.....	39
4.1	Türbin ve Kule Özellikleri.....	39
4.2	Rüzgar Yüğü Hesabı.....	39
4.2.1	DIN 1055-4 normuna (2005 revizyonu ve 2006 düzeltme eki) göre binalar için tasarım yükleri.....	39
4.2.1.1	Rüzgar yönü.....	40

4.2.1.2 Rüzgar basıncı	40
4.2.1.3 Rüzgar kuvvetleri	40
Aerodinamik katsayılar	45
Genel	45
Yük katsayısı, C_f	46
Dış Basınç katsayısı, C_{pe}	47
Uygulama	51
4.2.2 EIC 61400 -1 tasarım koşulları	58
4.2.2.1 Türbin sınıfları	59
4.2.2.2 Rüzgar koşulları	59
4.2.2.3 Normal rüzgar koşulları	60
Rüzgar hızı dağılımı	60
Normal rüzgar profili modeli (Normal wind profile-NWP)	60
Normal türbülans modeli (Normal-turbulence model-NTM)	61
4.2.2.4 Aşırı rüzgar koşulları.....	61
Aşırı rüzgar hızı modeli (Extreme wind speed model-EWM).....	61
İşletim sırasında fırtına (Extreme operating gust-EOG)	62
Aşırı türbülans modeli (Extreme turbulence model- ETM).....	62
Aşırı yön değişimi (Extreme direction change- EDC).....	62
Aşırı rüzgar kesmesi (Extreme wind shear-EWS)	64
4.2.2.5 Yüklerin hesaplanması	64
Genel	64
Yükler.....	64
Atalet ve ağırlık yükleri	64
Aerodinamik yükler	65
İşletim yükleri	65
Diğer yükler	65
4.2.2.6 Dizayn koşulları ve yük durumları.....	65
4.2.2.7 Yük hesaplamaları.....	67
Kulenin rezonans aralığı içinde çalışma	67
4.2.2.8 Yükler için kısmi emniyet faktörleri	67
Kullanışlılık sınır durumunun analizinde yükler için kısmi emniyet faktörleri	67
Kopma sınır durumunun analizinde yükler için kısmi emniyet faktörleri .	67
Yorulma mukavemetinin analizinde, yükler için kısmi emniyet faktörleri	68
Uygulama	68
4.2.3 SAP2000 programında analiz	74
5. SONUÇ.....	79
KAYNAKLAR	83
EKLER.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	97

SEMBOLLER

A	Alan
A_c	Bütün parçanın hacmini oluşturan yüzey alanı
A_{ref}	Yükün veya basıncın etki ettiği referans yüzey alanı
b	Çap
C_f	Yük katsayısı
C_{fr}	Sürtünme katsayısı
$C_{f,0}$	Silindirik geometri için temel yük katsayısı
C_{pe}	Dış basınç katsayısı
C_{pi}	İç basınç katsayısı
$C_{p,0}$	Silindirik geometri için temel dış basınç katsayısı
$C_{p,0,h}$	Arka taraf için basınç katsayısı
$C_{p,0,min}$	Minimum basınç katsayısı
C_t	Topografya katsayısı
E	Kinetik enerji
F	Frekans
$f(x)$	Gauss dağılım fonksiyonu
$f_r(v)$	Rayleigh dağılım fonksiyonu
$F_w(v)$	Rayleigh kümülatif dağılım fonksiyonu
$f_w(v)$	Weibull dağılım fonksiyonu
$F_w(v)$	Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu
F_w	Rüzgar kuvveti
h	Yükseklik
$I_v(z)$	z yüksekliğinde türbülans yoğunluğu
I_{ref}	15m/s'de türbülans yoğunluğu değeri
L	Uzunluk
L_e	Rüzgar üstü eğiminin efektif uzunluğu
L_u	Rüzgar üstü eğiminin gerçek uzunluğu
L_d	Rüzgar altı eğiminin gerçek uzunluğu
m	Kütle
q	Rüzgar hızına bağlı dinamik basınç
$q(z_e)$	z yüksekliğinde dış yüzeye etkiyen rüzgar hızına bağlı dinamik basınç
$q(z_i)$	z yüksekliğinde iç yüzeye etkiyen rüzgar hızına bağlı dinamik basınç
Re	Reynolds sayısı
$S_I(f)$	Güç spektral yoğunluğu
t	Zaman
T	Zaman
v	Hız
V	Hacim
v_m	Ortalama rüzgar hızı
v_{mod}	En büyük sıklığa sahip rüzgar hızı
v_{max}	En büyük rüzgar hızı
v_{ref}	Belirli bir yükseklik için bilinen ortalama rüzgar hızı
$v(z)$	z yüksekliği için rüzgar hızı
V_{el}	1 yılda en az bir defa aşılma olasılığı olan rüzgar hızı

V_{e50}	50 yılda en az bir defa aşılma olasılığı olan rüzgar hızı
V_1	1 yılda en az bir defa aşılma olasılığı olan türbülanslı rüzgar hızı
V_{50}	50 yılda en az bir defa aşılma olasılığı olan türbülanslı rüzgar hızı
V_{gust}	Göbek yüksekliğindeki fırtına şiddeti (gust rüzgar hızı)
V_{cg}	Eş zamanlı fırtına (gust) ve yön değişimi durumunda rüzgar hızı
W_e	Rüzgar dış (yüzey) basıncı
W_i	Rüzgar iç (yüzey) basıncı
z	Yerden yükseklik
z_0	Yüzey pürüzlülük uzunluğu
z_{hub}	Göbek yüksekliği
Δ	Delta
∇	Gradyan
α	Güç kuralı üssü, açısı
α_{min}	Silindir çevresinde minimum basıncın meydana geldiği bölge
α_A	Akışın silindir yüzeyinden ayrıştığı bölge
ρ	Yoğunluk
σ_x	Standart sapma
μ_x	Ortalama değer
Ψ_λ	Redüksiyon faktörü
$\Psi_{\lambda a}$	Çevresel açının bir fonksiyonu olan redüksiyon faktörü
λ	Efektif narinlik değeri
φ	Yüzey bütünlük faktörü
Φ	Eğim
A	Düşey türbülans ölçek parametresi
θ_e	Aşırı yön değişimi
γ_F	Kısmi yük emniyet faktörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : 4 tip arazi kategorisi için ortalama hız, türbülans yoğunluğu, hamle dinamik basıncı ve hamle hızı profilleri.	42
Çizelge 4.1 (devamı) : 4 tip arazi kategorisi için ortalama hız, türbülans yoğunluğu, hamle dinamik basıncı ve hamle hızı profilleri.	43
Çizelge 4.2 : Arazi koşullarının tanımlanması.	44
Çizelge 4.3 : Sürtünme katsayısı C_{fr} 'nin çeşitli malzeme yüzeyleri için aldığı değerler.	45
Çizelge 4.4 : Çeşitli yüzeyler için k değerleri.	47
Çizelge 4.5 : Re sayısı için bilinen genel değerler.	47
Çizelge 4.6 : Kulenin 21 parçasının tavan yüksekliklerine göre rüzgar hızı ve bu hızlara bağlı türbülanssız dinamik basınç değerleri.	53
Çizelge 4.7 : 21 parçaya ait türbülanslı dinamik basınç değerleri.	54
Çizelge 4.8 : Kulenin 21 parçasının ortalama çap, tavan yüksekliklerine göre rüzgar hızı ve bu parametrelere bağlı Re sayıları değerleri.	55
Çizelge 4.9 : Kulenin 21 parçası için $C_{p,0,min}$ ve $C_{p,0,h}$ değerleri.	56
Çizelge 4.10 : Kuleyi oluşturan 21 parçanın her biri için efektif narinlik, yüzey bürünlük faktörü ve redüksiyon faktörü değerleri.	57
Çizelge 4.11 : Rüzgar türbin sınıfları için temel parametreler.	59
Çizelge 4.12 : Dizayn yük durumları, DYD.	66
Çizelge 4.12 (devamı) : Dizayn yük durumları, DYD.	66
Çizelge 4.13 : NWP, NTM, EWM ve ETM modellerine göre hesaplanan hız ve türbülans yoğunluğu değerleri.	69
Çizelge 4.14 : NWP, NTM, EWM ve ETM modellerine göre hesaplanan dinamik basınç değerleri.	70
Çizelge 4.15 : EWM ve ETM modellerine göre hesaplanan dış basınç değerleri.	71
Çizelge 4.15 (devamı) : EWM ve ETM modellerine göre hesaplanan dış basınç değerleri.	72
Çizelge 4.16 : EWM ve ETM modellerine göre hesaplanan nihai yük değerleri.	72
Çizelge 4.17 : Kulenin 21 parçasına ait yükseklik, ortalama çap, et kalınlığı değerleri ve malzeme bilgisi.	74
Çizelge 4.17 (devamı) : Kulenin 21 parçasına ait yükseklik, ortalama çap, et kalınlığı değerleri ve malzeme bilgisi.	75
Çizelge 4.18 : 4 tip hesap yönteminin her birine göre kulenin 21 parçasının tavan seviyelerinde oluşan deplasmanlar.	75
Çizelge 4.19 : Çizelge 4.18 (devamı) : 4 tip hesap yönteminin her birine göre kulenin 21 parçasının tavan seviyelerinde oluşan deplasmanlar.	76
Çizelge 4.20 : Kulenin ilk 12 mod şekline göre frekans değerleri.	76
Çizelge 4.20 (devamı) : Kulenin ilk 12 mod şekline göre frekans değerleri.	77

Çizelge B.1 : Rüzgar türbinine ait rotor vb. diğer ekipmanlara ait bilgiler.	88
Çizelge B.1 (devam) : Rüzgar türbinine ait rotor vb. diğer ekipmanlara ait bilgiler.	89
Çizelge C.1 : Kulenin 21 parçasına ait arka yüzey ve minimum C_{pe} değerleri.	92
Çizelge C.2 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkileyen rüzgar basıncı.	92
Çizelge C.2 (devamı) : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkileyen rüzgar basıncı.....	93
Çizelge C.3 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkileyen rüzgar yükü.	93
Çizelge C.3 (devamı) : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkileyen rüzgar yükü.	94
Çizelge C.4 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkileyen türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmiş rüzgar basıncı.	94
Çizelge C.5 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkileyen türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmiş rüzgar yükü.	95

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Charles Francis Brush'un rüzgar türbini [1].....	6
Şekil 2.2 : Rüzgar türbin boyutlarının yıllara göre değişimi.	7
Şekil 2.3 : Basınç gradyan kuvvetinin oluşumu [3].....	10
Şekil 2.4 : Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönmesinden kaynaklanan Coriolis kuvvetinin atmosferdeki etkisi	10
Şekil 2.5 : Kepçeli tip anemometre [1, 3].....	17
Şekil 2.6 : Bir gust olayının grafiklerle gösterimi; a) genlik, b) devam süresi, c) maksimum değişim, d) değişim oranı [1, 3].	19
Şekil 2.7 : Rüzgar türbini güç eğrisi.	19
Şekil 2.8 : Düşey rüzgar profili; düşey eksen yüksekliği ve yatay eksen rüzgar hızını ifade eder [4].	20
Şekil 2.9 : Normal dağılım fonksiyonu ($\sigma = 0,5; 1; \text{ ve } 2$ için) [3].....	22
Şekil 2.10 : Normal dağılım fonksiyonunun standardize edilmiş şekli [3].	23
Şekil 2.11 : Rayleigh dağılımı	23
Şekil 2.12 : Düz arazi koşulu şeması.	26
Şekil 2.13 : Kanat sayılarına göre rüzgar türbin tipleri [5].....	27
Şekil 2.14 : a) rüzgar üstü türbin b) rüzgar üstü kuyruklu türbin c) rüzgar altı türbin	28
Şekil 2.15 : Klasik Darreius tipi rüzgar türbini.....	29
Şekil 2.16 : Δ -Darreius türbini [3].	29
Şekil 2.17 : Çeşitli dikey eksenli rüzgar türbinleri: a) Klasik Darreius b) Klasik Savonius c) Helisel Savonius d) Üç Kanatlı Helisel Savonius	30
Şekil 2.17 (devam) : Çeşitli dikey eksenli rüzgar türbinleri e) Noguchi f) Δ -Darreius g) Helisel Darreius	31
Şekil 2.18 : Eğik eksenli rüzgar türbini projelerinden örnekler	31
Şekil 2.19 : Çelik kafes tipi kule örneği	33
Şekil 2.20 : Tübüler çelik rüzgar türbini kulesi	34
Şekil 4.1 : Çeşitli topoğrafik koşullara göre üzey pürüzlülük uzunluğu değerleri. ...	43
Şekil 4.2 : Uçurumlar ve tepeler için s faktörü.	44
Şekil 4.3 : Zirve noktaları için s faktörü.	44
Şekil 4.4 : Temel kuvvet katsayıları.	46
Şekil 4.5 : Rüzgarın geliş açısı ve basınç katsayısı değerleri.	48
Şekil 4.6 : Silindirik yapılara etkiyen rüzgar basıncı profili.....	48
Şekil 4.7 : Efektif narinliğin (λ) bir fonksiyonu olarak redüksiyon faktörü (Ψ_λ) ve yüzey bütünlük faktörü (ϕ).....	49
Şekil 4.8 : Kafes yapıda yüzey bütünlük faktörü (ϕ) tanımı.....	50
Şekil 4.9 : Yapı şekillerine göre efektif narinlik (λ) değerleri.	50
Şekil 4.10 : Rüzgar türbininin kurulacağı araziye ait eğim, deniz seviyesinden yatay ve düşey mesafeler.	52
Şekil 4.11 : Yükler için kısmi emniyet faktörleri	68

Şekil 4.12 : IEC 61400-1’de verilen EWM50 ve ETM senaryolarına göre hesaplanan rüzgar dinamik basınç değerlerinin grafik üstünde gösterimi.	73
Şekil 4.13 : IEC 61400-1’de verilen EWM50 ve ETM senaryolarına göre hesaplanan rüzgar yükü değerlerinin grafik üstünde gösterimi.	73
Şekil 4.14 : SAP2000’de modellenmiş kule geometrisi	75
Şekil 4.15 : 4 tip hesaba göre yükseklikle değişen deplasman miktarlarının grafik üstünde gösterimi.	76
Şekil 4.16 : Soldan sağa doğru sırasıyla yapının birinci, ikinci, ve üçüncü mod şekilleri.	77

RÜZGAR TÜRBİN KULELERİNİN TASARIMINDA KULLANILACAK RÜZGAR YÜKLERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK BİR KARŞILAŞTIRMA

ÖZET

Bu tez çalışmasında kesit boyunca değişen et kalınlığına sahip çelik sac malzemeden imal edilmiş, 54,55 m yüksekliğinde, içi boş kesik koni şekilli rüzgar türbini kulesine etkiyen statik yükler; DIN 1055-4 normunda tanımlanan normal rüzgar hızı profili ve türbülans yoğunluğu dahil edilmiş rüzgar hızı profili kullanılarak hesap edilen rüzgar yükü yaklaşımlarına göre ve IEC 61400-1 standardında verilen EWM50 ve ETM senaryoları ile hesaplanan rüzgar yükü yaklaşımlarına göre ayrı ayrı hesaplanmıştır.

SAP2000 yazılımında kule geometrisi; 21 adet, farklı çapa sahip çubuk eleman olarak tanımlanmış ve her bir çubuk elemana boru profil (belirli bir sabit çap ve et kalınlığına sahip içi boş silindirik kesit) atanarak oluşturulmuştur. Kule imalatında kullanılan sac malzeme (S235J0) bilgisi içi boş silindirik kesitlere atanmıştır ve sınır koşulları kulenin temel bağlantısında ankastre mesnet olacak şekilde tanımlanmıştır. SAP2000 yazılımı, atanan malzemenin yoğunluk bilgisini kullanarak kule ağırlığını kendisi hesaplamaktadır. Nasel ve rotor gibi diğer ekipmanların ağırlığı, imalatçı tarafından verilen kütle bilgisine göre kulenin en tepesinden yer yüzüne dik doğrultuda etkiyen noktasal gravitasyonel yük olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan kule modeline, hesaplanan rüzgar yüklerinin yayılı yük olarak uygulanması ile yukarıda ifade edilen dört tip hesap yöntemine ait yaklaşımdan her biri için kulenin temel kesitinde oluşan toplam kesme kuvveti, kulenin tepe noktasında oluşan toplam deplasman, kulenin doğal frekansı, periyodu ve mod şekilleri elde edilmiştir. Birinci mod şekline ait frekans, 1,2722 Hz; ikinci mod şekline ait frekans, 5,1987 Hz ve üçüncü mod şekline ait frekans; 12,631 Hz bulunmuştur.

Kulenin temel kesitinde oluşan toplam kesme kuvveti ise, 4 tip hesap yönteminin her birine göre aşağıda verildiği şekilde elde edilmiştir.

DIN 1055-4/ Normal rüzgar hızı profili: 101,455 kN.

DIN 1055-4/ Türbülans yoğunluğu dahil edilmiş rüzgar hızı profili: 188,746 kN.

IEC 61400-1/ EWM50: 373,957 kN.

IEC61400-1/ ETM: 804,918 kN.

Bu değerlendirmeler sonucunda DIN 1055-4 ve IEC 61400-1 standartlarına ait yaklaşımlar karşılaştırılarak aralarındaki farklar ortaya konulmuş ve ülkemiz koşullarında kullanılması daha uygun olan standart ve yöntem belirlenmiştir.

A COMPARISON TO BE UTILIZED IN ORDER TO DETERMINE THE WIND LOADS USED IN WIND TURBINE TOWERS DESIGN

SUMMARY

The main objective of this study is to determine the method which reveals an optimum approach in terms of engineering and cost by comparing the calculation methods defined in DIN 1055-4 norm and IEC 61400-1 standard and to express the effect of wind loads on high-rise buildings.

In this study, DIN 1055-4 and IEC 61400-1 approaches to calculate the wind loads on buildings are compared in terms of maximum load acting on the building and maximum displacement occurs at the tip of the building.

In the study the 54,55 m long conical shaped sheet metal wind turbine tower with wall thicknesses varying between 12-22 mm is focused on. The wind turbine tower is made off S235J0 steel which corresponds to EN 10025 in European Norms and technical drawing of the tower is given in Appendix-A.

Only static loads acting on the tower at parked or idling status is calculated; operational loads such as braking, rotating loads etc. acting on rotor, generator, blades and operational equipments are neglected. Thus fatigue is not discussed in this study.

Static loads are calculated separately according to the methods and scenarios defined in DIN 1055-4 and IEC 61400-1.

In DIN 1055-4, there are two main scenarios consists of normal wind velocity profile and the wind velocity profile combined with turbulence intensity. None of these scenarios includes any component regarding the operational status of tower. Thus calculations are made both scenarios.

In IEC 61400-1, there are 22 scenarios varying the operational status of tower and wind profiles. As mentioned above the tower is considered in terms of static loads, thus the scenarios having operational load component isn't taken into account. Only the scenarios given for parked or idling status is considered and the EWM50 and ETM which are the scenarios represent most unfavourable conditions are calculated in the study.

Wind load calculations according to the standards and scenarios are made by hand separately and obtained results are used as input in SAP2000 software to run an analysis model. For this analysis model the tower geometry modeled in SAP2000 software as follows. Tower length divided quasi equally into 21 pieces according to the wall thickness change sections and flanged connections. Mean diameter value is calculated for each piece of tower and it is assumed that tower consists of 21 cylindrical metal pipes whose diameters and wall thicknesses are different than each other. After the geometric details decided, frame sections are defined using pipe profile with diameter and wall thickness in SAP2000. Defined sections are assigned to the related pieces of the tower. Material is assigned in order to have software calculated the tower weight. Nacelle weight is defined as gravitational load which is acting on the tip point of the tower and wind loads calculated are defined in separate load cases on the model

and assigned as distributed load. Boundary conditions defined as one fixed support at the bottom of the tower. Thus the maximum shear force and moment occurs at this point.

Modal analysis run is made separately according to 4 load cases defined according to the wind load scenarios. The frequencies belong to first three mods are found as follows:

Mod 1: 1,2722 Hz

Mod 2: 5,1987 Hz

Mod 3: 12,631 Hz

Obtained shear forces from the results of analyses according to 4 scenarios mentioned above are as follows:

DIN 1055-4/ Normal wind velocity profile: 101,455 kN.

DIN 1055-4/ Wind velocity profile including turbulence intensity: 188,746 kN.

IEC 61400-1/ EWM50: 373,957 kN.

IEC61400-1/ ETM: 804,918 kN.

The yield stress of the tower material (S235J0) is 235 Mpa for the cylindrical sections with wall thickness equal or thinner than 16 mm. With these data safety factor is checked and study shows that the tower is more durable than optimum durability level according to DIN 1055-4/Normal profile approach. According to DIN 1055-4/Turbulence intensity included profile approach almost all pieces of the tower have optimum durability. For IEC 61400-1/ EWM50 scenario, durability level of the most pieces of the tower is under it supposed to be and the worst results are obtained with IEC 61400-1/ETM scenario.

In accordance with these results, IEC 61400-1 standard is more appropriate than DIN 1055-4 to be utilized for the design of the buildings which is exposed to wind load in terms of durability and accuracy. The decision of the scenario to be used for design calculations is made according to the terrain and wind conditions. At the meantime operational conditions shall be considered in the scenario decision.

There are three main factors which affects the wind load acting on building directly and they are given as following:

- The altitude, slope and topography of the terrain which building is erected on.
- Wind velocity, direction and regime (laminar or turbulent flow).
- Building geometry.

The first and third factors given above are taken into account with same approach by DIN 1055-4 and IEC 61400-1. Only wind velocity, direction and regime considerations differentiate from each other. IEC 61400-1 addresses the wind velocity and turbulence conditions more detailed way compared to DIN 1055-4. This makes calculations more complex however it reveals better results for the projects which has hard conditions in terms of terrain category, wind conditions and building geometry.

Wind turbine towers are exposed both static and dynamic loads, thus tower's natural frequency, rotor's and blades' operational frequencies shall not overlap.

In the further studies blades, rotor, generator effects; dynamic loads such as blades rotational moves and braking forces and earthquake loads those are encountered during the operation and in real life shall be taken into account in order to have more accurate models which simulates the stresses and displacements better and design spectrum obtaining methods shall be developed in terms of designs reliability.

1. GİRİŞ

Sanayi Devrimi, yeni geliştirilen teknolojilerin üretime olan etkisiyle daha önce endüstri tarihinde benzeri görülmemiş bir makineleşmeye sebep olmuştur. Günümüzde eskiye göre ivmesi yükselerek devam eden makineleşme, enerjiye olan ihtiyacımızı her geçen gün daha çok artırmaktadır. Ancak milyarlarca yıldır üzerinde hayat barındıran Dünya'mızın fosil enerji rezervleri Sanayi Devrimi ile hızla kullanılmaya başlanmış ve artık tükenme sınırına dayanmıştır. Buna bağlı olarak tüm dünyada ve konvansiyonel enerji kaynakları açısından dışa bağımlı olan ülkemizde alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve kullanılması önem kazanmıştır.

Hidroelektrik enerji, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, dalga enerjisi ve hidrojen enerjisi gibi kaynaklar sürdürülebilir ve yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar içinde en popüler olanları hidroelektrik santralleri, güneş ve rüzgar enerjisi santralleridir. Rüzgar enerjisi son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları içinde yüksek hızlı bir büyüme grafiği çizerek dikkatleri üzerine çekmiş ve rüzgar enerjisi sistemlerinin değerlendirilmesi, geliştirilmesi alanındaki çalışmalar önem kazanmıştır. Yatırımcılar tarafından en çok arzu edilen gelişmelerin başında, verimliliği yüksek tesislerin uygulanabilirliği gelmektedir.

Verimliliği yüksek sistemler ile daha çok ve daha kaliteli çıktı alınmasında, rüzgar türbin rotorunun, yüksek hızlı ve sürekliliği fazla olan rüzgarlara maruz kalması kilit role sahiptir. Yüksek hızlı ve sürekliliği fazla olan rüzgarlar ise coğrafi ve topografik koşullara bağlı olmakla beraber çoğu zaman yerden birkaç yüz metre (hava koşullarına göre zaman zaman kilometre mertebesine ulaşabilir) yüksekte gerçekleşmektedir. Örneğin; çalılık ve seyrek ağaçlı, köy veya kasabaya yakın bir arazide, normal rüzgar profili modelinde kule boyu 80 m'den 120 m'ye çıkarıldığında; rüzgar hızı %13 güç üretimi ise %44 oranında artış gösterir. Bu durum rüzgar türbin kulelerini ve kule tasarımını özel bir konuma taşır.

Kule tasarımını geliştirerek dayanımı yüksek, statik açıdan güvenli sistemler kurmak için bir çok malzeme ve yapısal sistem denenmektedir. Bunlar içinde en çok tercih edilen kule tipi çelik silindirik veya konik kulelerdir.

Bu tez çalışmasında içi boş kesik koni geometrisine sahip çelik bir rüzgar türbin kulesinin yükleme koşulları ve yapısal tasarımında rol alan faktörlerin; DIN 1055-4 ve IEC 61400-1 standartları açısından değerlendirilerek, karşılaştırılması, yatırımcı ve tasarımcılar için kılavuz niteliği taşıyan bir araştırmanın gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın temel amacı; rüzgar türbin kulelerinin yapısal tasarımıyla ilgili temel faktörleri belirlemek, bu faktörlerin çeşitli standartlara göre uygulama farklılıklarını ortaya koymak ve elde edilen verileri, bilimsel araştırma ve teknolojik araçlar vasıtasıyla destekleyerek açıklamaktır.

Belirli değişkenlerine (malzeme, geometri vb.) önceden karar verilmiş bir tasarımda, etkiyen statik yüklerin mevcut standartlara göre tanımlarının yapılması ve referans alınan standarda göre kulenin yapısal olarak nasıl davranacağını gösterilmesi bu tezin amaçlarındandır.

Yukarıda bahsi geçen amaçlar doğrultusunda Enercon marka, E-48 model rüzgar türbinine ait, 54,55 m yüksekliğindeki içi boş kesik koni şekilli çelik kulenin geometrisi ve malzeme verileri kullanılarak modelleme yapılmıştır.

Türbin kulesinin matematik modeli için yapısal tasarım unsuru olarak çubuk elemanlardan faydalanılmıştır. Rüzgar hızı, kütle ve atalet bilgileri ile serbest titreşim analizi ve statik rüzgar yükü hesapları yapılarak mod şekilleri, ilgili frekanslar, maksimum yük, tepe noktasında maksimum deplasman gibi çıktıların elde edilmesi beklenmektedir.

1.2 Literatür Özeti

Baniotopoulos, C. C. (2003), 44,075 m yüksekliğinde, tübüler şekilli, yükseklik boyunca değişken et kalınlığı ve değişken kesite sahip çelik kule kullanılarak, 1 MW kapasiteli prototip rüzgar türbini tasarımı ve analizinde temel unsurları ele alan bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada 18 farklı rüzgar hızı ile çeşitli çevrim sayılarında analiz yapılarak türbin üzerinde ortaya çıkan gerilme aralıkları, yorulma yükü ve çevrim sayılarını içeren bir spektrum oluşturulmuştur. Çalışma sonunda görülmüştür ki yapısal tasarım için baskın yükleme koşulu EWM senaryosudur. Ömür hesabı için ise yapının dinamik karakteristikleri yüksek önem arz etmektedir.

DIN 1055-4 (2005), standartta rüzgar türbinine etki eden hızlar, dinamik ve statik yükler, bu yüklerin etkideği kesit ve şekiller tanımlanarak hesap yöntemleri açıklanmış ve ilgili emniyet faktörleri belirtilmiştir. Rüzgar türbini yapısal tasarımı üzerinde yoğunlaşmış bir standarttır.

Lanier, M. W. (2005), düşük hızlı rüzgarların hakim olduğu bölgelerde, rüzgar enerjisinden elektrik üretiminin mali açıdan elverişlilik durumunu araştıran bir projenin ilk fazındaki çalışmalara ait bir rapordur. Bu sebepten çeşitli kapasitedeki türbinler ile yapısal olarak farklı tipteki kulelerin kombinasyonlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Minimum maliyet ile optimum emniyetli yapıların tasarımında; IEC 61400-1'de tanımlanan EOG50 ve EWM50 senaryolarına göre hesap yapılmasının yeterli olacağı ifade edilmiştir. Kule doğal frekansını belirleme yöntemlerinden Rayleigh metodunun pratik ve güvenli olduğu belirtilmiştir.

IEC 61400-1 (2006), standartta rüzgar türbinleri sınıflandırılmış, rüzgar ve türbülans karakteristiğine göre çeşitli senaryolar tanımlanmış, yapısal tasarım için hesap yöntemi belirtilmiş ve bir türbinin baştan sona projelendirilmesinde kılavuzluk edecek kurulum, bakım onarım gibi prosedürler anlatılmıştır.

Harte, R. (2007), yüksek çevrimli dinamik yüklenme, dinamik tahrik durumu ve ömür davranışı gibi rüzgar türbinlerindeki temel yapısal hususlara değinmiştir. Çalışma belirli bir yükseklikten sonra tübüler çelik kulelerin rezonans açısından tehlikeli olabileceğini belirterek öngörülmesi beton kulelere odaklanmıştır. MW mertebesinde kapasiteye sahip türbinler için beton kulelerin yeterli emniyete sahip olduğu çalışmada gösterilmesine karşın çarpma ve çatlak durumlarında, malzeme kusurlarının dinamik davranışı ve uzun dönem dayanımını fazlasıyla etkilediği belirtilmektedir.

2. RÜZGAR ENERJİSİ

2.1 Giriş

Günümüz koşullarında enerji ihtiyacı; hava, su ve gıda gibi temel gereksinimlerimize duyduğumuz ihtiyaç ile eşdeğer düzeydedir. Ancak bugüne kadar çoğunlukla faydalandığımız enerji kaynakları hava gibi sınırsız kaynaklar değildir, fosil kökenli enerji kaynaklarıdır. Fosil kökenli konvansiyonel enerji kaynakları artık tükenme sınırına yaklaşmıştır ve bu durum insanoğlunu enerji savaşlarına, yeni kaynak arayışlarına ve sürdürülebilir kaynaklar için çalışmalar yapmaya itmiştir. Halen devam eden bu çalışmaların sonucunda yenilenebilir enerji kavramı ortaya çıkmış ve aldığı girdiyi tüketmeyen sistemler tasarlanmaya başlanmıştır. Bu sistemler temel olarak güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroenerji, jeotermal enerji, biokütle enerjisi, dalga enerjisi ve hidrojen enerjisi sistemleri olarak sıralanabilir.

Tükenmeyen bir kaynak olan rüzgardan faydalanarak, atık çıkarmadan enerji üretilmesine rüzgar enerjisi sistemleri denir. Rüzgarın nasıl oluştuğu ve enerji üretilmesi için minimum gereklilikleri gibi temel hususlar ilerleyen kısımlarda anlatılmıştır.

