



**KULE ETKİSİ VE RÜZGAR KAYMA DEĞİŞİMLERİNİN ENERJİ ÜRETİMİ,
RÜZGAR HIZI VE RÜZGAR GÜCÜ KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

TUĞÇE ÇETİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DR. ÖĞR. ÜYESİ Cem EMEKSİZ**

NİSAN - 2019

Her hakkı saklıdır

T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KULE ETKİSİ VE RÜZGAR KAYMA DEĞİŞİMLERİNİN ENERJİ
ÜRETİMİ, RÜZGAR HIZI VE RÜZGAR GÜCÜ
KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

TUĞÇE ÇETİN

TOKAT
NİSAN - 2019

Her hakkı saklıdır

TUĞÇE ÇETİN tarafından hazırlanan “Kule Etkisi ve Rüzgar Kayma Değişimlerinin Enerji Üretimi, Rüzgar Hızı ve Rüzgar Gücü Karakteristikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 25 Nisan 2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı ‘nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

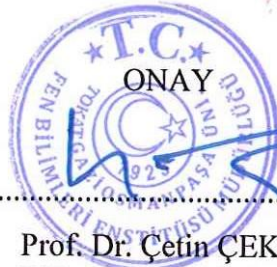
Danışman
DR. ÖĞR. ÜYESİ Cem EMEKSİZ
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi



Üye
DR. ÖĞR. ÜYESİ Canan ORAL
Amasya Üniversitesi



Üye
DR. ÖĞR. ÜYESİ Mehmet Serhat CAN
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi



Prof. Dr. Çetin ÇEKİÇ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
20/05/2019

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

TUĞÇE ÇETİN

25 Nisan 2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KULE ETKİSİ VE RÜZGAR KAYMA DEĞİŞİMLERİNİN ENERJİ ÜRETİMİ, RÜZGAR HIZI VE RÜZGAR GÜCÜ KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

TUĞÇE ÇETİN

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞR. ÜYESİ CEM EMEKSİZ)

Son zamanlarda fosil kökenli enerji kaynaklarının azalması, temiz olmaması, kullanıldığında doğaya ve canlılara zarar vermesi gibi sebeplerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ve kullanım miktarı artırmıştır. Rüzgar enerjisi de yenilenebilir enerji kaynakları sınıfına dahil, az maliyetli, kullanışlı, potansiyeli yüksek ve temiz kaynaklardan birisidir. Böylesine verimli bir kaynaktan doğru şekilde yararlanabilmek için rüzgar türbini kurulacak olan bölgenin doğru şekilde analiz edilmesi ve rüzgar türbin güç üretimine etkisi olan parametrelerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Rüzgar kayması ve kule etkisi, rüzgar türbininden elde edilen gücü ve elektrik enerjisi üretimini etkileyen parametrelerdendir. Bu çalışma, kule etkisi ve rüzgar kayması değişimlerinin enerji üretimi üzerindeki etkilerini sunmaktadır. Bunlar rüzgar karakteristiklerinin belirlenmesinde önemli rol oynayan parametrelerdir. Yapılan çalışmada rüzgar verilerini elde etmek için Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi kampüsünde yer alan ölçüm istasyonundan yararlanılmıştır. Rüzgar karakteristikleri kampüste yer alan referans bölge için belirlenmiştir. Analizler dört farklı senaryo kurularak gerçekleştirilmiştir. Kule etkisi, rüzgar kayması ve bozuk rüzgar hızı elde edilmiş ve bunlara göre türbin gücü ve enerji kayıpları hesaplanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarından farklı olarak, kanat-kule arasındaki mesafesinin rüzgar enerjisi üretimi üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiş ve oluşturulan her bir senaryoya göre farklı farklı analiz edilmiştir. Analizler bozuk rüzgar hızının oluşmasında kule etkisinin rüzgar kaymasından daha baskın olduğunu göstermiştir.

2019, 66 SAYFA

ANAHTAR KELİMELELER: Yenilenebilir Enerji, Rüzgar Enerjisi, Weibull Dağılımı, Rüzgar Kayma Katsayısı, Kule Etkisi, Rüzgar Kayması, Enerji Kaybı

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF TOWER SHADOW DISTURBANCE AND WIND SHEAR VARIATIONS EFFECTS ON ENERGY PRODUCTION WIND SPEED AND POWER CHARACTERISTICS

TUĞÇE ÇETİN

**TOKAT GAZIOSMANPASA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASST. PROF. DR. CEM EMEKSİZ)

Recently, the importance of renewable energy sources and the amount of use has increased due to the reasons such as reduction of fossil-based energy sources, lack of clean and damage to nature and living beings when used. Wind energy is also one of the sources of renewable energy resources which is low-cost, useful, high-potential and clean sources. In order to make the right use of such an efficient source, it is necessary to correctly analyze for the region which the wind turbine will be installed and to correctly evaluate the parameters that effect the wind turbine power generation. Wind shear and tower shadow effects are the parameters that affect electrical energy production and the power obtained from the wind turbine. This study presents effects of tower shadow disturbance and wind shear variations on energy production. These are very important parameters to determine wind characteristics. The measurement station was established to obtain wind data in Tokat Gaziosmanpasa University Campus. Wind characteristics were determined for reference location in campus. Analysis were performed with created four different scenarios. Tower shadow, wind shear and disturbed wind speeds and energy loses were calculated. Also new two equation were created to determine the turbine power of AIR-X 400 W wind turbine that was selected as reference. Unlike previous literature studies, the effect of x distance of blade origin from the tower midline was investigated in tower shadow instead of the effect of wind shear coefficient. Analysis showed that x is the most effective parameter on tower shadow disturbance and tower shadow disturbance is more dominant than wind shear. More over, this study showed that considering the x distance in calculating the tower shadow disturbance had more successful results in determining the disturbed windspeeds and energy losses.

2019, 66 PAGES

KEYWORDS: Renewable Energy, Wind Energy, Weibull Distribution, Wind Shear Coefficient, Tower Shadow, Wind Shear, Energ Losses

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın hazırlanma, araştırma ve tamamlanma aşamalarında danışmanlığımı yapan ve bu süreçte bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanını esirgemeyerek benimle paylaşan, her fırsatta yardımcı olan saygıdeğer hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cem EMEKSİZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve en büyük destekçilerim olan annem İlknur ÇETİN, babam Ali ÇETİN ve kardeşim Mert ÇETİN'e de teşekkür ve minnetimi belirtmek isterim. Ayrıca Yüksek Lisans yapmam konusunda beni teşvik eden, her zaman yanımda olan ve tez çalışmam sırasında desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili nişanlım Furkan YAĞCIOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

TUĞÇE ÇETİN

25 Nisan 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
3. RÜZGAR ENERJİSİNE GENEL BİR BAKIŞ	7
3.1. Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi ve Gelişimi.....	8
3.2. Rüzgar Enerjisinin Türkiye ve Dünyadaki Potansiyeli.....	9
3.3. Rüzgar Enerjisi ile İlgili Temel Kavramlar	13
3.3.1. Basınç gradyan kuvveti	14
3.3.2. Coriolis kuvveti	15
3.3.3. Merkezkaç kuvveti.....	15
3.3.4. Sürtünme kuvveti.....	16
3.3.5. Kanat uç hız oranı.....	16
3.3.6. Rüzgar kayma katsayısı	17
3.3.7. Rüzgar gücü.....	18
3.4. Rüzgar Türbinleri ve Türbinleri Oluşturan Ekipmanları.....	22
3.4.1. Kanat	22
3.4.2. Kule	23
3.4.3. Generatör.....	24
3.4.4. Dişli kutusu	25
3.4.5. Gövde (Nacel)	25
3.4.6. Kontrol sistemleri ünitesi	26
3.4.7. Rüzgar türbin çeşitleri.....	26
4. İSTATİKSEL RÜZGAR HIZI ANALİZ METODLARI	30
4.1. Weibull Dağılımı	30
4.2. Log-Normal Dağılımı.....	31

4.3. Rayleigh Dağılımı.....	31
4.4. Gama Dağılımı	32
5. MATERYAL ve YÖNTEM	33
5.1. Rüzgar Hızı Modellemesi ve Türbin Gücünün Elde Edilmesi	37
5.1.1. Rüzgar kayması.....	37
5.1.2. Kule etkisi	38
5.1.3. Bozuk rüzgar hızı.....	39
5.1.4. Rüzgar kayma katsayısının hesaplanması.....	40
5.1.5. Rüzgar türbin gücünün belirlenmesi	41
6. BULGULAR.....	42
7. TARTIŞMA VE SONUÇ	58
8. KAYNAKLAR	62
9. ÖZGEÇMİŞ	66

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
A	Rotor süpürme alanı
a	Gama dağılımına göre şekil parametresi
a	Kule yarıçapı
α	Rüzgar kayma katsayısı
α	Merkezkaç kuvvetinin birim kütleye etki eden ivmesi
α_0	Referans bölgedeki sabit pürüzlülük katsayısı
b	Gama dağılımına göre ölçek parametresi
c	Ölçek parametresi
C_p	Türbin verimi
E	Enerji kaybı
E_k	Kinetik enerji
f_c	Coriolis kuvveti
G	Gradyan kuvveti
GW	Gigawatt
h	İzobarlar arası uzunluk
h	Kule yüksekliği
H	İstenilen kule yüksekliği
H_{ref}	Referans yükseklik
k	Şekil parametresi
kW	Kilowatt
m	Havanın kütlesi
\dot{m}	Havanın kütleli debisi
MW	Megawatt
MW	Havanın moleküler ağırlığı
n	Üstel dağılım gösteren rassal değişkenlerin toplamı
P	Mutlak basınç
P_{gama}	Gama dağılımına göre ortalama güç yoğunluğu
$P_{log-normal}$	Log-normal dağılımına göre ortalama güç yoğunluğu
P_r	Rayleigh dağılımına göre ortalama güç yoğunluğu
P_r	Rüzgarın iş yapabilme yeteneği
P_t	Türbin gücü

P_{td}	Bozuk türbin gücü
P_w	Ortalama güç yoğunluğu
R	Rüzgarın döner çapı
r	Kanat yarıçapı
R	İdeal gaz sabiti
R^2	Determinasyon katsayısı
r	Kanat uzunluğu
S	Rüzgarın türbin kanatlarına yaptığı basınç
T	Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık değeri
t_e	Türbin çalışma süresi
TWh	Terawatt saat
V	Rüzgar hızı
V_h	Kanatlara gelen rüzgar hızı
V_{gama}	Gama dağılımına göre ortalama rüzgar hızı
$v_{log-normal}$	Log-normal dağılımına göre ortalama rüzgar hızı
V_m	Rüzgar kayması
v_{ort}	Ortalama rüzgar hızı
v_r	Rayleigh dağılımına göre ortalama rüzgar hızı
V_r	İstenilen yükseklikteki rüzgar hız değeri
V_{ref}	Referans yükseklikteki rüzgar hız değeri
$v_{log-normal}$	Log-normal dağılımına göre ortalama rüzgar hızı
W	Watt
x	Kanat-kule arası mesafe
z_0	Yüzey pürüzlülük uzunluğu
Γ	Gama fonksiyonu
ΔP	İzobarlar arası basınç farkı
σ	Log-normal dağılımına göre ölçek parametresi
φ	Enlem derecesi
Ω	Dünyanın açısal dönüş hızı
ω	Açısal dönme hızı
ψ	Kanat azimut açısı
ρ	Hava yoğunluğu
λ	Kanat uç hız oranı

Kısaltmalar	Açıklama
DC	Doğru Akım (Direct Current)
GWEC	Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi(Global Wind Energy Council)
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
ISA	Uluslararası Standart Atmosfer (International Standard Atmosphere)
LIDAR	Işık Algılama ve Değişme (Light Detection and Ranging)
M.Ö	Milattan Önce
MATLAB	Çok Paradigmalı Sayısal Hesaplama Yazılımı ve Program Dili (Matrix Laboratory)
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
OECD	Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Örgütü (Organisation for Economic Cooperation and Development)
RES	Rüzgar Enerji Santrali
RMSE	Ortalama hata kareleri toplamı (Root Mean Square Error)
SCADA	Uzaktan Kontrol ve Gözleme Sistemi (Supervisory Control And Data Acquisition)
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TÜREB	Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
YEGM	Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Küresel birikimli kurulu kapasite 2001-2017	2
Şekil 3.1. Rüzgar oluşumu	7
Şekil 3.2. Türkiye'nin ilk enerji santrali Alize Germiyan	8
Şekil 3.3. Türkiye 50 m. yükseklikteki ortalama rüzgar hızı dağılımı	9
Şekil 3.4. Türkiye'deki RESlerin bölgelere göre güç dağılımları	10
Şekil 3.5. RES'lerin toplam elektrik üretimine katkısı	10
Şekil 3.6. Beş yıllık plan dahilinde kaynakların toplam kurulu güç içindeki payları.....	11
Şekil 3.7. OECD ülkelerinde 1990-2016 yılları arasında elektrik üretiminin yıllık büyüme oranları.....	13
Şekil 3.8. Rüzgar yön ve isimleri.....	14
Şekil 3.9. Coriolis saptırıcı kuvvetleri	15
Şekil 3.10. Rüzgar türbinlerinde kanat uç hız oranı parametreleri	17
Şekil 3.11. Betz kanunu	20
Şekil 3.12. Rüzgar türbin bileşenleri	22
Şekil 3.13. Rüzgar türbini kanat bölümleri.....	23
Şekil 3.14. Kule tipleri sırasıyla boru kesitli, kafes örgü ve hibrid kule	24
Şekil 3.15. Türbinden enerji üretimi	24
Şekil 3.16. Rüzgar türbini gövde kısmı	26
Şekil 3.17. Yatay eksenli rüzgar türbinleri	27
Şekil 3.18. Dikey eksenli rüzgar türbinleri	28
Şekil 3.19. Eğik eksenli rüzgar türbini	29
Şekil 5.1. Rüzgar hız verilerinin alındığı ölçüm istasyonunun konumu.....	33
Şekil 5.2. Ölçüm İstasyonu	34
Şekil 5.3. Güç kutusu	34
Şekil 5.4. Yapılan çalışmada kullanılan akış diyagramı	36
Şekil 5.5. Bozuk rüzgar hızı blok şeması.....	37
Şekil 5.6. Rüzgar türbin modellemesinde kullanılan parametrelerin gösterimi	38

Şekil 5.7. Kule çevresinde rüzgar hız dağılımı	39
Şekil 6.1. Mevsimlere göre rüzgar gülü diyagramı	45
Şekil 6.2. Rüzgar hız histogramı ve Weibull diyagramı	48
Şekil 6.3. Farklı kanat kule arası mesafe değerlerinde kule etkisi değişimi	49
Şekil 6.4. Kanatlarda meydana gelen rüzgar kayması değişimi	50
Şekil 6.5. Farklı kule yüksekliği değerlerinde rüzgar kayma değişimi	51
Şekil 6.6. Farklı kanat-kule arası mesafelere göre elde edilen rüzgar gücü ve bozuk rüzgar gücü değerleri	55



ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. 2017 Ülkeler bazında kurulu güç kümülatif kapasitesi	12
Çizelge 3.2. Bölgelere göre rüzgar kayma katsayısı değerleri	18
Çizelge 5.1. Bölgelere göre pürüzlülük sınıfı ve pürüzlülük uzunluğu	41
Çizelge 6.1. İstatiksel analiz metodları için referans bölgeye göre RMSE değerleri	45
Çizelge 6.2. Referans bölgenin mevsimsel rüzgar hızı karakteristiği.....	46
Çizelge 6.3. Mevsimlere ve belirlenen kule yüksekliklerine göre hesaplanan rüzgar kayma katsayıları	48
Çizelge 6.4. Farklı kanat-kule arası mesafelerde kule etkisi değişimi.....	49
Çizelge 6.5. Farklı kule yüksekliği değerlerinde rüzgar kayma değerleri değişimi	50
Çizelge 6.6. Farklı kule yüksekliği ve mevsimler için hesaplanan bozuk rüzgar hızı değerleri	52
Çizelge 6.7. Farklı kule yüksekliklerine extrapolere edilen rüzgar hızı değerleri	52
Çizelge 6.8. Türbin için elde edilen rüzgar gücü eşitlikleri için RMSE ve R^2 değerleri	55
Çizelge 6.9. Türbin güç değerleri	55
Çizelge 6.10. Bozuk türbin gücü değerleri	56
Çizelge 6.11. Mevsimsel rüzgar kayıpları	57

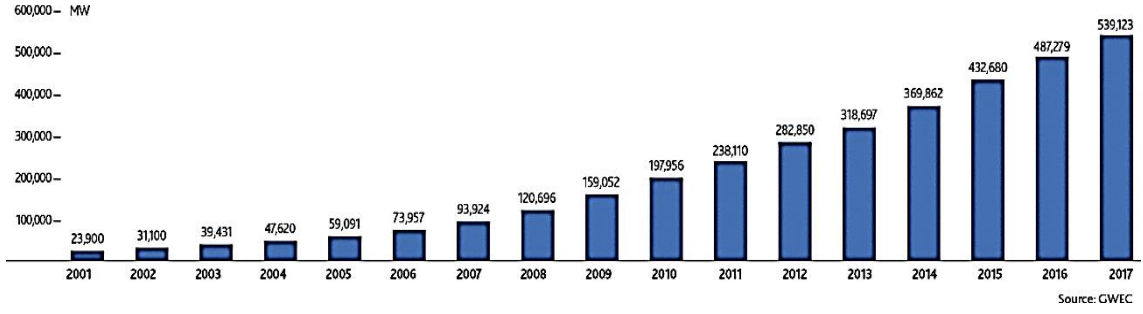
1. GİRİŞ

Enerji kaynaklarının optimal ve akıllı kullanımı geliştirmekte olan ülkeler için vazgeçilmez hale gelmiştir. Bu sayede ihtiyaç duyulan enerji gelecek nesillere aktarılabilir hale gelmiştir. Birçok çalışma fosil yakıtların yakın gelecekte tükeneceğini ve fosil yakıtların kullanımının küresel ısınmaya neden olan sera gazı gibi birçok zararlı salımlara yol açtığını göstermektedir (Sinha ve Chandel, 2015; Kuang ve ark., 2016). Sera gazı etkisini azaltmak ve fosil yakıt rezervlerini korumak için yenilenebilir enerji kaynakları hem yerel hem de bölgesel olarak birçok ülke tarafından kullanılmaktadır. Yakıt esnekliği, müşteri hizmetleri gereksinimleri, düşük maliyet avantajları ve güvenlik gibi faktörler, enerji yatırımcıları tarafından yenilenebilir enerjiyi tercih etmede önemli rol oynamaktadır. Enerji alanında yapılan tüm çalışmalara rağmen dünya genelinde şebeke bağlı elektrik kullanmayan iki milyardan fazla insan bulunmaktadır (Rehman ve ark., 2013).