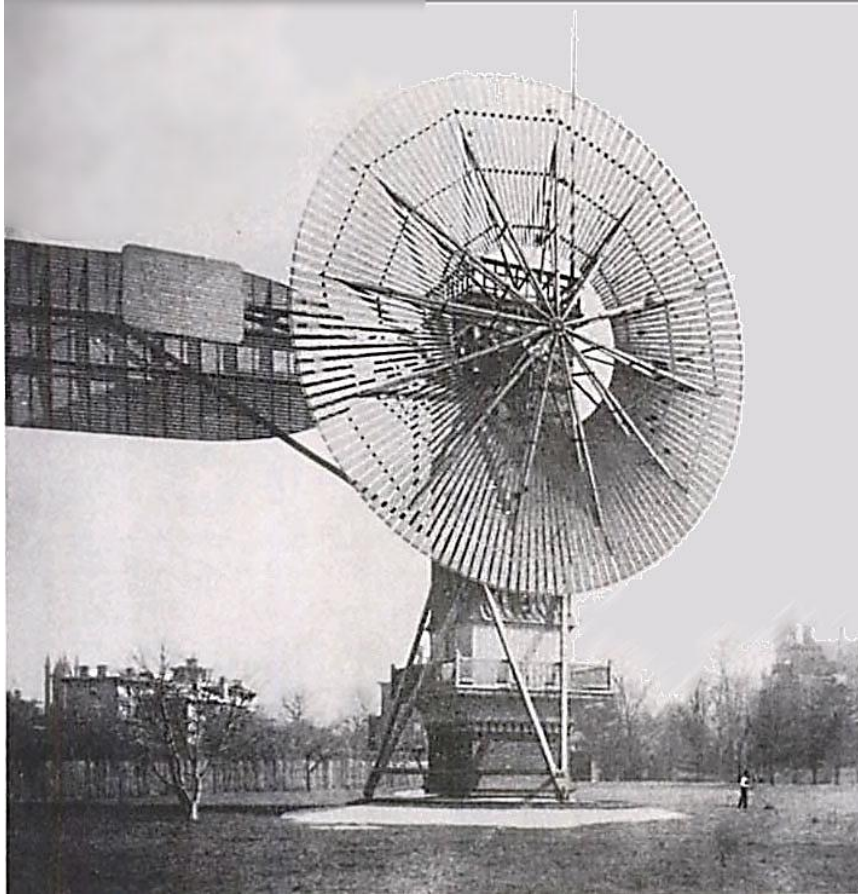
2.2 Tarihçe

Rüzgar enerjisi tarihi, resmi olmayan kaynaklara göre MÖ 2800'lü yıllara kadar, bilinen somut kanıt ve kayıtlara (Ali el-Tabari ve Ali el-Mesudi tarafından kaleme alınan yazılar) göre MÖ 700'lü yıllara kadar uzanmaktadır. Milattan önceki devirlerde yelkenli gemilerin yözdürülmesi, yeraltı sularının yeryüzeyine çıkarılması ve buğday vb tahılların öğütülmesi gibi amaçlar ile rüzgar enerjisinden faydalanılmıştır. Bu tip uygulamaların Çin, Tibet, Hindistan, Afganistan ve İran gibi Asya ve Doğu medeniyetleri tarafından gerçekleştirildiğine dair ilk yazılı bilgiler MÖ 200 ~ 300 yıllarında yazılmıştır. Özellikle İran'da bulunan yel değirmenleri Haçlı Seferleri ile beraber Batı'ya taşınmıştır.

Batı'da ilk olarak 11. Ve 12. yüzyılda İngiltere, Almanya ve Hollanda'da yel değirmeni kullanımına rastlanabilir. Avrupa'da Ortaçağ dönemlerinden bugüne dek

kullanılan yel değirmenleri tahıl öğütmek ve kuyulardan su çekmek amacı ile kullanılmış olup Hollanda ve Akdeniz'deki birçok adada örneklerine rastlanabilir. Amerika'da ise 1800'lü yıllarda çiftliklerde, su çekme amacı güden yel değirmenleri geliştirilmeye başlanmıştır. Ülkemizde ise Asya ve Doğu medeniyetlerinde olduğu gibi yel değirmenlerinin su çekme ve tahıl öğütme amacıyla kullanımı çok eski tarihlere dayanmaktadır. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ise hemen hemen eş zamanlı olarak 19. Yüzyıl sonlarına doğru Amerika ve Danimarka'da başlamıştır.

1887 Haziran ayında İskoç akademisyen James Blyth rüzgar enerjisi deneylerine başlamış ve rüzgar enerjisiyle çalışan bir pil şarj cihazı geliştirerek İngiltere'de patentini almıştır. 1887-88'de Amerika Birleşik Devletleri'nde, Charles Francis Brush 17 metre çapında rotoru olan bir yeldeğirmeni kullanarak elektrik üretimini gerçekleştirmiştir. 1890'larda Danimarkalı bilim adamı ve mucit Poul La Cour elektrik üretmek için günümüzde kullanılan üç kanatlı rüzgâr türbinlerini inşa etti [Url-1, 1].

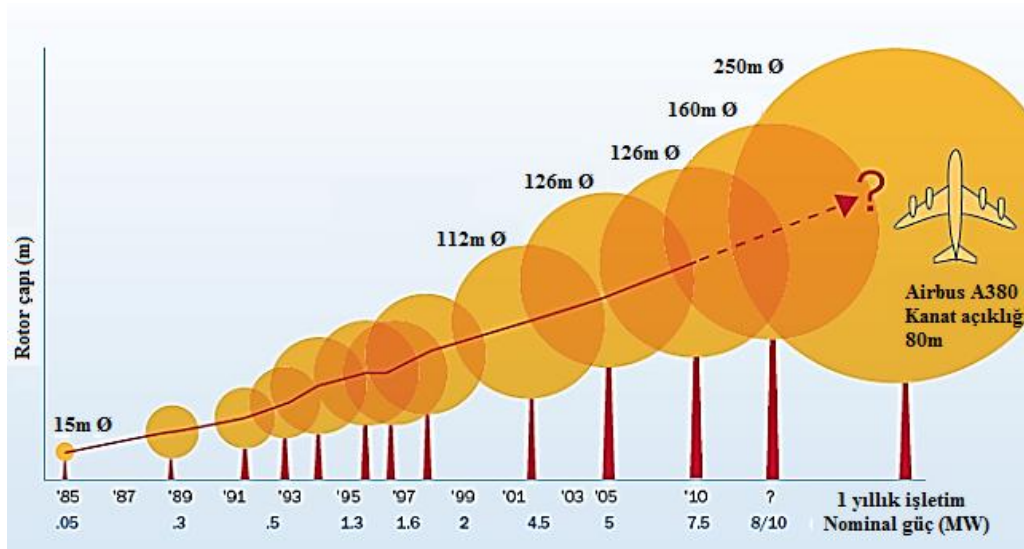


Şekil 2.1 : Charles Francis Brush'un rüzgar türbini [1].

2.3 Günümüzde Rüzgar Türbinleri

Danimarkalı bilim adamı Poul La Cour, çalışmaları ile daha hızlı dönen rotora sahip türbinlerin daha çok güç ürettiğini anlamış ve aerodinamik olarak şekillendirilmiş 4 kanatlı bir rüzgar türbin kullanarak bir test tesisi kurmuştur. La Cour'un bilimsel başarısını Lykkegard isimli şirket ticari alana taşımış ve 1. Dünya Savaşı ile artan petrol fiyatları sebebiyle rüzgar türbinleri ile elektrik üretmek Danimarka'da oldukça popüler hale gelmiştir. Bu sırada günümüz tasarımlarının ilkinin "Aeromotor" adını vererek yapan F. L. Smidth isimli yeni bir üretici pazara girer. İlk etapta 2 kanatlı 12 adet rüzgar türbini kurar, bu türbinlerin dinamik karakteristiklerinde sorunlar yaşayınca günümüzde yaygın olarak kullandığımız üç kanatlı tipteki rüzgar türbin tasarımını yaparlar. İlk üç kanatlı rüzgar türbini 24 m rotor çapına sahip ve 10 m/s rüzgar hızında yaklaşık 70 kW güç çıktısı veren bir türbindi [2].

Üç kanatlı rotor tasarımı ve rotor hızının artmasıyla artan kapasite bilgisi kullanılarak daha yüksek kule boyları, daha büyük rotor çapları ile daha büyük güç çıktılarını elde edilmiştir ve halen geliştirilmeye açık olan bu alanlar üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Günümüzde en çok faydalanılan rüzgar türbin modeli üç kanatlı, yatay eksenli ve kapasitesine göre kule yüksekliği ve rotor çapı ölçüleri değişen tiptedir. Günümüzde rüzgar türbinlerinin geldiği nokta şöyle ifade edilebilir; tarihteki ilk örneğinin rotor çapı 24 m iken bugün rotor çapı 150 m'lere ulaşan 7 MW güç çıktısı veren üç kanatlı rüzgar türbinleri kullanılmakla beraber halen gelişmeye devam etmektedir.



Şekil 2.2 : Rüzgar türbin boyutlarının yıllara göre değişimi.

2.4 Rüzgar Olayı

2.4.1 Atmosfer

Atmosfer, hemen hemen $5243 \cdot 10^{18}$ kg miktarındaki gazların karışımından meydana gelen ve Dünya'mızın çevresini ~15 km kalınlığında saran bir gaz tabakasıdır. %98'i Azot (N) ve Oksijen (O₂) tarafından oluşturulan atmosferde CO₂ (%0,05) ve su buharı da (H₂O %0,01-3) bulunur. H₂O, atmosferde buz, su damlası ve buhar olmak üzere bütün fazlarda bulunabilir. CO₂ miktarı yere ve zamana göre oldukça sabit iken, su buharı miktarı bölgeden bölgeye belirgin şekilde değişir. Genelde sıcaklığın yüksek olduğu tropikal bölgelerde daha fazla, soğuk bölgelerde ise daha az buhar vardır. Yoğuşma işlemlerinde buharlaşma gizli ısısının açığa çıkması, tropikal ve ekstrapopikal siklonlar gibi hava sistemlerinin gelişiminde kuvvetli olarak etki yapan önemli bir ısı kaynağıdır.

2.4.2 Rüzgarın kaynağı ve oluşumu

2.4.2.1 Dünya'nın şekli ve hareketleri

Dünya'nın iki çeşit hareketi vardır; kendi eksenini etrafında ve Güneş'in etrafında belli bir yörüngede döner. Dünya'nın kendi eksenini etrafından dönmesi sonucu gece ve gündüz oluşur. Dünya'nın, Güneş çevresindeki yörüngede dönmesi sonucu ise mevsimler oluşur.

Dünya, kutuplardan basık ve ekvator düzleminde şişik elipsoidal geometriye sahiptir. İki kutubu birleştiren hayali düz çizgiye yer eksenini denir. Bu eksen Ekvator düzlemine diktir ancak Güneş etrafında izlediği yörünge düzlemine dik değildir; ikisi arasında 66°33'lık bir açı bulunur. Bu sebeple Ekvator düzlemi ile yörünge düzlemi birbirleriyle çakışmaz ve güneş ışınları bir yere, yılın her günü aynı açıyla düşmez. Bu durum bölgelerin birbirinden ve gündün güne farklı düzeyde ısınmasına sebep olur. Bunun yanı sıra Dünya yüzeyinin girintili çıkıntılı olması ve homojen kalınlıkta olmayan yer kabuğu da ısınma düzeylerinin farklı olmasında rol oynar.

Güneş sabiti yaklaşık olarak 1400 W/m^2 dir, fakat Dünya'da yatay bir yüzeye ulaşan enerji miktarı, Dünya'nın elipsoidal şeklinden ötürü, kutuplara doğru azalır. Yer yüzeyi tarafından absorblanan enerjiyi etkileyen diğer faktörler bulutluluk ve yüzeyin albedosudur (örneğin kar örtüsünün albedosu 0,75) [3].

Farklı düzeyde ısınmalar sıcaklık farklarına, sıcaklık farkları da basınç farklarına sebep olurlar. Bilindiği üzere akışkan maddeler basınç farkı olan durumlarda yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine doğru hareket ederler. Hava kütlelerinin de basınç farklarından ötürü hareket ederek yer değiştirmesi olayına rüzgar denir.

Atmosferdeki toplam enerji potansiyel ve kinetik enerjiye olarak ikiye ayrılır. Rüzgarlar, atmosferin sahip olduğu potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşmesinin sonucunda oluşurlar, yani temel olarak basınç kuvvetlerinin ürünüdür.

2.4.2.2 Dünya'daki rüzgar sistemleri

Atmosferdeki rüzgar olayını tetikleyecek dört adet kuvvet türü mevcuttur [4]:

- Basınç gradyan kuvvetleri
- Coriolis kuvveti
- Geniş çaplı dönme hareketinden ötürü meydana gelen atalet kuvvetleri
- Yer kabuğundaki sürtünme kuvvetleri.

Basınç gradyan kuvvetleri

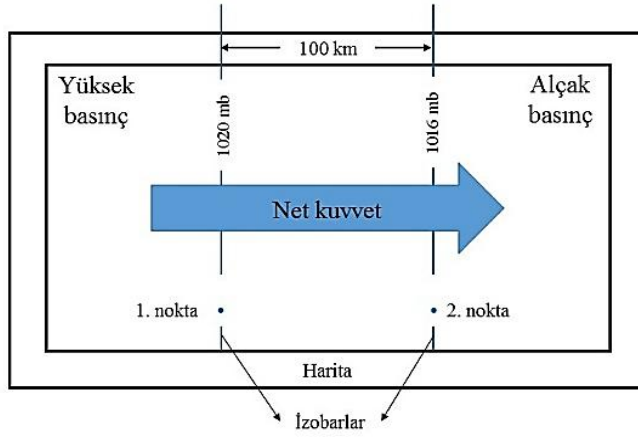
Gradyan; belirli bir aralıktaki değişim olarak tanımlanabilir. Basınç gradyanı, basıncın belirli bir mesafedeki değişimidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\nabla P = \Delta p / \Delta n \quad (2.1)$$

Δp : Aradaki basınç farkı

Δn : Aradaki mesafe

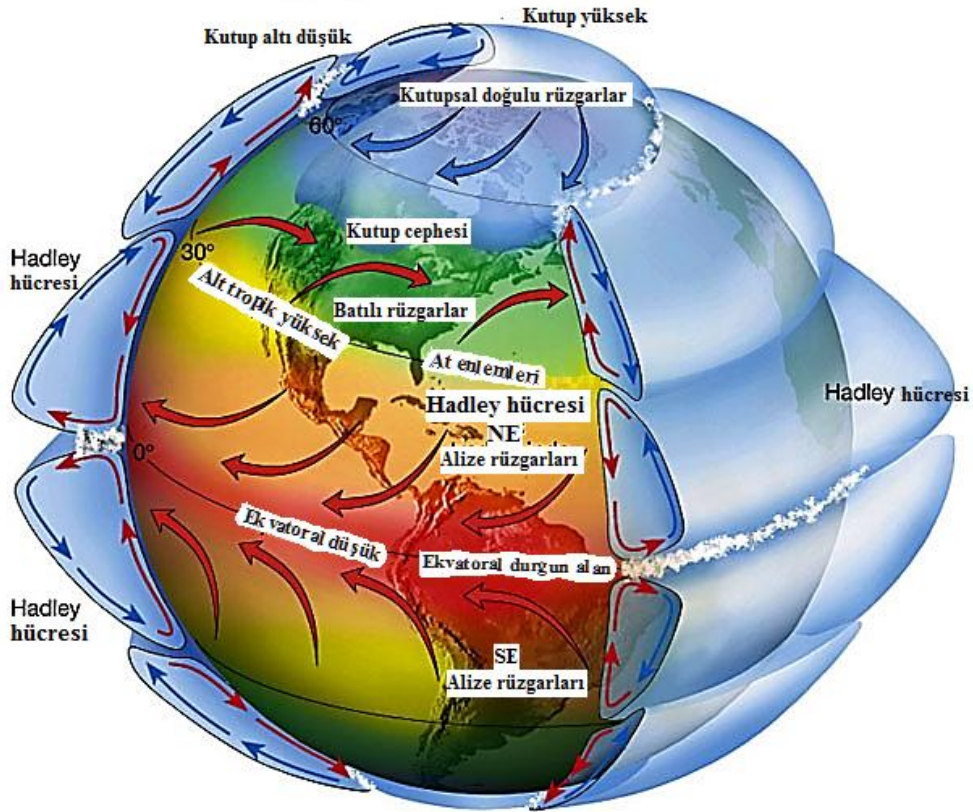
Şekil 2.3'te görüldüğü üzere Basınç gradyan kuvveti yüksek basınçtan alçak basınca doğru yönelmiştir. Basınç gradyanı arttıkça, basınç gradyan kuvveti ve bunun sonucu olarak rüzgar şiddeti artar.



Şekil 2.3 : Basınç gradyan kuvvetinin oluşumu [3].

Coriolis kuvveti

Coriolis kuvveti dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesinden ötürü oluşan bir kuvvet olup kuzey yarım kürede hava akışını sağa ve güney yarım kürede de hava akışını sola saptırır.



Şekil 2.4 : Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönmesinden kaynaklanan Coriolis kuvvetinin atmosferdeki etkisi

Atalet kuvvetleri

Özellikle dönüş hareketi gösteren hava bölümlerinde, rüzgarın yönü ve şiddeti üzerinde merkezkaç kuvvetinin de etkisi olmaktadır. Basınç merkezlerindeki izobarlar ne kadar yuvarlak ise merkezkaç etkisi de o derece fazla olmaktadır. Basınç gradyan kuvvet, Coriolis kuvveti ve merkezkaç etkisi altında izobarlara uygun esen rüzgarlara da gradyan rüzgar denilir.

Sürtünme kuvvetleri

Rüzgarın yeryüzüne sürtünmesi rüzgarın hızını azaltan bir etkidir. Sürtünme etkisi yeryüzü koşullarına bağlı olarak değişir. Örneğin denizler üzerinde sürtünme etkisi daha azdır. Yerden itibaren yükseldikçe rüzgar üzerindeki sürtünme etkisi azalır ve 500-600 metreden sonra sürtünme etkisi hiç kalmaz [3].

2.4.3 Rüzgarların sınıflandırılması

2.4.3.1 Küresel rüzgar sistemleri

Atmosferin genel sirkülasyonu, yeryüzünün ısınmasında ortaya çıkan eşitsizlikler sebebiyle oluşur. Yıllık ortalama dikkate alındığında, gelen güneş radyasyonu, giden yer radyasyonuna eşittir. Bununla birlikte, tropiklerde net bir enerji kazancı, kutuplarda ise net bir enerji kaybı söz konusudur. Bu dengesizliği ortadan kaldırmak için atmosfer, sıcak havayı kutuplara soğuk havayı ise ekvatora doğru transfer eder. Dolayısıyla genel sirkülasyon, dünyanın kuşakları arasında büyük rüzgar sistemlerine yol açar. Başlıca büyük rüzgar sistemleri şöyledir:

Ticaret rüzgarları (Alize rüzgarları)

Ticaret rüzgarları okyanuslar üzerinde oldukça belirgindir ve bu yüzden yelkenli gemiler için çok uygun koşullar hazırlarlar. Eskiden Avrupa'dan Hindistan'a ve Avustralya'ya gitmek için bu rüzgarlardan faydalanılırdı. Adını da böyle almıştır. Subtropikal yüksek basınçkuşağı ile tropikler arasında bütün yıl boyunca kuzey ve güney yarım kürede ekvatora doğru esen, yönleri kuzey yarımkürede kuzeydoğulu, güney yarımkürede ise güneydoğulu olan rüzgarlardır. En önemli dezavantajı her yerde ve her zaman düzenli ve sürekli olarak esmemesidir. Günlük hava olayları ve tropikal siklonlar düzenli esişi geniş ölçüde bozarlar [3].

Batılı rüzgarlar

Subtropikal yüksek basınçlardan (30. enlem civarı) orta enlem alçak basınçlarına (60. enlem civarı) doğru esen rüzgarlardır. Yön ve süreklilik bakımından oldukça değişkendirler. Orta enlem okyanuslarının doğu bölümlerinde ve kışın güçlü batı yönlü rüzgarlar halinde ortaya çıkarlar. Yönlerinin ve şiddetlerinin değişmesi batıdan doğuya doğru hareket halinde bulunan geçici siklon ve antisiklonların etkisinden dolayıdır [3].

Kutup rüzgarları

Kutuplarda veya civarında bulunan yüksek basınç merkezlerinden 60. enlemlerdeki alçak basınç kuşağına doğru kuru ve soğuk esen rüzgarlardır. Bazen 40. enlem derecelerine kadar inerler. Bu rüzgarlar yeryüzünde sürtünme ve sapma yüzünden kuzey yarımkürede kuzeydoğudan, güney yarımkürede ise güneydoğudan esmektedirler [3].

2.4.3.2 Mevsim rüzgarları (Muson rüzgarları)

Muson rüzgarları, bütün yaz boyunca denizlerden karalara; bütün bir kış boyunca da karalardan denizlere esen bir rüzgar sistemidir. Esas itibarıyla yeryüzündeki denizlerle karaların mevsimlere göre değişik şekilde ısınması sonucunda yüksek basınç merkezlerinin kışın karalarda yazın ise denizlerde bulunmasından ileri gelmektedirler. Muson rüzgarları bazı şartların bulunduğu yerlerde görülürler. Yeryüzünde Muson rüzgarlarını gerektiren şartların bulunduğu yerler özellikle Hint Okyanusu, Meksika ve Gine Körfezi, Çin ve Avustralya arasındaki denizler ve Brezilya ile Şili arasındadır. Bu rüzgarların en fazla estiği yönler ise kuzeydoğu, kuzeybatı, güneydoğu ve güneybatıdır [3, 4].

2.4.3.3 Günlük rüzgarlar

Gün esnasındaki basınç farklılıkları, diğer rüzgar sistemlerine oranla çok daha kısa sürede kendini gösteren rüzgarları oluştururlar. Gün içerisindeki basınç değişimleri daha çok karalarla denizler ve dağlarla vadiler arasında kendilerini gösterirler. Çünkü bu gibi yerler gün içerisinde farklı ısınıp farklı soğumaktadırlar. Bu rüzgarlar kara ile deniz arasında meydana geliyorsa kara ve deniz meltemleri, dağ ile vadi arasında meydana geliyorsa dağ ve vadi meltemleri adını alırlar. Bu tür rüzgarlar oluşumları bakımından musonlara benzerler. Fakat musonlar mevsimlik değişimlerden meydana gelirler ve daha geniş bir alanı etkileyebilirler. Meltemler ise günlük değişimlerden

meydana gelir ve daha küçük alanı etkilerler. Meltemler hemen hemen her yerde eserler. Yalnız kutuplarda günlük sıcaklık değişimleri az olduğu için orada görünmezler [3, 4].

Kara ve deniz meltemleri

Bilindiği gibi karalar gündüzleri denizlere oranla daha çabuk dolayısıyla daha fazla ısınırlar; geceleri de daha çabuk, yani daha fazla soğurlar. Bunun sonucu olarak karalar gündüzleri alçak basınç, geceleri de yüksek basınç alanlarıdır. Denizler ise bunun tersine olarak gündüzleri yüksek basınç, geceleri ise alçak basınç alanlarıdır. Basınç merkezlerinin bu şekilde oluşu rüzgarların gündüzleri denizden karaya doğru, geceleri de karalardan denizlere doğru esmesine yol açar. Kara ve Deniz Meltemleri daha çok ekvator kuşağında ve orta enlemlerde yaz mevsiminde görülür. Bu rüzgarların denizlerden karalara doğru esenlerine deniz meltemleri denir. Bunlar denizden estikleri için nemli ve serindirler. Deniz meltemleri, günlük sıcaklığın en yüksek olduğu zamanlarda hissedilmeye başlar. Bu rüzgarlar estikleri kıyı bölgelerinin ikliminde serinletici rol oynarlar. Yerel sebeplerden meydana geldikleri için etki sahaları kıyından içeriye doğru en fazla 20-40 km arasında, yükseklerle doğru ise 300-400 m arasındadır. Akşama doğru karaların soğumasıyla basınç şartları değişir ve deniz meltemleri kesilir. Genellikle gece yarısına doğru, rüzgar bu defa karadan denize doğru esmeye başlar, bu rüzgarlar da kara meltemi olarak adlandırılır. Kara meltemi en şiddetli halini sabaha karşı alır, fakat güneşin doğmasıyla kesilir. Karadan estikleri için kurudurlar; deniz meltemlerine oranlar daha zayıf rüzgarlardır.

Ülkemizde kara ve deniz meltemlerinin kendini en iyi hissettirdiği yer İzmir ve çevresidir. İzmir kıyılarında, denizden karaya doğru esen ve İmbat adı verilen deniz meltemi, yazın sıcak günlerinde İzmir'e denizin serin ve nemli havasını getirir [3, 4].

Dağ ve vadi meltemleri

Bu meltemler, dağlık bölgelerde gün esnasındaki sıcaklık farklılığından dolayı meydana gelir. Dağın güneşe bakan yamacı gündüzleri vadiye nazaran daha çabuk ısınır ve alçak basınç sahası oluşur. Vadi ise bir yüksek basınç sahası oluşturur. Bu durum rüzgarın vadiden dağa doğru esmesine yol açar. Bu rüzgara vadi meltemi denir. Vadi meltemi, hava sıcaklığının en yüksek olduğu zamanlarda şiddetini artırır. Sonra yavaş yavaş hafifler ve güneşin batışına doğru kesilir. Geceleyin ise tam tersine olarak dağ yamaçları yüksek basınç, vadiler ise alçak basınç sahası oluştururlar. Bu yüzden

rüzgarlar da dağdan vadilere doğru eserler. Bu rüzgara da dağ meltemi adı verilir. Dağ meltemi bütün gece devam eder ve sabaha doğru kesilir.

Vadi meltemi, aşağı kısımların nemli havasını yukarı doğru taşır. Dağ zirvelerinin çoğunlukla bulutlarla örtülü oluşu bu yüzdendir. Geceleyin esen dağ meltemi ise soğuk havayı getirerek aşağı tabakalardaki nemin yoğunlaşmasına ve yer yer sis oluşumuna neden olur [3, 4].

2.4.3.4 Yerel rüzgarlar

Bir bölgede belirli zamanlarda meydana gelen alçak ve yüksek basınç sahaları yerel rüzgarları meydana getirirler. Bunların esiş yerleri ve zamanları genellikle bellidir. Bazen birkaç gün bazen de birkaç hafta eserler. Yerel rüzgarlara özel karakter kazandıran estikleri yerin topografik şartlarıdır. Yerel rüzgarlar doğdukları yerlere göre sıcak ve soğuk karakterli olabilirler [3, 4].

Sam yeli

Güney Akdeniz'e veya Afrika'ya doğru hareket eden alçak basınç merkezlerinin önünde görülen sıcak, güney ve güneybatılı rüzgarlardır. Hava doğrudan doğruya Büyük Sahra'dan geldiği için kuru ve tozludur. Akdeniz'i geçerken çok sıcak olması nedeniyle fazla miktarda nem kazanır. Malta, Sicilya ve Güney İtalya'ya gelerek burada sis ve yağışları meydana getirirler. Bu rüzgarlar daha kuru olarak Yunanistan, Türkiye ve hatta Volga kıyılarına kadar etkili olurlar. Ülkemizde genellikle ilkbahar aylarında görülür. Ülkemizde özellikle bitkileri kurutması bakımından çok önemlidir. Yazın belirli zamanlarda esen bu rüzgara Sam Yeli veya Zehirli Yel denir. Zehirli Yel denmesinin sebebi bütün bitkileri kavurup öldürmesindedir. Sam Yeli Mısır'da, Hamsin; İtalya'da ise Sirokko olarak adlandırılır [3, 4].

Fön

Bütün dağlık bölgelerde görülebilir. Yüksek dağların yamaçlarından aşağıya doğru esen sıcak ve kuru rüzgarlardır. Alplerin kuzey yamaçlarından Avrupa'ya inen bu tip rüzgarlara Fön; Amerika'nın kuzeyinden ovaya inen aynı tip rüzgarlara da Şinok denir. Bu rüzgarların oluşum şekli şu şekildedir; dağa çarpan hava kütlelerinin yamaçta yükselmesi ve bu yükselme sonucu yağış ve bulutlanma yüzünden nemini kaybederek

dağın diğer yüzüne kuru ve sıcak bir şekilde akmasıdır. Bu rüzgarlar da estikleri yerlerde bitkilere zarar verirler [3, 4].

Bora

Bora, Adriya Denizi, Dalmaçya ve İstirya kıyılarında esen kuvvetli, soğuk ve kuru bir rüzgardır. Orta ve Doğu Avrupa üzerinde bir yüksek basınç, Tiran Denizi üzerinde bir alçak basınç oluştuğunda veya Orta İtalya'dan Adriyatik'e geçen bir alçak basınç görüldüğünde meydana gelir. Bu şartlar kendini daha çok kışın ve ilkbaharda gösterir. Bora estiği zaman özellikle İstirya kıyılarında şiddetli soğuklar hüküm sürer [3, 4].

Mistral

Fransa'da kuzey-kuzeybatıdan esen soğuk, kuru ve şiddetli rüzgardır. Mistralin en şiddetli olarak görüldüğü yer Rhone vadisidir. Bu rüzgar kışın ve ilkbaharda, Lyon körfezinde bir alçak basınç, Fransa'nın kuzeyinde ise yüksek bir basınç sahası olduğu zaman meydana gelir. Kuzeyde Massif Central'in karlı yüksek yaylalarını geçerek geldiği için soğuktur [3, 4].

Krivetz

Krivetz, Romanya'da aşağı Tuna ovalarında kuzeydoğudan esen soğuk ve şiddetli bir rüzgardır. Bu rüzgar, Rusya üzerinde bir yüksek basınç, İtalya üzerinde ise bir alçak basınç olduğu zaman kendini gösterir. Krivetz, Bora gibi genellikle kışın ve ilkbaharda eser. Güney Rusya'nın karlı ovalarını geçerken çok soğur ve geçtiği bölgelerde birkaç saat içinde 10-15° sıcaklık düşmesine neden olabilir [3, 4].

Poyraz

Karadeniz ve Marmara havzalarında kuzeydoğudan esen soğuk ve şiddetli bir rüzgardır. Poyraz, özellikle İstanbul ve çevresinin hakim rüzgardır. Buralarda senenin yaklaşık 120-130 gününde eser. Poyraz kış mevsiminde Bora gibi şiddetli ve soğuktur. Bu mevsimde yağış ve kar getirir. Yazın ise sıcak bölgelere doğru estiği için kuru fakat estiği yerlere serinlik getiren bir rüzgardır. Gündüzleri oldukça şiddetli esen poyraz, akşama doğru hafifleyerek kesilir [3, 4].

2.4.4 Meteorolojik ve topografik yapının rüzgara etkisi

Bir bölgedeki rüzgarın şiddeti ve diğer karakteristikleri üzerinde bölgenin meteorolojik ve topografik yapısının önemli bir etkisi vardır. Kuvvetli ve zayıf rüzgarların oluştuğu tipik bölgeleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

Kuvvetli rüzgar alanları:

- Basınç gradyanının yüksek olduğu yerler
- Hakim rüzgar yönüne paralel vadiler
- Yüksek ova ve platolar
- Sürekli inici alış bölgeleri
- Tepe ve dağ zirveleri
- Jeostrofik rüzgar ve termal etkileşimlerin meydana geldiği kıyı şeritleri

Zayıf rüzgar alanları:

- Hakim rüzgar yönüne dik vadiler
- Engebelerle gölgelenmiş arazi
- Kısa, dar vadi ve kanyonlar
- Pürüzlülük yüksekliği Z_0 'ın büyük olduğu alanlar

Rüzgarın topografya ile ilişkisi oldukça önemlidir. Dağ rüzgarı, vadi rüzgarı, kara ve deniz meltemleri, fön rüzgarları, katabatik rüzgarlar gibi topografik etkilerle meydana gelen rüzgarlar bulunmaktadır. Topografyanın rüzgar üzerinde üç önemli etkisi bulunmaktadır. Bunlar pürüzlülük, orografik ve perdeleme etkileridir.

Orografik etkiler için tepeler, sırtlar, basamaklı arazi yapısı, oluk, vadi ve yüksek platoların bulunması sayılabilir. Bu elemanlar rüzgar üzerinde ilave bir etkiye sahiptir. Örneğin, rüzgar bir zirveye yaklaşırken, üstünden aşarken veya dağın eteklerine kadar hızlanırken; zirve tabanında yavaşlamaktadır. Bu değişimler yersel olarak meydana gelmektedir [1, 3].

2.4.4.1 Atmosferik sınır tabakada rüzgar akışına etki eden faktörler

- Büyük ölçekli basınç ve sıcaklık gradyanları
- Yüzey sürtünmesi ve momentum alışverişine neden olduğundan dolayı yüzey pürüzlülük parametresi
- Sınır tabakada rüzgar kaymalarını meydana getiren sınır tabaka yüksekliği
- Sıcaklık ve momentumun yatay taşınımı [1, 3].

2.4.5 Yüzeyde rüzgar verisi ve ölçüm yöntemleri

Rüzgar vektörel bir büyüklüktür, bu nedenle yön ve şiddet olmak üzere iki parametre halinde ölçülmektedir. Meteorolojide, rüzgar hızı ölçümünde kullanılan alete anemometre denir. Genellikle kepçeli tipte olanlar kullanılır ve kepçenin devir sayısı elektronik olarak kaydedilir. Rüzgar hızını grafik şekillerle kaydeden cihazlara anemograf denir. Rüzgar hızı hem yer yüzeyinde hem de atmosferin düşey kesitinde ölçülmektedir. Rüzgar hızı birimi iklim biliminde m/s cinsinden, sinoptik biliminde ise Knots cinsinden verilir. 1 m/s, 1.94 Knots'a eşittir. 1 m/s'lik rüzgar hızı 1 m² yüzeye 0.076 kg'lık basınç yapar. Bu çarpma basıncı rüzgar hızının artışının karesiyle artar. Dünya Meteoroloji Örgütü'nün belirlediği standart ölçüm yüksekliği 10 metredir.

2.4.5.1 Anemometreler

- 1) Mekanik anemometreler
 - a) Dönen anemometreler
 - i) Kepçeli anemometre
 - (1) Sabit anemometre
 - (2) El anemometresi
 - (3) Elektrikli rüzgar aleti
 - ii) Pervaneli anemometre
 - (1) Aerovan
 - 2) Mekanik olmayan anemometreler
 - a) Sonik anemometre
 - b) Lazer anemometre
 - c) Hassas tel anemometre



Şekil 2.5 : Kepçeli tip anemometre [1, 3].

2.4.5.2 Anemograf

1. Mekanik anemograf
2. Elektrikli anemograf
3. Elektronik anemograf

2.4.6 Rüzgar karakteristikleri

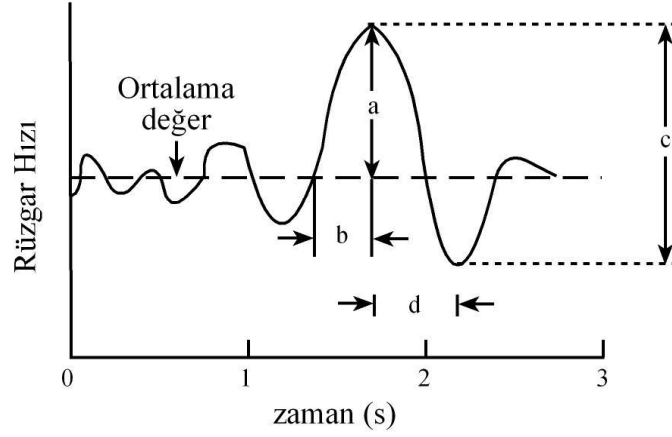
Bir bölgede türbin kurmak veya bölgeler arasında en uygun alanı seçmek için yıllık ortalama rüzgar şiddeti en önemli faktörlerden biridir. En elverişli bölgeler 6 m/s'nin üzerindeki bölgelerdir.

2.4.6.1 Kısa süreli rüzgar şiddeti değişimleri

Rüzgar şiddeti değişiminde genellikle iki aralık vardır; 10 dakika ve 3 saniye. İlki 1 s civarındaki bir örnekleme oranı kullanılarak tahmin edilmekte ve 10 dakikalık aralık için ortalaması alınmaktadır. 10 dakikalık aralık ortalaması, enerji çıktısı vasıtası ile rüzgar türbininin performansını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Diğer taraftan 3 saniyelik bir aralıktaki kısa süreli rüzgâr şiddeti değişimleri pik hamle (gust) ve türbülans dadasını vermektedir.

Rüzgardaki türbülans, rüzgâr türbinlerinin özellikle kanatlardaki yorulma süresini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Gust türbülans içinde süreksiz bir olaydır.

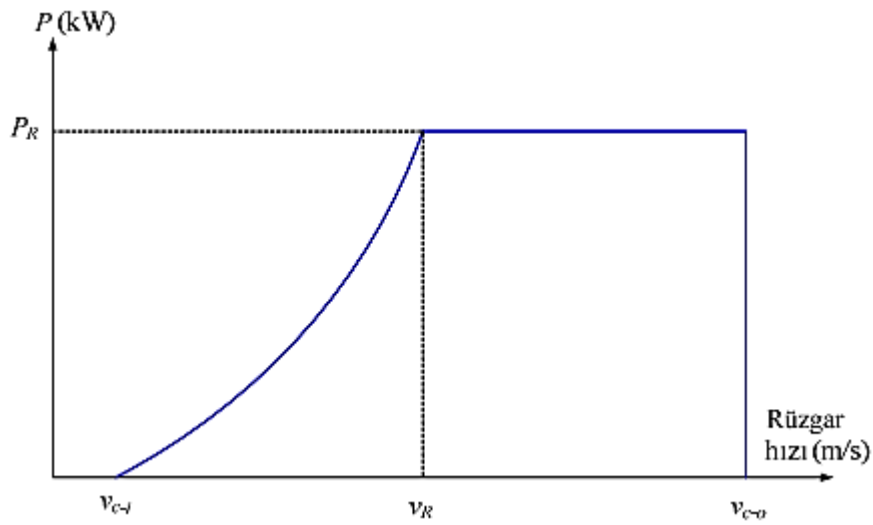
Bir gust'ın dört karakteristiği vardır. Genliği, devam süresi, maksimum gust değişimi ve değişim süresi. Gust yapısı bir rüzgâr türbininin davranışını etkilemektedir. Örneğin bir gust genliğinden bir rüzgâr türbini için ihtiyaç duyulan yapısal gerilmeler tahmin edilebilir. Bir ekstrem gust olayı türbinin kanat gibi bir elemanın veya tüm yapının dayanıklılığını belirler. Ekstrem yüklemeler, bir türbin elemanın muhtemel bir kullanılabilir yaşam süresini sağlayan şiddetli gust değerine duyarlılığını belirleyerek analiz edilmektedir.



Şekil 2.6 : Bir gust olayının grafikte gösterimi; a) genlik, b) devam süresi, c) maksimum değişim, d) değişim oranı [1, 3].

2.4.6.2 Bir rüzgar türbininin karakteristik güç eğrisi

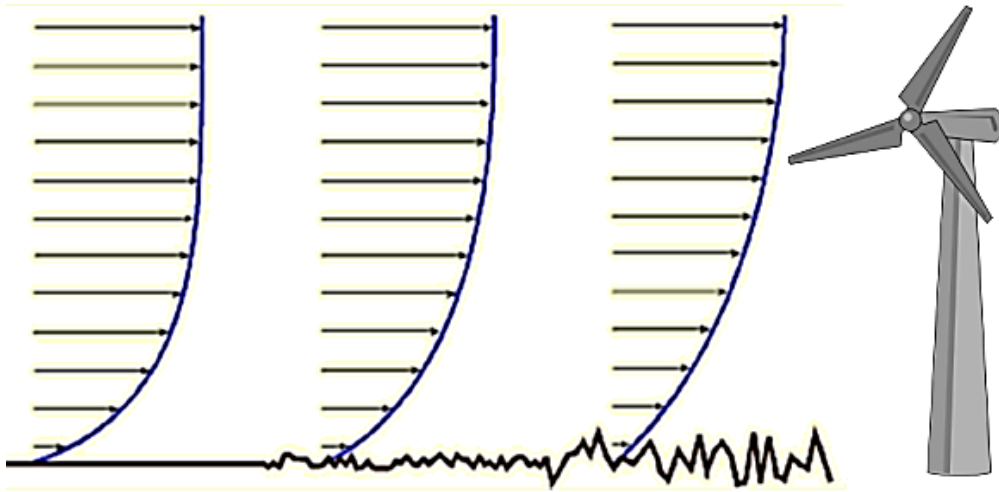
Rüzgar şiddeti frekans eğrisi ilgili bölgede kullanılacak olan bir rüzgar türbininin çalışma karakteristiklerinin belirlenmesi açısından büyük önem taşır. Bir rüzgar türbininin karakteristik güç eğrisi, türbinin üretime başladığı rüzgar şiddet değeri (cut in), maksimum gücün elde edildiği değeri, anma değeri (rated wind speed), türbinin devreden çıktığı değeri, kesme değeri (cut out) kapsar. Türbinin çalışmaya başladığı hız ile maksimum güç elde ettiği hız arasında güç eğrisi sürekli artış gösterir. Bu değer üzerinde ise açısız dönme (pitching) kontrol mekanizması ile türbin maksimum güç üretmeye devam eder. Kullanılan türbin için kesme rüzgar şiddeti değerinde ise türbin üretimi durdurur.



Şekil 2.7 : Rüzgar türbini güç eğrisi.

2.4.6.3 Düşey rüzgar profili

Yer yüzeyine yakın bölgelerde rüzgar, yüzey sürtünmesi nedeniyle yavaşlar ve yükseklik arttıkça artış gösterir. Rüzgarın yükseklikle bu değişimi düşey rüzgar profili olarak adlandırılır. Bu aynı zamanda rüzgarın düşey kaymasının ifadesidir. Bir türbinin hub (göbek) yüksekliğinin bu nedenle küçük çaplı bir rotor için bile 10 m'nin üzerinde olması gerekir. Rüzgardaki bu düşey kayma nedeni ile dönen bir kanat üzerinde salınımlı bir yük oluşur.



Şekil 2.8 : Düşey rüzgar profili; dikey eksen yüksekliği ve yatay eksen rüzgar hızını ifade eder [4].

2.4.6.4 Rüzgar yönünün değişimi

Rüzgar yönü Atmosferin genel sirkülasyonuna bağlı olarak mevsimsel ve lokal etkiler nedeniyle de günlük ve kısa süreli değişim gösterir. Mevsimsel olarak yön değişimleri özellikle sürekli akım bölgelerinde (ticaret rüzgarları) oldukça küçüktür. Orta enlem dereceleri gibi geçiş bölgelerinde ise değişim büyüktür. Ancak bir türbinin çalışması ve performansı üzerinde günlük ve kısa süreli değişimler daha önemli etkiye sahiptir.

Rüzgar yön değişimleri ve hâkim rüzgar yönü, rüzgar gülü diyagramları ile veya rüzgar yönünün frekans (%) ortamında grafiksel gösterimi ile belirlenir. Rüzgar yönündeki değişimlerin frekansı ve büyüklüğü, özellikle yatay eksenli türbinlerin farklı bileşenleri üzerinde dayanıklılık testleri ve oluşan gerilmeler açısından hayati önem taşır. Bir türbinden maksimum güç elde etmek ve gerilme etkisini minimize etmek için yön değişiminin davranışı ve persistans bilgisi gereklidir. Genelde bir rüzgar türbini, 30-60 saniyelik bir aralıkta rüzgar yönündeki her 5-10 derecelik değişim durumunda rüzgara doğru yönelerek uyum sağlar [3].

2.4.6.5 Rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesi

Rüzgar hareket halindeki bir hava akımı olduğu için kinetik enerjiye sahiptir. Kinetik enerji eşitliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2)$$

Burada m hareket halindeki cismin kütlesi, v de hızıdır. Yoğunluk ρ ile gösterilmek üzere eşitlikteki m kütlesi yerine aşağıdaki gibi yazılır:

$$m = \rho V \quad (2.3)$$

Burada V hacmi göstermektedir. Rüzgarın düşey bileşeni yatay bileşenin yanında ihmal edilir ve rüzgar esme yönüne göre dik alanı A ile, rüzgar yönündeki uzunluk da L ile gösterilirse hacim:

$$V = AL \quad (2.4)$$

ile ifade edilir. v rüzgar hızında ve t süresinde katedilecek mesafe ise;

$$L = vt \quad (2.5)$$

şeklinde bulunur. Bu ifadeleri eşitlik-2.1'de yerine yazıp düzenlersek;

$$E = \frac{1}{2}\rho Atv^3 \quad (2.6)$$

ifadesi elde edilir. Burada $t = 1$ ve $A = 1$ alınırsa birim zamanda birim alandaki enerji elde edilir.

$$E = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (2.7)$$

Eşitlikte kullanılan ρ , deniz seviyesinde standart atmosfer şartlarında havanın yoğunluğu olup $\rho = 1.223 \text{ kg/m}^3$, V ise 10 m yükseklikte ölçülen yatay rüzgar hızıdır.

Rüzgar enerjisi analizinde kullanılan büyüklük ve birimler:

$$\rho = [\text{kg/m}^3]$$

$$v : [\text{m/s}]$$

$$[\text{W}] = [\text{kgm}^2/\text{s}^3] \text{ olduğundan}$$

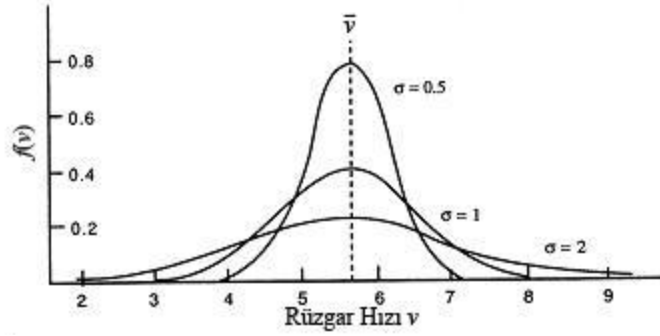
$E = [W/m^2]$ olarak ifade edilmektedir

2.4.6.6 Olasılık dağılım fonksiyonları (Weibull ve Rayleigh dağılımları)

Pratikte uygulamalarda karşılaşılan rastgele değişkenlerin büyük çoğunluğu normal dağılıma (Gauss Dağılımı) uyar. Bu dağılımın ortalama yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki eşitlikte verilir;

$$f(x) = \left(\frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \right) \times e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (2.8)$$

Kısaca $N(\mu, \sigma^2)$ şeklinde gösterilen bu dağılımın iki parametresinden μ_x , rastgele değişkenin ortalaması, σ_x standart sapmasıdır. Normal dağılım simetrik olduğundan çarpıklık katsayısı sıfırdır ($c_s=0$). Kurtosis katsayısı ise 3'e eşittir ($k=3$). Şekil 2.9 : 'da μ_x sabit kalırken, σ_x 'in üç farklı değeri için dağılım fonksiyonu verilmektedir.



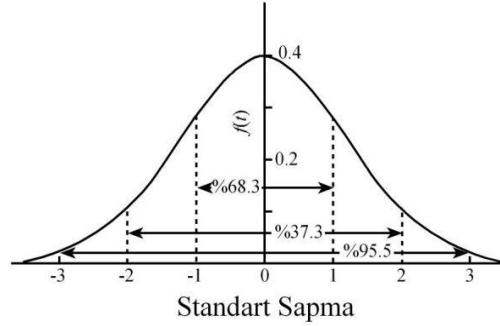
Şekil 2.9 : Normal dağılım fonksiyonu ($\sigma = 0,5; 1; \text{ve } 2$ için) [3].

Normal dağılımın $F(x)$ eklenik dağılım fonksiyonunun ifadesi analitik olarak elde edilemez, ancak sayısal integrasyon yoluyla hesaplanarak tablo haline getirilmiştir. Tek bir tablo hazırlayabilmek için önce rastgele değişken aşağıdaki dönüşümle standart değişken haline getirilir.

$$Z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (2.9)$$

Standart değişken boyutsuz olup ortalaması 0, standart sapması 1'e eşittir. Normal dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf), μ_x ortalaması çevresinde simetrik bir çan eğrisi şeklindedir. Simetrik dağılım olduğu için modu ve medyanı μ_x 'e eşittir.

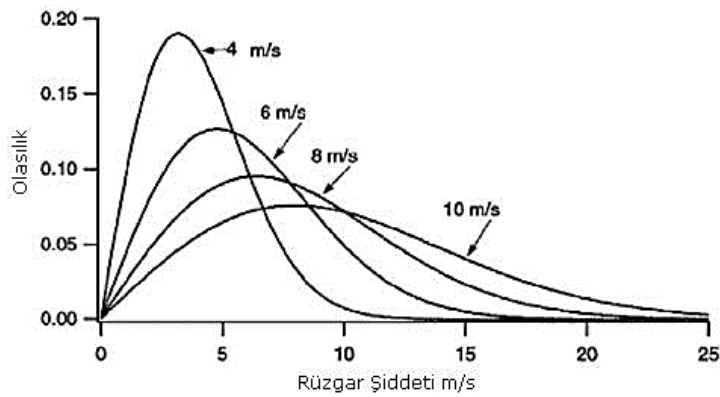
Rastgele değişkenin ortalamasının iki tarafında birer, ikişer ve üçer standart sapma genişlikteki aralıkların içinde kalması olasılıkları sırasıyla 0,68, 0,955 ve 0,9975 (~1)'dir.



Şekil 2.10 : Normal dağılım fonksiyonunun standardize edilmiş şekli [3].

Normal dağılıma ait olasılık kağıdı kolaylık sağlar. Bu kağıdın ordinat eksenini o şekilde ölçeklendirilmiştir ki normal dağılımın eklenik dağılım fonksiyonu (edf) bu kağıdın üzerinde doğru çizgi şeklinde görülür. Dağılım simetrik olduğu için $F(0.50)$ 'ye karşılık gelen $X_{0.50}$ medyan değeri ortalamayı verir. Standart sapma ise Şekil 2.10'da gösterildiği gibi $\sigma_x = x_{0.84} - \mu_x = \mu_x - x_{0.16}$ şeklinde hesaplanabilir. Çünkü rastgele değişkenin ortalamasının çevresinde iki yana doğru birer standart sapma genişlikte bir aralıkta kalma olasılığı 0.68'dir.

Rüzgar hızının dağılımının belirlenmesinde kullanılan pek çok dağılım vardır. İki parametrelili Weibull ve Weibull'un şekil parametresinin 2 olduğu durum olan Rayleigh dağılımları en yaygın kullanılan dağılımlardır. Rayleigh dağılımı tek parametrelili olduğu için Weibull'a göre daha az esnektir; ancak parametrelerinin hesaplanması daha kolaydır. Ayrıca, yıllık ortalama rüzgar hızının 4.5'den büyük olduğu durumda, rüzgar hızı dağılımının Rayleigh dağılımına yaklaştığı bilinmektedir.



Şekil 2.11 : Rayleigh dağılımı

Rüzgar hızı için iki parametrelili Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun genel ifadesi;

$$f_w(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (2.10)$$

şeklindedir. Weibull dağılımının ölçek parametresi olan c , aynı zamanda rüzgar verilerinde referans bir değere sahiptir. k şekil parametresinin genellikle 1.5 ile 3 değerleri arasında olması beklenmektedir. Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu;

$$F_w(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (2.11)$$

şeklindedir. Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu, rüzgar hızının, belli bir v değerinden küçük ya da eşit gerçekleşme olasılığını verir. Rayleigh yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki ifade ile verilebilir:

$$f_r(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right) \quad (2.12)$$

Rayleigh kümülatif dağılım fonksiyonu ise (2.2.13) eşitliğinde verildiği şeklindedir.

$$F_R(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right) \quad (2.13)$$

Rayleigh dağılımının en büyük avantajı sadece ortalama rüzgar hızı ile dağılımın belirlenmesidir. Rayleigh dağılımının rüzgar çalışmalarında geçerliliği pek çok referansta gösterilmiştir.

Ortalama rüzgar hızı ve rüzgar hızının standart sapması, sırasıyla (2.14) ve (2.15) eşitliklerinden hesaplanır.

$$v_m = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.14)$$

$$\sigma = \sqrt{c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k} - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right) \right]} \quad (2.15)$$

Weibull dağılımına dayanarak, en büyük sıklığa sahip rüzgar hızı (2.16) eşitliğinden hesaplanır.

$$v_{mod} = c \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{1/k} \quad (2.16)$$

Maksimum rüzgar hızı şu ifadeyle bulunabilir;

$$v_{maxE} = c \left(\frac{k+2}{k}\right)^{1/k} \quad (2.17)$$

Yukarıda ifade edilen formüllerde $k=2$ alındığında Rayleigh dağılımı için hesaplamalar gerçekleşir.

2.4.6.7 Rüzgar karakteri üzerinde arazinin etkisi

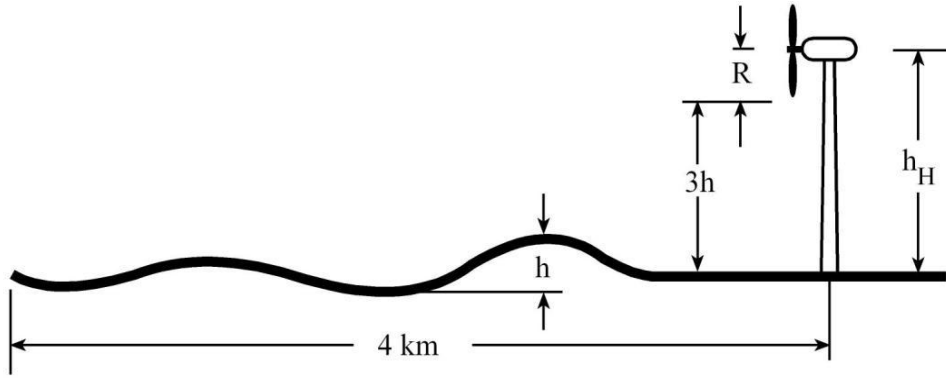
Düz bir arazi üzerinde rüzgar yükseklikle değişim gösterir. Yer yüzeyinin engebeleri ve pürüzlü yapısı rüzgarın yatay olarak da değişimine neden olur. Uygun bir arazi modeli seçildiği takdirde türbinden elde edilecek enerji üzerinde arazinin olumlu yönde bir katkısı olur.

Küçük ormanlık alanlar, küçük rüzgar kırıcıları gibi küçük düzensizliklerin olması durumunda arazi düz kabul edilebilir. Oysa tepeler, kanyonlar, vadiler, sırtlar gibi alanlar düz olmayan arazi yapılarıdır. Aşağıda belirtilen şartlarda arazi düz kabul edilebilir.

Türbin alanında 11.5 km çaplı bir daire içinde türbin alanı ile çevresi arasında yükseklik farkı 60 m'den daha küçük olması durumunda,

- Türbin alanı içinde rüzgar üstü tarafında 4 km, rüzgar altı tarafında ise 0.8 km mesafede yüksekliğin genişliğe oranının $1/50$ 'den büyük ($h/L > 1/50$ ($=\%2$)) bir tepenin olmadığı arazi yapısı durumunda,
- 4 km mesafedeki yukarı akım bölgesi içinde rotorun en alt seviyesi ile yüzeyin en alt seviyesi arasındaki fark, maksimum yükseklik farkının üç katından büyük olmalıdır ($h_t - R > 3h$, Burada h_t : hub yüksekliği, h : tepe yüksekliği, R : rotor yarıçapı).

Yukarıdaki tanımlama yer yüzeyi üzerindeki düz bir arazinin genel değişim özelliklerini tanımlamaktadır (bkz. Şekil 2.12 :)



Şekil 2.12 : Düz arazi koşulu şeması.

Düzgün olmayan arazi özelliklerinde çok büyük değişim vardır. Ayrık yükseklik veya çukur bölgeler ve dağlık arazi yapısı şeklinde alt sınıflandırmalar yapılmaktadır. Dağlık bölgedeki akış şartları komplekstir. Dağlık bölgedeki akışı incelemek üzere arazi atmosferik sınır tabaka (AST) yüksekliğine göre küçük ve geniş ölçekli arazi olarak bölünebilir. Örneğin bir yüksek tepe AST'nın %10'u gibi küçük bir oranını oluşturuyor ise, küçük ölçek arazi özelliklerine sahip olduğu söylenebilir. Böylece geniş ölçek özellikler sınır tabakanın %10'undan daha fazla bir oranını oluşturur. Bazı durumlarda da AST'yi geçebilir (~ 1-3 km).

2.5 Rüzgar Türbinleri Ve Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

2.5.1 Yatay eksenli rüzgar türbinleri

2.5.1.1 Tek kanatlı rüzgar türbinleri

Tek kanatlı rüzgâr türbinleri yüksek dönme hızları sebebiyle denenmiştir ancak gerek kütleli ve aerodinamik olarak dengesiz olması gerekse yüksek gürültü seviyesi sebebiyle bu türbinlerin kullanımından vazgeçilmiştir.

2.5.1.2 Çift kanatlı rüzgar türbinleri

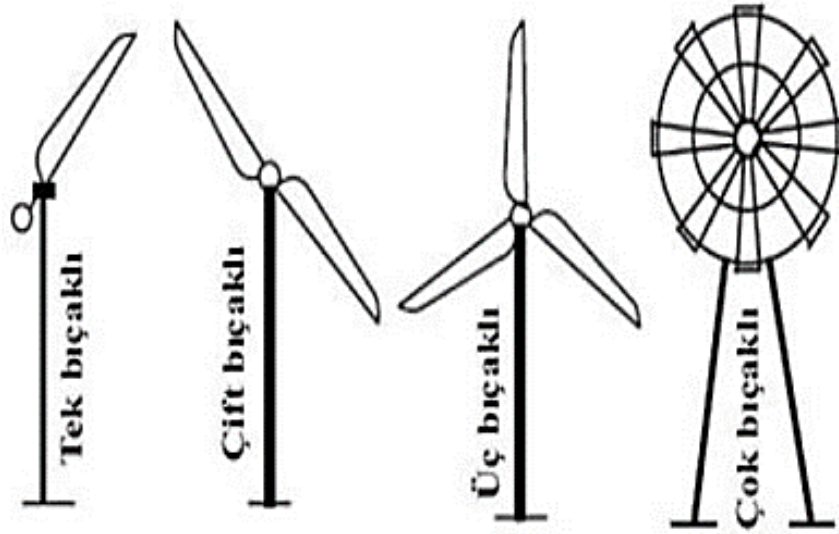
Tek kanatlı türbine nazaran kütleli ve aerodinamik olarak nispeten daha dengeli ve üç kanatlı türbine nazaran daha düşük maliyetli olduğu için denenmiştir. Ancak düşük rüzgar hızlarında çalıştırılması gerekmesi kullanımını sınırlayan en önemli faktördür, bunun yanı sıra gürültü seviyesi de yüksektir.

2.5.1.3 Üç kanatlı rüzgar türbinleri

Günümüzde en çok tercih edilmesinden de anlaşılacağı üzere optimum tasarıma sahip türbin tipi üç kanatlı modeldir. Bu tip türbinler kütleli yükler bakımından daha dengelidir. Kanat uç hız oranları düşüktür ve bundan dolayı gürültü seviyeleri azdır.

2.5.1.4 Çok kanatlı rüzgar türbinleri

Yel değirmenlerinden evrilmiş ilk rüzgar türbinleridir bu tip türbinler. Bir çoğu su çekme ve moment işi yapmak için kullanılmaktadır. Düşük hızlarda çalışırlar. Devir sayılarının yükseltilmesi için dişli kutuları kullanılır.



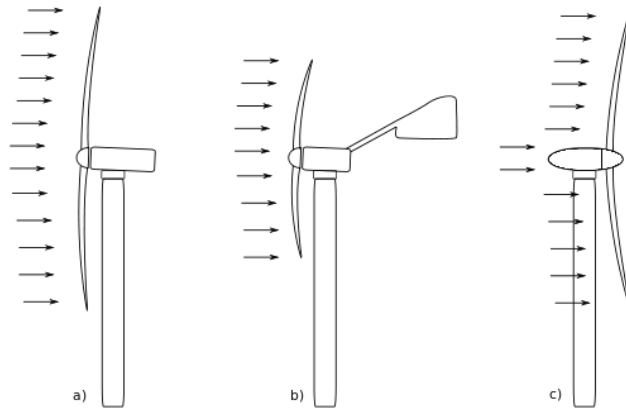
Şekil 2.13 : Kanat sayılarına göre rüzgar türbin tipleri [5].

2.5.1.5 Rüzgar üstü (upwind) türbinler

Yatay eksenli türbinlerde rotor rüzgarın estiği yöne bakıyorsa bu türbin rüzgar üstü türbin sınıfına girer. Günümüzde yaygın olarak bu makineler kullanılmaktadır. Bu türbinlerin en önemli avantajı; kulenin yapacağı gölgeleme etkisine neredeyse maruz kalmamasıdır ancak yine de rüzgar kuleye bir miktar eğilerek gelir. Kule yuvarlak ve düzgün olsa bile, kanadın kule hizasından her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalır. Ayrıca rüzgar üstü türbinler, rotoru rüzgara karşı döndürmek için yönelme (yawing) mekanizması ile donatılmışlardır.

2.5.1.6 Rüzgar altı (downwind) türbinler

Yatay eksenli türbinlerde rotor rüzgarı nasel tarafından (arka taraftan) alıyorsa bu türbin rüzgar altı türbin sınıfına girer. Bunların en önemli avantajı yönelme (yawing) mekanizmasına ihtiyaç olmayışıdır. Eğer nasel ve rotor uygun tasarlanırsa nasel rüzgarı pasif olarak takip eder ancak nasel rüzgarı takip ederken bu tip türbinlerin üreteçlerinden inen kabloların dolaşması söz konusudur. En önemli avantajı rijit olmayan kanat kullanılabilmesidir. Bu hem ağırlık hem de türbinin güç dinamiği açısından önemli bir üstünlük sağlar ve kule yükü azalmış olur. En önemli dezavantajı ise kanat kule hizasından geçerken meydana gelen güç dalgalanması, çok fazladır.



Şekil 2.14 : a)rüzgar üstü türbin b) rüzgar üstü kuyruklu türbin c) rüzgar altı türbin

2.5.2 Dikey eksenli rüzgar türbinleri

2.5.2.1 Darrieus türbini

Darrieus tipi dikey eksenli türbinler düşey doğrultuda belli bir forma sahip iki veya üç adet kanat ve bu kanatların iki uçtan birleştiği bir şafttan oluşur. Bu iki kanatlı türbini bir elips şekline benzetecek olursak kanatlar bir elipsi oluşturan iki yay ve şaft da elipsin uzun ekseni olarak ele alınabilir.