Yenilenebilir enerji kaynakları, rüzgar, güneş, biyokütle, hidro, jeotermal ve okyanus kaynakları (deniz akıntıları, okyanus termal enerjisi, gelgit, dalga ve tuz gradyanından oluşan) gibi enerji türlerinden oluşmaktadır. Rüzgar enerjisinin sürdürülebilir, yerel, yenilenebilir ve yatırımda daha fazla getirisi olmasından dolayı diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla geliştirmekte olan ülkelerde kullanımı çok hızlı bir şekilde artmaktadır (Lia ve ark., 2018).

Küresel rüzgar gücünün yıllık kümülatif büyüme kapasitesi, 2016 yılıyla karşılaştırıldığında yaklaşık 52 GW'lık (%10.6) bir büyüme ile 2017 yılının sonunda Şekil 1.1'de görüldüğü gibi 539 GW'a ulaşmıştır (GWEC (Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi)), 2017). Çin, rüzgar gücü piyasasına 2017 yılında 19.666 GW'lık yeni güç ilavesi ile hakim olmuştur. 7.017, 6.581, 4.270 ve 4.148 GW'lık yeni kapasite ilaveleriyle; ABD, Almanya, İngiltere ve Hindistan sırasıyla iki, üç, dört ve beşinci sırada yer almıştır.

Ayrıca, Fransa, Türkiye, Güney Afrika, Finlandiya ve dünyanın geri kalanı, 1.694, 0.766, 0.618, 0.535 ve 5.182 GW'lık yeni rüzgar gücü kapasitesi ilaveleri ile 6. ve 10. sıralar arasında yer almıştır.



Şekil 1.1. Küresel birikimli kurulu kapasite 2001-2017 (GWEC, 2017)

Bir rüzgar santrali kurulması planlanıyorsa, bölge için fizibilite çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Son yirmi yıldır, Dünya'da rüzgar enerji potansiyeli konusunda birçok fizibilite çalışması gerçekleştirilmiştir (Chang ve ark., 2003; Rehman ve Al-Abbadi, 2005; Shata ve Hanitsch, 2006; Bekele ve Palm, 2009; Akdağ ve Güler, 2010; Fyrippis ve ark., 2010; Akdağ ve ark., 2010). Rüzgar hızı, hava yoğunluğu, hava basıncı, ortam sıcaklığı, rüzgar hızı dağılımı ve türbülans yoğunluğu fizibilite çalışmaları için oldukça önemli parametrelerdir. Rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde ise türbinin güç eğrisi ve rüzgar hızları ön plana çıkmaktadır. Rüzgar hızı yükseklikle artar. Bu nedenle daha fazla güç elde etmek için sistemlerin kurulmasında yüksek kuleler tercih edilir. Kule yüksekliği, yatay eksenli rüzgar türbinleri için zeminden türbin rotorunun merkez hattına olan mesafe olarak tanımlanır (The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living, 2018).

Bir rüzgar türbini kulesinin yüksekliğinin ne kadar olması gerektiğini belirlemede iki ana faktör vardır. İlk faktör, rüzgar hızının yükseklik ile artmasıdır. Bu nedenle rüzgar türbini, rüzgardan daha fazla güç elde etmek için daha yüksek bir kule üzerine kurulmalıdır. İkinci faktör türbülanstır. Türbülans ile türbin verimliliği azalmakta bu da elektrik üretimini düşürmektedir. Her iki durumda da stokastik ve periyodik süreçler etkilidir. Türbülansın oluşumunda etkili olan periyodik süreçlerin başlangıcında ilk olarak rüzgar kayması vardır. Dikey yükseklik değişiklikleri rüzgar hızının değişmesine neden olur. Bu durum rüzgar kayması olarak tanımlanır. Diğerisi ise kule etkisidir. Kule etkisi, bir kulenin varlığına bağlı olarak rüzgar hızının yeniden düzenlenmesini gerektirir (Wen ve ark., 2017). Rüzgar türbini çıkış gücünde ve aerodinamik yüklerdeki periyodik dalgalanmalar, rüzgar kayması ve kule etkisi nedeniyle meydana gelir. Son yıllarda araştırmacılar tarafından kule etkisi ve rüzgar kayması hakkında birçok çalışma yapılmıştır.

Bu alışmada; Tokat Gaziosmanpaşa niversitesi yerleşkesinde kurulan rüzgar ölüm istasyonundan 2017 yılı boyunca elde edilen rüzgar verileri kullanılarak kule etkisi ve rüzgar kayması parametrelerinin rüzgar gücüne, türbin gücüne ve oluşacak enerji kayıplarına olan etkisi incelenmiştir. Ölüm istasyonunun üzerine yerleştirilen AIR-X 400 W rüzgar türbini referans alınarak oluşturulan farklı senaryolar ışığında kule etkisi ve rüzgar kayması parametrelerinden kule etkisinin daha baskın olduğu ortaya çıkmış olup özellikle de kanat-kule arası mesafenin bu parametrede etkili bir değişken olduğu tespit edilmiştir.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Sintra ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada rüzgar enerjisinde etkili olan rüzgar kayması ve kule etkisi parametrelerini modellemişler ve MATLAB (Çok Paradigmali Sayısal Hesaplama Yazılımı ve Program Dili) programını kullanarak parametreleri simüle etmişlerdir. Rüzgar kayması ve kule etkisinin bozuk bir rüzgar hızı oluşturduğunu, bu eşdeğer bozuk rüzgar hızının da rüzgar türbinden elde edilen türbin torkunu etkilediğini görmüşlerdir. Sonuç olarak bu parametrelerin rüzgar türbinlerinin modellenmesinde ihmal edilmemesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Fırtın ve ark. (2011), Balıkesir şehrinden Ekim 2008-Eylül 2009 tarihleri arasında topladıkları verilerle yaptıkları çalışmada; 1000 kW, 900 kW ve 800 kW 'lık 3 rüzgar türbini üzerinden 10 farklı senaryo oluşturmuşlardır. Oluşturdukları bu senaryolarda özellikle rüzgar kayma katsayısı kavramının üzerinde durmuşlar ve yıllık enerji üretimine etkisini incelemişlerdir. Rüzgar kayma katsayısının yükseklikle değişen bir kavram olduğunu vurgulamışlar ve rüzgar türbini kurulacak bölgelerde sabit alınmaması gerektiğinin, yükseklikle olan ilişkisinin göz önüne alınması gerektiğinin önemini türbinlerin enerji çıkışlarındaki etkileriyle kanıtlamışlardır. Ayrıca rüzgar kayma katsayısı ne kadar küçükse elde edilen enerjinin o kadar fazla olduğunu yaptıkları hesaplamalarla göstermişlerdir. Büyük güçlü türbinlerde rüzgar kayma katsayısının daha etkili olduğunu, çıkış enerjisini küçük güçlü rüzgar türbinlerine göre daha fazla etkilediğini kanıtlamışlardır.

Wan ve ark. (2017); yüksek güçlü, n bıçaklı rüzgar türbinleri için rüzgar kayması ve kule etkisini içeren, türbin yüksekliği, kule yarıçapı, bıçak uzunluğu gibi türbin parametrelerinin detaylı incelenmesine olanak sağlayan bir modelleme sunmuşlardır. Gerekli simülasyonları yaparak rüzgar kayma katsayısı, kanat-kule arası mesafe, türbin yüksekliği, bıçak uzunluğu gibi kavramların eşdeğer rüzgar hızına olan etkilerini detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Sonuç olarak; rüzgar kayması ve kule etkisinin eşdeğer rüzgar hızı üzerinde bıçak sayısı ile periyodik olacak şekilde dalgalanmaya sebep olduğunu, türbin parametrelerinin eşdeğer rüzgar hızı üzerinde farklı etkilere neden olduğunu grafiklerle kanıtlamışlardır.

Das ve ark. (2011), bir çok çalışmada göz ardı edilen rüzgar kayması ve kule etkisini de içinde bulunduran eşdeğer rüzgar hızı için bir modelleme sunmuşlardır. Bu modellemede; rüzgar kayması ve kule etkisinin yanı sıra, rüzgar türbininin aerodinamik,

elektrik ve mekanik bileşenlerini de içeren 6 farklı durum ortaya koyarak detaylı bir inceleme gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları uygulamadan elde ettikleri sonuçlara göre ortaya çıkardıkları modellemenin doğru olduğunu kanıtlamışlardır.

Yapılan bir çalışmada; rüzgar kayması ve kule etkisinin modellemesini elde etmişler, eşdeğer rüzgar hızı üzerinde, yalnızca kule etkisi, yalnızca rüzgar kayması ve rüzgar kayması ile kule etkisinin birlikte olduğu durumlardaki etkilerini gözlemlemişlerdir. Eşdeğer rüzgar hızı formülüne göre elde ettikleri tork salınımlarında kule etkisinin rüzgar kaymasından daha baskın olduğunu görmüşlerdir. Modelledikleri tork osilasyonunun daha çok kule yarıçapı, kanat-kule arası mesafe ve kanat uzunluğuna yani daha çok kule etkisiyle bağlantılı olduğunu görmüşlerdir. Rüzgar kaymasının ise küçük dalgalanmalara neden olduğunu, ortalama torkta yaklaşık %1'lik bir azalma sağladığını açıklamışlardır (Dolan ve Lehn, 2006).

Wen ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada; 5 MW'lık 3 kanatlı bir türbin üzerinde rüzgar kayması ve kule etkisini detaylı incelemiş, kule etkisi için kule yarıçapını detaylı inceleyen bir model geliştirmişlerdir. Kule etkisi ve rüzgar kaymasının, güç dalgalanması ve güç kaybı üzerine etkilerine bakmışlardır. Türbinlerde kule etkisinin güç dalgalanmasına, rüzgar kaymasının ise güç kaybına neden olduğunu yaptıkları hesaplamalarla kanıtlamışlardır. Ayrıca güç kaybını rotor kaybı ve rüzgar çiftliği kaybı olarak detaylı incelemişlerdir.

Bardal ve ark. (2015) yaptıkları çalışmalarında; 3MW'lık bir rüzgar türbini üzerinde performans testi yapmışlar, rüzgar türbinlerinde performans ölçümü için LIDAR kullanılmasının avantaj ve dezavantajlarını incelemişlerdir ve merkez yükseklikteki hız ve rotor eşdeğer hızı arasındaki farkı belirlemişlerdir. Rotor eşdeğer hızı kullanmanın daha doğru sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. Son olarak da güç üretiminde rüzgar kaymasının ve türbülansın etkilerini incelemişlerdir.

Wagner ve ark. (2010), rüzgar kaymasının etkisini, rüzgar kaymasının yönünü ve türbülans yoğunluğunu araştırmak için aerodinamik simülasyonlar kullanmışlar ve bu kavramların güç üretimi ve güç akışı üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. LIDAR (Işık Algılama ve Değişme) kullanarak elde edilebilen rüzgar hızı ölçümlerini simule etmişler ve bu ölçümlerden eşdeğer bir rüzgar hızı elde etmenin yollarını araştırmışlardır. Ayrıca farklı rüzgar kayma katsayılarında güç çıkışlarının farklı olduğunu görmüşlerdir.

Stival ve ark. (2017) yaptıkları çalışmalarında; Kuzey Amerikada bulunan rüzgar çiftliğinden LIDAR ve SCADA (Uzaktan Kontrol ve Gözleme Sistemi) kullanarak topladıkları verilerle, rüzgar kayması ve türbülans yoğunluğunun etkilerini incelemişlerdir. Yüksek rüzgar kaymasıyla ilgili olan türbülans yoğunluğunun türbin güç çıkışının performansını etkilediğini gözlemlemişlerdir. Rüzgar kayma katsayısının yüksek giriş hızlarında 0 ile 0.2 arasında alındığını, düşük giriş hızlarında 0.4'e yakın alındığını göstermişlerdir. Ardından çok yüksek rüzgar hızlarında rüzgar kayma katsayısının göz ardı edilebileceği kanısına varmışlardır.

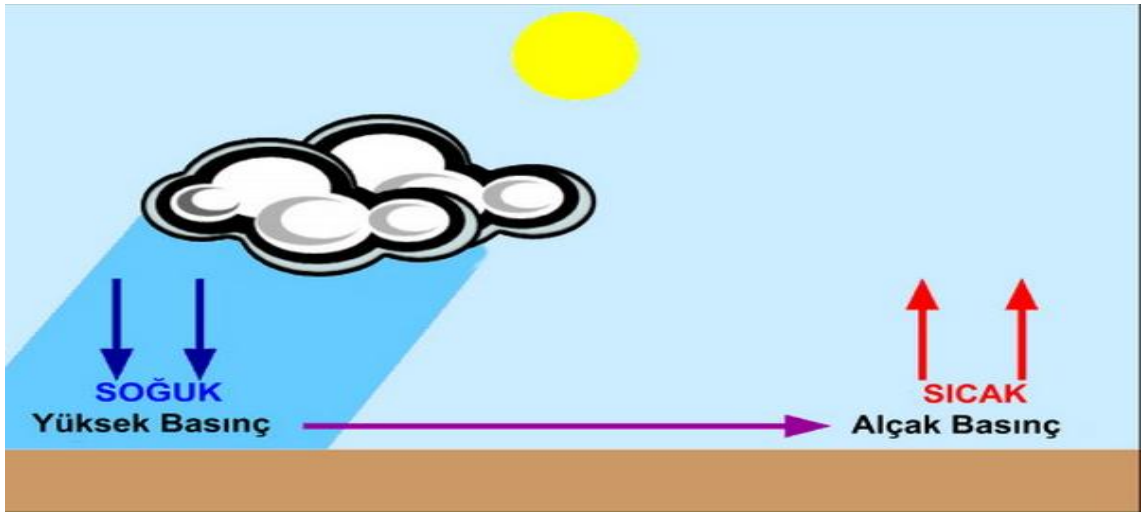
Wagner ve ark. (2011) yaptıkları çalışmalarında; rüzgar ölçümlerinin merkez yüksekliğinde alınmasının özellikle büyük güçlü türbinlerde güç çıkışı tahminlemede hassas olmayan bir yöntem olduğunu, daha doğru sonuçlar elde etmek için rüzgar kaymasını da kapsayan bir eşdeğer rüzgar hız modeli belirlenmesi gerektiğini anlatmışlardır. Rotor önündeki kinetik enerji akışını dikkate alan LIDAR yöntemiyle ölçüm yapmanın daha hassas sonuçlar verdiğini kanıtlamışlardır. Kullandıkları yeni yöntemle güç performans ölçümünü geliştirmişler, özellikle multimegawattlık türbinler için daha doğru yıllık enerji akışı tahmini sağlamışlardır.

Uzol, N.S. ve Uzol, O. (2013) yaptıkları çalışmalarında; rüzgar kaymasının varlığının rüzgar türbin çıkışlarında dengesizliklere ve rüzgar türbin rotorunda periyodik olmayan durumlara yol açtığından bahsetmişlerdir. Rüzgar kayması kavramının yatay eksenli rüzgar türbin rotoru performansı üzerine etkilerini detaylı biçimde incelemişlerdir. Sonuç olarak yaptıkları çalışmada, rüzgar kaymasının göz ardı edilmemesi gereken önemli asimetrilere ve dalgalanmalara yol açtığını görmüşlerdir.

3. RÜZGAR ENERJİSİNE GENEL BİR BAKIŞ

Rüzgar enerjisi temiz, elektrik üretimi sırasında sera gazı etkisi olmayan, asit yağmuru ve atmosferik ısınma oluşturmeyen, kaynağı rüzgar olduğu için ücretsiz yakıt sağlayan, gerekli optimizasyonlar sağlandığında düşük maliyetle yüksek verim alınan bir enerji kaynağıdır. Bu sebeplerden dolayı yenilenebilir enerji kaynakları arasında en çok tercih edilen rüzgar enerjisidir. Fosil ve yenilenemez yakıtların aksine, enerji güvenliği açısından yakıt maliyetleri ve uzun dönemli yakıt fiyatı riskleri bulunmayan, ekonomik, politik ve elde etme riskleri bakımından diğer ülkelere bağımlılığı ortadan kaldıran, yerli ve her zaman kullanılabilir bir kaynak olması rüzgar enerjisini daha da önemli bir hale getirmektedir (Özpinar, 2007). Rüzgar enerjisinin temel kaynağı tükenmeyen ve doğal bir temel kaynak olan güneştir. Güneş sayesinde ısıl potansiyel farklarına sahip hava kütleleri oluşur. Bu hava kütleleri daha soğuk ve yüksek basınç alanından daha sıcak ve alçak basınç alanına hareket ederler ve bu şekilde rüzgar oluşumu sağlanır (Emeksiz, 2014).