1931 yılında Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından icat edilmiştir. Kanatları geometrik formlu aerodinamik profile sahip olduğundan yüksek performanslıdır. Kanatlardaki hafif eğim sayesinde kanatlardaki çekme gerilimleri minimuma iner. Yüksek hızlarda çalışabilir. İlk hareket için Savonius rüzgar türbini veya bir tahrik motoru gerekmektedir. Rüzgar yönünün önemi yoktur.



Şekil 2.15 : Klasik Darreius tipi rüzgar türbini

H-Darrieus türbini (Gyromill)

Darrieus rüzgar türbinlerinin geliştirilmesiyle oluşan daha karmaşık geometride bir rüzgar türbinidir. Darrieus türbinleri ile arasındaki en önemli farklar; kanatlara açılal dönme (pitching) kontrolü uygulanabilmesi ve aerodinamik profiline düz olmasıdır.

Δ -Darrieus türbini

Darrieus rüzgar türbinlerinin geometrisinin değiştirilmesiyle oluşan başka bir türbindir, çok kanatlıdır ve kanatlar yatay ile belli bir açı yapacak şekilde türbin şaftına bağlanmışlardır ve karşıdan bakıldığında üçgen şeklinde gözüktüğü için ismi Δ -Darrieus türbinidir. Herhangi bir tahrik sistemi olmadan kendi kendine çalışmaya başlayabilir, gürültü seviyesi yüksektir.



Şekil 2.16 : Δ -Darrieus türbini [3].

Helical-Darrieus türbini

Üç kanatlı ve kanatları helisel forma sahip Darrieus rüzgar türbinidir. Gürültü seviyesi yüksektir.

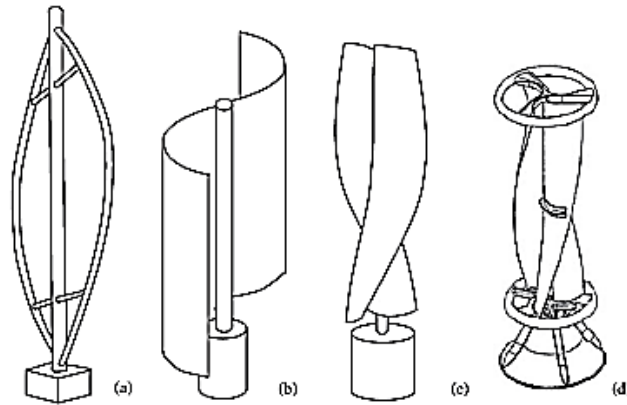
2.5.2.2 Savonius türbini

Savonius rüzgar türbinleri, 1925 yılında Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından keşfedilmiştir. İki yatay disk arasına yerleştirilmiş dikey bir şaft ve merkezleri, bu şaft ekseninin dik kestiği bir doğru üzerinde ve birbirine göre simetrik olan, yarım silindir şekilli iki adet kanattan oluşur. Kuş bakışı bakıldığında “S” harfi gibi görünür. Belirli bir hızla gelen rüzgarın etkisiyle, türbini oluşturan silindirlerin iç kısmına ve dış kısmına etkiyen kuvvetlerin oluşturduğu döndürme momenti ile dönmeye başlar.

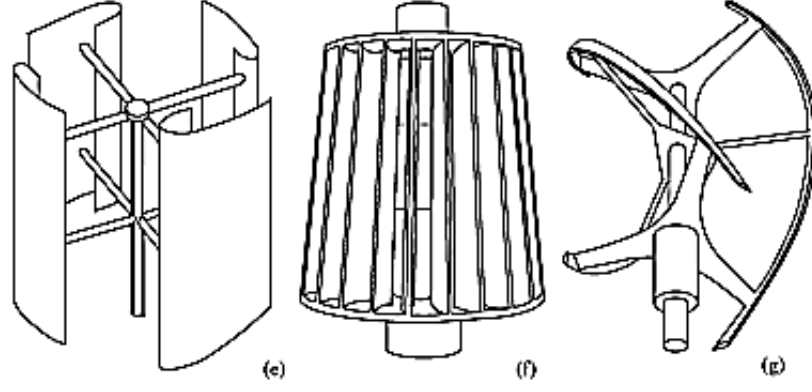
Diğer dikey eksenli rüzgar türbinlerine göre; düşük rüzgar hızlarında iyi başlangıç karakteristiklerine sahip olması, yapımının kolay ve ucuz olması, rüzgarın yönünden bağımsız olması ve kendi kendine ilk harekete başlaması gibi birçok üstünlüklere sahip olan Savonius rüzgar türbinlerinin, aerodinamik performansı düşük olduğu için ilk uygulama alanları; havalandırma, su pompalama gibi kısıtlı alanlar olmuştur. Savonius rüzgar türbinlerinin birçok üstünlüğü bulunmasına rağmen, aerodinamik performanslarının düşüklüğü nedeniyle kullanılmamaktadır [Url-2].

Helical-Darrieus türbini

Klasik Savonius türbinlerinin yarım silindir şeklindeki kanatlarına helisel form verilerek şekillendirilmiş dikey eksenli rüzgar türbinidir.



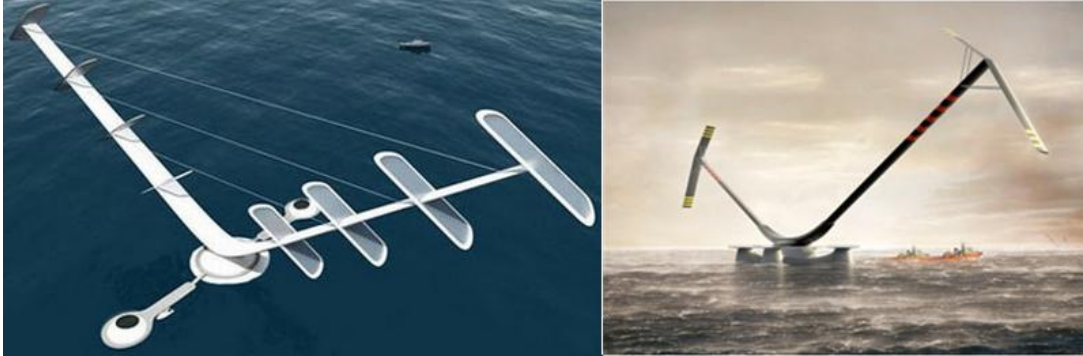
Şekil 2.17 : Çeşitli dikey eksenli rüzgar türbinleri: a) Klasik Darrieus b) Klasik Savonius c) Helisel Savonius d) Üç Kanatlı Helisel Savonius



Şekil 2.17 (devam) : Çeşitli dikey eksenli rüzgar türbinleri e) Noguchi
f) Δ -Darreius g) Helisel Darreius

2.5.3 Eğik eksenli rüzgar türbini

Dönme eksenleri, hem yatay ile hem de dikey eksen ile belirli bir açı yapan rüzgâr türbinleridir. Tasarımda iki adet eğimli kol ve bu kolların ucuna bağlanmış rotorlar vardır. Amacı kule ihtiyacını ortadan kaldırmak ve kanatlardaki gerilmeyi azaltmaktır. Rüzgar yönünün, dikey eksenli türbinlerde olduğu gibi bu tip türbinlerde de önemi yoktur.



Şekil 2.18 : Eğik eksenli rüzgar türbini projelerinden örnekler

2.6 Rüzgar Türbini Komponentleri

Yatay eksenli bir rüzgar türbinine ait ana elemanlar; kule, nasele, rotor, elektrik sistemi dairesi olarak sıralanabilir.

2.6.1 Temel

Kulenin tabanı ile zemin arası devamlılığı sağlayacak olan temel betonarme olarak tasarlanır; dönme, devrilme ve kesme etkilerine karşı mukavemet gösterir. Silindirik

çelik kuleyle olan bağlantısı taban flanşı ve temel içinde kalacak sepet flanşı ile sağlanır.

2.6.2 Nasel (Muhafaza)

Nasel, kule üstünde bulunan, yataklar, sapma mekanizması, fren mekanizması, dişli kutusu, jeneratör gibi mekanik elemanların içinde bulunduğu muhafazadır. Burada oluşacak rüzgar yükleri kule üstüne aktarılır ve önemli bir analiz konusu oluşturur. Normal çalışma, frenleme gibi farklı rüzgar senaryolarının yanında nasel ağırlığı da kule tasarımında önemli bir yer tutmaktadır. Nasel ağırlığı, kule doğal frekansını etkilemesi ve yerel burkulmalar açısından dikkat edilmesi gereken bir noktadır.

2.6.3 Rotor (Pervane)

Kule üstünde bulunan, kanatlar ve kanatların önündeki göbek (hub) olarak tanımlanır. Günümüzde 3 kanatlı sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Kanatlar genellikle fiberglas ve karbon fiber gibi kompozit malzemelerden yapılmaktadır. Göbek (hub) ise kanatları birleştiren elemandır ve yapısal olarak rijit, sallantılı veya mafsallı olarak tasarlanabilir.

2.6.4 Elektrik sistemi dairesi

Rüzgar türbinin altında bulunan elektrik sistemi dairesi bazı elektrik aksamı içerir. Bunlar kablolar, dönüştürücüler, elektronik konverterler, güç faktörü düzeltme kapasitörleri olarak sıralanabilir.

2.6.5 Kule

Kule yapısı, rotor pervanesi ve nasel ağırlıklarını taşıırken, kendi üzerine gelen rüzgar etkisini ve pervanelerin çalışmasından kaynaklanan rüzgar yüklerini de güvenli bir şekilde karşılayıp temele aktarmalıdır. Günümüzde çoğunlukla çelik silindirik kuleler tercih edilir. Çelik plaka sacların sıcak haddehanelerde eğilmesiyle elde edilen kule gövde parçaları birbirine kaynaklanarak ana segmentler oluşturulur. Bu segmentler flanşlar yardımıyla birbirine bağlanır. Kulelerde diğer tasarım tercihleri betonarme, hibrid (Çelik-betonarme) veya çelik makas olarak sıralanabilir.

2.6.5.1 Rüzgar türbin kulesi tipleri

Günümüzde rüzgar türbin kuleleri; aynı amaca hizmet etmekte olup, farklı malzemelerden ve farklı yapı sistemleriyle imal edilebilmektedir. Yapısal çelikten veya betonarme olarak imal edilebilen kuleler, genel olarak dört farklı yapı sistemiyle enerji piyasasında yer almaktadırlar. Kuleler yapı sistemlerine göre;

- Yapısal çeliğin kullanıldığı kafes tipi ve silindirik kuleler
- Betonarme malzeme kullanılan silindirik kuleler
- İki ana malzemenin beraber kullanıldığı hibrit kuleler

olarak sınıflandırılabilir.

Çelik kafes tipi kuleler

Rüzgar enerjisinde yapısal çeliğin kullanıldığı ilk kule sistemi kafes tipi kuleler olmuştur. Kafes tipi kulelerde, birleşim elemanlarının ana taşıyıcı ayaklara, ana taşıyıcı ayakların da birbirine bağlantısı bulonlarla sağlanmaktadır [6]. Taşıyıcı sistemin birleştirilecek elemanlarının, proje sahasına ulaşımının kolay olması ekonomi açısından avantaj sağlamaktadır. Ayrıca yüzeyinin silindirik çelik kulelere göre daha az olması kuleye daha az rüzgar kuvveti etkimesini sağlar. Ancak rüzgar kuvvetlerini azaltan bu durum, soğuk havalarda bakım ve onarım çalışmalarında zorluk yaratarak kafes tipi kuleler için bir dezavantaj oluşturmaktadır.



Şekil 2.19 : Çelik kafes tipi kule örneği

Çelik silindirik kuleler

Günümüzde çelik silindirik kuleler en çok tercih edilen kule tipidir. Beton ile mukayese edildiğinde hafif, dolayısıyla ekonomik olmasına rağmen; sağladığı yüksek mukavemet faktörü tercih edilmesindeki en büyük etkidir.



Şekil 2.20 : Tübüler çelik rüzgar türbini kulesi

Çelik silindirik kuleler, gövde ve öngermeli bulonlu flanş bağlantılarından oluşmaktadır. Gövde elemanları; birbirine dikey kaynakla bağlanacak, imal edildiği yerin kapasitesine göre 2-3 metre boylarında silindirik veya kesik konilerden oluşur. İmalatı yapılan bu kesik koniler birbirleriyle yatay kaynakla birleştirilir ve ana segment oluşturulur [6].

Gövdeyi oluşturan parçaların birbirleriyle birleşimi, gövdeye kaynaklanacak flanşlar ve bu flanşların öngermeli bulonlarla birbirine tesbiti ile sağlanır. Birleşimi sağlanan kulenin, betonareme tekil temel ile bağlantısı taban flanşı ve temel içinde kalacak sepet flanşı ile sağlanır.

Çoğunlukla aşağıdan yukarıya azalan çap değerleriyle, kesik koni biçiminde üretilen ve et kalınlığı yükseklikle değişkenlik gösteren çelik silindirik tip kuleler ekonomik açıdan büyük avantaj sağlamaktadır. Bu tip kulelerin, kafes tipi kulelere göre daha az bulonlu birleşim gerektirmesi ve dolayısıyla daha az öngörme ve bakım gerektirmesi önemli bir avantajdır. Ayrıca kafes tipi kulelere göre daha güvenli bir tırmanma alanı sağlaması ve estetik olarak hoş görünümü günümüzde daha fazla tercih edilmelerinin başlıca nedenleridir [7].

Atölyelerde imal edilip proje sahasına konumlandırılacak silindirik çelik kuleler için ulaştırma konusu önemli bir kısıttır. Kuleler çoğunlukla karayolundan büyük tırlarla taşındıklarından, karayolu boyutları kulelerin geometrisinde kısıtlamalar

yaratmaktadır. Amerikan karayolları için silindirik çelik kule için çap sınırı 4,3 metre olarak verilmiştir [8]. Sınır olan bu çap değerlerine karşılık, tasarımda kule yüksekliğini artırabilmek için kesit et kalınlığını artırmak veya küçük parçalar halinde taşımacılık yapma çözüm olabilmektedir [8]. Artan kule yüksekliği ile ortaya çıkan yüksek dayanım talebi kalınlığın artmasıyla karşılanabilir. Karayolları ağırlık sınırlarını aşmamak adına, kule yüksekliğinin yüksek olduğu durumlarda taşımacılık ekonomik olmasa da küçük parçalar halinde yapılabilmektedir.

Betonarme kuleler

Yapı sektöründe, imalatın büyük bir çoğunluğunda ana malzeme olarak kullanılan beton, rüzgar enerjisinde yapısal çeliğin gölgesinde kalmıştır. Ancak zamanla artan türbin kapasitesiyle beraber artış gösteren kule yüksekliği ve rotor çapı betonarme kuleye olan talebi artırmıştır. Silindirik çelik kulelerin, yüksek ölçekli rüzgar türbinlerindeki rezonans eğilimi, tasarımcıları betonarme kulelere yönlendirmiştir [9].

Ön germeli prefabrike betonarme panellerin sahada birleştirilmesiyle oluşturulan betonarme kuleler, ulaşılabilirlik açısından son derece avantajlıdır. Betonarme yapıların inşaat mühendisliğinin bir çok alanında yapısal çelikten fazla kullanılması, beton imalat sanayisinin daha yoğun olmasını beraberinde getirmiştir. Bu durum betonarme rüzgar türbin kuleleri için sahaya ulaştırma bakımından ayrı bir ekonomik avantaj sağlamaktadır [10].

Yapısal olarak; daireselliği sağlayacak şekilde, önceden hazırlanmış yay şeklindeki betonarme panellerin öngörme ile bütün halde çalışması sağlanır. Öngermeli betonda servis yükleri altında çatlama oluşmadığından yorulma açısından dayanımı yüksektir. Ayrıca çelik kulelerde tasarımı etkileyebilen lokal burkulmalar öngermeli betonarme kulelerde görülmemektedir [11].

Hibrit kuleler

Hibrit kuleler, çelik ve betonarme yapı sistemlerinin birlikte kullanıldığı kulelerdir. Kule; altta betonarme, üstte silindirik çelik kule olarak tasarlanır ve iki yapı sisteminin de avantajlarından faydalanır. Yüksek bir kulenin tasarımında engel yaratan ulaştırma kısıtası sorunu bu kule tipiyle ortadan kalkmaktadır. Üstte bulunan silindirik çelik kule bölümü karayolu standartlarına boyut ve ağırlık bakımından uygun olarak tasarlanır.

Büyük kapasiteli bir türbin için kullanılacak kulenin büyük tekil temel gereksinimi ve yüksek mukavemet talebi ve prekast parçaların kaldırılabilmesi için daha yüksek vinçlerin fazladan maliyet oluşturacaktır. Hibrit bir kulede ise üst kısmın silindirik çelik kule olması ağırlığı azaltarak bu üç faktörün de ortadan kalkmasını sağlamaktadır. Ayrıca ağırlığın azalması deprem yüklerinin de azalmasını sağlayacaktır [11].

Gergili çelik kuleler

Rüzgar altı türbinlerde rotorun, kulenin sebep olduğu rüzgarı gölgeleme etkisini azaltmak için daha ince yapılı kulelere ihtiyaç duyulmuştur. Bu kulelerde çelik kablolar veya kirişler kullanılır. Nispeten düşük kütleli olmalarına rağmen gergili kuleler maliyet açısından çok düşük değildir. Çelik teller ve bunların bağlanacağı temel ve diğer ekipmanların maliyetleri toplam maliyeti oldukça yükseltmektedir. Buna ek olarak, tarımsal alanlar için bu kablolar engel teşkil etmektedir

3. RÜZGAR TÜRBİN KULESİNİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ

Rüzgar türbin kulelerinin ön tasarımında belirleyici olan temel faktör dinamik karakteristiklerdir. Kuleye ait doğal frekansın, türbin çalışma frekanslarından (1P ve 3P) yaklaşık $\pm\%25$ oranında uzak olması istenir. Bunun yanında rüzgar hamlesi veya darbe yükü gibi dinamik ve ani yüklere karşı dayanıklı olması beklenir.

3.1 Dayanım ve Rijitlik

Kule tasarımında boyutlandırma, dayanım ve rijitlikle ilgili ihtiyaca yönelik olarak yapılır. Bu ihtiyaçlar kabaca ve genel olarak aşırı rüzgar hızlarında ayakta kalabilmesi için gerekli olan kopma dayanımı, 20-30 yıl arası bir işletim süresi boyunca hizmet verebilecek yorulma dayanımı ve titreşim özelliklerine mukavemet gösterebilecek rijitliktir [2].

3.1.1 Kopma dayanımı

Kuleye etki eden statik yükler, nasele ve kulenin kendi ağırlığı; dinamik yükler ise rotora etki eden aerodinamik kuvvetlerin ve işletimden gelen kuvvetlerin meydana getirdiği yüklerdir. Açısız dönme (pitch) kontrollü türbinlerde rotora gelen kuvvet, genellikle rotorun anma hızında döndüğü zaman en yüksek mertebesine ulaşır. Kuledeki en yüksek eğilme momenti dağılımı kanat açısı (pitch) kontrolü olmayan türbinlerde veya kanat pozisyonunun bazı yük durumlarında gerçekleşir.

3.1.2 Burkulma dayanımı

Eğilme doğal frekansı düşük olan ve et kalınlığı ince olan tübüler çelik kulelerde yerel burkulmaların önemi büyüktür. Modern türbinlerdeki ağırlıkların azaltılması çalışmalarının sonucu olarak incelenen et kalınlıklarının boyutlandırılması için burkulma dayanımına sıklıkla başvurulur [2].

3.1.3 Yorulma dayanımı

Rotorun dönmesinden ileri gelen dinamik yükler, kulelerin yorulma ömürleri üzerinde oldukça etkilidir. Bu nedenle konvansiyonel binalar için uygulanan statik gerilme

analizi her rüzgar türbini kulesi için uygun olmamaktadır. Rüzgar türbini çalıştırılırken, türbin bileşenlerinin titreşimleri ve doğal frekansları göz önünde bulundurulmalı ve bu doğal frekans bölgelerinden yeterli oranda uzaklaşılmalıdır.

Rotordan gelen tahrik ile doğal frekanslar arasındaki ilişkiyi belirlemenin bir yolu Campbell diyagramından faydalanmaktır. Campbell diyagramı türbinin en önemli doğal frekanslarını rotor hızının bir fonksiyonu olarak gösterir. Şekil 3.1’de üç kanatlı bir türbin için Campbell diyagramı görülmektedir. Burada (1P) rotorun dönme frekansını, (BP) kanat geçiş frekansını, (B) kanat sayısını, (P) ise her bir dönüşü temsil etmektedir. Kesişim noktaları kaçınılması gereken işletim hızlarıdır.

3.2 Kule Doğal Frekansının Belirlenmesi

Kulenin 1. moduna ait frekansın hesaplanması, kuleye etkileyen dinamik yükler açısından önemlidir. Rotor çalışma frekansı (P) ve kanat geçiş frekansı (3P) değerleri arasındaki ilişkiye göre kule doğal (1. mod) frekansı, kulenin dinamik yükler altında davranışını etkileyecektir.

- Kule doğal frekansı; kanat geçiş frekansından büyükse çok yumuşak (soft soft),
- Rotor çalışma frekansı ve kanat geçiş frekansı arasında ise yumuşak (soft)
- Rotor çalışma frekansından küçükse katı (stiff)

kule olarak kategorilendirilir [4, 7].

Dinamik etkiler, özellikle çok yumuşak ve yumuşak kulelerde dikkat edilmesi önem arz etmektedir. Ön tasarımı yapılmış bir rüzgar türbin kulesinin doğal frekansını hesaplamak için kullanılacak üç farklı yöntem aşağıda belirtilmiştir.

- Modal Analiz
- Rayleigh Metodu
- Baumeister Formülü

4. YÜKLERİN BELİRLENMESİ VE MODELLEME

4.1 Türbin ve Kule Özellikleri

Üzerinde çalışma yapılan kule, Enercon markasının E-48 modeli olup 800 kW güce sahip yatay eksenli, üç kanatlı rüzgar türbininin kulesidir. Türbinin kanatları kompozit malzemeden imal edilmiştir, kontrol sisteminin çalıştırdığı üç ayrı motor ile sağlanan açısız dönme (pitching) kontrolüne sahiptir, kanat içlerinde yıldırım koruması mevcuttur. Yönelme (yawing) mekanizmasına sahiptir ve bu 4 adet elektrik motoru ile sağlanmaktadır. Bu türbin, dişli kutusu olmayan bir modeldir.

Kule, içi boş tüp şeklinde 3 parçadan oluşan, silindirik kesitli konidir, yani yükseklik arttıkça çap azalmaktadır. Koni şeklinin sabit çaplı silindir şekline tercih edilmesinin sebebi maliyeti düşürmektir. Kule ölçüleri (yükseklik, çap ve et kalınlığı gibi) ve malzeme bilgileri bu tezin ekinde verilen teknik resimden okunabilir. Kule üç parçadan oluşmaktadır ve bu üç parça birbiri ile, parçalara kaynak ile eklenmiş olan flanşlar vasıtasıyla civatalı bağlantı yapılarak birleştirilir. Türbine ait veriler bu tezin ekinde verilmiştir.

4.2 Rüzgar Yüğü Hesabı

4.2.1 DIN 1055-4 normuna (2005 revizyonu ve 2006 düzeltme eki) göre binalar için tasarım yükleri

Kural olarak yapılar, ana eksenlerine etkiyen rüzgar yükü ile değerlendirilir. Bazı özel durumlarda diğer eksenler referans alınarak ana eksen dışındaki eksenler (örneğin diyagonal eksenler) için yapılan hesaplar da değerlendirmeye katılır.

Hesaba katılan rüzgar yükleri ve diğer yatay doğrultuda etkiyen yüklerin sonucunda, yapıların ve yapı elemanlarının devrilmesi ve/ veya kayması ve uçmasına karşı yeterli emniyet hesaplanmışsa, bu hesap doğrulanmalıdır.

4.2.1.1 Rüzgar yönü

Hesaplama rüzgar yükünün, doğrultusundan bağımsız olarak, dinamik basınç karakteristik değerinde etkidiği kabul edilir. Kural olarak rüzgar yükünün yapıya ya da binaya zemine paralel olarak etkidiği varsayılır.

4.2.1.2 Rüzgar basıncı

Bir yapının dış yüzeyine etkileyen rüzgar yükü, yapı şekline bağlıdır ve basınç, emiş ve sürtünmenin bileşkesi olarak etkileyen bir yüküdür. Tüm yapıya etkileyen nihai rüzgar yükü aşağıdaki denklemler ile bulunur:

$$W_e = C_{pe} \cdot q(z_e) \quad (4.1)$$

W_e : Tüm yapıya etkileyen dış rüzgar basıncı

C_{pe} : Dış yüzeye etkileyen basınç katsayısı

q : Rüzgar dinamik (hıza bağlı) basıncı

Bir elemanın yüzey alanına etkileyen rüzgar basıncı aşağıdaki denklem ile bulunur:

$$W_i = C_{pi} \cdot q(z_i) \quad (4.2)$$

C_{pi} : İç yüzeye etkileyen basınç katsayısı

q : Rüzgar dinamik basıncı

Rüzgar basıncının yapı yüzeyine dik olarak etkidiği varsayılır. Standartta belirtilen basınç ve emiş katsayıları ortalama değerlerdir ve ayrı yapısal elemanlar için %25 artabilir, örneğin; çatı kirişi, çatı aşığı ve cephe elemanları.

4.2.1.3 Rüzgar kuvvetleri

Bir yapıya etkileyen toplam rüzgar kuvvetleri aşağıdaki formül ile bulunur:

$$F_w = C_f \times q(z_e) \times A_{ref} \quad (4.3)$$

C_f : Yük katsayısı

A_{ref} : Rüzgar yüküne maruz kalan yüzey alanı

$$A_{ref} = b \times h \quad (4.4)$$

b: Kesit çapı

h: Yükseklik (yüke maruz kalan kısma ait)

Yükün uygulanacağı nokta yapı şekline ve rüzgarın etkidiği pozisyona göre belirlenir. Bina şeklinin standartta verilen çizelge ve şekillerde yer almaması durumunda C_f ve C_p katsayıları rüzgar tüneli testleri ile belirlenir.

Rüzgar dinamik basıncı aşağıda verilen denklem ile hesaplanır:

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 \quad (18)$$

$\rho = 1.223 \text{ kg/m}^3$ (hava için)

v_m : hesapların dayandırıldığı rüzgar hızı [m/s]

Rüzgar hızı (v_m) İstanbul ve civarı için 25 m/s olarak tanımlanmıştır [14]. Bununla beraber hesaplamalarda kullanılan rüzgar hızı, rüzgar yükünün etkidiği alanın zeminden yüksekliğine bağlı bir fonksiyon olarak kabul edilir. Bu fonksiyon aşağıdaki gibidir [2]:

$$v(z) = v_{ref} \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_{ref}}{z_0}} \quad (4.6)$$

$v(z)$: z yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı [m/s]

v_{ref} : Referans yükseklikteki rüzgar hızı [m/s]

z : Rüzgar hızı değeri hesaplanmak istenen yükseklik [m]

z_{ref} : Referans yükseklik [m]

z_0 : Yüzey pürüzlülük uzunluğu [m] (bkz: Şekil 4.1)

\ln : Doğal logaritma tabanı (taban $e=2,7183$)

Hamle dinamik basıncı ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$q(z) = \frac{1}{2} \times \rho \times v_{m,t}^2(z) \times [1 + 6 \times I_{v,t}(z)] \quad (4.7)$$

$v_{m,t}(z)$: Ortalama rüzgar hızı

$I_{v,t}(z)$: Türbülans yoğunluğu

Ortalama rüzgar hızı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$v_{m,t}(z) = C_t(z) \times v_m(z) \quad (4.8)$$

Türbülans yoğunluğu ise aşağıdaki eşitlik ile bulunur:

$$I_{v,t}(z) = \frac{1}{C_t(z)} \times I_v(z) \quad (4.9)$$

Burada $v_m(z)$ ve $I_v(z)$ değerleri 0'den elde edilirken C_t , topoğrafya katsayısı olup aşağıdaki koşullara uyan duruma göre seçilir:

$$\begin{aligned} C_t &= 1 & \Phi &< 0,05 \\ C_t &= 1 + 2 \times s \times \phi & 0,05 &\leq \Phi \leq 0,3 \\ C_t &= 1 + 0,6 \times s & \Phi &> 0,3 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Φ : Arazinin rüzgar üstü eğimidir (bkz. Çizelge 4.2 :)

s : Şekil 4.2 : ve Şekil 4.3 :'te verilen diyagramlardan seçilir.

Çizelge 4.1 : 4 tip arazi kategorisi için ortalama hız, türbülans yoğunluğu, hamle dinamik basıncı ve hamle hızı profilleri.

Arazi Kategorileri	Kategori 1	Kategori 2	Kategori 3	Kategori 4
Yüzey pürüzlülük katsayısının sabit olduğu minimum yükseklik Z_{min}	2m	4m	8m	16m
Ortalama rüzgar hızı ($Z > Z_{min}$ koşulu için) v_m	$1,18 \times v_{ref}(Z/10)^{0,12}$	$1,00 \times v_{ref}(Z/10)^{0,16}$	$0,77 \times v_{ref}(Z/10)^{0,22}$	$0,56 \times v_{ref}(Z/10)^{0,30}$
v_m/v_{ref} ($Z < Z_{min}$ koşulu için)	0,97	0,86	0,73	0,64
Türbülans yoğunluğu ($Z > Z_{min}$ koşulu için) I_v	$0,14 \times (Z/10)^{-0,12}$	$0,19 \times (Z/10)^{-0,16}$	$0,28 \times (Z/10)^{-0,22}$	$0,43 \times (Z/10)^{-0,30}$
Türbülans yoğunluğu ($Z < Z_{min}$ koşulu için) I_v	0,17	0,22	0,29	0,37

Çizelge 4.1 (devamı) : 4 tip arazi kategorisi için ortalama hız, türbülans yoğunluğu, hamle dinamik basıncı ve hamle hızı profilleri.

Hamle dinamik basıncı ($Z > Z_{min}$ koşulu için) q	$2,6 \times q_{ref}(Z/10)^{0,19}$	$2,1 \times q_{ref}(Z/10)^{0,24}$	$1,6 \times q_{ref}(Z/10)^{0,31}$	$1,1 \times q_{ref}(Z/10)^{0,40}$
q/q_{ref} ($Z > Z_{min}$ koşulu için)	1,9	1,7	1,5	1,3
Hamle hızı ($Z > Z_{min}$ koşulu için) v	$1,61 \times v_{ref}(Z/10)^{0,095}$	$1,45 \times v_{ref}(Z/10)^{0,120}$	$1,27 \times v_{ref}(Z/10)^{0,155}$	$1,05 \times v_{ref}(Z/10)^{0,200}$
v/v_{ref} ($Z < Z_{min}$ koşulu için)	1,38	1,3	1,23	1,15

Arazi kategorileri ve z_0 değerleri için bkz. Şekil 4.1 :

<p>Kategori 1 Açık denizler; rüzgar yönünde en az 5 km açıklığa sahip göller, pürüzsüz, düz ve engel barındırmayan araziler. $Z_0 = 0,01$ m</p>	
<p>Kategori 2 Çitler, tekil çiftlikler, evler veya ağaçlar içeren bölge ve tarımsal arazi bölgesi $Z_0 = 0,05$ m</p>	
<p>Kategori 3 Banliyöler veya endüstriyel/ticari araziler, ormanlar $Z_0 = 0,30$ m</p>	
<p>Kategori 4 En az %15'lik kısmına, 15 m'yi aşan yükseklikte yapılar yapılmış kentsel araziler $Z_0 = 1,00$ m</p>	

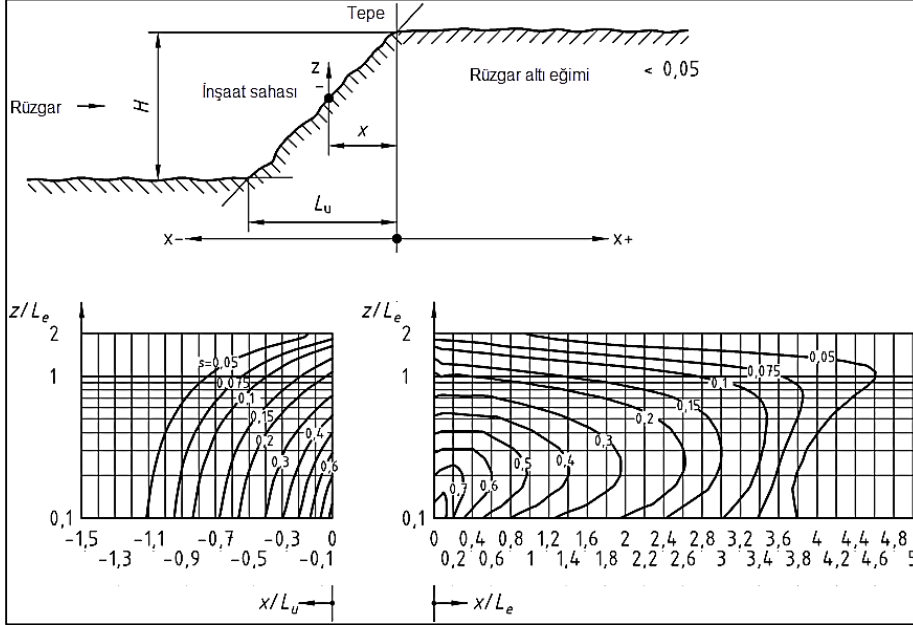
Şekil 4.1 : Çeşitli topoğrafik koşullara göre üzey pürüzlülük uzunluğu değerleri.

Çizelge 4.2 : Arazi koşullarının tanımlanması.

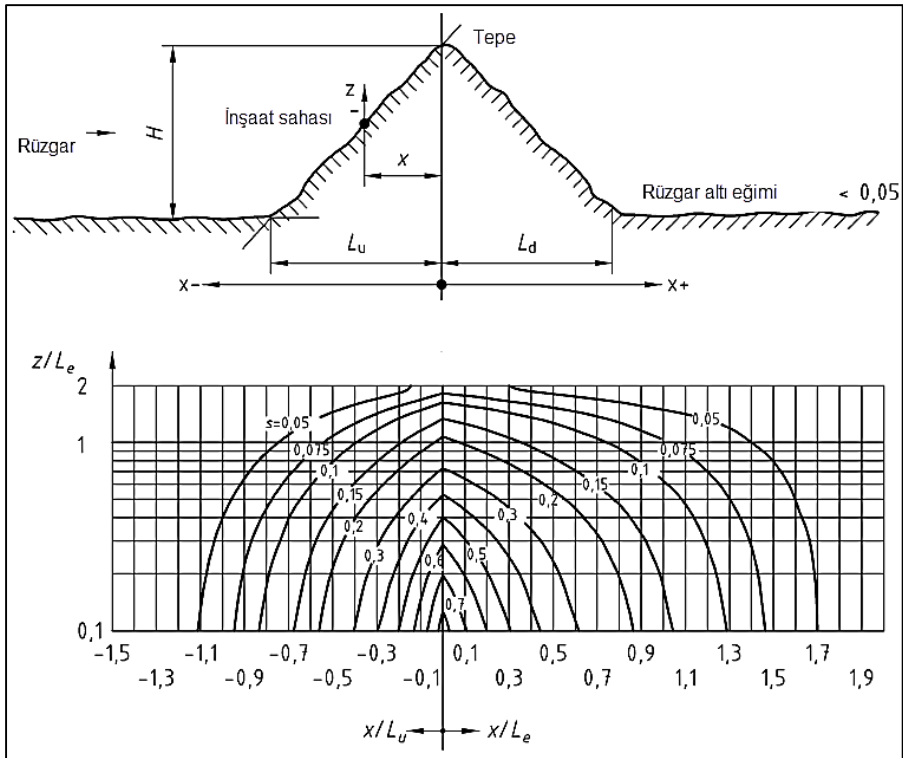
Rüzgar üstü eğimi $\Phi = H/L_u$

Düz ($0,05 < \Phi < 0,3$), $L_e = L_u$

Sarp ($\Phi \geq 0,3$), $L_e = H/0,3$



Şekil 4.2 : Uçurumlar ve tepeler için s faktörü.



Şekil 4.3 : Zirve noktaları için s faktörü.

L_e : Rüzgar üstü eğiminin efektif uzunluğu (bkz. Çizelge 4.2 :)

L_u : Rüzgar üstü eğiminin gerçek uzunluğu.

L_d : Rüzgar altı eğiminin gerçek uzunluğu.

H : Tepenin efektif yüksekliği.

x : Yapının tepe noktasına olan yatay mesafesi.

z : Eğim üzerindeki yapının rakımı.

Eğer bir yapı kısmi olarak güçlü rüzgarlara maruz kalıyorsa (örneğin; civardaki bölgelerin yüksekliğinden çok daha yukarıda ve bir uçurumun ucunda yerleşik bir yapı) dinamik basınç $1,1 \text{ k/Nm}^2$ 'den daha düşük olmayacak şekilde kabul yapılarak rüzgar yükü hesaplanır.

Aerodinamik katsayılar

Genel

Standartta listelenen yük ve basınç katsayıları rüzgar tünellerinde, tünel kesiti boyunca geçen düşük türbülans ve neredeyse değişmeyen homojen rüzgar hareketi ile gerçekleştirilen modeller üzerinden ölçüm değerlendirmeleriyle elde edilmiştir.

Prizmatik yapılar için, yaygın tip yüzey yapısının etkisi, ayrıca belirtilmiş katsayılar ile hesap yapılarak bulunabilir.

Eğer yüzeyler, düzlemleri içinde rüzgar hareketine maruz kalıyorlarsa, $C_{fr} \cdot q \cdot A$ 'ya denk bir sürtünme kuvveti, W_{fr} oluşur ve bu sürtünme kuvveti yok sayılır. Sadece istisnai durumlarda bu sürtünme kuvveti etkisi hesaba katılır. Böyle istisnai durumlar için C_{fr} 'nin yüzey pürüzlülüğüne bağlı bir fonksiyon olduğu kabul edilir ve aşağıdaki değerler ilgili koşullar için kullanılır:

Çizelge 4.3 : Sürtünme katsayısı C_{fr} 'nin çeşitli malzeme yüzeyleri için aldığı değerler.

Koşul	C_{fr}
Pürüzsüz yüzeyler (Çelik veya pürüzsüz açık beton yüzeyler)	0,01
Kaba yüzeyler (kaba beton veya mukavva çatı kaplaması)	0,02
Çok kaba yüzeyler	0,04

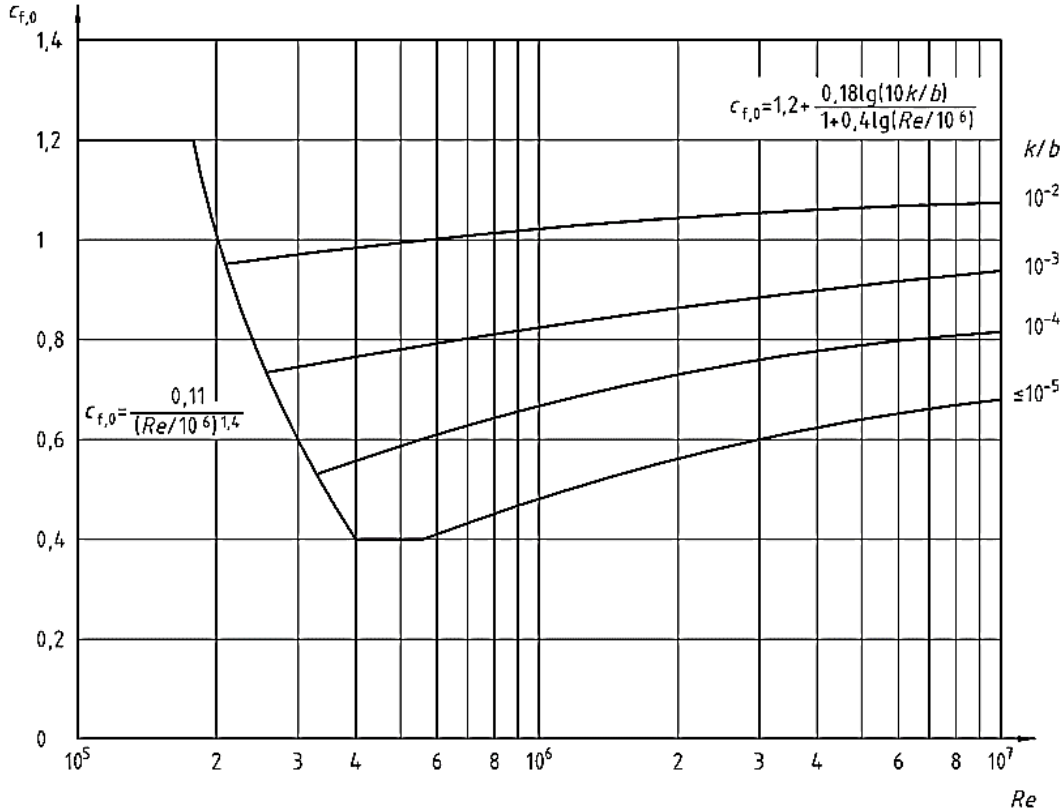
Yük katsayısı, C_f

Silindirik kesitlere etki eden yük katsayısı aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$C_f = C_{f,0} \times \psi_\lambda \quad (4.11)$$

$C_{f,0}$: Silindirik geometri için temel yük katsayısı (bkz.Şekil 4.4 :)

ψ_λ : Redüksiyon faktörü (bkz.Şekil 4.7 :)



Şekil 4.4 : Temel kuvvet katsayıları.

$C_{f,0}$, ilgili pürüzlülüğün bir fonksiyonudur, k/b (çeşitli yüzey pürüzlülükleri için k 'nın aldığı değerler Çizelge 4.4'te verilmiştir)

Not: yüzey pürüzlülüğünün çok yüksek olduğu yerlerde $C_{f,0} = 1,2$ olarak hesaba katılır.

$$Re = \frac{v \times b}{1,5 \times 10^{-5}} \quad (4.12)$$

v : Rüzgar hızı [m/s]

b : Silindir çapı [m]

Çizelge 4.4 : Çeşitli yüzeyler için k değerleri.

Yüzey Tipi	Tuğla örgü	Pürüzsüz beton	Kaba beton	Ahşap	Çelik	Çelik (civata vb. Bağlantılar içeren)
k [mm]	4	2	10	2	0,5	1

Dış Basınç katsayısı, C_{pe}

Silindirik kesitler için dış basınç katsayısı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$C_{pe} = C_{p,0} \times \psi_{\lambda\alpha} \quad (4.13)$$

$C_{p,0}$: Silindirik geometri için temel dış basınç katsayısı

$\psi_{\lambda\alpha}$: Çevresel açının bir fonksiyonu olan redüksiyon faktörü.

$C_{p,0}$, aşağıdaki koşullara göre belirlenir:

$$\begin{aligned} C_{p,0} &= \frac{1-C_{p,0,min}}{2} \cos\left(\frac{\alpha}{\alpha_{min}}\pi\right) + \frac{1+C_{p,0,min}}{2} && \text{eğer } 0^\circ < \alpha < \alpha_{min} \\ C_{p,0} &= (C_{p,0,min} - C_{p,0,h}) \cos\left(\frac{\alpha-\alpha_{min}}{\alpha_A-\alpha_{min}}\frac{\pi}{2}\right) + C_{p,0,h} && \text{eğer } \alpha_{min} < \alpha < \alpha_A \\ C_{p,0} &= C_{p,0,h} && \text{eğer } \alpha_A < \alpha < 180^\circ \end{aligned} \quad (4.14)$$

α_{min} : Silindir çevresinde minimum basıncın meydana geldiği bölge.

α_A : Akışın silindir yüzeyinden ayrıştığı bölge (bkz. Şekil 4.5 : ve Şekil 4.6 :).

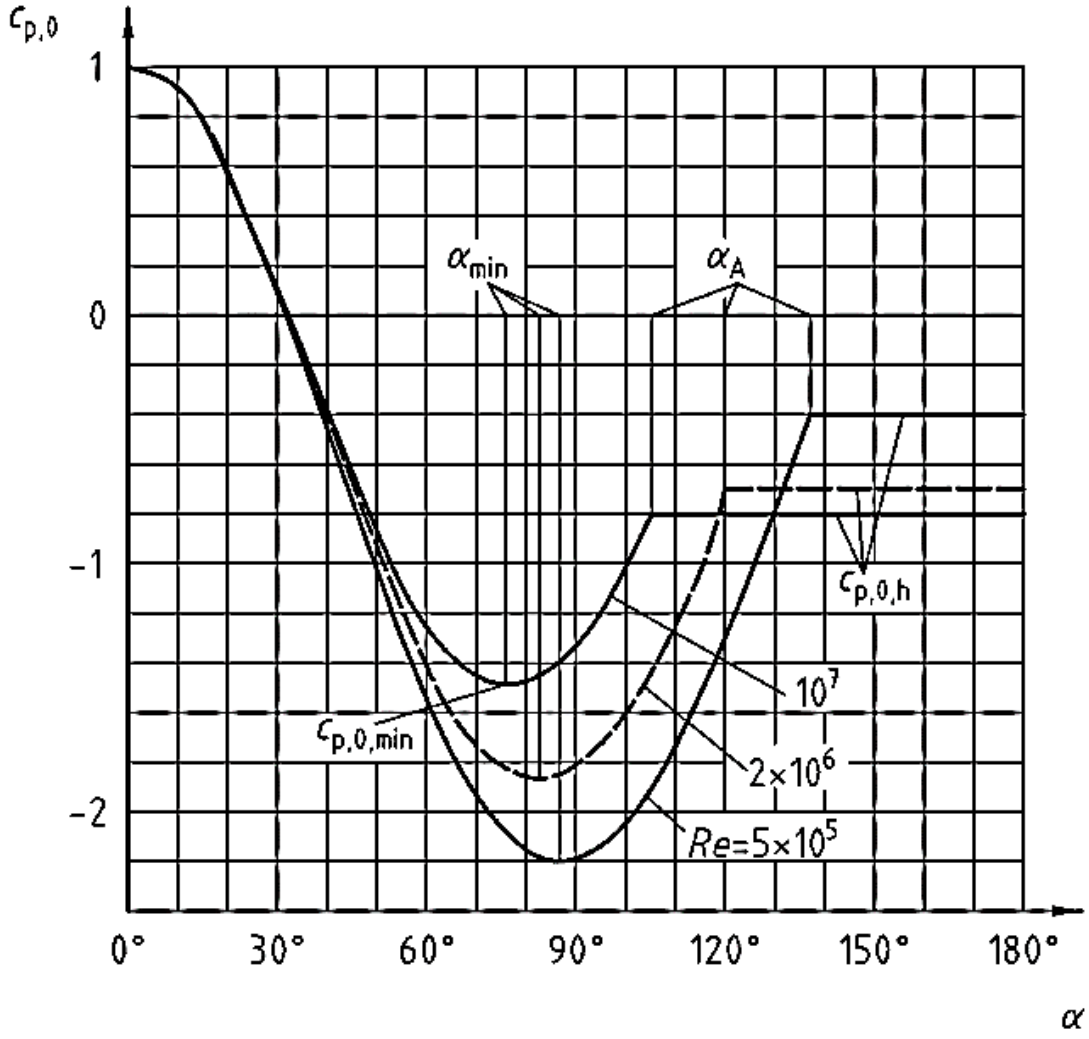
$C_{p,0,h}$: Arka taraf için basınç katsayısı (bkz.Çizelge 4.5 : ve Şekil 4.5 :).

$C_{p,0,min}$: Minimum basınç katsayısı (bkz.Çizelge 4.5 : ve Şekil 4.5 :).

Çizelge 4.5 : Re sayısı için bilinen genel değerler.

Re	α_{min}	$C_{p,0,min}$	α_A	$C_{p,0,h}$
5×10^5	85	-2,2	135	-0,4
2×10^6	80	-1,9	120	-0,7
1×10^7	75	-1,5	105	-0,8

Ara değerler lineer olarak interpolate edilebilir.



Şekil 4.5 : Rüzgarın geliş açısı ve basınç katsayısı değerleri.

Yapının şekli ve pozisyonu	Akış ayrışma noktası
<p>Kesit</p>	

Şekil 4.6 : Silindirik yapılara etkiyen rüzgar basıncı profili.

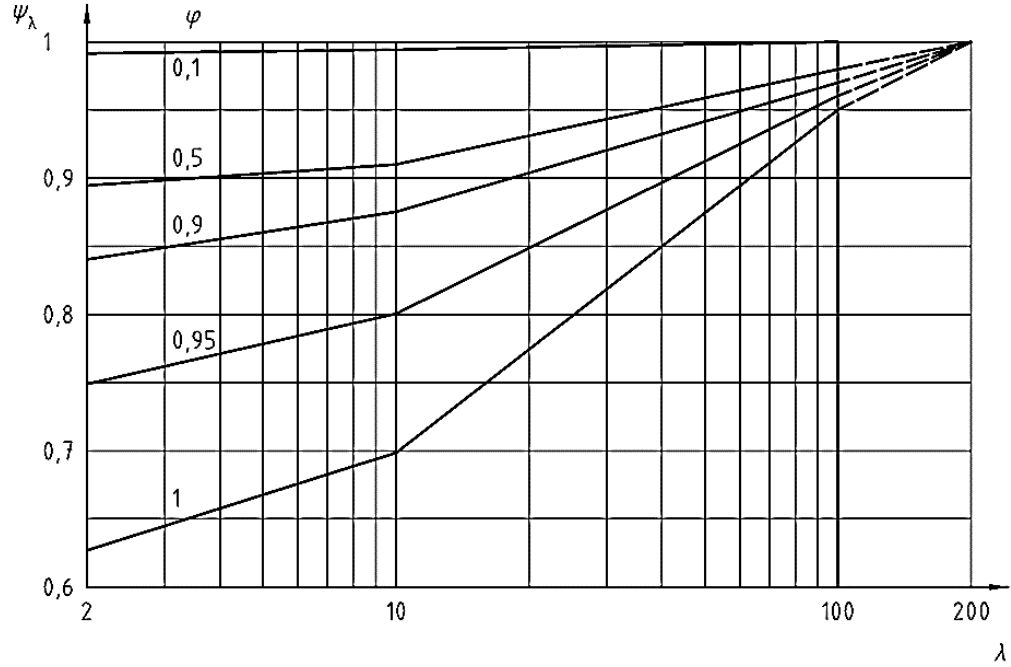
$$\psi_{\lambda a} = 1$$

$$\text{eğer } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{min}$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = \psi_{\lambda} + (1 - \psi_{\lambda}) \times \cos\left(\frac{\alpha - \alpha_{min}\pi}{\alpha_A - \alpha_{min}2}\right) \quad \text{eğer} \quad \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_A$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = \psi_{\lambda} \quad \text{eğer} \quad \alpha_A \leq \alpha \leq 180^{\circ}$$

ψ_{λ} Şekil 4.7 : kullanılarak bulunur.



Şekil 4.7 : Efektif narinliğin (λ) bir fonksiyonu olarak redüksiyon faktörü (Ψ_{λ}) ve yüzey bütünlük faktörü (φ)

λ : Efektif narinlik değeri (bkz. Şekil 4.9 :)

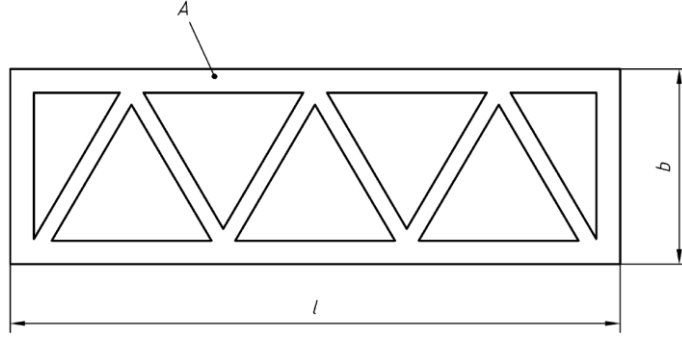
φ : Yüzey bütünlük faktörü ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad (4.15)$$

A : Bütünü oluşturan her bir parçanın yüzey alanları toplamı

A_c : Bütün parçanın hacmini oluşturan yüzey alanı (bkz. Şekil 4.8 :)

$$A_c = l \times b \quad (4.16)$$



Şekil 4.8 : Kafes yapıda yüzey bütünlük faktörü (φ) tanımı.

Sıra No	Yapının pozisyonu	Efektif narinlik, λ
1		$l > b$ $\lambda = l/b$ veya $\lambda = 2$ büyük olan değer kullanılır.
2		<u>Poligon kesitler için:</u> $l \geq 50m$ ise; $\lambda = 1,4 l/b$ veya $\lambda = 70$ küçük olan değer kullanılır. $l < 15m$ ise; $\lambda = 2 l/b$ veya $\lambda = 70$ küçük olan değer kullanılır. <u>Dairesel kesitli silindirler için:</u> $l \geq 50m$ ise; $\lambda = 0,7 l/b$ veya $\lambda = 70$ küçük olan değer kullanılır. $l < 15m$ ise; $\lambda = l/b$ veya $\lambda = 70$ küçük olan değer kullanılır.
3		$b \leq l$
4		
5		$l \geq 50m$ ise; $\lambda = 0,7 l/b$ veya $\lambda = 70$ büyük olan değer kullanılır. $l < 15m$ ise; $\lambda = l/b$ veya $\lambda = 70$ büyük olan değer kullanılır.

Ara değerler doğrusal olarak interpolate edilebilir.

Şekil 4.9 : Yapı şekillerine göre efektif narinlik (λ) değerleri.

Uygulama

Yukarıda anlatılanların model üzerinde uygulanması için elimizdeki veriler denklemlerde yerine yazılmak üzere aşağıdaki şekilde hesaplanır.

Dizayn rüzgar hızı değeri İstanbul Yüksek Binalar Rüzgar Yönetmeliği'nde İstanbul ve civarı için verilen değer olarak alınmıştır. Temel rüzgar hızı açık bir arazide (örneğin hava alanları gibi), yerden 10m yükseklikte herhangi bir yönde ölçülen 10 dakikalık ortalama rüzgar hızlarından 50 yılda en az bir kere aşılma olasılığına karşı gelen rüzgar hızıdır. İstanbul Atatürk Havaalanı'nda sürekli olarak 1 dakika ara ile yapılan rüzgar hızı ölçüm verilerinin analizi sonucunda, İstanbul ve civarı için temel rüzgar hızı $v_b = 25$ m/s olarak tanımlanmıştır [15].

$$\rho = 1,223 \text{ kg/m}^3 \text{ (hava için)}$$

Kulenin 1 numaralı parçasının tavan yüksekliğinde etkiyen rüzgar hızını ve dinamik basıncı bulmak üzere, ilgili veriler sırasıyla (4.6) ve (4.5) numaralı denklemde yerine yazılır.

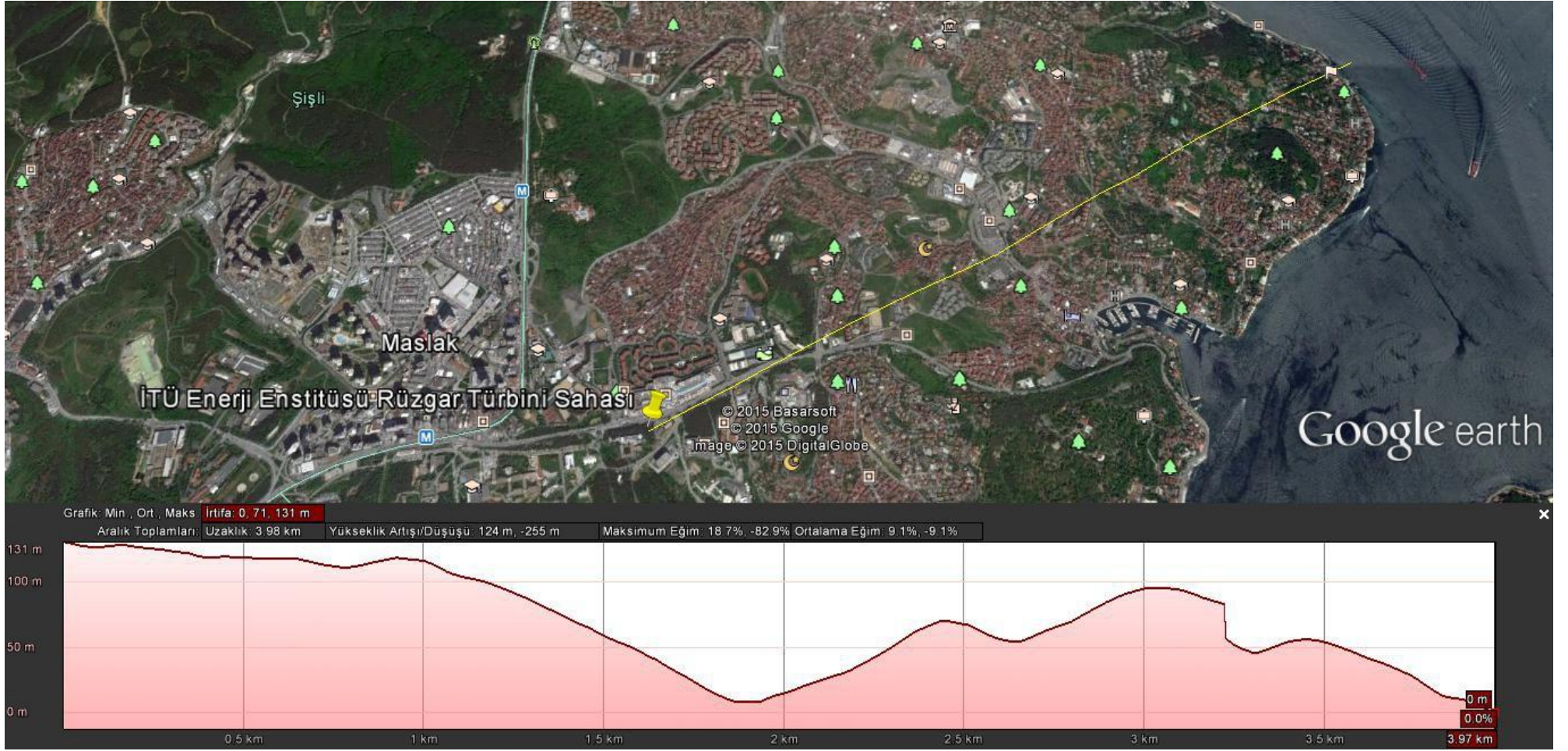
Rüzgar hızı 10 m yükseklikte alınan veridir, dolayısıyla referans yüksekliğimiz 10 m'dir.

Rüzgar türbininin kurulması planlanan bölge İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü bahçesi olarak seçilmiştir ve bu arazi Şekil 4.1 : ile tanımlanan 4 numaralı kategoriye dahil bir arazi olup Z_0 değeri 1'e eşittir. Arazinin deniz seviyesinden yüksekliği 131 m ve deniz seviyesine yatay uzaklığı yaklaşık 4 km'dir; Ortalama eğimi %9,1 olup türbinin kurulacağı bölgedeki eğim %4,6'dır (bkz. Şekil 4.10 :)

$$v_{1,5} = 25 \frac{\ln^{1,5} \frac{1}{1}}{\ln^{1,5} \frac{1}{1}} = 4,402 \text{ m/s}$$

$$q = \frac{1}{2} \cdot 1,223 \text{ kg/m}^3 \cdot (4,402 \text{ m/s})^2 = 11,851 \text{ N/m}^2$$

21 parçaya ait rüzgar hızı ve türbülanssız dinamik basınç verisi Çizelge 4.6 : ile verilmiştir.



Şekil 4.10 : Rüzgar türbininin kurulacağı araziye ait eğim, deniz seviyesinden yatay ve düşey mesafeler.

Çizelge 4.6 : Kulenin 21 parçasının tavan yüksekliklerine göre rüzgar hızı ve bu hızlara bağlı türbülansız dinamik basınç değerleri.

Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan yüksekliğinde rüzgar hızı, [m/s]	Tavan yüksekliğindeki rüzgar hızına bağlı dinamik basınç, [N/m ²]
1	0	1500	4,402	11,851
2	1500	3000	11,928	87,003
3	3000	5610	18,724	214,386
4	5610	6000	19,454	231,422
5	6000	9000	23,856	348,012
6	9000	12000	26,980	445,108
7	12000	15000	29,402	528,638
8	15000	16930	30,716	576,949
9	16930	19930	32,488	645,407
10	19930	22930	34,010	707,314
11	22930	25930	35,345	763,931
12	25930	28930	36,534	816,176
13	28930	31930	37,605	864,743
14	31930	34630	38,486	905,751
15	34630	37450	39,336	946,201
16	37450	40650	40,227	989,512
17	40650	43850	41,049	1030,402
18	43850	47050	41,814	1069,153
19	47050	49520	42,370	1097,750
20	49520	51990	42,898	1125,306
21	51990	54550	43,420	1152,852

Alternatif hesaplama yöntemi olarak türbülansın dahil edildiği dinamik basınç eşitliği (4.7) numaralı formülü kullanırsak hesap aşağıdaki gibi yapılır ve 21 parçaya ait değerler ile verilmiştir.

Ortalama hız ve türbülans yoğunluğu değerleri 0 ile bulunur. Topoğrafya katsayısını belirleyebilmek için türbin kurulacak arazinin eğim bilgisi gereklidir. Google Earth uygulamasından alınan veriye göre eğim %4,6 yani $\Phi = 0,046$ 'dır. Eğim bilgisi ve (4.7) numaralı eşitliklerden uygun olan kullanılarak topoğrafya katsayısı, C_t belirlenir. Topoğrafya katsayısı, (4.8) ve (4.9) kullanılarak ilgili ortalama rüzgar hızı ve türbülans yoğunluğu hesaplanır. Bulunan değerler (4.7) numaralı eşitlikte yerine yazılır ve Çizelge 4.7 : ile verilen tabloda görülen dinamik basınç değerleri elde edilir.

Çizelge 4.7 : 21 parçaya ait türbülanslı dinamik basınç değerleri.

Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan yüksekliğinde rüzgar hızı, [m/s] (referans) $V_r(Z)$	Ortalama rüzgar hızı, [m/s] (arazi kategorisine göre düzeltilmiş) $V_m(Z)$	Türbülans yoğunluğu $I_v(Z)$	Topoğrafya katsayısı C_t	Rüzgar hızı [m/s] (topoğrafyaya göre düzeltilmiş) $V_{m,i}(Z)$	Türbülans yoğunluğu, (topoğrafyaya göre düzeltilmiş) $I_{v,i}(Z)$	Hamle dinamik basıncı, [N/m ²] $q(Z)$
1	0	1500	4,402	2,817	0,370	1	2,817	0,370	15,630
2	1500	300	11,928	7,634	0,370	1	7,634	0,370	114,749
3	300	5610	18,724	11,983	0,370	1	11,983	0,370	282,757
4	5610	6000	19,454	12,450	0,370	1	12,450	0,370	305,225
5	6000	9000	23,856	15,268	0,370	1	15,268	0,370	458,997
6	9000	12000	26,980	17,267	0,370	1	17,267	0,370	587,058
7	12000	15000	29,402	18,817	0,370	1	18,817	0,370	697,227
8	15000	16930	30,716	19,659	0,370	1	19,659	0,370	760,946
9	16930	19930	32,488	22,375	0,350	1	22,375	0,350	948,353
10	19930	22930	34,010	24,430	0,335	1	24,430	0,335	1099,004
11	22930	25930	35,345	26,343	0,323	1	26,343	0,323	1246,941
12	25930	28930	36,534	28,138	0,313	1	28,138	0,313	1392,344
13	28930	31930	37,605	29,833	0,304	1	29,833	0,304	1535,387
14	31930	34630	38,486	31,285	0,296	1	31,285	0,296	1662,242
15	34630	37450	39,336	32,735	0,289	1	32,735	0,289	1792,951
16	37450	40650	40,227	34,310	0,282	1	34,310	0,282	1939,205
17	40650	43850	41,049	35,817	0,276	1	35,817	0,276	2083,401
18	43850	47050	41,814	37,263	0,270	1	37,263	0,270	2225,672
19	47050	49520	42,370	38,342	0,266	1	38,342	0,266	2334,245
20	49520	51990	42,898	39,391	0,262	1	39,391	0,262	2441,791
21	51990	54550	43,420	40,450	0,258	1	40,450	0,258	2552,221

(4.13) numaralı eşitlik ile dış basınç katsayısı hesaplanır, bunun için $C_{p,0}$ ve $\Psi_{\lambda\alpha}$ değerleri bulunmalıdır.

$C_{p,0}$ değerinin belirlenebilmesi için rüzgar yükünün etkidiği çevresel açı ve Re sayısı hesaplanmalıdır (bkz.Şekil 4.5 :, Şekil 4.6 :). İstanbul için hakim rüzgar Poyraz olup yılın 120, 130 günü boyunca NE (kuzeydoğu) yönünden eser, bu da demek oluyor ki çevresel olarak rüzgar yükü etkileyen açı 135^0 'dir. Re sayıları ise Çizelge 4.7 : ile verilmiştir.

$$\alpha=135^0$$

Çizelge 4.8 : Kulenin 21 parçasının ortalama çap, tavan yüksekliklerine göre rüzgar hızı ve bu parametrelere bağlı Re sayıları değerleri.

Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Taban alanı ile tavan alanı arasındaki ortalama çap değeri, [mm]	Tavan yüksekliğinde rüzgar hızı, [m/s]	Reynolds Sayısı
1	0	1500	3265,889	4,402	958490,8
2	1500	3000	3197,667	11,928	2542791,4
3	3000	5610	3104,203	18,724	3874887,4
4	5610	6000	3035,981	19,454	3937420,0
5	6000	9000	2958,890	23,856	4705830,3
6	9000	12000	2822,445	26,980	5076550,2
7	12000	15000	2686,001	29,402	5264970,9
8	15000	16930	2573,890	30,716	5270712,2
9	16930	19930	2474,068	32,488	5358448,6
10	19930	22930	2362,203	34,010	5355918,4
11	22930	25930	2250,339	35,345	5302558,2
12	25930	28930	2138,475	36,534	5208427,5
13	28930	31930	2026,610	37,605	5080708,0
14	31930	34630	1920,339	38,486	4927117,7
15	34630	37450	1831,919	39,336	4804059,6
16	37450	40650	1750,624	40,227	4694768,0
17	40650	43850	1664,199	41,049	4554273,0
18	43850	47050	1577,773	41,814	4398199,3
19	47050	49520	1501,205	42,370	4240356,2
20	49520	51990	1434,495	42,898	4102465,4
21	51990	54550	1366,570	43,420	3955753,5

İlgili açı ve Re sayıları temel alınarak bütün parçalar için Çizelge 4.5 : ve Şekil 4.5 : kullanılarak $C_{p,0}$ değerleri belirlenir (bkz.Çizelge 4.9 :)

Çizelge 4.9 : Kulenin 21 parçası için $C_{p,0,min}$ ve $C_{p,0,h}$ değerleri.

Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	α_{min}	$C_{p,0,min}$	α_A	$C_{p,0,h}$
1	0	1500	83,5	-2,110	130,5	-0,490
2	1500	3000	79,7	-1,875	119,1	-0,706
3	3000	5610	78,8	-1,806	116,5	-0,723
4	5610	6000	78,8	-1,806	116,5	-0,723
5	6000	9000	78,3	-1,765	114,9	-0,734
6	9000	12000	78,1	-1,750	114,4	-0,738
7	12000	15000	78,0	-1,737	113,9	-0,741
8	15000	16930	78,0	-1,737	113,9	-0,741
9	16930	19930	77,9	-1,732	113,7	-0,742
10	19930	22930	77,9	-1,732	113,7	-0,742
11	22930	25930	77,9	-1,735	113,8	-0,741
12	25930	28930	78,0	-1,740	114,0	-0,740
13	28930	31930	78,1	-1,746	114,2	-0,739
14	31930	34630	78,2	-1,754	114,5	-0,737
15	34630	37450	78,3	-1,760	114,8	-0,735
16	37450	40650	78,3	-1,765	114,9	-0,734
17	40650	43850	78,4	-1,772	115,2	-0,732
18	43850	47050	78,5	-1,780	115,5	-0,730
19	47050	49520	78,6	-1,788	115,8	-0,728
20	49520	51990	78,7	-1,795	116,1	-0,726
21	51990	54550	78,8	-1,802	116,3	-0,724

Redüksiyon faktörünün (Ψ_λ) bulunabilmesi için efektif narinlik (λ) ve yüzey bütünlük faktörleri (φ) hesap edilmelidir.

Efektif narinlik değeri Şekil 4.9 : içinde anlatıldığı üzere hesaplanır. Kulemizin her bir parçası için ilgili tablodaki 3 numaralı koşul geçerlidir. Buna göre 1 numaralı parça için ortalama çap değeri için 0 kullanılır.

$l < 15$ m;

$\lambda = 0,7 \times (1500/3265,889) = 0,322$ veya $\lambda = 70$ değerlerinden küçük olan değer kullanılır.

Yüzey bütünlük faktörü ise (4.15) numaralı eşitlik ile hesaplanır. Kulemiz kafes yapıda olmayıp, tek parça çelik levhanın bükülerek şekillendirilmesiyle imal edildiği için her

bir parçanın yüzey alanları toplamı ile bütün hacmi oluşturan kule yüzey alanı birbirine eşittir ve dolayısıyla yüzey bütünlük faktörü $\varphi = 1$ alınır.

Yukarıda bulunan değerler ile redüksiyon faktörü Şekil 4.7 : kullanılarak seçilir. Her bir parça için efektif narinlik ve redüksiyon faktörü değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.10 : Kuleyi oluşturan 21 parçanın her biri için efektif narinlik, yüzey bütünlük faktörü ve redüksiyon faktörü değerleri.

Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Taban alanının zeminden yüksekliğine göre çap değeri, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Taban alanı ile tavan alanı arasındaki ortalama çap değeri [mm]	Efektif narinlik değeri $\lambda = 0,7 \times l/b$	Yüzey bütünlük faktörü φ	Redüksiyon Faktörü Ψ_λ
1	0	3300,000	1500	3265,889	0,322	1	0,625
2	1500	3231,778	3000	3197,667	0,328	1	0,625
3	3000	3163,556	5610	3104,203	0,589	1	0,625
4	5610	3044,849	6000	3035,981	0,090	1	0,625
5	6000	3027,112	9000	2958,890	0,710	1	0,625
6	9000	2890,667	12000	2822,445	0,744	1	0,625
7	12000	2754,223	15000	2686,001	0,782	1	0,625
8	15000	2617,779	16930	2573,890	0,525	1	0,625
9	16930	2530,000	19930	2474,068	0,849	1	0,625
10	19930	2418,136	22930	2362,203	0,889	1	0,625
11	22930	2306,271	25930	2250,339	0,933	1	0,625
12	25930	2194,407	28930	2138,475	0,982	1	0,625
13	28930	2082,542	31930	2026,610	1,036	1	0,625
14	31930	1970,678	34630	1920,339	0,984	1	0,625
15	34630	1870,000	37450	1831,919	1,078	1	0,625
16	37450	1793,837	40650	1750,624	1,280	1	0,625
17	40650	1707,412	43850	1664,199	1,346	1	0,625
18	43850	1620,986	47050	1577,773	1,420	1	0,625
19	47050	1534,560	49520	1501,205	1,152	1	0,625
20	49520	1467,850	51990	1434,495	1,205	1	0,625
21	51990	1401,141	54550	1366,570	1,311	1	0,625

Elde edilen $C_{p,0}$ ve Ψ_λ değerleri (4.13) numaralı denklemde yerine yazılarak dış basınç katsayısı değeri bulunur.

1 numaralı parça için dış basınç katsayısı:

$$C_{pe} = 0,76875 \times 0,625 = 0,4805$$

Bu bölümle alaklı olan isimleri aşağıda verilen çizelgeler EK-C’de verilmiştir.

- Çizelge C.1 : Kulenin 21 parçasına ait arka yüzey ve minimum C_{pe} değerleri.
- Çizelge C.2 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkiyen rüzgar basıncı.
- Çizelge C.3 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkiyen rüzgar yükü.
- Çizelge C.4 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkiyen türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmiş rüzgar basıncı
- Çizelge C.5 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkiyen türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmiş rüzgar yükü.
- Şekil C.1 : Türbülans yoğunluğu hesabı dahil rüzgar basıncı değeri ile türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmemiş rüzgar basıncı değerlerinin grafik üstünde gösterimi.
- Şekil C.2 : Türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmiş rüzgar yükü değeri ile türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmemiş rüzgar yükü değerlerinin grafik üstünde gösterimi.

4.2.2 IEC 61400 -1 tasarım koşulları

IEC 61400-1 (2005) standardına göre genel olarak, bir rüzgar türbininin yapısal bütünlüğünün belirlenmesinde kullanılan yük kombinasyonları aşağıdaki gibidir:

- Normal dizayn koşulları ve normal dış koşullar,
- Normal dizayn koşulları ve aşırı dış koşullar
- Arıza durumunda dizayn koşulları ve buna ilişkin dış koşullar
- Taşıma, montaj ve bakıma ait dizayn koşulları ve buna ilişkin dış koşullar.

Kural olarak normal dış koşullar, 1 yılda en az bir kere ortaya çıkan koşullar ve aşırı dış koşullar da 50 yılda en az bir kere ortaya çıkan koşullar olarak kabul edilir.

4.2.2.1 Türbin sınıfları

Çizelge 4.11 : Rüzgar türbin sınıfları için temel parametreler

Rüzgar Türbin Sınıfı	I	II	III	S
V_{ref} [m/s]	50,0	42,5	37,5	
A	$I_{ref}(-)$	0,16		Değerler tasarımcı tarafından belirlenir.
B	$I_{ref}(-)$	0,14		
C	$I_{ref}(-)$	0,12		

Tablodaki değerler hub yüksekliğinde geçerli olan değerlerdir.

V_{ref} , 10 dakikalık ortalama rüzgar hızıdır.

A, yüksek türbülans karakteristiğine sahip kategoriye gösterir.

B, orta türbülans karakteristiğine sahip kategoriye gösterir.

C, düşük türbülans karakteristiğine sahip kategoriye gösterir.

I_{ref} , 15m/s'de türbülans yoğunluğunun beklenen değeridir.

I'den III'e kadar olan sınıflara dahil rüzgar türbinlerinin tasarım ömrü 20 yıl olarak düşünülür.

4.2.2.2 Rüzgar koşulları

Yük ve emniyet değerlendirmeleri çerçevesindeki rüzgar rejimi; rüzgar türbininin normal çalışması sırasında oluşan normal rüzgar koşulu ve 1-yıl veya 50-yıllık tekrarlama periyoduna sahip olacak şekilde tanımlanan iki tip aşırı rüzgar hızı koşulu olarak ikiye ayrılır.

Standart rüzgar türbin sınıflarında türbülans modelinin rastgele rüzgar hızı bölgesi aşağıdaki koşulları sağlamalıdır.

- Ortalama rüzgar yönüne dik gelen komponentlerde en az aşağıda verilen türbülans sapma değerleri dikkate alınmalıdır.

Yatay bileşenler; $\sigma_2 \geq 0,7\sigma_1$

Düşey bileşenler; $\sigma_3 \geq 0,5\sigma_1$

- Türbülans ölçek parametresi aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$A_1 = 0,7 Z_{hub}, \quad Z_{hub} < 60 \text{ m için}$$

$$A_1 = 42 \text{ m}, \quad Z_{hub} \geq 60 \text{ m için}$$

$$S_1(f) = 0,05 (\sigma_1)^2 \left(\frac{\Lambda_1}{V_{hub}} \right)^{-\frac{2}{3}} \cdot f^{-5/3} \quad (4.17)$$

$$S_2(f) = S_3(f) = \frac{4}{3} S_1(f) \quad (4.18)$$

$S_1(f)$: Güç spektral yoğunluğu [m^2/s^2]

A : Düşey türbülans ölçek parametresi [m]

f : Frekans [1/s]

4.2.2.3 Normal rüzgar koşulları

Rüzgar hızı dağılımı

Standart rüzgar türbini sınıflarının dizaynında, yük hesapları için Rayleigh dağılımı kullanılır, bkz. (2.12) ve (2.13) numaralı eşitlikler.

$$f_R(V_{hub}) = 1 - \exp\left(-\pi \left(\frac{V_{hub}}{2V_{ave}}\right)^2\right) \quad (4.19)$$

$$V_{ave} = 0,2 \times V_{ref} \quad (4.20)$$

Normal rüzgar profili modeli (Normal wind profile-NWP)

$V(z)$, yüksekliğin bir fonksiyonu olarak ortalama rüzgar hızını ifade eder. Standart rüzgar türbini sınıflarında, normal rüzgar hızı profilinin, güç kuralı ile elde edileceği varsayılır:

$$V(z) = V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \quad (4.21)$$

$V(z)$: Z yüksekliğindeki rüzgar hızı [m/s]

z : Zeminden yükseklik [m]

z_{hub} : Göbek yüksekliği [m]

α : Güç kuralı üssü = 0,2 [birimsiz]

Varsayılan rüzgar profili, rotor süpürme alanındaki ortalama düşey rüzgar kesmesini tanımlamak için kullanılır.

Normal türbülans modeli (Normal-turbulence model-NTM)

Normal türbülans modeli için türbülans standart sapması σ_I ile gösterilir ve (4.22) numaralı denklem ile hesaplanır:

$$\sigma_1 = I_{ref}(0,75V_{hub} + b) \quad (4.22)$$

$$b = 5,6 \text{ m/s}$$

4.2.2.4 Aşırı rüzgar koşulları

Aşırı rüzgar koşulları, rüzgar türbinlerine etki eden aşırı rüzgar yüklerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu koşullar, fırtınalar nedeniyle oluşan pik rüzgar hızları ile rüzgar hızı ve doğrultusundaki ani değişimleri içerir.

Aşırı rüzgar hızı modeli (Extreme wind speed model-EWM)

Kararlı veya türbülanslı rüzgar modeli olabilir. Rüzgar modelinde V_{ref} referans rüzgar hızı ve σ_I standart sapma esas alınır.

Kararlı aşırı rüzgar modeli için, 50 yıllık aşırı rüzgar hızı V_{e50} ve bir yıllık aşırı rüzgar hızı V_{e1} denklemlerinde, V_{ref} referans rüzgar hızı esas alınmıştır. Standart rüzgar türbini sınıflarının dizaynında V_{e50} ve V_{e1} , aşağıdaki eşitlikler kullanılarak, z yüksekliğinin fonksiyonu olarak hesaplanır.

Kararlı aşırı rüzgar hızı modeli:

$$V_{e50}(z) = 1,4 \cdot V_{ref} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{0,11} \quad (4.23)$$

$$V_{e1}(z) = 0,8 \cdot V_{e50}(z) \quad (4.24)$$

Türbülanslı aşırı rüzgar hızı modeli:

$$V_{50}(z) = V_{ref} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{0,11} \quad (4.25)$$

$$V_1(z) = 0,8 \cdot V_{50}(z) \quad (4.26)$$

$$\sigma_1 = 0,11(V_{hub}) \quad (4.27)$$

İşletim sırasında fırtına (Extreme operating gust-EOG)

Göbek yüksekliğindeki fırtına şiddeti V_{gust} , standart rüzgar türbini sınıfları için, aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$V_{gust} = \text{Min} \left\{ 1,35(V_{e1} - V_{hub}); 3,3 \left(\frac{\sigma_1}{1 + 0,1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right)} \right) \right\} \quad (4.28)$$

D = Rotor çapı [m]

σ_1 (4.22) numaralı eşitlikten çekilir.

Rüzgar hızının, zaman ve yüksekliğe bağlı tanımı:

$$V_{(z,t)} = \begin{cases} V_{(z)} - 0,37V_{gust} \sin\left(\frac{3\pi t}{T}\right) \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right) & \text{for } 0 \leq t \leq T \\ V_z & \text{aksi koşullar} \end{cases} \quad (4.29)$$

$T = 10,5$ s;

$V_{(z)}$, (4.21) numaralı eşitlikten bulunur.

Aşırı türbülans modeli (Extreme turbulence model- ETM)

Aşırı türbülans modeli normal rüzgar profili modelini kullanır ve düşey bileşene ait standart sapma aşağıdaki gibi ifade ile elde edilir:

$$\sigma_1 = c \times \left(0,072 \left(\frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \left(\frac{V_{ave}}{c} - 4 \right) + 10 \right); c = 2 \text{ m/s} \quad (4.30)$$

Aşırı yön değişimi (Extreme direction change- EDC)

Aşırı yön değişimi büyüklüğü θ_e , aşağıdaki ilişki kullanılarak hesaplanır:

$$\theta_e = \pm 4 \arctan \frac{\sigma_1}{V_{hub} \left(1 + 0,1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right) \right)} \quad (4.31)$$

$\theta_e = \pm 180^\circ$ ile sınırlı aşırı yön değişimi.

$\sigma_l = (4.22)$ numaralı eşitlikten çekilir

aşırı yön değişimi geçişi aşağıdaki ifade ile belirlenir:

$$\theta_{(t)} = \begin{cases} 0^\circ & \text{for } t < 0 \\ \pm 0,50\theta_e \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)\right) & \text{for } 0 \leq t \leq T \\ \theta_e & \text{for } t > T \end{cases} \quad (4.32)$$

Buradaki $T=6$ s aşırı yön değişimi geçişinin süresidir. İşaret, en olumsuz geçiş yükü oluşacak şekilde seçilir. Yön değişimi geçişinin sonunda, rüzgar doğrultusunun değişmediği kabul edilir. Rüzgar hızı, normal rüzgar profili modeline göre hesaplanır.

Eşzamanlı fırtına ve yön değişimi (Extreme coherent gust with direction change-ECD)

Eşzamanlı fırtına ve yöndeğişimi büyüklüğü, $V_{cg} = 15$ m/s olmalıdır. Rüzgar hızı işe aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$V(z, t) = \begin{cases} V(z) & t \leq 0 \\ V(z) + 0,5V_{cg} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)\right) & 0 \leq t \leq T \\ V(z) + V_{cg} & t \geq T \end{cases} \quad (4.33)$$

$T=10$ s ve $V(z)$ NTM ile verilen rüzgar hızı değeridir.

Rüzgar hızındaki değişimin eşzamanlı olarak yön değişimi ile beraber gerçekleştiği kabul edilir. Yön değişimi büyüklüğü, θ_{cg} , aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\theta_{cg}(V_{hub}) = \begin{cases} 180^\circ & V_{hub} < 4 \text{ m/s} \\ \frac{720^\circ \text{ m/s}}{V_{hub}} & 4 \text{ m/s} < V_{hub} < V_{ref} \end{cases} \quad (4.34)$$

Eşzamanlı yön değişimi;

$$\theta(t) = \begin{cases} 0^\circ & t < 0 \\ \pm 0,5\theta_{cg} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)\right) & 0 \leq t \leq T \\ \mp \theta_{cg} & t > T \end{cases} \quad (4.35)$$

$T=10$ s

Aşırı rüzgar kesmesi (Extreme wind shear-EWS)

Yatay rüzgar kesmesi geçişinin işareti, en olumsuz geçiş yükleri oluşacak şekilde seçilir. İki aşırı rüzgar kesmesi birbirinden bağımsız olarak dikkate alınır ve bu nedenle bir arada uygulanmaz.

Düşey kesme:

$$V(z, t) = \begin{cases} V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \pm \left(\frac{z - z_{hub}}{D} \right) \left(2,5 + 0,2\beta\sigma_1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right)^{1/4} \right) \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \right) & 0 \leq t \leq T \\ V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (4.36)$$

Yatay kesme:

$$V(y, z, t) = \begin{cases} V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \pm \left(\frac{y}{D} \right) \left(2,5 + 0,2\beta\sigma_1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right)^{1/4} \right) \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \right) & 0 \leq t \leq T \\ V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (4.37)$$

$$\alpha = 0,2; \beta = 6,4; T = 12 \text{ s}$$

4.2.2.5 Yüklerin hesaplanması

Genel

Rüzgar türbinlerinin yapısal dizaynında, yük taşıyan bileşenlerin yapısal bütünlüğünün doğrulanması esas alınır. Kabul edilebilir bir emniyet düzeyi sağlanmalıdır. Dizayn yükünün ilgili dizayn dayanımını aşmayacağını göstermek üzere hesaplamalar ve/veya testler yapılır.

Yükler

Yükler dizayn hesaplamalarında dikkate alınmıştır. Yük hesapları yerine prototip testler de kullanılabilir.

Atalet ve ağırlık yükleri

Atalet ve ağırlık yükleri; titreşimden, dönmeden, ağırlıktan ve sismik faaliyetlerden kaynaklanan, rüzgar türbinine etki eden statik ve dinamik yüklerdir.

Aerodinamik yükler

Aerodinamik yükler; hava akımının ve bunun rüzgar türbinlerinin sabit ve hareketli parçalarıyla karşılıklı etkileşiminin neden olduğu statik ve dinamik yüklerdir.

Hava akımı; rotorun dönüş hızına, rotor düzlemindeki ortalama rüzgar hızına, türbülans derecesine, havanın yoğunluğuna, rüzgar türbini bileşenlerinin aerodinamik şekline ve bunların karşılıklı etkilerine ve aeroelastik etkilere bağlıdır.

İşletim yükleri

İşletim yükleri, rüzgar türbininin işletimi ve kontrolünden kaynaklanır. Bunlar çeşitli kategorilere ayrılırlar. Bunlar rotor devrinin kontrolü, kanat açılma dönmesinin tork kontrolü veya diğer aerodinamik cihazlardır. Diğer işletim yükleri; rotorun harekete geçmesi ve durması, jeneratörün devreye girmesi ve devreden çıkması ile yönlendirme hareketleri sırasında oluşan mekanik frenleme ve geçiş yükleridir.

Diğer yükler

Diğer yükler (iz yükleri, darbe yükleri, buz yükleri, vb. gibi) de oluşabilir ve bunların ilgili olanlarının dahil edilmesi gerekir. Tesis alanının özel koşulları dikkate alınmalıdır.

4.2.2.6 Dizayn koşulları ve yük durumları

Bu kısımda dizayn yük durumlarının yapısı tanımlanmakta olup dikkate alınacak minimum koşul sayısı verilmektedir. Dizayn amacıyla, rüzgar türbininin ömrü, rüzgar türbininin karşılaştığı en önemli koşulları kapsayan dizayn koşulları ile karakterize edilebilir.

Yük durumları; dış koşullar ile birlikte, özel montaj, bakım ve işletim durumları veya dizayn koşullarının kombinasyonundan belirlenmiştir. Kontrol ve emniyet sistemlerinin davranışları ile birlikte, ilgili tüm yük durumları, makul bir oluşma olasılığı dahil edilerek dikkate alınmıştır.

Genel olarak, bir rüzgar türbininin yapısal bütünlüğünün belirlenmesinde kullanılan yük durumları, aşağıdaki kombinasyonlardan hesaplanabilir:

- Normal dizayn koşulları ve normal dış koşullar,
- Normal dizayn koşulları ve aşırı dış koşullar

- Hataya ait dizayn koşulları ve buna ilişkin dış koşullar
- Taşıma, montaj ve bakıma ait dizayn koşulları ve buna ilişkin dış koşullar.

Aşırı bir dış koşul ile bir hata durumunun arasında herhangi bir bağıntı varsa, dizayn yük durumu olarak iki durumun gerçekçi bir kombinasyonu dikkate alınır.

Çizelge 4.12 : Dizayn yük durumları, DYD

Dizayn Koşulu	DYD	Rüzgar Koşulları	Diğer Koşullar	Analiz Tipi	Kısmi Emniyet Faktörü
1) Güç üretimi	1.0	$NWP V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
	1.1	$NTM V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
	1.2	$NTM V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	1.3	$ECD V_{in} \leq V_{hub} \leq V_r$		U	N
	1.4	$NRP V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Dış elektrik arızası	U	N
	1.5	$EOG1 V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Şebeke kaybı	U	N
	1.6	$EOG50 V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
	1.7	$EWS V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
	1.8	$EDC50 V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
	1.9	$ECG V_{in} \leq V_{hub} \leq V_r$		U	N
	1.10	$NRP V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Buz oluşumu	F/U	*/N
	1.11	$NRP V_{hub} = V_r$ veya V_{out}	Sıcaklık etkileri	U	N
	1.12	$NRP V_{hub} = V_r$ veya V_{out}	Depremler	U	**
1.13	$NRP V_{hub} = V_r$ veya V_{out}	Şebeke kaybı	F	*	
2) Güç üretimi + arıza gerçekleşmesi	2.1	$NRP V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Kontrol sisteminde arıza	U	N
	2.2	$NRP V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Emniyet sisteminde arıza veya daha önceki iç elektrik arızası.	U	A
	2.3	$NTM V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Kontrol sisteminde veya emniyet sisteminde arıza	F	*

Çizelge 4.12 (devamı) : Dizayn yük durumları, DYD

3) Kalkış	3.1	$NRP V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	3.2	$EOG1 V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
	3.3	$EDC1 V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
4) Normal kapanma	4.1	$NRP V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	4.2	$EOG1 V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
5) Acil durum kapanması	5.1	$NRP V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
6) Park halinde (durgun ya da rölantide)	6.0	$NRP V_{hub} < 0,8 V_{ref}$	Olası deprem; 4, D.3.3'e bkz.	U	N/**
	6.1	EWM tekrarlama periyodu 50 yıl		U	N
	6.2	EWM tekrarlama periyodu 50 yıl	Şebeke kaybı	U	A
	6.3	EWM tekrarlama periyodu 1 yıl	Aşırı açılı akım	U	N
	6.4	$NTM V_{hub} < 0,7 V_{ref}$		F	*

	6.5	EDC50 $V_{hub} = V_{ref}$	Buz oluşumu	U	N
	6.6	NRP $V_{hub} = 0,8 V_{ref}$	Sıcaklık etkileri	U	N
7) Park halinde ve arıza koşulu	7.1	EWM tekrarlama periyodu 1 yıl		U	A
	8.1	EOG1 $V_{hub} = V_T$	Üretici tarafından belirtilecek	U	T
8) Taşıma, montaj, bakım ve onarım	8.2	EWM tekrarlama periyodu 1 yıl	Kilitli durum	U	A
	8.3		Girdap etkili enine titreşimler	F	*

* Yorulma mukavemeti için kısmi emniyet faktörü (Bölüm 4, C.5.3)
** Depremler için kısmi emniyet faktörü (Bölüm 4, D.3.3)
(1) Eğer V_{out} kapanma rüzgar hızı tanımlı değilse, V_{ref} kullanılacaktır.

F (fatigue) Yorulma mukavemeti

U (ultimate) Kopma mukavemeti

N Normal ve aşırı

A Anormal

4.2.2.7 Yük hesaplamaları

Her dizayn yük durumu için, standartta belirtilen yükler dikkate alınmalıdır. Gerektiği takdirde, aşağıdaki etkiler de dikkate alınır:

Kulenin rezonans aralığı içinde çalışma

Eğer, rüzgar türbininin, kulenin doğal frekansının $\pm 5\%$ 'i kadar bir toleransla, kulenin rezonans aralığı içinde çalışması onaylanmışsa, uygun titreşim izleme sistemleri sağlanır. Yük durumlarının değerlendirilmesi ile, izin verilen titreşimler için uygun eşik değerleri tanımlanır ve dikkate alınır.

4.2.2.8 Yükler için kısmi emniyet faktörleri

Kullanışlılık sınır durumunun analizinde yükler için kısmi emniyet faktörleri

Kullanışlılık sınır durumunun analizinde, tüm yük bileşenlerindeki yükler için $\gamma_F=1,0$ kısmi emniyet faktörü kullanılır.

Kopma sınır durumunun analizinde yükler için kısmi emniyet faktörleri

Eğer, çeşitli nedenlerden kaynaklanan yükler, birbirinden bağımsız olarak hesaplanabiliyorsa, yükler için kısmi emniyet faktörlerinin minimum değerleri Çizelge 4.18'e göre alınır.

Birçok durumda, özellikle kararsız yüklerin dinamik etkilere neden olduğu hallerde, yük bileşenleri birbirinden bağımsız olarak hesaplanamazlar. Bu durumlarda, yükler için kısmi emniyet faktörleri γ_F olarak, Çizelge 4.18'deki ilgili dizayn durumunun en büyük kısmi emniyet faktörü uygulanır.

Yorulma mukavemetinin analizinde, yükler için kısmi emniyet faktörleri

Tüm normal ve anormal dizayn durumlarında, yükler için kısmi emniyet faktörü γ_F alınır.

Yük nedeni	Olumsuz yükler			Olumlu yükler
	Dizayn koşulu tipi (Tablo 4.2'ye bakınız)			Tüm dizayn koşulları
	Normal ve aşırı N	Anormal A	Taşıma ve montaj T	
Aerodinamik	1,35	1,1	1,5	0,9
Operasyonel	1,35	1,1	1,5	0,9
Gravite	1,1 / 1,35 (*)	1,1	1,25	0,9
Diğer atalet kuvvetleri	1,25	1,1	1,3	0,9
Isı etkisi	1,35	-	-	-

(*) Tartılarak belirlenemeyen kütleler durumunda.

Şekil 4.11 : Yükler için kısmi emniyet faktörleri

Uygulama

Çalıştığımız kulede, rotordan, mekanik bileşenlerden (fren, generator vb.) ve kontrol ekipmanlardan gelecek operasyonel ve tekrarlı yükleri göz ardı ettiğimiz için ömür hesabı yapılmamış olup sadece dayanım ve rijitlik yönünden incelenmiştir. Bunun için yalnızca NWP, NTM, EWM ve ETM koşullarına göre rüzgar hızları ve türbülans standart sapmaları hesaplanarak en olumsuz koşullar seçilmiştir.