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi soğuyan hava alçalır ve yüksek basınç alanı oluşturur. Isınan hava yükselir ve alçak basınç alanı oluşturur. Hava kütleleri yüksek basınç alanından alçak basınç alanına hareket ederek sürekli bir döngü oluşturur. Hava kütleleri arasındaki sıcaklık ve basınç farkı ne kadar fazlaysa oluşan rüzgar hızı da o kadar fazla olur. Bu şekilde basınç farklarının yüksek olduğu bölgeler arasında rüzgar potansiyelinin de yüksek olması beklenir (MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü), 2018).



Şekil 3.1. Rüzgar oluşumu (MGM, 2018)

3.1. Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi ve Gelişimi

Rüzgar enerjisinin kullanımı yaklaşık olarak M.Ö (Milattan Önce) 2800'lü yıllara kadar dayanmakta ve ilk olarak Orta Doğu'da kullanıldığı bilinmektedir (Anonim-1, 2018). Başlangıçta rüzgar enerjisi, elektrik enerjisi üretminden ziyade tarım alanlarının sulanması, yel değirmenleri ve yelkenli gemilerin hareketinde kullanılmaktaydı. Elektrik enerjisi üretme amaçlı ilk rüzgar türbini kullanımı 19.yy'da DC (Doğru Akım) türbinin kullanımıyla Danimarka'da başlamıştır ve yaklaşık olarak kullanılan elektriğin %25'i rüzgar türbinleri tarafından üretilmiştir (Behçet ve ark., 2014). İlk rüzgar türbini Paul La Cour adlı bilim adamı tarafından 23 metre çapında, 18 kW gücünde ve 4 kanatlı olarak 1891 yılında Danimarka'da tasarlanmış ve ardından Amerika ve Almanya'da daha yüksek güçlerde türbin kurulumları 1900'lü yıllarda yaygınlaşarak devam etmiştir (Ünsalver, 2008). O dönemde kullanılan türbinlerden elde edilen elektrik enerjisi miktarı teknolojik yetersizliklerden dolayı düşüktü. Ancak artan teknolojik gelişme ve iyileştirmeler, enerjiye olan talebin artması, fosil yakıtların çevreye ve canlılara verdiği zararlar, doğal ve tükenmez kaynak arayışı rüzgar enerjisinden ve rüzgar türbinlerinden faydalanmayı artırmıştır.

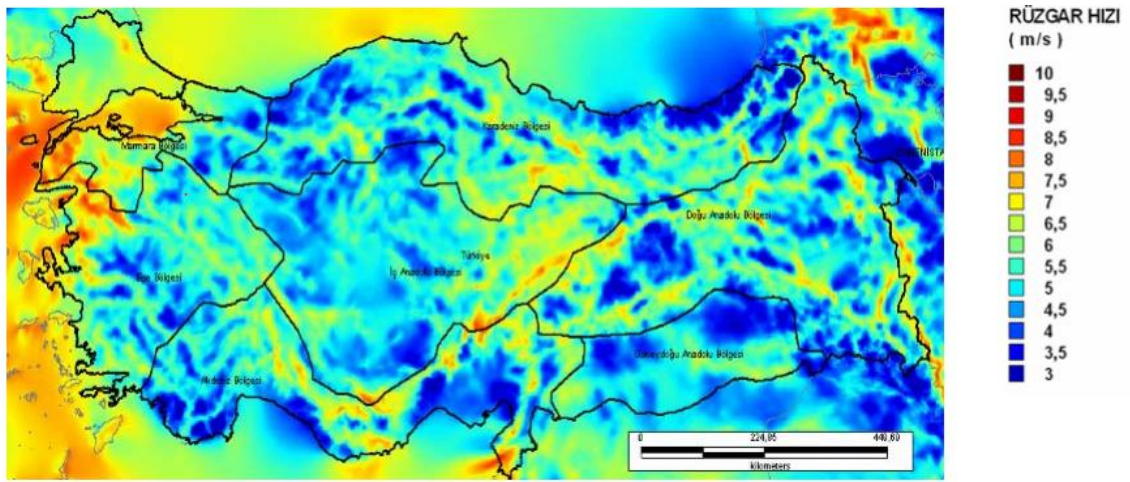
Türkiye'de ilk rüzgar enerji santrali 1998 yılında İzmir-Germiyan'da kurulmuştur. 3 türbinden oluşan ve toplamda 1.5 MW'lık kurulu güce sahip olan santral Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Daha sonra aynı yıl içerisinde 7.2 MW'lık rüzgar santrali İzmir-Alaçatı'da kurulmuştur (Öztürk ve Çelik, 2006). Ülkemizde rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu bölgelerin de belirlenmesiyle rüzgar santrallerinin sayısında hızlı bir artış gözlenmektedir.



Şekil 3.2. Türkiye'nin ilk enerji santrali Alize Germiyan (Anonim-2, 2018)

3.2. Rüzgar Enerjisinin Türkiye ve Dünyadaki Potansiyeli

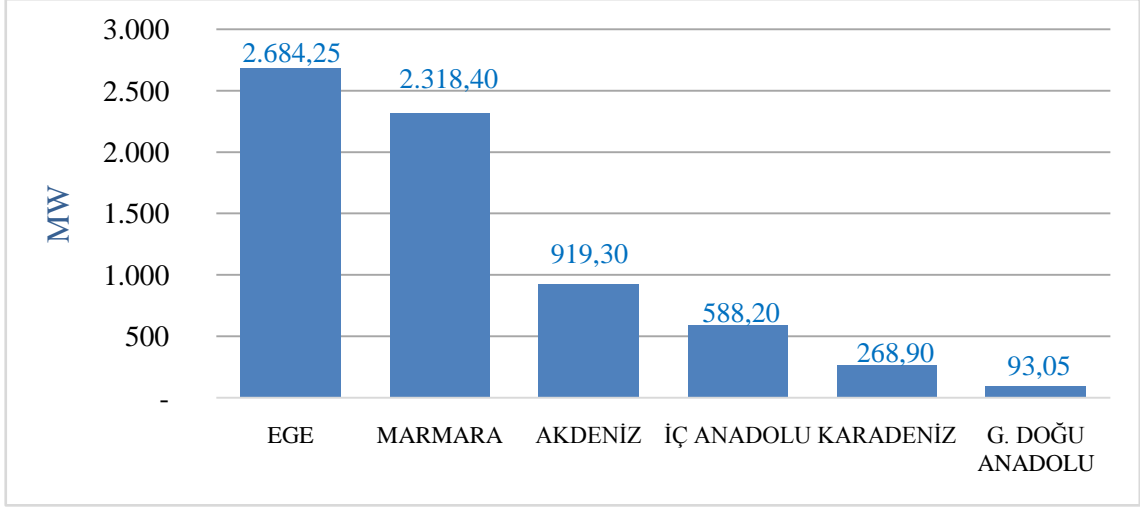
Temiz, yerel, doğal ve tükenmeyen kaynaklar arayışı ve artan enerji talebine karşı azalan fosil kaynaklar ülkemizi ve dünyayı yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yatırım yapmaya yöneltmiştir. Ülkemiz oldukça zengin yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeline sahiptir. Bu kaynaklar arasında rüzgar enerjisi ayrı bir önem taşımaktadır. Rüzgar enerjisi potansiyeli açısından ortalama rüzgar hızı dağılımları Şekil 3.3’de gösterilmektedir. Şekil 3.3 incelendiğinde Ege bölgesinin rüzgar potansiyeli yönünden daha elverişli olduğu görülmektedir.



Şekil 3.3. Türkiye 50 m. yükseklikteki ortalama rüzgar hızı dağılımı (Çalışkan, 2011)

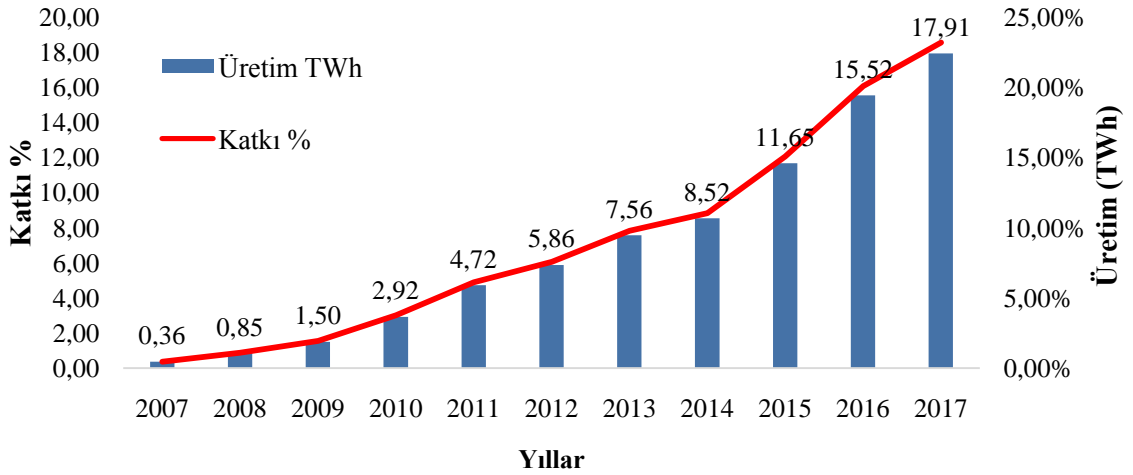
Genellikle rüzgar türbinlerinden enerji üretirken türbinlerin elektrik enerjisi üretmeye başladığı ve maksimum güç elde edildiği hız değerleri vardır. Bu değerler türbin çeşitlerine göre farklılık göstermektedir. Genellikle modern rüzgar türbinlerinde Cut-in (güç üretiminin başladığı hız değeri) hızları 3-4 m/s, Cut-out (maksimum gücün üretildiği hız değeri) hızları 25-30 m/s arasındadır (YEGM (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü), 2018).

Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği'nin 2018 yılının Ocak ayında yayınladığı rapora göre; toplamda işletmede olan 164 rüzgar enerji santrali bulunmakta ve bulunan santrallerin toplam kurulu gücü 6.872 GW' tır. Aynı raporda işletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı Şekil 3.4'deki gibi verilmiştir. Şekil 3.4'e bakıldığında kurulmuş olan rüzgar enerji santrallerinin yaklaşık %40'ı Ege bölgesinde bulunmaktadır. TÜREB (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği) İstatistik Raporu'na bakıldığında il bazında değerlendirmede RES (Rüzgar Enerji Santrali)'lerinin çoğunlukla kurulmuş olduğu ilk 5 şehrimiz sırasıyla; İzmir, Balıkesir, Manisa, Hatay, Çanakkale şeklindedir (TÜREB, 2018).



Şekil 3.4. Türkiye’deki RESlerin bölgelere göre güç dağılımları (TÜREB, 2018)

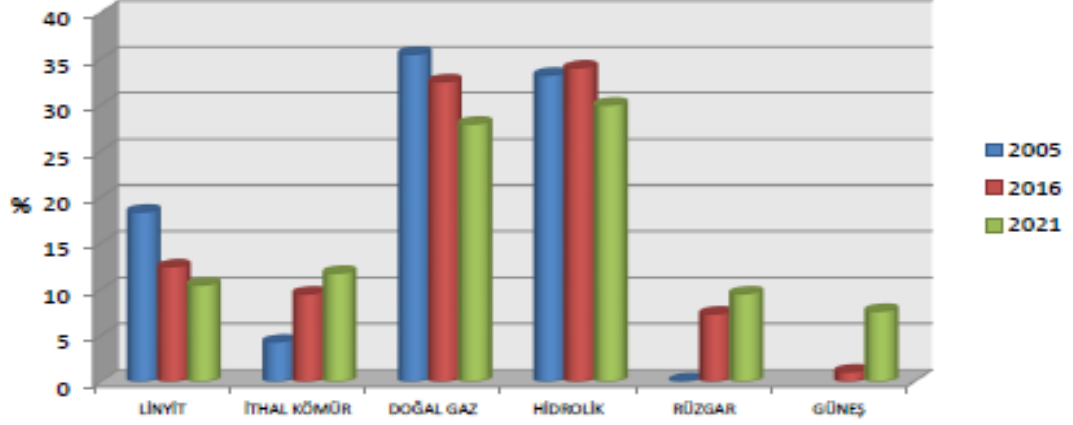
Rüzgar enerji santrallerinin elektrik üretimine olan katkısının değişimi Şekil 3.5’de gösterilmektedir. 2007-2017 yılları arasındaki değişim incelendiğinde ülkemizde rüzgar enerjisinin toplam enerji üretimine katkısı 2017 yılının Ekim ayında güncellenen verilere göre yaklaşık olarak %0.2’lerden %7’lere kadar artmıştır.



Şekil 3.5. RES’lerin toplam elektrik üretimine katkısı (YEGM, 2017)

Ülkemizde kurulum aşamasında olan rüzgar enerji santrallerimiz ile enerjideki arz-talep dengesinin sağlanması planlanmaktadır. TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) tarafından Ağustos 2017’de yayınlanan 5 yıllık kapasite projeksiyonuna göre; rüzgar ve güneş enerjisinin kurulu güç içerisindeki payının artması beklenmektedir. 2021 yılında rüzgar enerjisi payının yaklaşık olarak %9.5 olacağı ön görülmektedir

(TEİAŞ, 2017). 5 yıllık plan dahilinde kaynakların toplam kurulu güç içerisindeki paylarına ait dağılımlar Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Beş yıllık plan dahilinde kaynakların toplam kurulu güç içindeki payları (TEİAŞ, 2017)

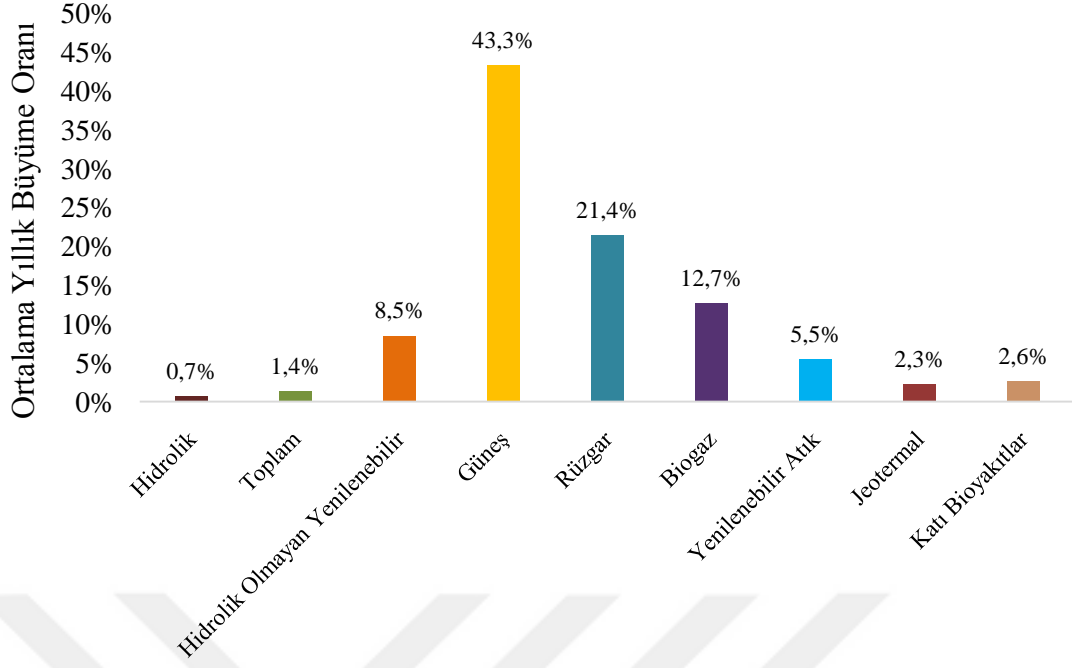
TEİAŞ tarafından hazırlanan rapora göre 2021 yılında kurulu gücün tüm kaynaklar dahil edildiğinde yaklaşık olarak 105 GW olması beklenmekte ve rüzgarın bu kurulu güce katkısının yaklaşık 10 GW olması ön görülmektedir (TEİAŞ, 2017).

Rüzgar enerjisinin dünyadaki potansiyeline bakacak olursak; bugün rüzgar enerjisi kullanan ülke sayısı 90'dan fazladır ve bu ülkelerden 9'unda 10 GW'ın üzerinde kurulu güce sahip santraller bulunmaktadır. 30 ülkede ise 1 GW'ın üzerinde kurulu güce sahip santraller mevcuttur (GWEC, 2017). En yüksek kurulu güçler için dünya çapındaki ilk 10 ülkeye bakacak olursak; Çin 2017 yılında yaptığı 19.660 GW'lık kurulu güç katkısıyla toplamda 188.392 GW'lık kurulu güce ulaşarak birinci sırada yer almaktadır. Çin dünya çapında toplamdaki 539.123 GW'lık kurulu gücün %35'ini oluşturmaktadır. Onu takip eden ülkeler ise %17'lik payla Amerika ve %10'luk payla Almanya'dır. Diğer ülkelerin kurulu güçleri ve toplam kurulu güce oranları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. 2017 Ülkeler bazında kurulu güç kümülatif kapasitesi (GWEC, 2017)

Ülke	MW	% 'lik Pay
Çin Halk Cumhuriyeti	188 392	35
Amerika Birleşik Devletleri	89 077	17
Almanya	56 132	10
Hindistan	32 848	6
İspanya	23 170	4
İngiltere	18 872	4
Fransa	13 759	3
Brezilya	12 763	2
Kanada	13 239	2
İtalya	9 479	2
Diğer Ülkeler	82391	15
Toplam TOP10	456 732	85
Dünya Toplamı	539 123	100

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın 2017 yılında yayınladığı rapor incelendiğinde; dünya çapında yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisinin elektrik üretimine etkisinin 1990-2016 yılları arasında kayda değer bir şekilde arttığı açıkça görülmektedir. Ülkemizin de arasında bulunduğu OECD (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü) ülkelerinin kullandığı yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllık ortalama büyüme oranları Şekil 3.7'de verilmiştir. Şekil 3.7 incelendiğinde %43.3'lük büyüme oranıyla güneş enerjisinin, yıllık ortalama %21.4'lük büyüme oranıyla rüzgar enerjisinin olduğu görülmektedir.



Şekil 3.7. OECD ülkelerinde 1990-2016 yılları arasında elektrik üretiminin yıllık büyüme oranları (IEA, 2017)

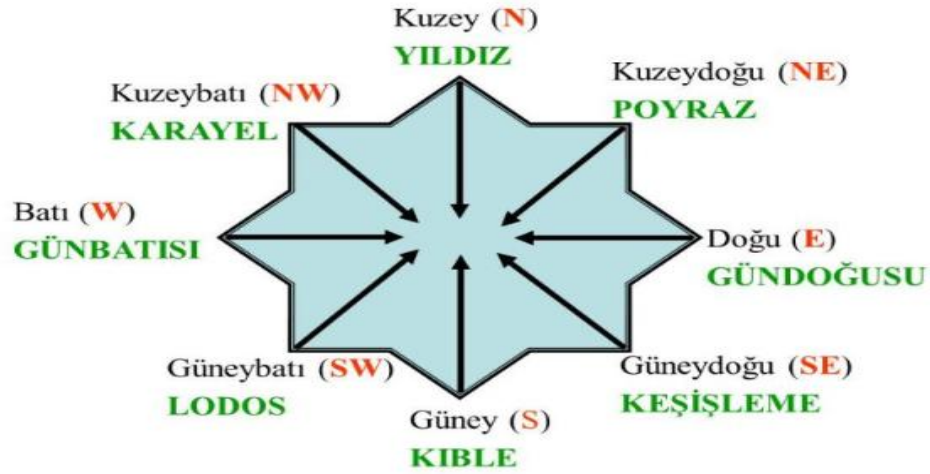
Uluslararası Enerji Ajansı'nın yayınladığı raporda yalnızca 2016 yılına bakıldığında; yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin %23.2'si rüzgar türbinlerinden üretilmiştir. 1990 yılından 2016 yılına kadar rüzgar enerjisi üretimi 3.8 TWh'ten 599.4 TWh'e çıkarılarak büyük bir gelişim göstermiştir (IEA, 2017).

3.3. Rüzgar Enerjisi ile İlgili Temel Kavramlar

Rüzgar enerjisi aralarında sıcaklık ve basınç farkı olan iki bölge arasında hava moleküllerinin hareket etmesi ile oluşur. Havadaki moleküllerin sahip olduğu ısı enerjisinin kinetik enerjiye dönüşümü olarak açıklanmaktadır. Rüzgarın oluşacağı iki bölge arasındaki topografik özelliklerin farklılığı, basınç farkı, sıcaklık farkı, dünyanın kendi eksenini etrafındaki dönüşü o bölgeler arasında rüzgar oluşumuna katkı sağlayan etkenlerdendir.

Rüzgar enerjisini belirleyen ve coğrafik konumlara göre değişiklik gösteren üç önemli parametre bulunmaktadır. Bunlar; rüzgarın yönü, rüzgarın hızı ve rüzgarın frekansıdır. Bu parametrelerin belirlenmesi bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli hakkında temel bilgiler vermektedir. Rüzgar hızı, yönü ve frekansı fizibilite çalışması yapılan bölgede kurulan rüzgar ölçüm istasyonlarıyla belirlenir. Rüzgar ölçüm istasyonlarında bu verilerin elde edilmesi için gerekli sensör ve cihazlar yer alır. Bu sensör ve cihazlardan toplanan veriler çeşitli analiz yöntemleri kullanılarak çözümlenir. İlgili bölgenin rüzgar

potansiyeli belirlenerek rüzgar enerjisi çevrim sistemlerinin kurulmasının bu bölge için uygun olup olmadığına karar verilir. Rüzgar hız ölçümü için anemometreler kullanılır. Rüzgar frekansı bir diğer deyişle rüzgarın esme sıklığı; rüzgar frekans gülleri veya rüzgar rejim diyagramları oluşturularak belirlenebilir. Rüzgar yönü anemoskop (rüzgar oku), windsock (rüzgar tulumu) veya yön sensörleri ile ölçülür (Anonim-4, 2018). Rüzgar yönleri meteorolojide kullanılan 8 farklı yön ile adlandırılır. Bu yönler Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Rüzgar yön ve isimleri (Kaya, 2016)

Yüksekte bulunan, engebesiz plato ve ovalar, basınç değişiminin fazla olduğu bölgeler, güçlü rüzgar esintilerinin etkisinde kalan zirveler ve tepeler, sürekli rüzgar alan az eğimli vadiler, fazla ısı değişimine sahip kıyı şeritleri rüzgar potansiyelinin yoğun olduğu bölgeler arasında yer alır.

Rüzgar dünya üzerindeki şekillere bağlı olan bir hava hareketidir. Rüzgarın meydana gelmesi ve havanın yeryüzünde hareket etmesi için gerekli kuvvetler vardır. Rüzgarı oluşturan ve rüzgar hızını etkileyen bu kuvvetler; gradyan kuvveti, merkezkaç kuvveti, coriolis kuvveti ve sürtüme kuvvetidir (Emeksiz, 2014).

3.3.1. Basınç gradyan kuvveti

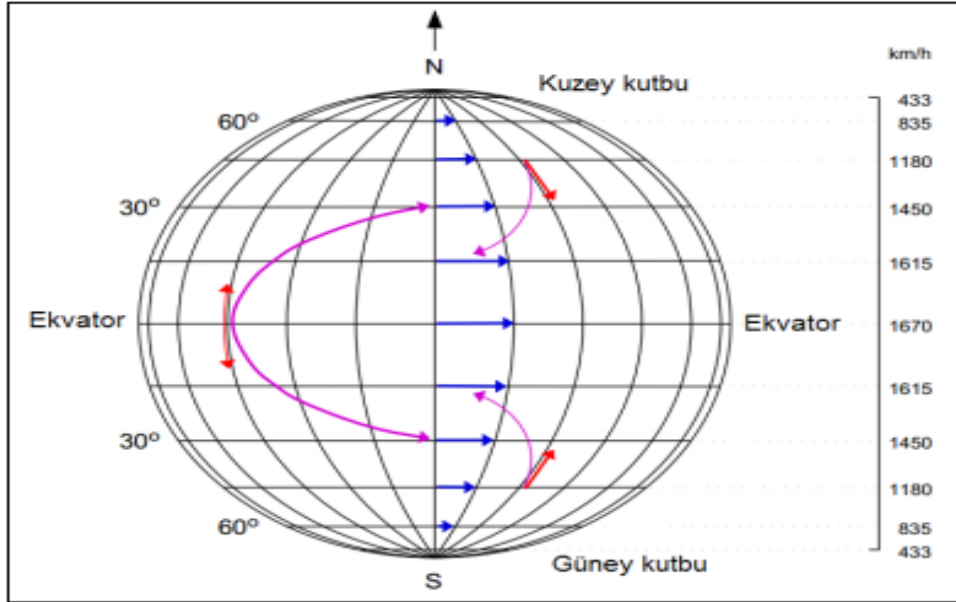
Havayı yüksek basınç alanından alçak basınç alanına hareket ettirmeye zorlayan kuvvet; basınç gradyan kuvveti olarak adlandırılır. Bu kuvvet hava akımlarının dünya üzerinde yer değiştirmesini ve rüzgarın oluşumunu sağlar. Eşitlik 3.1’de Gradyan kuvvetinin formülü verilmiştir (Demir, 2018). Burada G ; gradyan kuvveti (atm), ρ ; hava yoğunluğu (kg / m^3), ΔP ; izobarlar arası basınç farkı, h ; izobarlar arası uzunluğu temsil etmektedir.

$$G = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{h} \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1 incelendiğinde iki nokta arasındaki basınç farkı arttığında gradyan kuvvetinin de arttığı görülebilir.

3.3.2. Coriolis kuvveti

Coriolis kuvveti dünyanın dönmesinin saptırıcı kuvveti olarak da bilinir. Bu kuvvet rüzgara dik olarak etki eder ve rüzgarın yönünü değiştirebilir. Ancak rüzgarın şiddetine bir etkisi bulunmamaktadır. Genellikle büyük bölgesel alanlarda esen rüzgarlar için göz önünde bulundurulur ancak küçük ölçekli rüzgar hareketlerinde hesaba katılmaz (Taşkın, 2013). Coriolis saptırıcı kuvvetleri Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Coriolis saptırıcı kuvvetleri (Taşkın, 2013)

Coriolis kuvveti Eşitlik 3.2'de verilmiştir.

$$f_c = 2\Omega \sin\varphi \quad (3.2)$$

Burada f_c ; Coriolis kuvveti, Ω ; dünyanın açısal dönüş hızı ($7292.10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$), φ ; enlem derecesidir (Demir, 2018).

3.3.3. Merkezkaç kuvveti

Genellikle bir merkez etrafında dolanan rüzgarlar; dönme hareketinin bir sonucu olarak dönme merkezinden uzaklaştırıcı bir etkiye maruz kalır. Bu etki merkezkaç kuvvetidir.

Merkezkaç kuvveti rüzgarın yönü ve hızı üzerinde etkili olur. Basınç alanındaki basınç eğrileri yuvarlaklaştıkça havanın o yuvarlak içindeki dönüş hızı artar ve merkezkaç etkisi de fazlalaşır. İzobar eğrileri ne kadar düzleşirse merkezkaç etkisi o kadar az olur. Eşitlik 3.3'de birim kütleye etki eden merkezkaç kuvveti ivmesinin matematiksel denklemi verilmiştir.

$$\alpha = \frac{V^2}{R} \quad (3.3)$$

Burada α ; merkezkaç kuvvetinin birim kütleye etki eden ivmesi (m/sn^2), V ; rüzgar hızı (m/sn), R ; rüzgarın döner çapı olarak ifade edilmektedir (Emeksiz, 2014).

3.3.4. Sürtünme kuvveti

Sürtünme kuvveti; rüzgarın hızını yavaşlatmaya çalışan ve rüzgar oluşumunda herhangi bir etkisi bulunmayan kuvvettir. Rüzgarların yeryüzüne sürtünmesinden meydana gelir ve yeryüzüne yaklaştıkça rüzgarlar için bu etki artmaktadır. Sürtünme kuvveti türbülanslarla yükseklerle taşınmaktadır. Rüzgarların yeryüzüne sürtünmesinden dolayı oluşan sürtünme kuvveti, yeryüzünden 450-600 m yüksekliklere kadar rüzgarı yavaşlatabilir (Taşkın, 2013).

3.3.5. Kanat uç hız oranı

Kanat uç hız oranı; kanadın uç kısmındaki çevresel hızın rüzgar hızına oranıyla elde edilir. Bu değer kanat yarıçapına ve gelen rüzgar hızına bağlı olarak değişmektedir. Kanat uç hız oranı Eşitlik 3.4'te verilmektedir (Sintra ve ark., 2014).

$$\lambda = \frac{\omega r}{V} \quad (3.4)$$

Burada λ ; kanat uç hız oranı, ω ; kanatların açısal dönme hızı (rad/sn), r ; kanat yarıçapı (m) ve V ; rüzgar hızına (m/sn) karşılık gelmektedir. Türbinlerin performans analizi için kanat uç hız oranının bilinmesi gerekir. Kanat uç hız oranı bir rüzgar türbininin güç katsayısını belirlemede kullanılır. Böylelikle en yüksek güç katsayısına karşılık gelen kanat uç hız oranı belirlenir ve bu kanat uç hızına göre türbin tasarımı yapılabilir. Şekil 3.10'da kanat uç hız oranı parametreleri verilmiştir.

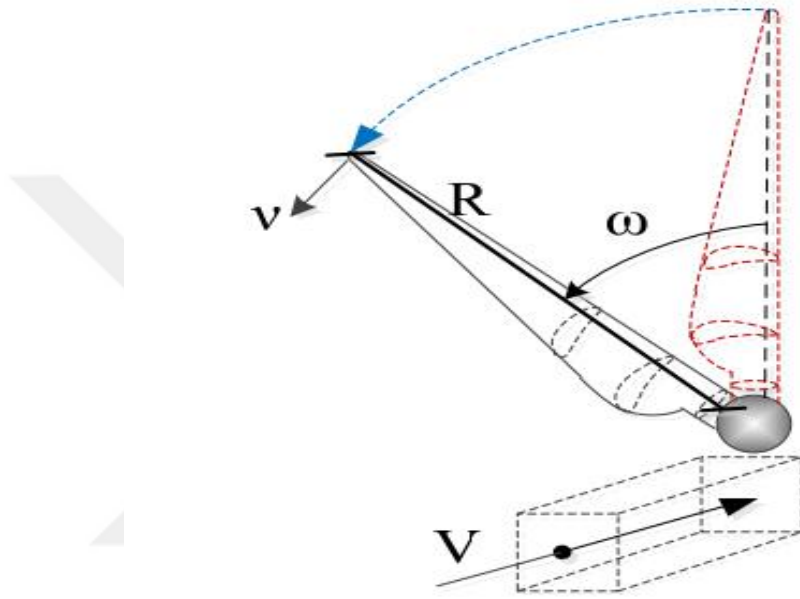
Rüzgar türbinlerinde rüzgar hızının kanat uç hız oranına bölünmesiyle kanat uç hız oranı (λ) elde edilir. Bu orana göre rüzgar türbinlerindeki kanat sayısı belirlenir.

$\lambda= 1-5$ Çok kanatlı rotor,

$\lambda= 6-8$ Üç kanatlı rotor,

$\lambda= 9-15$ İki kanatlı rotor,

$\lambda>15$ Tek kanatlı rotor kullanılır (Nurbay ve Çınar, 2018).



Şekil 3.10. Rüzgar türbinlerinde kanat uç hız oranı parametreleri (Arslan ve ark., 2017)

3.3.6. Rüzgar kayma katsayısı

Yükseklığe göre farklılık gösteren rüzgar kayma katsayısı, rüzgar kaymasının belirlenmesinde ve rüzgar hız tahminlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Hellmann yükseklik katsayısı olarak da bilinen rüzgar kayma katsayısı, belirli bir yükseklikte ölçülen rüzgar hız değeriyle farklı yüksekliklerdeki hız değerinin tahminlemede kullanılır. Rüzgar hız ölçümlerinin yapıldığı yükseklik ile rüzgar türbininin kule yüksekliğinin farklı olması durumunda Hellmann yükseklik katsayısı önemli rol oynamaktadır. Yüksekliğe bağlı rüzgar hız değişimi Eşitlik 3.5'deki bağıntı kullanılarak hesaplanabilir (Emeksiz, 2014).

$$V_r = V_{rref} \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^\alpha \quad (3.5)$$

Burada V_r ; istenilen yükseklikteki rüzgar hız değeri (m/sn), V_{ref} ; referans yükseklikteki rüzgar hız değeri (m/sn), H ; istenilen yükseklik (m) ve H_{ref} ; referans yükseklik (m) ve α ; rüzgar kayma katsayısıdır. Rüzgar kayma katsayısı sabit bir değer değildir. Ortalama rüzgar hızına, basınca sıcaklığa ve atmosferik koşullara göre değişiklik göstermektedir. Genelde literatürde rüzgar kayma katsayısı 0.2 ve 0.14 arasında bir değer olarak alınır. Rüzgar kayma katsayısının çeşitli bölgelere göre değişimi Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bölgelere göre rüzgar kayma katsayısı değerleri (Fırtın ve ark., 2011)

Bölge Tipi	α
Göl, okyanus ve pürüzsüz sert zemin	0.10
Düz zemin ve açık alanlar	0.15
Uzun boylu bitki ve çalılık alanlar	0.20
Çok ağaçlı ormanlık alanlar	0.25
Ağaçlık alan ve çalılardan oluşan şehir alanı	0.30
Yüksek binalı şehir alanı	0.40

3.3.7. Rüzgar gücü

Rüzgar enerjisinden verimli bir şekilde yararlanmak istiyorsak öncelikle belirlememiz gereken o bölgede rüzgarın potansiyel gücüdür. Rüzgar gücü ortamdaki hava yoğunluğuna bağlıdır ve hava yoğunluğunun değişimiyle doğrusal olarak değişir. Hava yoğunluğu; ISA (Uluslararası Standart Atmosfer) koşullarında yani +15 °C sıcaklıkta ve 1 atm hava basıncında 1.225 kg/m³’tür (Masters, 2004). Hava yoğunluğu denklemi aşağıda Eşitlik 3.6’da verildiği gibidir.

$$\rho = \frac{P.MW.10^{-3}}{R.T} \quad (3.6)$$

Eşitlikte, P; mutlak basınç (atm), R; ideal gaz sabiti, MW; havanın moleküler ağırlığı, T ise Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık değeridir (Demir, 2018).

Rüzgar türbinleri tarafından üretilen rüzgar gücü, türbin rotorunun süpürdüğü alanla orantılı olarak değişmektedir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde rotorun süpürdüğü alan Eşitlik 3.7’de verilmiştir. Eşitliğe göre; R; kanat çapı (m), A ise rotor süpürme alanını (m²) temsil etmektedir (Patel, 2006). Eşitlikten anlaşıldığı gibi, rotor süpürme alanı kanat çapının karesiyle doğru orantılı olarak değişmektedir.

$$A = \frac{\pi}{4} R^2 \quad (3.7)$$

Rüzgar enerjisi bir hava akışından meydana gelmektedir ve her akış olayında olduğu gibi rüzgar enerjisinde de bu akıştan kaynaklanan bir kinetik enerji vardır. V_1 hızı ile hareket eden, m kütledeki havanın oluşturduğu kinetik enerji denklemi Eşitlik 3.8'de verilmiştir (Emeksiz, 2014).

$$E_k = \frac{1}{2} m V_1^2 \quad (3.8)$$

Hava kütleli rüzgar türbin rotorunun süpürdüğü alana geldiğinde, hava kütledeki kinetik enerjinin bir kısmı frenlenir ve bu frenlenen enerji türbin kanatlarının çalıştırılmasında kullanılır (Çetin, 2006). Türbin kanatlarına çarpan havanın kütleli debisi Eşitlik 3.9'da verilmiştir. Burada ρ ; hava yoğunluğu, A ; süpürme alanı ve V_1 hızı temsil etmektedir.

$$\dot{m} = \rho V_1 A \quad (3.9)$$

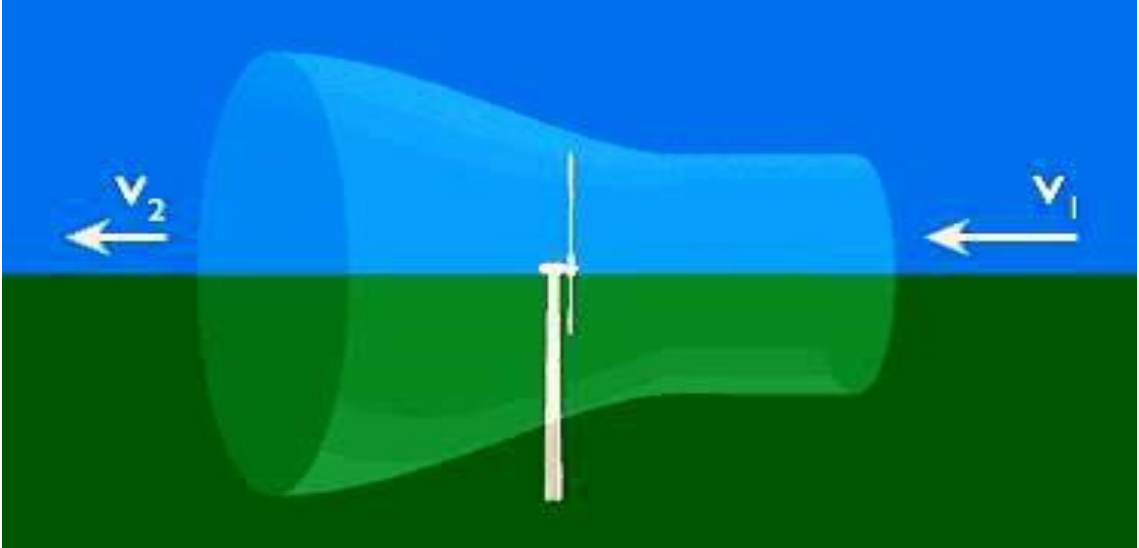
Birim zamanda yapılan işe güç adı verilir. Rüzgarın iş yapabilme yeteneği (P_r); Eşitlik 3.10'da verilmiştir.

$$P_r = \left(\frac{1}{2} m V_1^2 \right) / t \quad (3.10)$$

$dm/dt = \dot{m}$ şeklinde ifade edilip, \dot{m} yerine Eşitlik 3.9'daki formül yazılırsa; rüzgardan elde edilecek teorik güç Eşitlik 3.11'deki gibi elde edilir.

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.11 incelendiğinde, rüzgar gücü rotor süpürme alanı ve rüzgar hızının karesiyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Rüzgar türbinleri rüzgar hızını kullanırken elde edilecek gücün Eşitlik 3.11'deki teorik güç ile aynı olması mümkün değildir. Rüzgar türbinleri rüzgar gücünden elde edilen gücün en fazla %59'unu kullanabilmektedir. Rüzgar güç üretiminde önemli bir yeri olan bu yasanın ismi; Betz Kanunu olarak bilinmektedir (Kırsar, 2009). Betz kanununa göre Şekil 3.11'de rüzgar türbinine V_1 hızı ile giren gelen rüzgar hızı, V_2 rüzgar hızı ile türbinden ayrılmaktadır.



Şekil 3.11. Betz kanunu (Emeksiz, 2014)

Rüzgar türbin kanatlarına giren ve çıkan havanın enerji dengesi Eşitlik 3.12’de verilmiştir.

$$E_{kt} = E_{k1} - E_{k2} \quad (3.12)$$

Bu durumda hareket eden rüzgarın taşıdığı kinetik enerji Eşitlik 3.8’e göre düzenlenirse, Eşitlik 3.13 elde edilir.

$$E_{kt} = \left(\frac{1}{2}\right) m(V_1^2 - V_2^2) \quad (3.13)$$

Birim zamanda yapılan iş güç olarak adlandırılır. Bu durumda türbinden elde edilecek güç Eşitlik 3.14’teki gibidir.

$$P_t = \frac{E_{kt}}{t} = \frac{1}{2} \left(\frac{dm}{dt}\right) (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.14)$$

Burada $dm/dt = \dot{m}$ ile ifade edilirse; türbinden elde edilecek güç Eşitlik 3.15’teki gibi olur.

$$P_t = \left(\frac{1}{2}\right) \dot{m} (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.15)$$

Rüzgarın türbin kanatlarında yapacağı iş aynı zamanda rüzgarın birim zamanda kanatlara uyguladığı basınca da bağlıdır. Rüzgarın türbin kanatlarına yaptığı basınç Eşitlik 3.17’deki gibidir.

$$P_t = S.V \quad (3.16)$$

$$S = \dot{m}(V_1 - V_2) \quad (3.17)$$

Eşitlik 3.15 ve Eşitlik 3.16 birbirine eşitlenip Eşitlik 3.17’de yerine yazılırsa,

$$\dot{m}V(V_1 - V_2) = \left(\frac{1}{2}\right) \dot{m}(V_1^2 - V_2^2) \quad (3.18)$$

eşitliği elde edilir. Buradan Eşitlik 3.19 elde edilir.

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (3.19)$$

Eşitlik 3.19 incelendiğinde rüzgar türbinine giren ve türbinden çıkan rüzgar hızlarının ortalaması, rüzgar türbinine gelen hızı oluşturmaktadır. Eşitlik 3.9 kullanılarak, türbinden geçen havanın kütleli debisi (\dot{m}), Eşitlik 3.15’te yerine konulduğunda Eşitlik 3.20 elde edilir.

$$P_t = \left(\frac{1}{2}\right) \rho AV(V_1^2 - V_2^2) \quad (3.20)$$

Eşitlik 3.18 ve Eşitlik 3.19 düzenlendiğinde türbin gücü ifadesi Eşitlik 3.21’deki gibi elde edilir.

$$P_t = \left(\frac{1}{2}\right) \rho A(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad (3.21)$$

P_t ve P_r değerleri birbirine oranlandığında Eşitlik 3.22’de verilen, türbin verimi olarak adlandırılan C_p elde edilir.

$$C_p = \frac{P_t}{P_r} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right) \right] \quad (3.22)$$

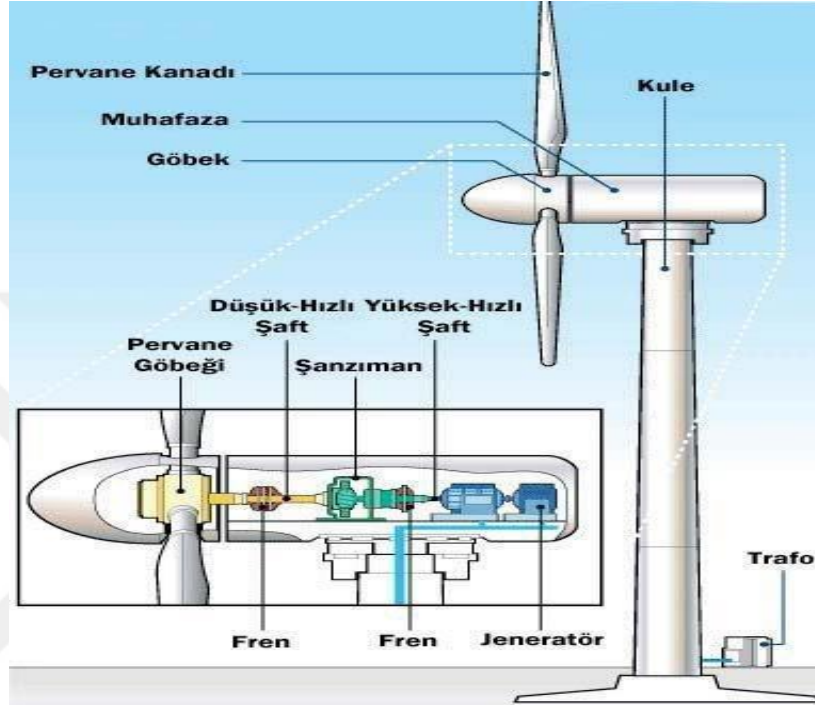
$\frac{V_2}{V_1} = n$ ile tanımlanırsa;

$$C_p = \left(\frac{1}{2}\right) (1 - n^2)(1 + n) \quad (3.23)$$

Eşitlik 3.23’ün türevi alınıp sıfıra eşitlendiğinde C_p ’yi maksimum yapan n değeri, 1/3 olarak elde edilir. Yani C_p ’nin maksimum olması için kanat tasarımının, rüzgar türbin giriş hızı rüzgar türbin çıkış hızının 3 katı olacak şekilde yapılması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu durumda rüzgar türbininden elde edilecek maksimum verim 0.5926 olacaktır. Pratikte bu oran yaklaşık % 45 olabilmektedir (Çetin, 2001).

3.4. Rüzgar Türbinleri ve Türbinleri Oluşturan Ekipmanları

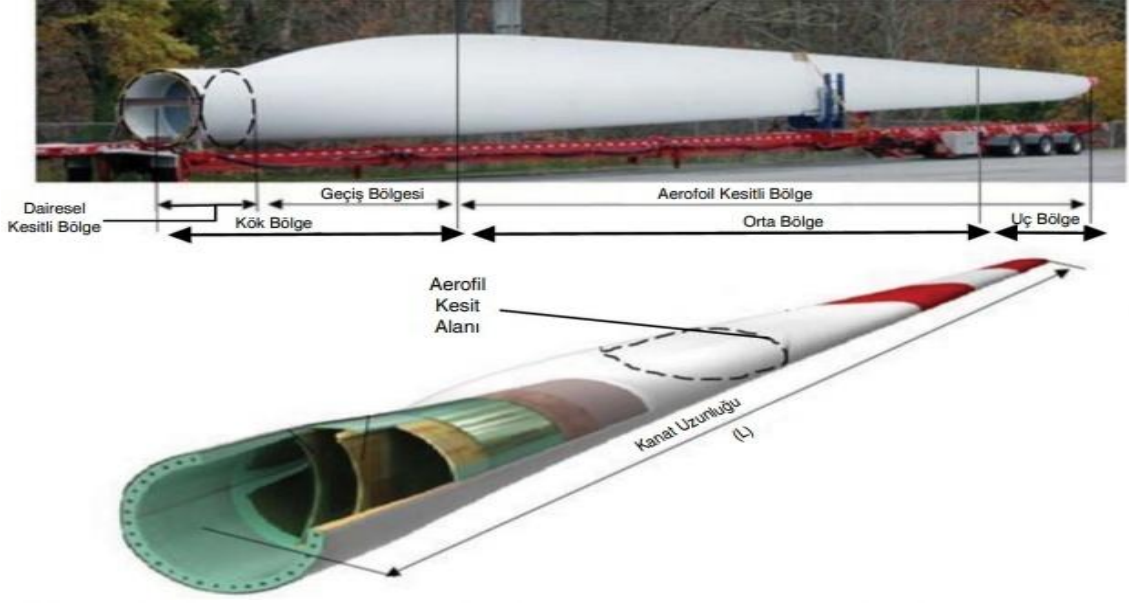
Genel olarak rüzgar türbinleri; kanat, kule, generatör, dişli kutusu, güç elektroniği ekipmanları ve kontrol sistemlerinden oluşmaktadır. Bu ekipmanlar sayesinde rüzgar hızından yararlanılarak türbinden enerji üretimi sağlanır. Şekil 3.12’de rüzgar türbinini oluşturan bileşenler verilmiştir.



Şekil 3.12. Rüzgar türbin bileşenleri (Anonim-3, 2018)

3.4.1. Kanat

Türbin kanatlarına vuran rüzgar, kanatları harekete geçirip kanatların dönmesini sağlar. Yani rüzgarın kinetik enerjisini alır mekanik enerjiye dönüştürür ve şafta iletir. Rüzgar türbin kanatları aerodinamik ve yapısal özellikleri açısından üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar kök bölge, orta bölge ve uç bölgedir. Verilen kanat bölgeleri Şekil 3.13’te verilmiştir (Kaya ve Koç, 2015).



Şekil 3.13. Rüzgar türbini kanat bölümleri (Kaya ve Koç, 2015)

Kanat kök bölgesi kanadın bağlantı bölgesinde yer alır ve en çok zorlanmaya maruz kalan bölgedir. Kanat orta bölgesi ve kanat uç bölgesi türbinin güç üretiminde önemli rol oynamaktadır.

Kanat tasarımı, kanat boyutu, uzunluğu ve yapısı rüzgar türbininin güç üretiminde etkilidir. Türbin kurulacak olan bölgeye göre bu yapı ve değerler belirlenmeli ve optimizasyonu sağlanmalıdır. Kanat seçiminde en önemli etkenlerden biriside rüzgarın kanada gelme açısına göre oluşan hücum açısını belirlemek ve bu hücum açısına göre performans analizi yapmaktır (Keleş, 2012). Kanat tasarımında aerodinamik ve mekanik özellikler önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle türbin kanadın aerodinamik tasarımı güç üretiminde etkiliyken mekaniksel dayanımlar ve mekaniksel davranışlarda etkili olan kısım; kanadın mekanik tasarımıdır (Kaya ve Koç, 2015).

3.4.2. Kule

Rüzgar türbinlerinde bulunan kuleler, türbin kanatlarının belirli bir yükseklikte kullanılmasını sağlayan, türbin rotorunu, generatörü ve kanatları taşıyan bölümdür. Bir nevi rüzgar türbini için destek görevi görmektedir. Türbinlerde kule yüksekliği güç üretiminde önemli bir etkindir. Çünkü rüzgar hızı yükseklikle artmaktadır ve daha yüksek rüzgar hızlarında daha fazla enerji üretimi sağlanmaktadır. Bu sayede türbin güç üretimini olumsuz etkileyen çevresel bileşenlerin etkisi de nispeten azaltılabilir. Ancak kule yüksekliğinin çok fazla artırılması teknik olarak mümkün değildir ve türbinin kule

yüksekliği arttıkça kurulum maliyeti de bir o kadar artmaktadır. Bu yüzden bölgeye göre optimizasyon yapmak ve maliyet analizini göz önünde bulundurmak kule yüksekliğini belirlemede önem taşımaktadır.

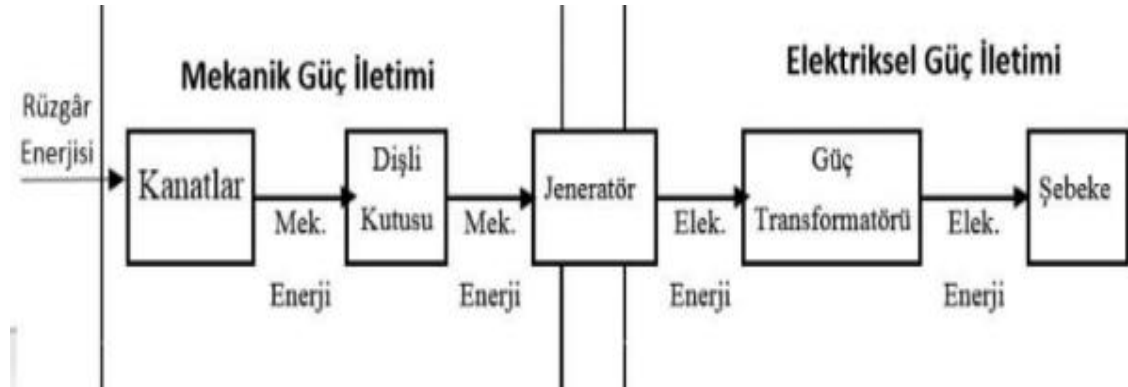
Kule tipleri; boru kesitli çelik kule, kafes sistem örgü kule ve hibrid kule (betonarme ve çelikten oluşan) olarak üç genel gruba ayrılır. Şekil 3.14’te kule tipleri verilmiştir.



Şekil 3.14. Kule tipleri sırasıyla boru kesitli, kafes örgü ve hibrid kule (Genç, 2013)

3.4.3. Generatör

Rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörler, kanatların dönmesiyle oluşan mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlarlar. Şekil 3.15’te en genel haliyle bir rüzgar türbininden enerji üretimi gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Türbinden enerji üretimi (Kaya ve Koç, 2015)

Türbinlerde kullanılan generatörler; doğru akım generatörü, senkron generatör ve asenkron generatör olabilir. Doğru akım generatörleri daha çok küçük güçlü

sistemlerde, yerel türbin kurulumlarında veya elektriğin şebekeden bağımsız kullanılmasının tercih edildiği yerlerde kullanılmaktadır. Günümüzde daha çok büyük ve orta ölçekli türbinler için senkron ve asenkron generatörler kullanılmaktadır. Asenkron generatörler maliyetlerinin düşük olması, daha ucuz olması ve bakıma daha az ihtiyaç duyulmasından dolayı türbinlerde daha çok tercih edilmektedir.

3.4.4. Dişli kutusu

Dişli kutusu, rotor milinden alınan düşük devirdeki hızı kullanılan dişli sistemlerin yardımıyla artırarak generatörün elektrik üretimi için gerekli olan devir sayısına getirir ve generatöre iletir. Dişli kutusu rüzgar türbinlerindeki en ağır ve en pahalı parçadır.

Günümüzde verimi artırmak ve maliyeti azaltabilmek için, dişli kutusunun kullanılmadığı direkt sürümlü generatörler geliştirilmektedir. Dişli kutulu generatör sistemleri; fiyat, büyüklük ve ağırlıkta daha avantajlıdır. Dişli kutusu olmayan direkt sürümlü generatörler ise enerji verimliliği, güvenilirlik ve bakım onarımda üstünlük göstermektedir (Kurt, 2011).

3.4.5. Gövde (Nacel)

Gövde; rüzgar türbinin dişli kutusu, generatör, motor gibi mekanik bileşenlerini içeren bölümdür. Rüzgar türbinin mekanik elemanlarını dış ortamdan korur. Gövde kısmının ön bölümünde rüzgar türbin rotoru, kanatlar ve kanatların bağlantı noktası bulunur.

Rüzgar türbinin gövde kısmı Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Rüzgar türbini gövde kısmı (Ömeroğlu, 2012)

3.4.6. Kontrol sistemleri ünitesi

Kontrol sistemleri ünitesi, rüzgar türbinin davranışlarını sürekli izleyerek kontrolünü sağlar ve herhangi bir arıza durumunda raporlar. İzleme ve denetleme işlemini gerçekleştirmek için kontrol sistemi ünitesi içerisinde bilgisayarlar bulunmaktadır. Bununla birlikte kontrol sistemleri içerisinde bulunan telefon modem hattı aracılığıyla türbin operatörü bilgisayarına denetim sinyalleri gönderilir (Ömeroğlu, 2012). Kontrol ünitesi rüzgar türbininin işletmesi sırasında karşılaşılan arızalı durumda türbinin çalışmasını kontrol altına alarak güvenli bir şekilde durdurulmasını sağlar.

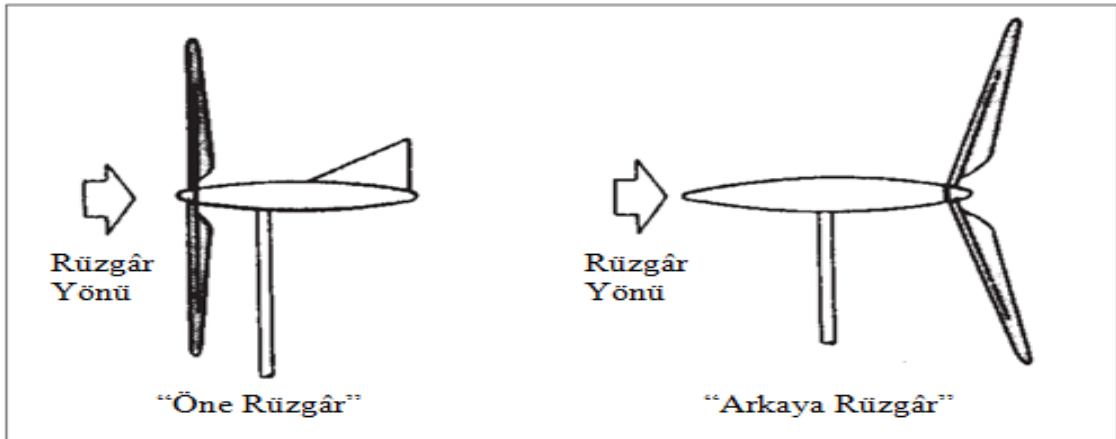
3.4.7. Rüzgar türbin çeşitleri

Rüzgar türbinleri ihtiyaca ve konumlandığı yere göre farklı tip ve boyutlarda üretilmektedir. Genellikle rüzgar türbini sınıflandırmada en çok kullanılan sınıflandırma türü; rüzgar türbinlerinin dönme eksenlerine göre yapılan sınıflandırmadır. Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar, yatay eksenli rüzgar türbinleri, dikey eksenli rüzgar türbinleri ve eğik eksenli rüzgar türbinleridir.

3.4.7.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kanatlar rüzgar yönüne dik ve dönme eksenini rüzgar yönüne paraleldir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinden alınan verim yaklaşık olarak %45 civarındadır (Elibüyük ve Üçgül, 2014).

Yatay eksenli rüzgar türbinleri rüzgarı önden alan ve rüzgarı arkadan alan türbinler olarak ikiye ayrılmaktadır. Günümüzde kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinin çoğu rüzgarı önden alan şekilde kullanılır. Rüzgarı önden alan rüzgar türbinleri kulenin varlığından kaynaklı olan rüzgar türbininin çıkış gücünde dalgalanma etkisi yaratan ve çıkış gücünü azaltan gölgelenmeden rüzgarı arkadan alan türbinlere göre çok daha az etkilenir. Rüzgarı önden alan ve arkadan alan yatay eksenli türbinler arasındaki en temel fark budur. Aralarındaki bir diğer fark ise rüzgarı önden alan türbinlerde rotoru rüzgara döndürmek için yaw mekanizmasına gereksinim duymasındır. Bu rüzgarı önden alan türbinler için bir dezavantajdır. Rüzgarı arkadan alan yatay eksenli türbinlerde kanatlar esnek bir özelliğe sahiptir ve böylece türbinin kule yükü azaltılmış olur. Ancak bu türbinler rüzgarı arkadan aldığı için kulenin varlığından kaynaklı kule gölgelenmesinden fazlaca etkilenmektedir (Ömeroğlu, 2012). Şekil 3.17’de rüzgarı önden alan ve arkadan alan yatay eksenli rüzgar türbinleri gösterilmiştir.



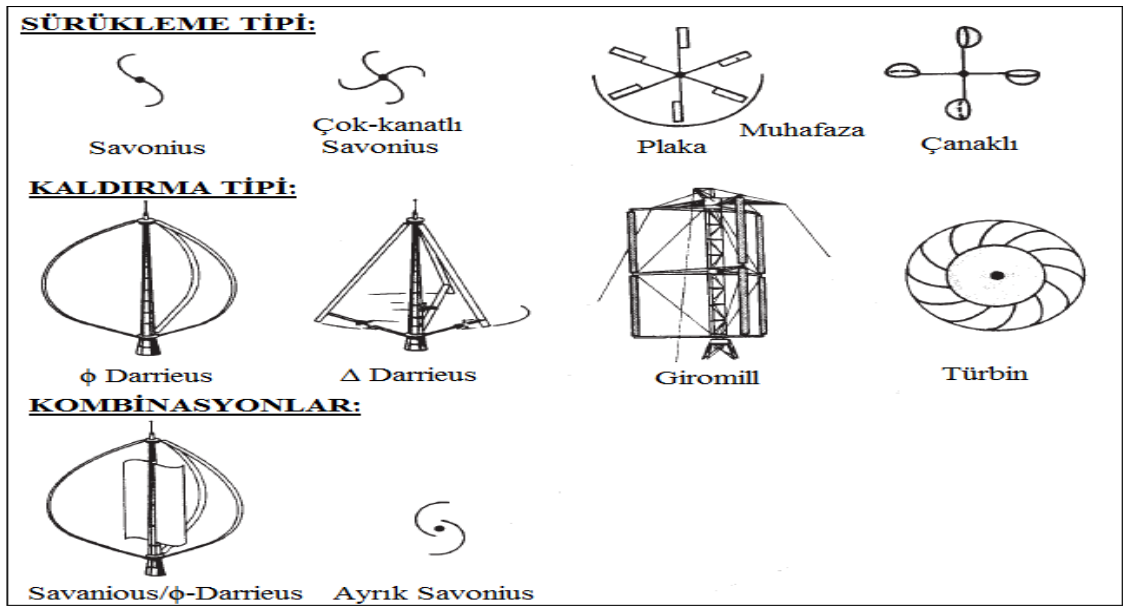
Şekil 3.17. Yatay eksenli rüzgar türbinleri (Doty ve Turner, 2007))

3.4.7.2. Dikey eksenli rüzgar türbinleri

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde türbinin dönme eksenini ve türbin kanatları düşeydir ve rüzgara diktir. Bu türbinlerde dişli kutusu ve generatör yere yerleştirilir bu yüzden kuleye ihtiyaç yoktur ve buna bağlı olarak da kurulum maliyeti azaltılmış olur. Bu bir rüzgar türbinini için avantajdır. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin bir diğer avantajı ise

rüzgarı her yönden alabilmesidir. Böylelikle türbini herhangi bir rüzgar yönüne çevirmek için yaw mekanizmasına gerek yoktur. Dezavantajı ise türbin verimliliklerinin düşük olması ve yere yakın konumlandırılmasından dolayı türbine gelen rüzgar hızının düşük olmasıdır. Bu sebeplerden dolayı dikey eksenli rüzgar türbinleri günümüzde pek tercih edilmemekte ve genelde deneysel amaçla kullanılmaktadır (Elibüyük ve Üçgül, 2014).

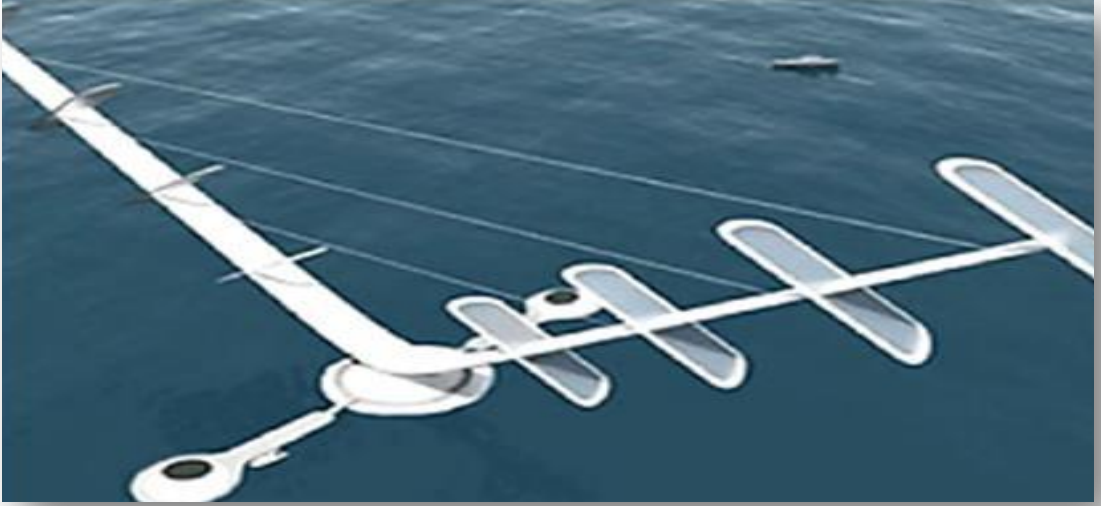
Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin en yaygın olarak kullanılanları; Savanious, Darrieus ve H-Darrieus'dur (Emeksiz, 2014). Şekil 3.18'de dikey eksenli rüzgar türbin çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Dikey eksenli rüzgar türbinleri (Doty ve Turner, 2007)

3.4.7.3. Eğik eksenli rüzgar türbinleri

Eğik eksenli rüzgar türbinlerinde türbin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı değeri bulunmaktadır. Yaygın bir kullanım alanı yoktur. Şekil 3.19'da eğik eksenli rüzgar türbini gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Eğik eksenli rüzgar türbini (Anonim-5)

4. İSTATİKSEL RÜZGAR HIZI ANALİZ METODLARI

Bir bölgedeki rüzgar hızı analiz edilirken öncelikle, rüzgar ölçüm istasyonlarından alınan rüzgar hızı verilerinin frekans dağılımları elde edilir. Bu rüzgar hızı frekans dağılımlarına göre rüzgarın en çok hangi hız değerinde ve ne sıklıkla estiği belirlenebilir. Rüzgar verileri yapılan ölçümlerin sıklığına göre kendi içerisinde saatlik, günlük, haftalık, aylık, mevsimsel ve yıllık olarak gruplandırılarak analizler gerçekleştirilebilir. Rüzgar türbinleri için modelleme yapılırken de elde edilen rüzgar dağılımlarından yararlanılır (Kurban ve ark., 2007). Rüzgar enerjisinin verimli kullanılması rüzgar türbini kurulacak olan bölgenin rüzgar karakteristiğinin doğru şekilde modellenmesine bağlıdır (Bulut ve Açıkcalp, 2013). Bir bölgede rüzgar türbinleri kurulmadan önce ilk yapılması gereken işlemlerden biri, rüzgar santrali kurulacak olan bölgenin rüzgar enerjisi üretimi için uygun olup olmadığının analiz edilmesidir. Bu bağlamda rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için kullanılan belli başlı istatistiksel rüzgar hızı analiz metodları bulunmaktadır. Bu rüzgar hızı analiz metodlarından en yaygın olarak kullanılanları; Weibull dağılımı, Gama dağılımı, Log-Normal dağılımı ve Rayleigh dağılımıdır. Yapılan literatür çalışmalarında birçok bölgenin rüzgar karakteristiğinin Weibull dağılımını sergilediği görülmüştür. Yapılan bu çalışmada da istatistiksel rüzgar hızı analizi neticesinde bölgenin Weibull dağılımında daha iyi bir sonuç vermiş ve bundan dolayı çalışmada bu dağılım tercih edilmiştir. Yapılan istatistiksel analizler neticesi bölge için uygun ve verimli türbin seçimleri yapmaya olanak sağlar.

4.1. Weibull Dağılımı

Weibull dağılımı rüzgar hızı karakteristiğinin belirlenmesinde en sık kullanılan istatistiksel analiz metodlarından biridir. Bu yöntemin sık kullanılmasının sebebi, rüzgar dağılımı için esnek bir yapı içermesi ve içerdiği parametrelerin sayısının az olmasından dolayı rüzgar hızı dağılımının kolay belirlenebilmesidir (Emeksiz ve ark., 2016).

Weibull dağılımı şekil parametresi ve ölçek parametresi olmak üzere iki parametreden oluşmaktadır. Şekil parametresi birimsizdir ve Weibull dağılımının grafiğindeki eğim şekil parametresine bağlı olarak değişir. Ölçek parametresi ise rüzgar hızıyla aynı birime sahiptir. Şekil ve ölçek parametreleri belirlendikten sonra, ortalama rüzgar hızı değeri ve ortalama rüzgar gücü yoğunluğu değeri Eşitlik 4.1 ve Eşitlik 4.2’de hesaplandığı gibi belirlenebilir (Mert ve ark. 2014).

$$v_{ort} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4.1)$$

$$P_w = \frac{1}{2}\rho c^3\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.1 ve 4.2'deki c ; ölçek parametresini, k ; şekil parametresini, $\Gamma(\cdot)$; Gamma fonksiyonunu, ρ ; hava yoğunluğunu, v_{ort} ; ortalama rüzgar hızını ve P_w ; ortalama güç yoğunluğunu ifade etmektedir.

4.2. Log-Normal Dağılımı

Log-Normal dağılımı normal olmayan dağılımların normal dağılıma benzetilmesiyle elde edilen dağılımdır. Bunun nedeni normal dağılımın kolay ve özelliklerinin iyi bilinmesindedir (Akbulut, 2018). Log-Normal dağılımı, yer parametresi ve ölçek parametresi olmak üzere iki parametreden oluşmaktadır. Log-Normal dağılımına göre ortalama hız ve ortalama güç yoğunluğu Eşitlik 4.3 ve 4.4'te verilmiştir (Emeksiz ve ark., 2016).

$$v_{log-normal} = e^{\mu + \left(\frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (4.3)$$

$$P_{log-normal} = \frac{1}{2}\rho e^{3\left(\mu + \left(\frac{\sigma^2}{2}\right)\right)} \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.3 ve 4.4'te μ ; yer parametresini, σ ; ölçek parametresini, $v_{log-normal}$; ortalama hız değerini, $P_{log-normal}$; ortalama güç yoğunluğu değerini, ρ ; hava yoğunluğunu ifade etmektedir.

4.3. Rayleigh Dağılımı

Rayleigh dağılımında ölçek parametresi kullanılmaktadır. Ortalama rüzgar hızı ve ortalama güç yoğunluğu hesabı Eşitlik 4.5 ve 4.6'da verilmiştir.

$$v_r = c\sqrt{\frac{\pi}{4}} \quad (4.5)$$

$$P_r = \frac{3}{\pi}\rho v_r^3 \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.5 ve 4.6'da yer alan, v_r ; ortalama rüzgar hızını, c ; ölçek parametresini, ρ ; hava yoğunluğunu, P_r ; ortalama güç yoğunluğunu ifade etmektedir (Emeksiz ve ark., 2016).

4.4. Gama Dağılımı

Gama dağılımı, dağılım değişkenlerinin tamamının pozitif olduğu, bu yönüyle Log-Normal dağılımıyla benzerlik gösteren istatistiksel analiz metodlarından biridir (Akbulut, 2018). Gama dağılımı, n tane üstel dağılım gösteren rassal değişkenlerin toplamını temsil eder. Burada n rassal olarak değişen rüzgar hızı gözlem değerleri bir tam sayı değeri olarak tanımlanır. Eşitlik 4.7 ve 4.8'de ortalama rüzgar hızı ve ortalama güç yoğunluklarının gama dağılımına göre değişimleri verilmiştir (Emeksiz ve ark., 2016).

$$V_{gama} = ba \quad (4.7)$$

$$P_{gama} = \frac{1}{2} \rho(ba)^3 \quad (4.8)$$

Eşitlik 4.7 ve 4.8'de yer alan, V_{gama} ; ortalama hız değerini, P_{gama} ; ortalama güç yoğunluğu değerini, ρ ; hava yoğunluğunu, a ; şekil parametresini, b ; ölçek parametresini ifade etmektedir.

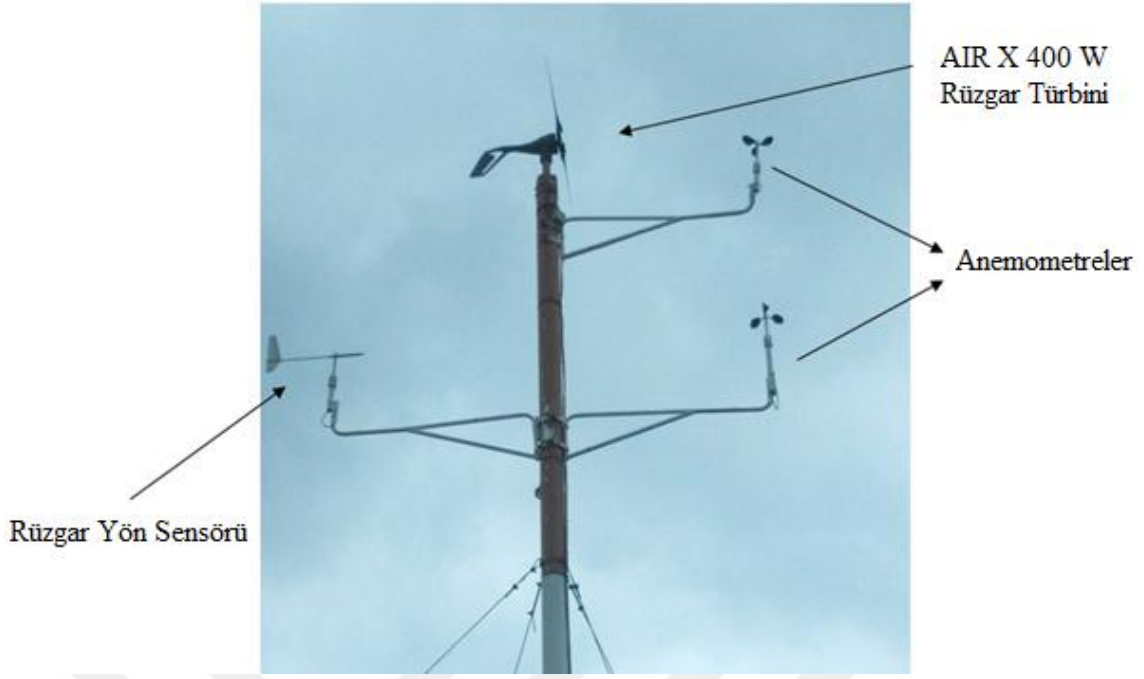
5. MATERYAL ve YÖNTEM

Uygulamada kullanılan rüzgar hız verileri Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi yerleşkesinde kurulan ölçüm istasyonundan alınmıştır. Ölçüm istasyonu ($40^{\circ}19'58.73''$) Kuzey enleminde ve ($36^{\circ}29'0.28''$) Doğu boylamında konumlandırılmıştır. Ölçüm istasyonunun konumu Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

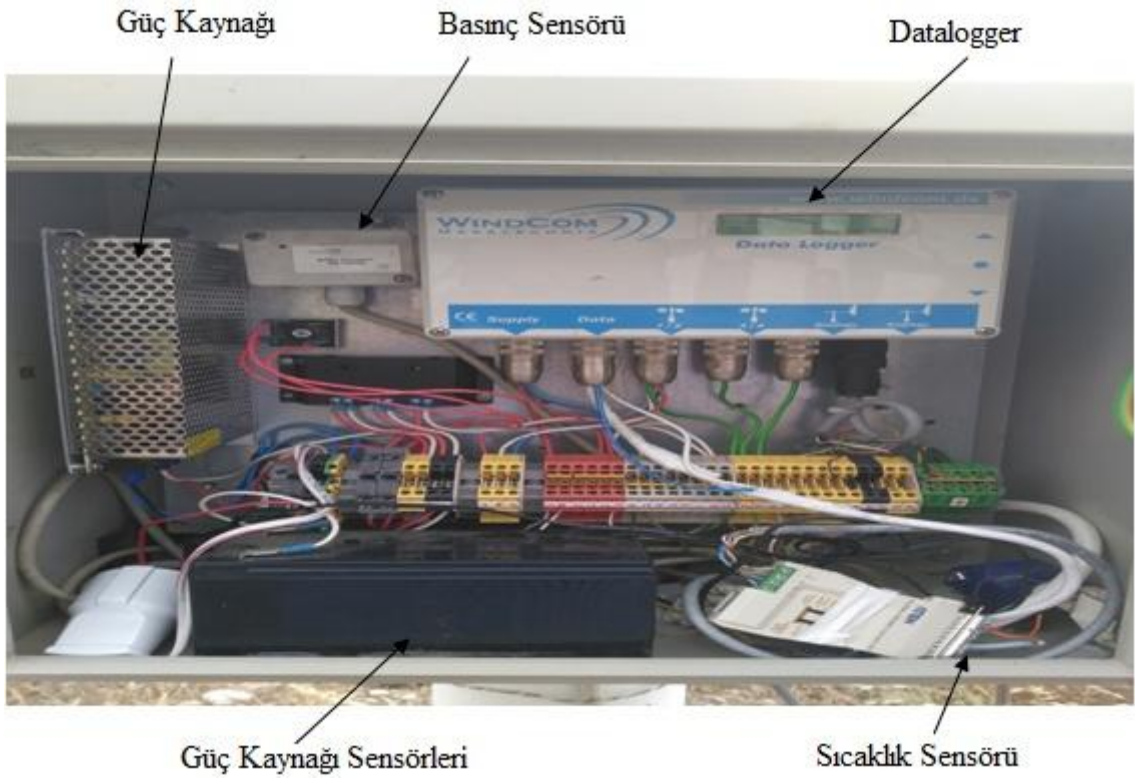


Şekil 5.1. Rüzgar hız verilerinin alındığı ölçüm istasyonunun konumu

Ölçüm istasyonu ormanlık ve tarım alanları arasında yer alan bir bölgededir. Bölgedeki bitki örtüsü kısa çalılardan oluşmaktadır. Bu durum bölgenin rüzgar kayma katsayısının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Çalışmada Şekil 5.2'de gösterilen 12 metrelik ölçüm istasyonu kullanılmıştır. Kule yarıçapı 7.33 cm'dir. Kulede iki rüzgar hız sensörü ve bir rüzgar yön sensörü bulunmaktadır. Güç kutusunda nem, sıcaklık ve basınç sensörü bulunmaktadır. Ölçüm verilerinin alındığı datalogger da Şekil 5.3'te gösterilen güç kutusunun içerisine yerleştirilmiştir. Sensörlerin enerji ihtiyacını karşılamak için 10 Watt'lık güneş paneli kullanılmıştır. AIR-X 400 W rüzgar türbini kulenin tepesine yerleştirilmiştir. Kullanılan türbinin kanat uzunluğu 55 cm'dir ve kanat-kule arası mesafesi 0.18 metredir.



Şekil 5.2. Ölçüm İstasyonu



Şekil 5.3. Güç kutusu

Bu çalışmada, rüzgar kayması ve kule etkisinin enerji üretimi üzerindeki etkilerini incelemek için 4 farklı senaryo geliştirilmiştir (S1, S2, S3, S4). Tüm senaryolar için rüzgar kayma katsayıları ve bozuk rüzgar hızları belirlenmiştir. Sonrasında referans türbinden elde edilecek olan enerji hesapları yapılmış ve bozuk rüzgar hızıyla gelen rüzgar hızı arasındaki farklara göre türbin için enerji kayıpları hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan 4 farklı senaryo aşağıda belirtildiği gibi oluşturulmuştur.

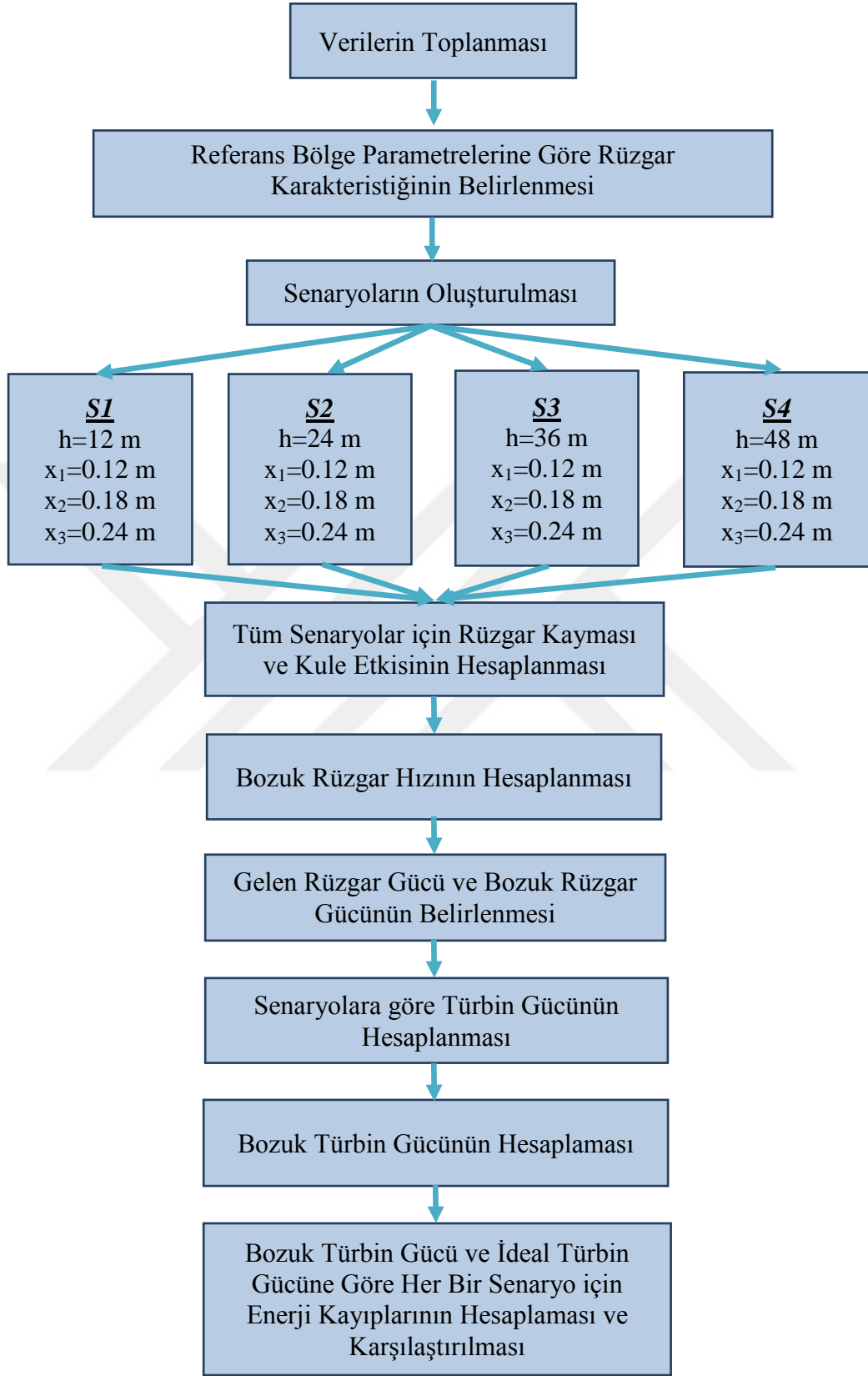
Senaryo 1: Rüzgar hızları 12 metre yükseklikte ölçülmüştür ve her mevsim için rüzgar kayma katsayısı hesaplanmıştır. Kanat-kule arası mesafe sırasıyla 0.12 metre, 0.18 metre ve 0.24 metre olarak değiştirilmiştir. Kule etkisi, rüzgar kayması ve bozuk rüzgar hızları hesaplanmış ve sonrasında enerji kaybı belirlenmiştir.

Senaryo 2: Rüzgar kayma katsayıları her mevsim için 24 metrede hesaplanmıştır. Ekstrapolere edilen rüzgar hızları, 24 metre yükseklik için hesaplanan rüzgar kayma katsayısı kullanarak hesaplanmıştır. Kanat-kule arası mesafe sırasıyla 0.12 metre, 0.18 metre ve 0.24 metre olarak değiştirilmiştir. Kule etkisi, rüzgar kayması ve bozuk rüzgar hızları hesaplanmış ve sonrasında enerji kaybı belirlenmiştir.

Senaryo 3: Rüzgar kayma katsayıları her mevsim için 36 metre de hesaplanmıştır. Ekstrapolere edilen rüzgar hızları, 36 metre yükseklik için hesaplanan rüzgar kayma katsayısı kullanarak hesaplanmıştır. Kanat-kule arası mesafe sırasıyla 0.12 metre, 0.18 metre ve 0.24 metre olarak değiştirilmiştir. Kule etkisi, rüzgar kayması ve bozuk rüzgar hızları hesaplanmış ve sonrasında enerji kaybı belirlenmiştir.

Senaryo 4: Rüzgar kayma katsayıları her mevsim için 48 metre de hesaplanmıştır. Ekstrapolere edilen rüzgar hızları, 48 metre yükseklik için hesaplanan rüzgar kayma katsayısı kullanarak hesaplanmıştır. Kanat-kule arası mesafe sırasıyla 0.12 metre, 0.18 metre ve 0.24 metre olarak değiştirilmiştir. Kule etkisi, rüzgar kayması ve bozuk rüzgar hızları hesaplanmış ve sonrasında enerji kaybı belirlenmiştir.

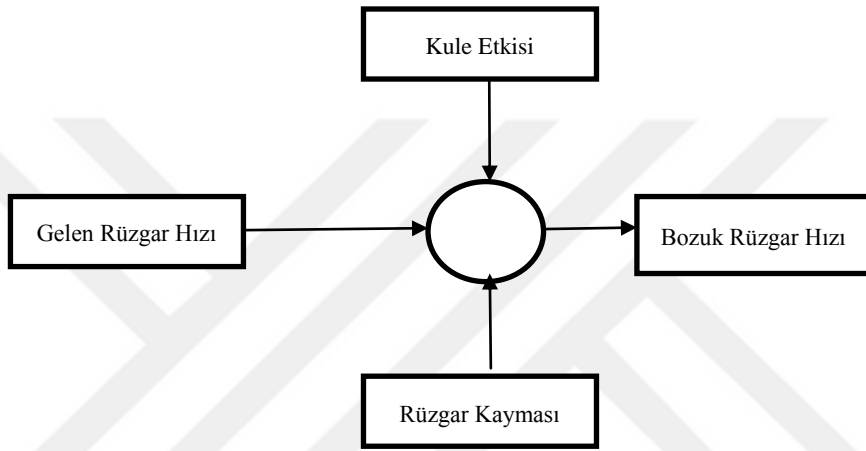
Yapılan bu çalışmanın aşamalarını belirten akış diyagramı Şekil 5.4'teki gibi oluşturulmuştur. Şekil 5.4'te h ; kule yüksekliği, x ; kanat-kule arası mesafeyi temsil etmektedir.



Şekil 5.4. Yapılan çalışmada kullanılan akış diyagramı

5.1. Rüzgar Hızı Modellemesi ve Türbin Gücünün Elde Edilmesi

Rüzgar santrali kurulacak olan bölgenin rüzgar güç potansiyelinin belirlenmesi; o bölgenin rüzgar hızının doğru modellenmesine bağlıdır. Kısacası rüzgar hız modellemesi ne kadar iyi yapılırsa rüzgar türbininden elde edilecek enerji verimi o kadar yüksek olur. Rüzgar hızı modellemesinde etkin rüzgar hızı ön plana çıkmaktadır. Literatür çalışmalarında bozuk rüzgar hızı olarak da tanımlanan etkin rüzgar hızı Şekil 5.5’de de görüldüğü gibi rüzgar kayması, kule etkisi ve gelen rüzgar hızı parametrelerinden oluşmaktadır.



Şekil 5.5. Bozuk rüzgar hızı blok şeması

5.1.1. Rüzgar kayması

Yükseklik arttıkça rüzgar hızı da artmaktadır. Rüzgar hızının yükseklikle olan bu değişimi; rüzgar türbinlerinde rüzgar kaymasına neden olmaktadır (Dolan ve Lehn, 2006). Bu kaymayla birlikte türbinde tork salınımları görülmektedir. Tork salınımları da türbinden elde edilen gücü direkt olarak etkilemektedir. Üç kanatlı bir rüzgar türbininde kanatların bir tam turu tamamlanırken; her bir kanat rüzgar hızının maksimum olduğu (kanat ucu yukarı bakarken) ve minimum olduğu (kanat ucu aşağı bakarken) noktadan geçer (Şekil 5.6). Her bir kanat minimum ve maksimum hızdaki rüzgarlardan geçtiği için rüzgar kayması kavramına bağlı olarak 3 kez tork salınımı oluşur. Rüzgar türbinlerinde kanatların tam turu sırasında yükseklik arttıkça hız artmasına rağmen kanatların dönüşü sırasında bir türbülans etkisi oluşur ve tahminlenen rüzgar hızından daha az veya daha fazla bir hız değeri elde edilir. Elde edilen bu fark rüzgar kaymasından kaynaklanmaktadır.

Rüzgar türbinlerinde rüzgar kaymasında etkili olan parametreler; türbin yükseliği (h), kanat uzunluğu (r), rüzgar kayma katsayısı (α), kanat azimut açısı (Ψ)'dir. Bu kavramlara bağlı olarak bir türbindeki rüzgar kayması (V_m) Eşitlik 5.1'de verilmiştir (Sintra ve ark., 2014).

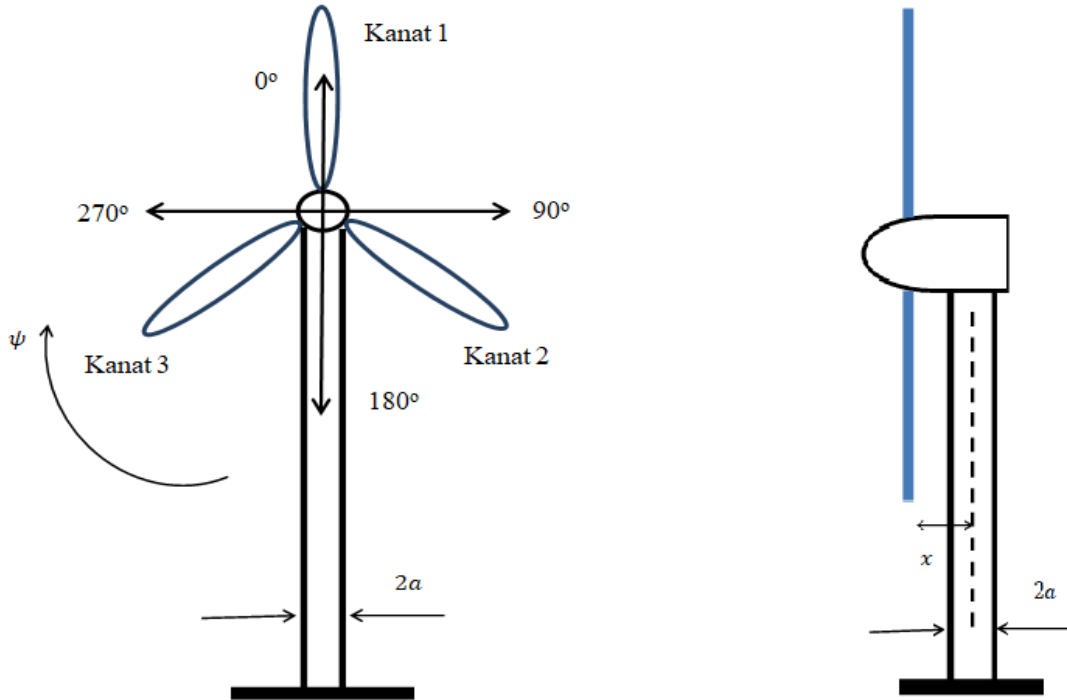
$$V_m(r, \Psi) = \alpha \left(\frac{r}{h}\right) \cos\Psi + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} \left(\frac{r}{h}\right)^2 \cos^2\Psi + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6} \left(\frac{r}{h}\right)^3 \cos^3\Psi \quad (5.1)$$

Şekil 5.6'da rüzgar türbini modellemesinde etkili olan parametreler gösterilmektedir.

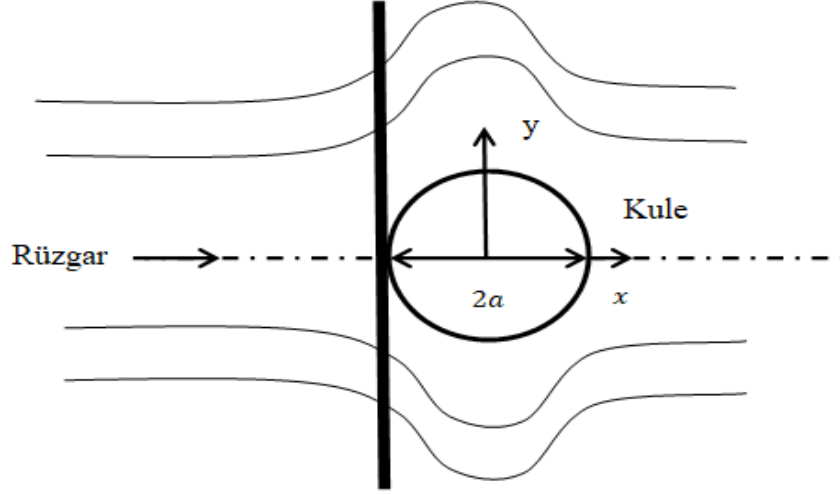
Yapılan bu çalışmada; farklı kule yükseklik değerleri ile her bir mevsim için rüzgar kaymasının hesaplanması ve rüzgar kaymasının analizi için grafiklerin elde edilmesinde MATLAB programından yararlanılmıştır.

5.1.2. Kule etkisi

Rüzgar türbinlerindeki kulenin varlığı türbine gelen rüzgar hızına etki etmekte ve kulenin etrafındaki rüzgar dağılımını değiştirmektedir. Bu durum kule etkisi olarak adlandırılmaktadır. Kulenin varlığı rüzgar hızını azalttığı için her bir kanat kule önünden geçerken tork salınımı oluşturmaktadır. Bu durum üretilen gücün doğrudan etkilenmesine neden olur. Kule etkisi Şekil 5.6'dan da görüleceği üzere yoğun olarak azimut açısının 90° ile 270° arasında olduğu durumda hava akışını etkilemektedir. Kule etrafındaki rüzgar dağılımı Şekil 5.7'de gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Rüzgar türbin modellemesinde kullanılan parametrelerin gösterimi



Şekil 5.7. Kule çevresinde rüzgar hız dağılımı

Kule etkisi Eşitlik 5.2’de verildiği gibi modellenmektedir (Sintra ve ark, 2014).

$$V_{tower}(r, \Psi, x) = \frac{a^2(r^2 \sin^2 \Psi - x^2)}{(r^2 \sin^2 \Psi + x^2)^2} \quad (5.2)$$

Bu eşitlikte, r ; kanat uzunluğu, Ψ ; kanat azimut açısı, a ; kule yarıçapı, x ; kanat-kule arası mesafeyi temsil etmektedir.

Yapılan bu çalışmada, kule etkisinin mevsimsel olarak farklı kanat-kule arası mesafeler için hesaplanması ve kule etkisinin analizi için grafiklerin elde edilmesinde MATLAB programından yararlanılmıştır.

5.1.3. Bozuk rüzgar hızı

Bozuk rüzgar hızı; rüzgar kayması, kule etkisi ve ortalama rüzgar hız değerinin birleşiminden oluşmaktadır. Bozuk rüzgar hızı, Eşitlik 5.3’te verildiği gibi formülize edilir (Sintra ve ark., 2014).

$$V_d = V_h(1 + V_m + V_{tower}) \quad (5.3)$$

Eşitlik 5.3’de V_d ; bozuk rüzgar hızını, V_m ; rüzgar kayması, V_{tower} ; kule etkisini ve V_h ; kanatlara gelen rüzgar hızını ifade etmektedir.

Yapılan bu çalışmada, tıpkı rüzgar kayması ve kule etkisinin hesaplanmasında olduğu gibi MATLAB programından yararlanılmıştır.

5.1.4. Rüzgar kayma katsayısının hesaplanması

Rüzgar kayma katsayısının rüzgar türbini kurulacak olan bölgeye göre analizi yapılarak ve türbin kule yüksekliği göz önünde bulundurularak türbin kurulacak bölge için uygun değerinin hesaplanması gerekmektedir.

Yapılan bu çalışmada, rüzgar kayma katsayısını hesaplamak için NASA (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi) araştırmacıları tarafından önerilen Eşitlik 5.4 ve 5.5 kullanılmıştır. Bu eşitliklerde hem pürüzlülük uzunluğu hem de referans yükseklikteki rüzgar hızı dikkate alınır. Bu durumda rüzgar türbini kurulacak bölge için daha doğru bir yaklaşımla rüzgar kayma katsayısının hesaplanmasını sağlar (Emniyetli, 2007).

$$\alpha = \alpha_0(1 - 0.55 \log(v_{ref})) \quad (5.4)$$

$$\alpha_0 = \left(\frac{z_0}{10}\right)^{0.2} \quad (5.5)$$

Eşitlik 5.4 ve 5.5’de yer alan z_0 ; yüzey pürüzlülük uzunluğu, α_0 ; referans bölgedeki sabit pürüzlülük katsayısı, v_{ref} ; referans yükseklikteki rüzgar hız değeri ve α ; rüzgar kayma katsayısını temsil etmektedir.

Yüzey pürüzlülük uzunluğu rüzgar hızı profilini etkilemektedir. Bu nedenle bölgenin pürüzlülük uzunluğunun doğru şekilde belirlenmesi rüzgar enerjisi alanındaki çalışmalarda önem arz etmektedir. Rüzgar haritası çalışmalarında tanımlanmış olan 4 pürüzlülük sınıfı bulunmaktadır. Bölgelerin coğrafik özelliklerine göre pürüzlülük sınıfları ve bu pürüzlülük sınıflarına denk gelen pürüzlülük uzunluğu değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir (Emniyetli, 2007). Yapılan bu çalışmada yüzey pürüzlülük uzunluğu bölge özellikleri dikkate alınarak 0.1 metre olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.1. Bölgelere göre pürüzlülük sınıfı ve pürüzlülük uzunluğu

Pürüzlülük Sınıfı	Pürüzlülük Sınıfının Özelliği	Pürüzlülük Uzunluğu z_0 (m)
0	Su alanları, deniz ve göller	0.0002
1	Düz alanlar veya yumuşak sağlam alanlar	0.03
2	Düz veya dalgalı arazi, ağaç ve bina	0.10
3	Kentsel alanlar, ormanlar ve tarlalar	0.40

5.1.5. Rüzgar türbin gücünün belirlenmesi

Türbin gücünün ve türbin enerji kayıplarının daha doğru belirlenebilmesi için referans alınan türbinin güç eğrisinden yararlanılarak güç hesabında kullanılacak iki yeni eşitlik elde edilmiştir (Eşitlik 5.6 ve 5.7). Referans alınan türbinin güç eğrisi türbin katalog bilgisinden alınmıştır.

Eşitlik 5.6 ve 5.7; regresyon analizi uygulanarak elde edilmiştir. MATLAB yazılımı ile regresyon analizinde en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Eşitlik 5.6; rüzgar hız değerleri 4.5 m/sn ve 6.8 m/sn arasında iken, Eşitlik 5.7; rüzgar hız değerleri 6.8 m/sn ve 9.5 m/sn arasında olduğunda kullanılmıştır. Bu eşitlikler türbin güç değerlerini (P_t) ve bozuk türbin gücü (P_{td}) değerlerini hesaplamak için oluşturulmuştur. Bozuk türbin gücü ve türbin gücü arasındaki fark elde edilmiş sonrasında referans türbin için mevsimsel enerji kayıpları Eşitlik 5.8'e göre belirlenmiştir. Burada E ; türbin enerji kaybını, t_e ; ise türbin çalışma süresini ifade etmektedir.

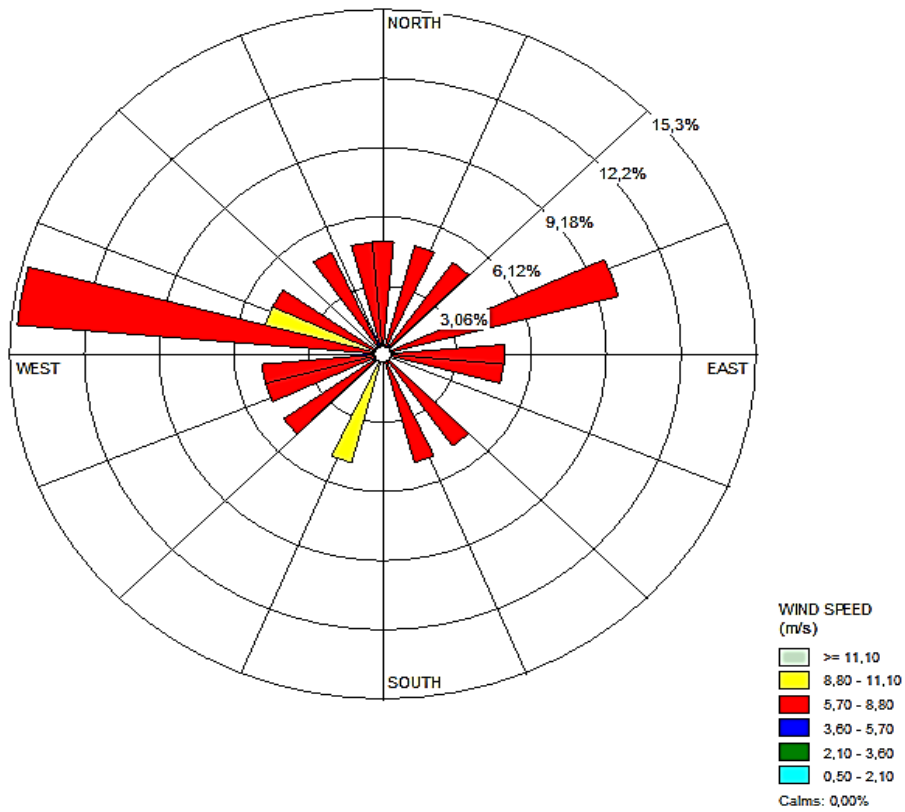
$$P = -5.266V^2 + 76.02V - 223.5 \quad (5.6)$$

$$P = 3.788V^2 - 14.39V - 27.27 \quad (5.7)$$

$$E = (P_t - P_{td})t_e \quad (5.8)$$

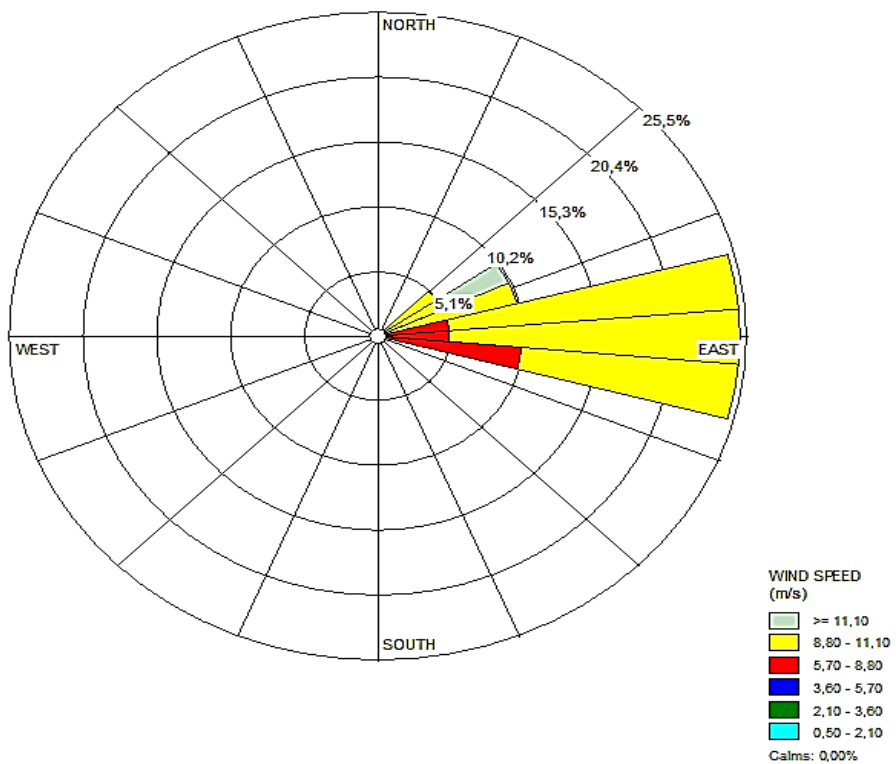
6. BULGULAR

Çalışmada kullanılan rüzgar hız verileri, 2017 yılı boyunca 10 dakika aralıklarla ölçüm istasyonunda bulunan dataloggerdan alınmıştır. Çalışma yapılacak olan bir bölgede hangi rüzgar yönünün hakim olduğunu belirlemek için rüzgar gülü diyagramları kullanılır. Yapılan bu çalışmada; referans bölgenin karakteristik özelliklerine bağlı olarak her bir mevsim için rüzgar yönleri dataloggerdan alınan rüzgar hız verilerine göre rüzgar gülü diyagramları oluşturularak Şekil 6.1'deki gibi elde edilmiştir ve elde edilen grafiklere göre her bir mevsim için referans bölgede rüzgarın çoğunlukla estiği

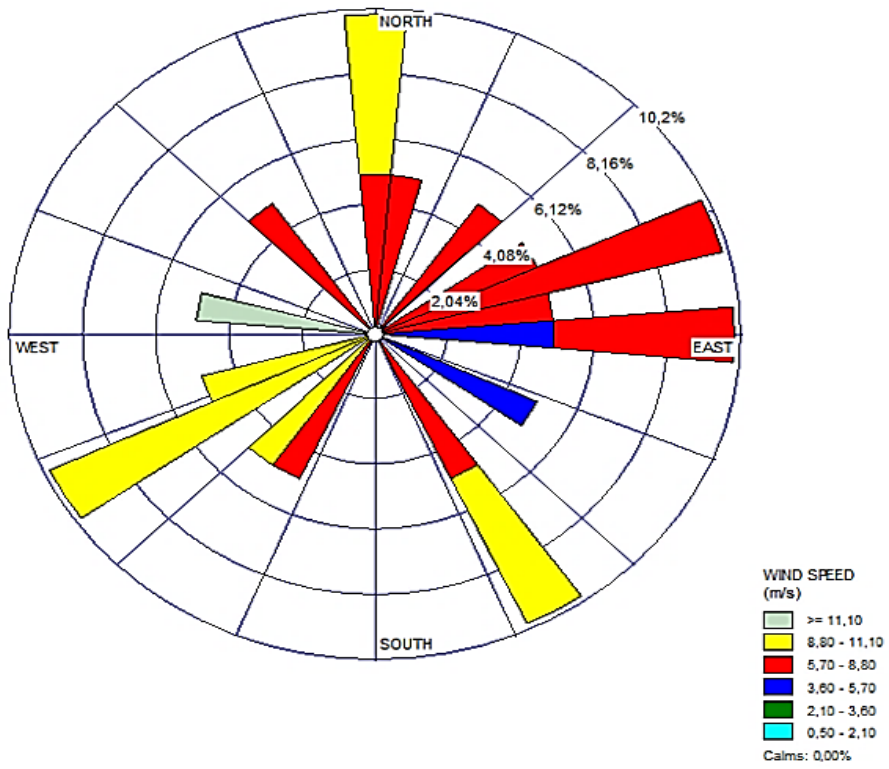


yönler grafiklere göre yorumlanmıştır.