Kule, imalatçı tarafından sağlanan kataloglarda belirtildiği üzere; IEC 61400-1 türbin sınıflarından IIA sınıfına dahildir. Çizelge 4.11 : ile verilen değerlerden ilgili olanları kullanılır:

$V_{ref} = 42,5$ m/s ve $I_{ref} = 0,16$ hesaplanan diğer rüzgar hızı ve türbülans değerleri için çizelgeye bakınız.

Çizelge 4.13 : NWP, NTM, EWM ve ETM modellerine göre hesaplanan hız ve türbülans yoğunluğu değerleri.

Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan yüksekliğinde NWP rüzgar hızı, [m/s]	Türbülans standart sapması NTM σ_1	Türbülans yoğunluğu NTM	Düzgün EWM50 rüzgar hızı, [m/s] $V_{e50}(z)$	Düzgün EWM1 rüzgar hızı, [m/s] $V_{e1}(z)$	Türbülanslı EWM50 rüzgar hızı, [m/s] $V_{s0}(z)$	Türbülanslı EWM1 rüzgar hızı, [m/s] $V_{1}(z)$	Türbülans standart sapması EWM σ_1	Türbülans yoğunluğu EWM50	Türbülans yoğunluğu EWM1	Türbülans standart sapması ETM σ_1	Türbülans yoğunluğu ETM
1500	20,7		0,202	40,1	32,1	28,6	22,9		0,134	0,168		0,741
3000	23,8		0,202	43,2	34,6	30,9	24,7		0,134	0,168		0,741
5610	27,0		0,202	46,3	37,1	33,1	26,5		0,134	0,168		0,741
6000	27,3		0,202	46,7	37,3	33,3	26,7		0,134	0,168		0,741
9000	29,6		0,202	48,8	39,0	34,9	27,9		0,134	0,168		0,684
12000	31,4		0,191	50,4	40,3	36,0	28,8		0,130	0,162		0,645
15000	32,8		0,183	51,6	41,3	36,9	29,5		0,127	0,158		0,617
16930	33,6		0,178	52,3	41,9	37,4	29,9		0,125	0,156		0,602
19930	34,7		0,173	53,3	42,6	38,0	30,4		0,123	0,154		0,583
22930	35,7		0,168	54,1	43,3	38,6	30,9		0,121	0,151		0,567
25930	36,6	5,996	0,164	54,8	43,9	39,2	31,3	4,675	0,119	0,149	20,261	0,553
28930	37,4		0,160	55,5	44,4	39,6	31,7		0,118	0,147		0,541
31930	38,2		0,157	56,1	44,9	40,1	32,1		0,117	0,146		0,531
34630	38,8		0,155	56,6	45,3	40,4	32,3		0,116	0,145		0,522
37450	39,4		0,152	57,1	45,7	40,8	32,6		0,115	0,143		0,514
40650	40,1		0,150	57,6	46,1	41,1	32,9		0,114	0,142		0,506
43850	40,7		0,147	58,1	46,5	41,5	33,2		0,113	0,141		0,498
47050	41,3		0,145	58,5	46,8	41,8	33,5		0,112	0,140		0,491
49520	41,7		0,144	58,9	47,1	42,1	33,6		0,111	0,139		0,486
51990	42,1		0,142	59,2	47,3	42,3	33,8		0,111	0,138		0,481
54550	42,5		0,141	59,5	47,6	42,5	34,0		0,110	0,138		0,477

Çizelge 4.14 : NWP, NTM, EWM ve ETM modellerine göre hesaplanan dinamik basınç değerleri.

Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Dinamik basınç NWP, [N/m ²]	Türbülanslı dinamik basınç NTM, [N/m ²]	Dinamik basınç EWM50, [N/m ²]	Dinamik basınç EWM1, [N/m ²]	Türbülanslı dinamik basınç EWM50, [N/m ²]	Türbülanslı dinamik basınç EWM1, [N/m ²]	Türbülanslı dinamik basınç ETM, [N/m ²]
1	0	1500	268,1	647,9	1003,6	642,3	992,7	712,3	1659,6
2	1500	3000	353,8	854,9	1168,9	748,1	1156,3	829,6	2189,9
3	3000	5610	454,5	1098,1	1341,5	858,6	1327,0	952,1	2812,9
4	5610	6000	466,9	1128,0	1361,5	871,3	1346,8	966,3	2889,6
5	6000	9000	549,1	1326,6	1488,5	952,6	1472,4	1056,4	3176,4
6	9000	12000	616,0	1439,6	1585,8	1014,9	1545,0	1106,5	3399,0
7	12000	15000	673,6	1534,7	1665,6	1066,0	1603,9	1147,2	3583,5
8	15000	16930	707,0	1589,2	1710,5	1094,7	1637,0	1170,0	3688,2
9	16930	19930	754,6	1666,2	1773,0	1134,7	1682,7	1201,4	3834,8
10	19930	22930	798,2	1735,6	1828,6	1170,3	1723,2	1229,3	3965,9
11	22930	25930	838,4	1799,2	1878,7	1202,4	1759,5	1254,2	4085,0
12	25930	28930	876,0	1858,0	1924,5	1231,7	1792,6	1276,9	4194,4
13	28930	31930	911,2	1912,8	1966,7	1258,7	1823,0	1297,8	4295,8
14	31930	34630	941,3	1959,3	2002,2	1281,4	1848,4	1315,3	4381,3
15	34630	37450	971,2	2005,3	2036,9	1303,6	1873,3	1332,3	4465,5
16	37450	40650	1003,6	2054,8	2074,0	1327,4	1899,8	1350,5	4555,7
17	40650	43850	1034,5	2101,7	2108,9	1349,7	1924,6	1367,5	4640,8
18	43850	47050	1064,1	2146,4	2141,8	1370,8	1948,0	1383,6	4721,5
19	47050	49520	1086,1	2179,6	2166,1	1386,3	1965,2	1395,3	4781,1
20	49520	51990	1107,4	2211,6	2189,4	1401,2	1981,7	1406,6	4838,6
21	51990	54550	1128,9	2243,8	2212,7	1416,1	1998,2	1417,9	4896,2

Çizelge 4.13 : ile görülebileceği üzere en olumsuz hız koşulları düzgün EWM50 profilinde ve en olumsuz türbülans yoğunluğu koşulları da ETM profilinde ortaya çıkmaktadır.

IEC 61400-1 standardının yükleme esasları için atıfta bulunduğu ISO 2394 ve EN 1991-1-4:2005 standartlarına bakıldığında dinamik basınç için verilen formüller aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$q(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) \quad (4.38)$$

Seçilen 4 profil için hesaplanan dinamik basınç değerleri Çizelge 4.14 : ile okunabilir.

Türbülanssız rüzgar modeli için EWM50, türbülanslı rüzgar modeli için NTM en olumsuz koşullara sahip olduğu için bundan sonraki hesaplar bu iki model üzerinden yapılmıştır.

Etkiyen dış basınç için aşağıdaki formül kullanılır:

$$W_e = C_{pe} \cdot q(z_e) \quad (4.39)$$

C_{pe} , DIN 1055-4 prosedüründe bulunduğu şekilde bulunur. Buna göre dış yüzeye etkiyen basınç değerleri çizelgedeki gibi olur.

Çizelge 4.15 : EWM ve ETM modellerine göre hesaplanan dış basınç değerleri.

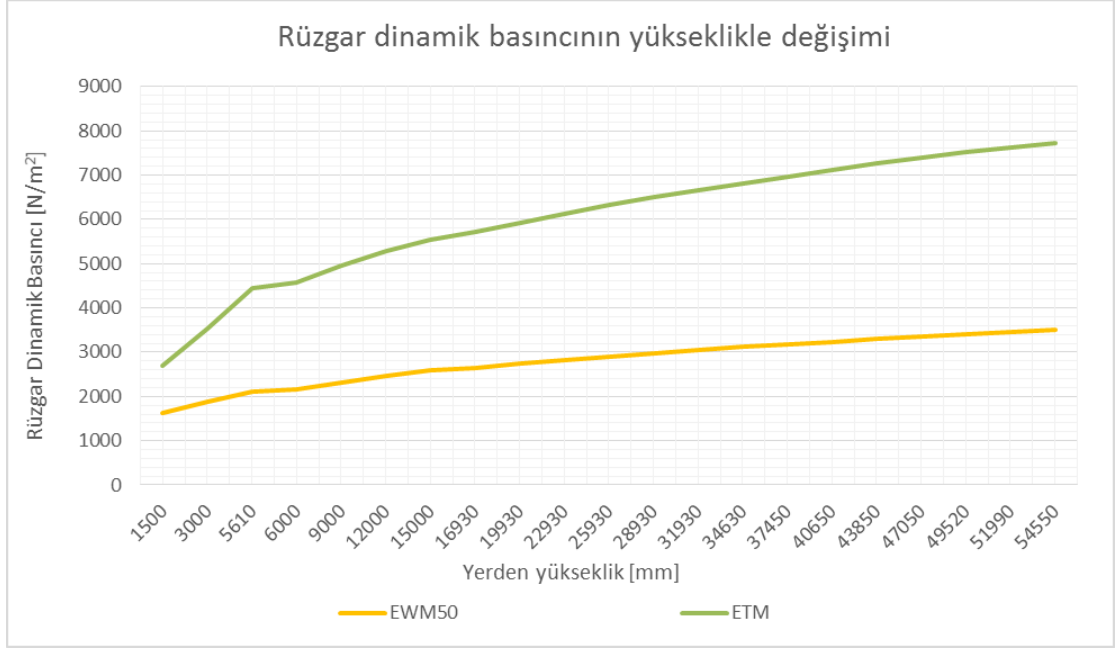
Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	C_{pe}	Dinamik basınç EWM50, [N/m ²]	Dış yüzeye etkiyen rüzgar basıncı EWM50, [N/m ²] W_e	Türbülanslı dinamik basınç ETM, [N/m ²]	Dış yüzeye etkiyen rüzgar basıncı ETM, [N/m ²] W_e
1	0	1500	-1,6	1003,6	-1630,8	1659,6	-2696,9
2	1500	3000	-1,6	1168,9	-1885,8	2189,9	-3532,9
3	3000	5610	-1,6	1341,5	-2121,0	2812,9	-4447,4
4	5610	6000	-1,6	1361,5	-2152,6	2889,6	-4568,6
5	6000	9000	-1,6	1488,5	-2324,6	3176,4	-4960,7
6	9000	12000	-1,6	1585,8	-2465,4	3399,0	-5284,4
7	12000	15000	-1,5	1665,6	-2579,1	3583,5	-5549,0
8	15000	16930	-1,5	1710,5	-2648,5	3688,2	-5710,7
9	16930	19930	-1,5	1773,0	-2741,6	3834,8	-5929,7
10	19930	22930	-1,5	1828,6	-2827,6	3965,9	-6132,8
11	22930	25930	-1,5	1878,7	-2907,6	4085,0	-6322,2

Çizelge 4.15 (devamı) : EWM ve ETM modellerine göre hesaplanan dış basınç değerleri.

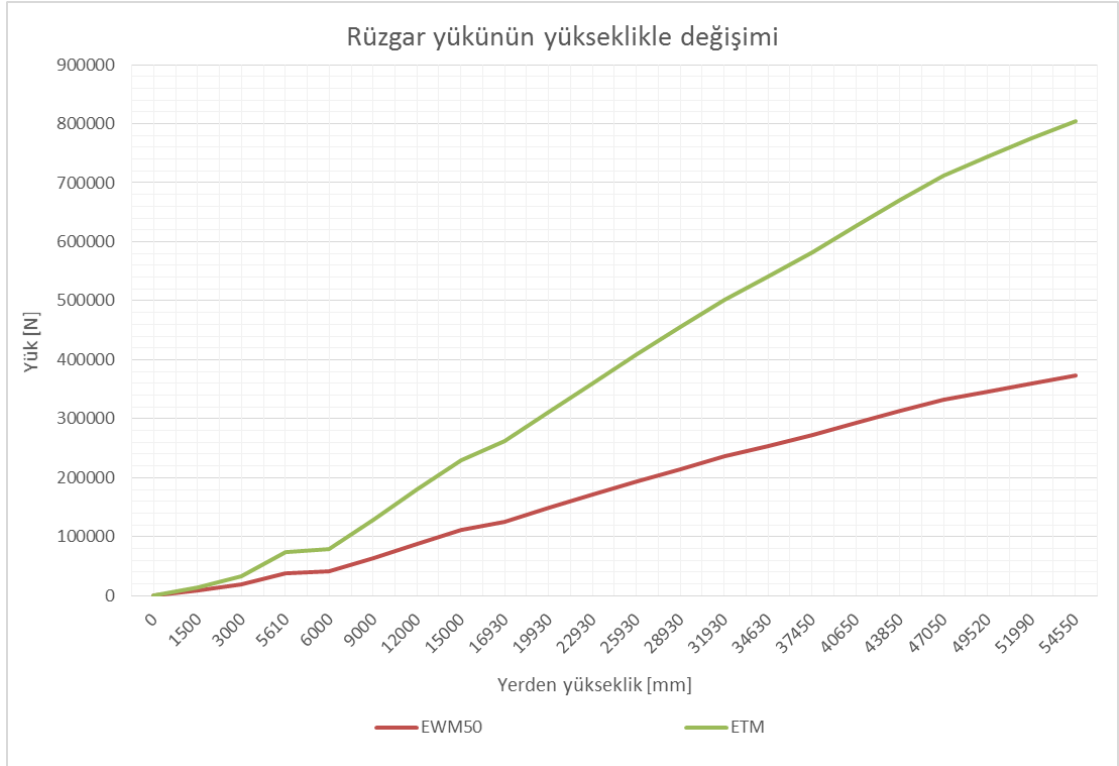
12	25930	28930	-1,6	1924,5	-2983,0	4194,4	-6501,4
13	28930	31930	-1,6	1966,7	-3053,9	4295,8	-6670,6
14	31930	34630	-1,6	2002,2	-3116,2	4381,3	-6819,0
15	34630	37450	-1,6	2036,9	-3176,4	4465,5	-6963,4
16	37450	40650	-1,6	2074,0	-3239,3	4555,7	-7115,3
17	40650	43850	-1,6	2108,9	-3300,7	4640,8	-7263,5
18	43850	47050	-1,6	2141,8	-3360,1	4721,5	-7407,1
19	47050	49520	-1,6	2166,1	-3406,1	4781,1	-7518,4
20	49520	51990	-1,6	2189,4	-3450,0	4838,6	-7624,6
21	51990	54550	-1,6	2212,7	-3494,2	4896,2	-7732,0

Çizelge 4.16 : EWM ve ETM modellerine göre hesaplanan nihai yük değerleri.

Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	C _s C _d	Dış yüzeye etkiyen rüzgar kuvveti EWM50, [N] <i>F_{EWM50}</i>	Dış yüzeye etkiyen rüzgar kuvveti ETM, [N] <i>F_{ETM}</i>
1	0	1500	1,10	-8879,9	-14684,6
2	1500	3000	1,10	-10055,9	-18839,0
3	3000	5610	1,10	-19264,0	-40393,7
4	5610	6000	1,10	-2811,8	-5967,7
5	6000	9000	1,10	-23221,9	-49554,6
6	9000	12000	1,10	-23517,7	-50408,7
7	12000	15000	1,10	-23441,0	-50434,5
8	15000	16930	1,10	-14719,0	-31737,6
9	16930	19930	1,10	-22889,6	-49507,2
10	19930	22930	1,10	-22564,0	-48938,6
11	22930	25930	1,10	-22128,6	-48116,4
12	25930	28930	1,10	-21601,2	-47079,9
13	28930	31930	1,10	-20987,9	-45843,0
14	31930	34630	1,10	-18238,6	-39911,2
15	34630	37450	1,10	-18425,2	-40393,0
16	37450	40650	1,10	-20454,1	-44928,3
17	40650	43850	1,10	-19837,5	-43654,3
18	43850	47050	1,10	-19172,2	-42264,0
19	47050	49520	1,10	-14201,5	-31347,0
20	49520	51990	1,10	-13759,1	-30408,2
21	51990	54550	1,10	-13786,7	-30507,3



Şekil 4.12 : IEC 61400-1’de verilen EWM50 ve ETM senaryolarına göre hesaplanan rüzgar dinamik basıncı değerlerinin grafik üstünde gösterimi.



Şekil 4.13 : IEC 61400-1’de verilen EWM50 ve ETM senaryolarına göre hesaplanan rüzgar yükü değerlerinin grafik üstünde gösterimi.

4.2.3 SAP2000 programında analiz

4.3.1 ve 4.3.2 numaralı başlıkların altında anlatılarak elde edilen yükler SAP2000 yapısal analiz programında geometrisi oluşturulan, malzemesi, et kalınlıkları atanan modele yayılı yük olarak uygulanır.

Kulenin kesiti, yükseklik boyunca değişkenlik gösterdiğinden sabit bir atalet momenti veya kütle yayılımı söz konusu değildir. Bu nedenle kule, sacları temsil eden parçalara ayrılırlarak idealize edilir. Düşey düzlemde 21 adet birbirinden farklı ama kendi içinde sabit çaplı boru eleman ile bütün kule modellenmiştir.

Model ile zemin arasındaki bağlantı ankastre mesnet olarak ilgili düğüm noktalarında tanımlanmış ve zeminden yukarıda kalan bütün düğüm noktaları serbest mesnet olarak tanımlanmıştır. Yükleme koşulları rotor, şaft ve naselin ağırlıkları; kulenin en tepesinden etkiyecek şekilde tanımlanmıştır ve kulenin kendi ağırlığından kaynaklanan yüklerin de hesaba katılabilmesi için “Self Weight Multiplier” değeri ölü yükler için 1 olarak girilmiştir. Bu değer dinamik yükler için 0 olarak girilir.

Ek A’da verildiği üzere rotor, şaft ve naselin toplam ağırlığı 34,5 ton’dur.

34,5 ton = 34500 kg

$$F = m \times a \quad (4.40)$$

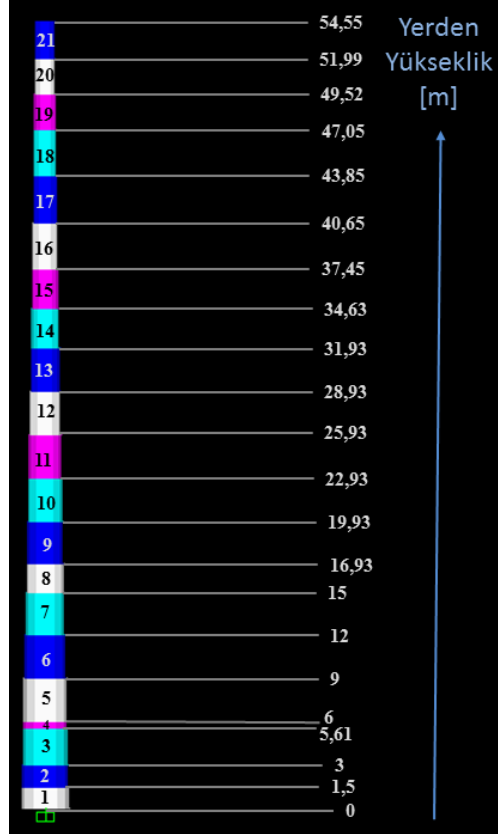
$$F = 34500 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 338445 \text{ kgm/s}^2 = 338445 \text{ N}$$

Çizelge 4.17 : Kulenin 21 parçasına ait yükseklik, ortalama çap, et kalınlığı değerleri ve malzeme bilgisi.

Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Taban alanı ile tavan alanı arasındaki ortalama çap değeri, [mm]	Et kalınlığı, [mm]	Malzeme
1	0	1500	3265,889	22	S235JR/ EN10025
2	1500	3000	3197,667	22	
3	3000	5610	3104,203	22	
4	5610	6000	3035,981	16	
5	6000	9000	2958,890	16	
6	9000	12000	2822,445	16	
7	12000	15000	2686,001	16	
8	15000	16930	2573,890	16	
9	16930	19930	2474,068	16	
10	19930	22930	2362,203	16	
11	22930	25930	2250,339	16	
12	25930	28930	2138,475	16	
13	28930	31930	2026,610	16	
14	31930	34630	1920,339	16	

Çizelge 4.17 (devamı) : Kulenin 21 parçasına ait yükseklik, ortalama çap, et kalınlığı değerleri ve malzeme bilgisi.

15	34630	37450	1831,919	16
16	37450	40650	1750,624	14
17	40650	43850	1664,199	14
18	43850	47050	1577,773	14
19	47050	49520	1501,205	12
20	49520	51990	1434,495	14
21	51990	54550	1366,570	16



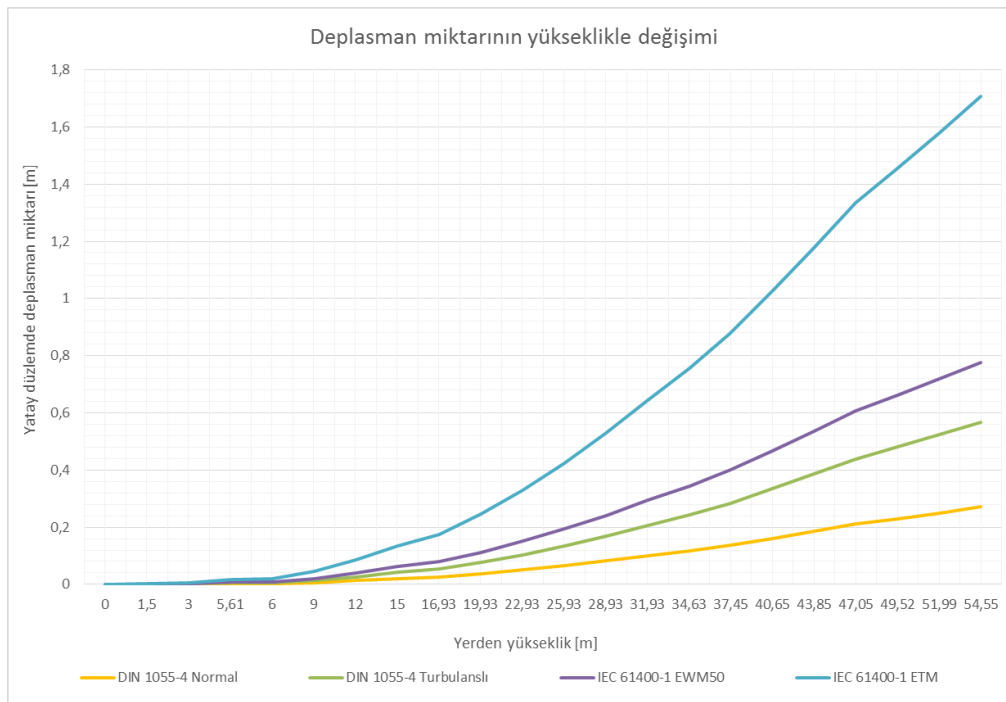
Şekil 4.14 : SAP2000'de modellenmiş kule geometrisi

Çizelge 4.18 : 4 tip hesap yönteminin her birine göre kulenin 21 parçasının tavan seviyelerinde oluşan deplasmanlar.

Yerden yükseklik, [m]	DIN1055-4/ Normal, [m]	DIN1055-4/ Türbülanslı, [m]	IEC61400-1/ EWM50, [m]	IEC61400-1/ ETM, [m]
0	0	0	0	0
1,5	0,00022	0,000432	0,000701	0,00153
3	0,000777	0,00154	0,002436	0,005326
5,61	0,002572	0,005126	0,007949	0,017398
6	0,002938	0,00586	0,00907	0,019852
9	0,006861	0,013746	0,020973	0,045934
12	0,012723	0,025599	0,038577	0,08453
15	0,020548	0,041508	0,061878	0,135642
16,93	0,02662	0,053903	0,079846	0,175069
19,93	0,03769	0,076598	0,112415	0,246561
22,93	0,05068	0,103358	0,150383	0,329935

Çizelge 4.19 : Çizelge 4.18 (devamı) : 4 tip hesap yönteminin her birine göre kulenin 21 parçasının tavan seviyelerinde oluşan deplasmanlar

25,93	0,065509	0,13405	0,193465	0,424575
28,93	0,082078	0,168493	0,241337	0,52977
31,93	0,100267	0,206461	0,293626	0,644706
34,63	0,117903	0,243407	0,344106	0,755693
37,45	0,137456	0,284497	0,399868	0,878319
40,65	0,160889	0,333898	0,466458	1,024783
43,85	0,185361	0,38563	0,535784	1,177289
47,05	0,21052	0,438918	0,606903	1,333757
49,52	0,230235	0,480722	0,66256	1,456218
51,99	0,250069	0,522802	0,718526	1,579361
54,55	0,270653	0,566476	0,776598	1,70714



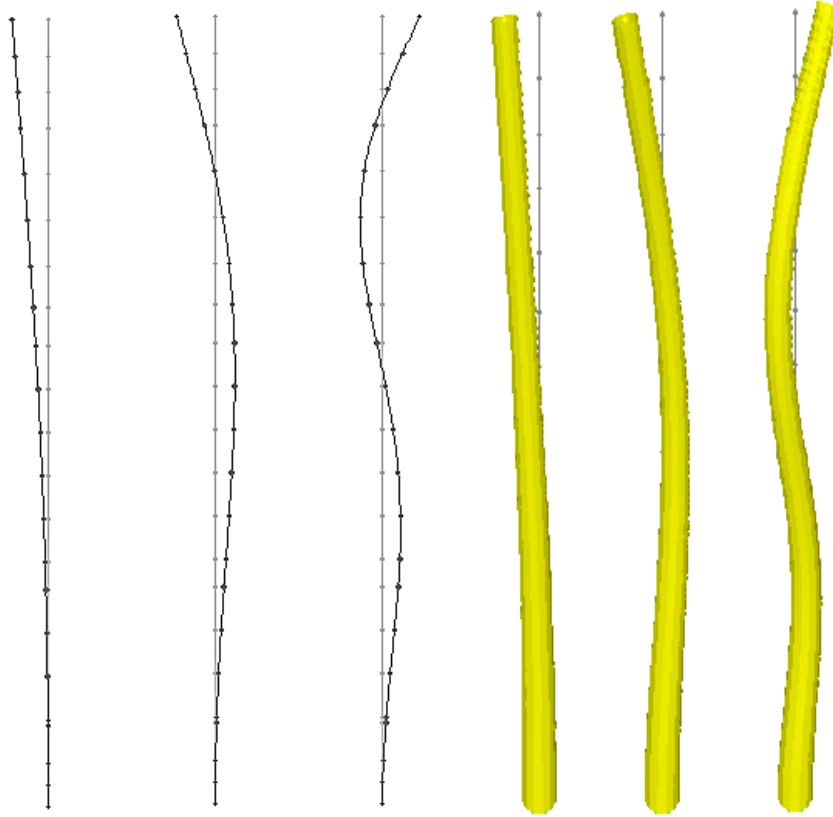
Şekil 4.15 : 4 tip hesaba göre yükseklikle değişen deplasman miktarlarının grafik üstünde gösterimi.

Çizelge 4.20 : Kulenin ilk 12 mod şekline göre frekans değerleri.

Mod sayısı	Periyot, [sn]	Frekans, [Hz]
1	0,786037	1,2722
2	0,192357	5,1987
3	0,079172	12,631
4	0,04333	23,079
5	0,034302	29,153
6	0,027819	35,947
7	0,019652	50,884

Çizelge 4.20 (devamı) : Kulenin ilk 12 mod şekline göre frekans değerleri.

8	0,015044	66,472
9	0,013782	72,56
10	0,011938	83,763
11	0,009815	101,88
12	0,008585	116,48



Şekil 4.16 : Soldan sağa doğru sırasıyla yapının birinci, ikinci, ve üçüncü mod şekilleri.

5. SONUÇ

Rüzgar türbini kuleleri ve benzer yapıların daha güvenli inşa edilebilmesi için rüzgar etkilerinin önemini göstererek, standartların yaklaşımlarını daha basit bir dille okuyucuya aktarmak ve farklılıkları karşılaştırarak emniyet ve maliyet açısından optimum mühendislik yaklaşımı ortaya koyan metodu belirlemek amacı güden bu çalışmada elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiştir.

Çalışmada DIN 1055-4 ve IEC 61400-1 standartlarının yapılar üzerindeki rüzgar yükü ile ilgili yaklaşımları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın konusu, etkiyen maksimum kuvvet ve görülen maksimum deplasman değerleridir.

Bu çalışmada, rotor, generator ve türbin kanatları gibi operasyonel ekipmanlar ihmal edilerek sadece kule incelenmiş olup, sadece durma (idling) esnasındaki durumu incelenmiştir yani operasyonel yükler (rotorun dönmesi, frenleme vb.) ve deprem yükleri ihmal edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada yapılan hesaplar statik yüklerden oluşmaktadır, dinamik yükler ihmal edildiği için yorulmadan bahsedilmemiştir.

Kule, statik yükleme yönünden incelendiği için IEC 61400-1'de verilen 22 adet senaryodan operasyonel yükleri hesaba dahil eden senaryolar bu çalışmada yer almamıştır. Sadece durma (idling) durumu için verilen senaryolar ele alınmış ve bu senaryolardan da en olumsuz koşulları temsil eden EWM50 ve ETM senaryolarına göre sonuçlar verilmiştir. DIN 1055-4 standardında ise yapının maruz kalacağı operasyonel yüklerle ait herhangi bir senaryo bulunmamaktadır yalnızca türbülanslı ve türbülanssız olacak şekilde iki tip hesap metodu verilmiştir.

Yapıya etkiyen rüzgar yükünü doğrudan etkileyen en önemli faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Yapının kurulacağı arazinin rakımı, engebелilik durumu, eğimi vb.
2. Rüzgar hızı, yönü ve rejimi (laminer sürekli akış veya türbülanslı akış vb.)
3. Yapı geometrisi

Yukarıda sıralanan faktörlerden 1 ve 3 numaralı olanlar, iki standart tarafından da aynı yaklaşımla hesaplara dahil edilmektedir. Yalnızca rüzgar hızı, yönü ve rejimi

durumları standartlar tarafından farklı yaklaşımlarla hesaplara dahil edilmektedir. EIC 61400-1 rüzgar ve türbülans koşullarını DIN 1055-4'e nazaran daha detaylı biçimde ele almaktadır. Bu durum hesapları karmaşıktırmakla beraber; arazi, rüzgar koşulları ve yapı geometrisi yönünden zorlu koşullara sahip projeler için daha güvenli ve gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir.

Aşağıda karşılaştırılması yapılan 4 tip hesap yöntemine göre kulenin temel kesitinde ortaya çıkan toplam kuvvet değerleri verilmektedir:

DIN 1055-4/ Normal: 101,455 kN.

DIN 1055-4/ Türbülanslı: 188,746 kN.

IEC 61400-1/ EWM50: 373,957 kN.

IEC61400-1/ ETM: 804,918 kN.

DIN 1055-4 normunda verilen türbülanssız rüzgar hızı, dinamik basınç ve yük hesabına göre kuledeki gerilmeler kule malzemesinin (S235J0) akma sınırının (çapı 16 mm'den küçük silindirik kesitler için 235 Mpa) oldukça altında çıkmaktadır. Bu durum yapının emniyetli olduğunu gösterse de ekonomik açıdan mühendislik beklentilerinin karşılanamamaktadır. Aynı standardın türbülanslı rüzgar hızı, dinamik basınç ve rüzgar yükü hesabına göre; 5-11 numaralı parçalar (5 ile 11 dahil) optimum emniyet katsayısına (1,5 ile 2 arasında değişen) sahiptir. Diğer parçalardaki gerilmeler akma sınırının oldukça altında kalmaktadır.

IEC 61400-1 standardında verilen EWM50 senaryosu ile yapılan hesaplara göre; 5 numaralı parçada ortaya çıkan gerilme, malzemenin akma sınırını %2 oranında aşmaktadır. 4, 6 ve 7 numaralı parçalarda oluşan gerilmeler akma sınırının altında kalmakla beraber akma sınırına oldukça yakın değerlerdedir. 1, 2, 3, 8, 9, 10 numaralı parçalarda ortaya çıkan gerilmeler akma sınırının altında ve yaklaşık 1,2-1,4 arasında değişen emniyet katsayısına sahiptirler. 11, 12 ve 13 numaralı parçalar optimum emniyet katsayısına sahiptirler ve geriye kalan 14-21 numaralı parçalar da gereğinden fazla emniyetlidirler. ETM senaryosu ile yapılan hesaplara göre; 1-13 numaralı parçalarda meydana gelen gerilmeler (1 ve 13 dahil) emniyetli akma sınırının oldukça üstünde kalmaktadır (emniyet katsayısı 0,45'lere kadar düşmektedir). 14 numaralı parça akma sınırının hemen altında bir gerilme değerine sahiptir. 15 ve 16 numaralı parçalar nispeten daha iyi bir emniyet katsayısına sahiptir. 17 numaralı parça optimum

emniyet katsayısına sahiptir ve 18-21 numaralı parçalar gereğinden fazla emniyet katsayısına sahiptir.

Sonuç olarak sadece makine dairesi ağırlığı, kulenin kendi ağırlığı ve yayılı rüzgar yükü statik olarak değerlendirildiğinde, bu çalışmada hesapları yapılan 4 tip yöntemden en iyimseri DIN 1055-4 standardında verilen normal rüzgar hızı temel alınarak hesap yapılan yöntemdir. En kötümser yaklaşım ise IEC 61400-1’de verilen ETM senaryosuna göre yapılan hesap yöntemidir. Bu sonuçlar doğrultusunda rüzgar yüküne maruz kalan yapı tasarımı için Türkiye koşullarında IEC 61400-1 standardının daha uygun olacağı görülmüştür. Yapı tasarımlarımızda kullanılması uygun olan senaryonun seçimi ise arazi koşulları ve rüzgar koşullarına bağlı olarak belirlenmelidir. Bununla beraber yapının çalışma koşulları da dikkate alınmalıdır.

Rüzgar türbin kuleleri tasarımı hem statik yüklerin hem dinamik yüklerin görüldüğü yapılardır. Bu nedenle kule öz frekansının, rotor ve kanatların çalışma frekanslarıyla çakışarak rezonansa girme ihtimali minimuma indirilmelidir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda türbin kanatları, rotor, generator etkileri; kanatların dönmesi ve frenleme gibi operasyonel yükler ve deprem yükü gibi gerçek hayatta ve çalışma esnasında görülen yükler de hesaba katılarak oluşan gerilme ve deplasmanları daha iyi simüle eden modeller üretilmesi ve tasarım spektrumu elde edilme yöntemlerinin geliştirilmesi tasarımın güvenilirliği açısından önemlidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Durak, M. ve Özer, S.** (2008). Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Ankara, Türkiye.
- [2] **Hau, E.** (2006). Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics, NY: Springer-verlag Berlin Heidelberg. New York, USA.
- [3] **Menteş, S.** (2012). Rüzgar Enerjisi Sistemleri Ders Notları. Meteoroloji Bölümü, Uzay Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [4] **Barutçu, B.** (2013). Wind Energy Conversion Technologies Ders Notları. Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul Türkiye.
- [5] **Elibüyük, U. Üçgül, İ.** (2014). Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Yekarum e-Dergi, Cilt 2, Sayı 3, Isparta, Türkiye.
- [6] **Burton, T. Sharpe, D. Jenkins, N. ve Bossanyi, E.** (2001). Wind Energy Handbook. John Wiley & sons, Ltd, New York, NY, USA.
- [7] **Manwel, J.F. Mcgowan, J.G. ve Rogers, A. L.** (2009). Wind Energy Explained Theory, Design and Application Secon Edition. John Wiley & Sons, Ltd.U.K.
- [8] **Cotrell, J. Stehly, T. Johnson, J. Roberts, J.O. Parker Z. Scott, G. Hemiller, D.** (2014). Analysis of Transportation and Logistics Challenges Affecting the Deployment of Larger Wind Turbines: Summary of Results, Technical Report NREL/TP-5000-61063.
- [9] **Harte, R. G.P.A.G. ve Zijl, V.** (2007). Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 95, 1079–1096.
- [10] **Lewin, T, J.** (2010). An investigation of design alternatives for 328-ft (100-m) tall wind turbine towers. Yüksek lisans tezi, Iowa State University, Iowa, USA.
- [11] **Lanier, M. W.** (2005). LWST Phase I Project Conceptual Design Study: Evaluation of Design and Construction Approaches for Economical Hybrid Steel/Concrete Wind Turbine Towers. Golden: National Renewable Energy Laboratory, Denver, USA.
- [12] **DIN 1055-4.** (2005). DIN 1055-4: Einwirkungen auf Tragwerke- Teil 4: Windlasten. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, Deutschland.
- [13] **DIN 1055-4.** (2006). Einwirkungen auf Tragwerke- Teil 4: Windlasten, Berichtigungen zu DIN 1055-4:2005-03. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, Deutschland.

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

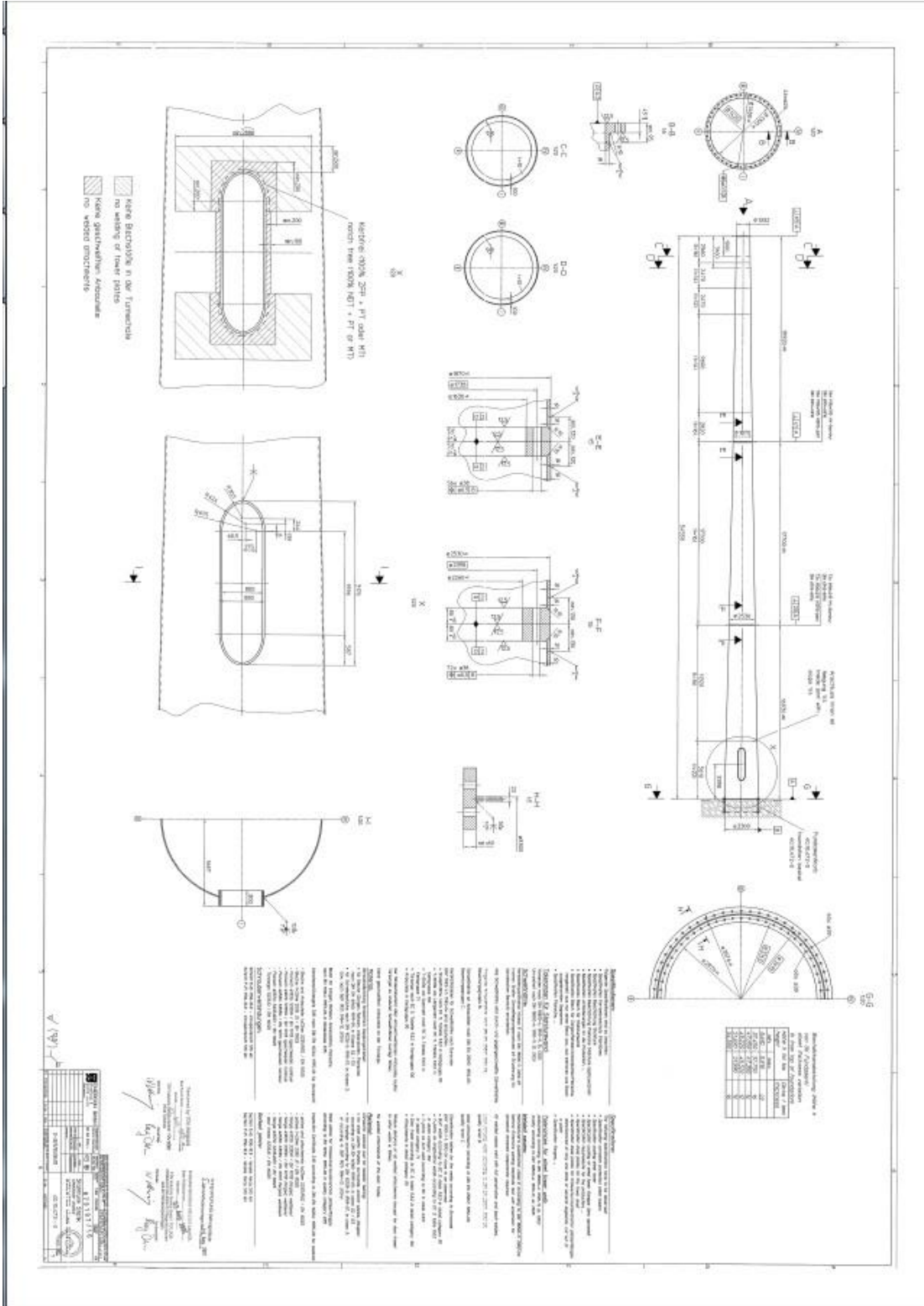
[15] **İYBRY.** (2009). İstanbul Yüksek Binalar Rüzgar Yönetmeliği Versiyon V, Boğaziçi Üniversitesi Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Url-1 <<http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/ruzgar-enerjisinin-gelisimi-ve-tarihi/4309#ad-image-0>>, alındığı tarih 23.04.2015.

Url-2 <http://www.muhendisizbiz.net/uploadlar/92/rzgar_enerjisi.pdf>, alındığı tarih 23.05.2015.

EKLER

EK A: Enercon E48 rüzgar türbini kulesi teknik resmi



Şekil A.1 : Enercon E48 rüzgar türbini kulesi

EK B: Enercon E48 rüzgar türbinine ait bilgiler

Çizelge B.1 : Rüzgar türbinine ait rotor vb. diğer ekipmanlara ait bilgiler.

1- ROTOR		
Tip	E-48	E-44
Rotor çapı	48 m	44 m
Rotor süpürme alanı	1810 m ²	1521 m ²
Güç	800 kW	900 kW
Güç ayarı	hatve denetimli	
Devir sayısı	değişken, 12~34 devir/dakika	
En düşük (durma) rüzgar hızı	2,5 m/s	
En yüksek (durma) rüzgar hızı	28~34 m/s (Enercon fırtına denetimi)	
Anma gücünde rüzgar hızı	~13 m/s	
Sınır dayanma rüzgar hızı	59,5 m/s (214,2 km/saat)	

2- DİŞLİ KUTUSU	
Uygulanmaz	yoktur

3- KANATLAR		
Üretici	Enercon Aero	
Makine tipi	E-48	E-44
Anma gücü	800 kW	900 kW
Kanat uzunluğu	22,8 m	18,9 m
Malzeme	GRP (Epoksi)	
Yıldırıma karşı koruma	kanat içinde	

4- GENERATOR		
Üretici	Enercon	
Makine tipi	E-48	E-44
Anma gücü	800 kW	900 kW
Tip (model)	senkron-doğrudan tahrikli-bilezikli	
Senkron hız	değişken devirli hızlı	
Koruma derecesi	IP23	

5- YÖN (sapma) AYARI		
Üretici	Enercon	
Makine tipi	E-48	E-44
Anma gücü	800 kW	900 kW
Sapma ayarı	rüzgar ölçerden gelen bilgi ile etkin	
Sapma hızı	0,5 ⁰ / saniye	
Tip (model)	4 adet elektrik motoru	

Çizelge B.1 (devam) : Rüzgar türbinine ait rotor vb. diğer ekipmanlara ait bilgiler.

6- KONTROL DÜZENİ				
Üretici	Enercon			
Makine tipi	E-48	E-44		
Anma gücü	800 kW	900 kW		
Tip	mikroişlemcili			
Şebeke ile bağlantı	Enercon evirici ile			
Haberleşme	Enercon uzaktan izleme sistemi			
Kesintisiz güç kaynağı	kendi içinde			

7- FRENLEME				
Üretici	Enercon			
Makine tipi	E-48	E-44		
Anma gücü	800 kW	900 kW		
Göbek yüksekliği	65 m	76 m		
Aerodinamik fren	bağımsız beslemeli 3 ayrı hatve sistemi			
Aerodinamik frenin etkinleşmesi	kontrol düzeninin çalıştırdığı 3 motor ile			
Rotorun duruş zamanı	en çok 2 rotor devri sonunda			

8- KULE				
Üretici	Çimtaş			
Makine tipi	E-48	E-44		
Anma gücü	800 kW	900 kW		
Mil eksen yüksekliği	50 m	65 m	76 m	56 m
Kule yüksekliği	49 m çelik 3 parça	64 m çelik 3 parça	76 m çelik 3 parça	55 m çelik 3 parça

9- MAKİNE DARESİ AĞIRLIKLARI				
Makine tipi	E-48			
Makine tipi	E-48	E-44		
Anma gücü	800 kW	900 kW		
Makine dairesi (rotor ve mil hariç)	≈ 5 ton			
Rotor ve mil	≈ 15 ton			
Generatör	≈ 14,5 ton			
Toplam ağırlık	≈ 34,5 ton			

EK C: Uygulama bölümünde yer alan çizelge ve şekiller

Çizelge C.1 : Kulenin 21 parçasına ait arka yüzey ve minimum C_{pe} değerleri.

Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	$C_{p,0,min}$	$C_{p,0,h}$	Redüksiyon Faktörü Ψ_λ	$C_{pe} Min$	$C_{pe} Arka$
1	0	1500	-2,110	-0,490	0,625	-1,319	-0,306
2	1500	3000	-1,875	-0,706	0,625	-1,172	-0,441
3	3000	5610	-1,806	-0,723	0,625	-1,129	-0,452
4	5610	6000	-1,806	-0,723	0,625	-1,129	-0,452
5	6000	9000	-1,765	-0,734	0,625	-1,103	-0,459
6	9000	12000	-1,750	-0,738	0,625	-1,094	-0,461
7	12000	15000	-1,737	-0,741	0,625	-1,085	-0,463
8	15000	16930	-1,737	-0,741	0,625	-1,085	-0,463
9	16930	19930	-1,732	-0,742	0,625	-1,083	-0,464
10	19930	22930	-1,732	-0,742	0,625	-1,083	-0,464
11	22930	25930	-1,735	-0,741	0,625	-1,084	-0,463
12	25930	28930	-1,740	-0,740	0,625	-1,088	-0,463
13	28930	31930	-1,746	-0,739	0,625	-1,091	-0,462
14	31930	34630	-1,754	-0,737	0,625	-1,096	-0,460
15	34630	37450	-1,760	-0,735	0,625	-1,100	-0,459
16	37450	40650	-1,765	-0,734	0,625	-1,103	-0,459
17	40650	43850	-1,772	-0,732	0,625	-1,108	-0,457
18	43850	47050	-1,780	-0,730	0,625	-1,113	-0,456
19	47050	49520	-1,788	-0,728	0,625	-1,118	-0,455
20	49520	51990	-1,795	-0,726	0,625	-1,122	-0,454
21	51990	54550	-1,802	-0,724	0,625	-1,126	-0,453

Çizelge C.2 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkiyen rüzgar basıncı.

Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	$C_{pe} Min$	$C_{pe} Arka$	Tavan yüksekliğindeki rüzgar hızına bağlı dinamik basınç, [N/m ²] q	Dış yüzeye etkiyen rüzgar basıncı, [N/m ²] $W_{e, Arka}$	Dış yüzeye etkiyen rüzgar basıncı, [N/m ²] $W_{e, Min}$	Dış yüzeye etkiyen toplam rüzgar basıncı, [N/m ²] W_e
1	0	1500	-1,3	-0,3	11,9	-3,6	-15,6	-19,3
2	1500	3000	-1,2	-0,4	87,0	-38,4	-102,0	-140,4
3	3000	5610	-1,1	-0,5	214,4	-96,9	-242,0	-339,0
4	5610	6000	-1,1	-0,5	231,4	-104,6	-261,3	-365,9
5	6000	9000	-1,1	-0,5	348,0	-159,6	-383,9	-543,5
6	9000	12000	-1,1	-0,5	445,1	-205,2	-486,8	-692,0

Çizelge C.2 (devamı) : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkiyen rüzgar basıncı.

7	12000	15000	-1,1	-0,5	528,6	-244,8	-573,8	-818,6
8	15000	16930	-1,1	-0,5	576,9	-267,2	-626,2	-893,3
9	16930	19930	-1,1	-0,5	645,4	-299,3	-698,7	-998,0
10	19930	22930	-1,1	-0,5	707,3	-328,0	-765,8	-1093,8
11	22930	25930	-1,1	-0,5	763,9	-353,9	-828,4	-1182,3
12	25930	28930	-1,1	-0,5	816,2	-377,5	-887,6	-1265,1
13	28930	31930	-1,1	-0,5	864,7	-399,1	-943,7	-1342,8
14	31930	34630	-1,1	-0,5	905,8	-417,0	-992,7	-1409,7
15	34630	37450	-1,1	-0,5	946,2	-434,7	-1040,8	-1475,5
16	37450	40650	-1,1	-0,5	989,5	-453,7	-1091,7	-1545,5
17	40650	43850	-1,1	-0,5	1030,4	-471,4	-1141,4	-1612,7
18	43850	47050	-1,1	-0,5	1069,2	-487,8	-1189,5	-1677,3
19	47050	49520	-1,1	-0,5	1097,8	-499,5	-1226,7	-1726,2
20	49520	51990	-1,1	-0,5	1125,3	-510,8	-1262,5	-1773,2
21	51990	54550	-1,1	-0,5	1152,9	-522,0	-1298,6	-1820,6

Çizelge C.3 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkiyen rüzgar yükü.

Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Dış yüzeye etkiyen rüzgar basıncı, [N/m ²] W_e	Yüzey alanı hesabı [m ²]	Dış yüzeye etkiyen rüzgar kuvveti, [N] F_e	Dış yüzeye etkiyen rüzgar kuvveti, [N] F_w	$C_{f,0}$	Redüksiyon faktörü ψ_z	C_f
1	0	1500	-19,3	4,9	-94,3	-75,4	1,278	0,625	0,799
2	1500	3000	-140,4	4,8	-673,2	-529,6	1,259	0,625	0,787
3	3000	5610	-339,0	8,1	-2746,2	-2155,2	1,256	0,625	0,785
4	5610	6000	-365,9	1,2	-433,2	-340,6	1,258	0,625	0,786
5	6000	9000	-543,5	8,9	-4824,4	-3794,1	1,258	0,625	0,786
6	9000	12000	-692,0	8,5	-5859,4	-4623,0	1,262	0,625	0,789
7	12000	15000	-818,6	8,1	-6596,2	-5224,2	1,267	0,625	0,792
8	15000	16930	-893,3	5,0	-4437,7	-3527,4	1,272	0,625	0,795
9	16930	19930	-998,0	7,4	-7407,3	-5906,2	1,276	0,625	0,797
10	19930	22930	-1093,8	7,1	-7751,1	-6204,6	1,281	0,625	0,800
11	22930	25930	-1182,3	6,8	-7981,7	-6416,3	1,286	0,625	0,804
12	25930	28930	-1265,1	6,4	-8116,0	-6554,1	1,292	0,625	0,808
13	28930	31930	-1342,8	6,1	-8163,9	-6625,5	1,299	0,625	0,812
14	31930	34630	-1409,7	5,2	-7309,2	-5962,3	1,305	0,625	0,816
15	34630	37450	-1475,5	5,2	-7622,4	-6245,7	1,311	0,625	0,819

Çizelge C.3 (devamı) : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkiyen rüzgar yükü.

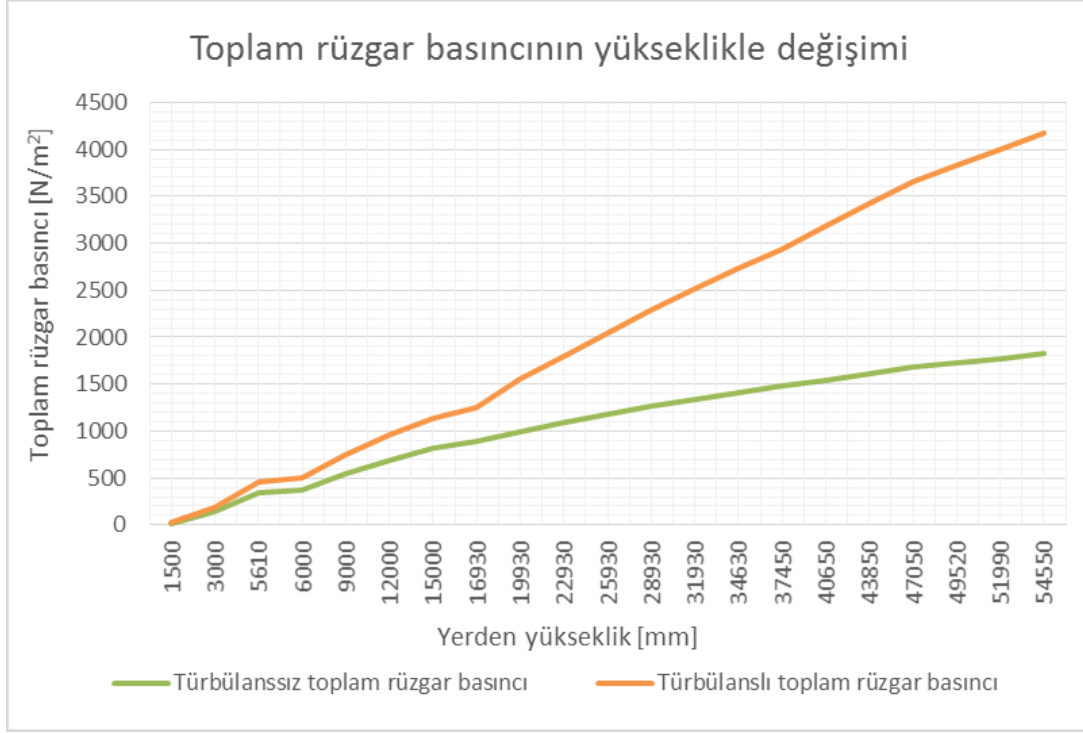
16	37450	40650	-1545,5	5,6	-8657,8	-7124,9	1,317	0,625	0,823
17	40650	43850	-1612,7	5,3	-8588,5	-7103,0	1,323	0,625	0,827
18	43850	47050	-1677,3	5,0	-8468,4	-7041,3	1,330	0,625	0,831
19	47050	49520	-1726,2	3,7	-6400,8	-5349,7	1,337	0,625	0,836
20	49520	51990	-1773,2	3,5	-6282,9	-5276,3	1,344	0,625	0,840
21	51990	54550	-1820,6	3,5	-6369,1	-5376,4	1,351	0,625	0,844

Çizelge C.4 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkiyen türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmiş rüzgar basıncı.

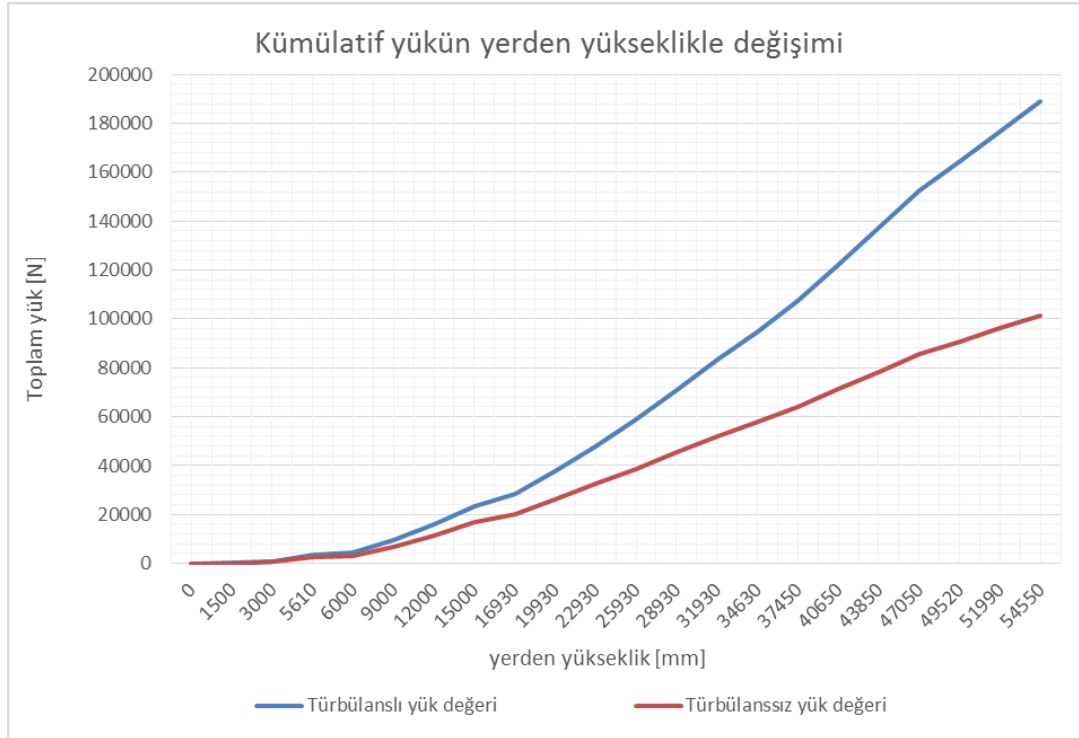
Parça No	Taban alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Tavan alanının zeminden yüksekliği, [mm]	Hamle dinamik basıncı, [N/m ²] $q(Z)$	Reynolds Sayısı	$C_{p,0,min}$	$C_{p,0,h}$	$C_{pe} Min$	$C_{pe} Arka$	Hamle dinamik basıncı, [N/m ²] $q(Z) Min$	Hamle dinamik basıncı, [N/m ²] $q(Z) Arka$	Hamle dinamik basıncı, [N/m ²] $q(Z) Toplam$
1	0	1500	15,63	613.434	-2,2	-0,4	-1,4	-0,264	-21,5	-4,1	-25,6
2	1500	3000	114,749	1.627.386	-2,0	-0,6	-1,3	-0,4	-144,3	-44,8	-189,1
3	3000	5610	282,757	2.479.928	-1,9	-0,7	-1,2	-0,4	-335,8	-124,8	-460,5
4	5610	6000	305,225	2.519.949	-1,9	-0,7	-1,2	-0,4	-362,5	-134,7	-497,1
5	6000	9000	458,997	3.011.731	-1,9	-0,7	-1,2	-0,4	-545,1	-204,5	-749,6
6	9000	12000	587,058	3.248.992	-1,9	-0,7	-1,2	-0,4	-697,1	-262,7	-959,8
7	12000	15000	697,227	3.369.581	-1,9	-0,7	-1,2	-0,4	-828,0	-312,4	-1140,4
8	15000	16930	760,946	3.373.256	-1,9	-0,7	-1,2	-0,4	-903,6	-341,0	-1244,6
9	16930	19930	948,353	3.690.450	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-1126,2	-427,4	-1553,5
10	19930	22930	1099,004	3.847.186	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-1305,1	-496,6	-1801,7
11	22930	25930	1246,941	3.951.975	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-1480,7	-564,2	-2045,0
12	25930	28930	1392,344	4.011.430	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-1653,4	-630,9	-2284,3
13	28930	31930	1535,387	4.030.621	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-1823,3	-695,7	-2519,0
14	31930	34630	1662,242	4.005.131	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-1973,9	-753,2	-2727,1
15	34630	37450	1792,951	3.997.900	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-2129,1	-812,4	-2941,6
16	37450	40650	1939,205	4.004.242	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-2302,8	-878,7	-3181,5
17	40650	43850	2083,401	3.973.726	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-2474,0	-944,0	-3418,1
18	43850	47050	2225,672	3.919.501	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-2643,0	-1007,1	-3650,1
19	47050	49520	2334,245	3.837.289	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-2771,9	-1054,8	-3826,7
20	49520	51990	2441,791	3.767.115	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-2899,6	-1101,9	-4001,5
21	51990	54550	2552,221	3.685.154	-1,9	-0,7	-1,2	-0,5	-3030,8	-1150,1	-4180,9

Çizelge C.5 : Modelde, 21 parça için DIN 1055-4 normuna göre düşey doğrultuda etkiyen türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmiş rüzgar yükü.

Dış yüzeye etkiyen rüzgar basıncı, [N/m ²] W_e	Yüzey alanı hesabı [m ²]	Dış yüzeye etkiyen rüzgar kuvveti, [N] F_e	Dış yüzeye etkiyen rüzgar kuvveti, [N] F_w	$C_{f,0}$	Redüksiyon Faktörü ψ_z	C_f
-25,623	4,899	-125,525	-101,619	1,295	0,625	0,810
-189,114	4,797	-907,083	-718,492	1,267	0,625	0,792
-460,540	8,102	-3731,284	-2945,238	1,263	0,625	0,789
-497,135	1,184	-588,624	-465,588	1,266	0,625	0,791
-749,599	8,877	-6653,946	-5262,989	1,266	0,625	0,791
-959,840	8,467	-8127,286	-6450,814	1,270	0,625	0,794
-1140,402	8,058	-9189,363	-7324,341	1,275	0,625	0,797
-1244,622	4,968	-6182,794	-4947,835	1,280	0,625	0,800
-1553,521	7,422	-11530,547	-9247,442	1,283	0,625	0,802
-1801,680	7,087	-12767,802	-10275,723	1,288	0,625	0,805
-2044,983	6,751	-13805,717	-11154,425	1,293	0,625	0,808
-2284,314	6,415	-14654,845	-11891,260	1,298	0,625	0,811
-2518,994	6,080	-15315,058	-12485,252	1,304	0,625	0,815
-2727,116	5,185	-14139,864	-11583,806	1,311	0,625	0,819
-2941,560	5,166	-15196,132	-12501,468	1,316	0,625	0,823
-3181,508	5,602	-17822,804	-14720,367	1,321	0,625	0,826
-3418,080	5,325	-18202,766	-15103,722	1,328	0,625	0,830
-3650,102	5,049	-18428,905	-15368,083	1,334	0,625	0,834
-3826,703	3,708	-14189,327	-11890,848	1,341	0,625	0,838
-4001,485	3,543	-14178,077	-11934,811	1,347	0,625	0,842
-4180,857	3,498	-14626,393	-12372,410	1,353	0,625	0,846



Şekil C.1 : Türbülans yoğunluğu hesabı dahil rüzgar basıncı değeri ile türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmemiş rüzgar basıncı değerlerinin grafik üstünde gösterimi.



Şekil C.2 : Türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmiş rüzgar yükü değeri ile türbülans yoğunluğu hesabı dahil edilmemiş rüzgar yükü değerlerinin grafik üstünde gösterimi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Hüsniye Senem Büyükçolpan
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara/ 01.07.1986
E-posta : turkarlansenem@gmail.com
Adres : İstanbul
Lisans Üniversite : 2010, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği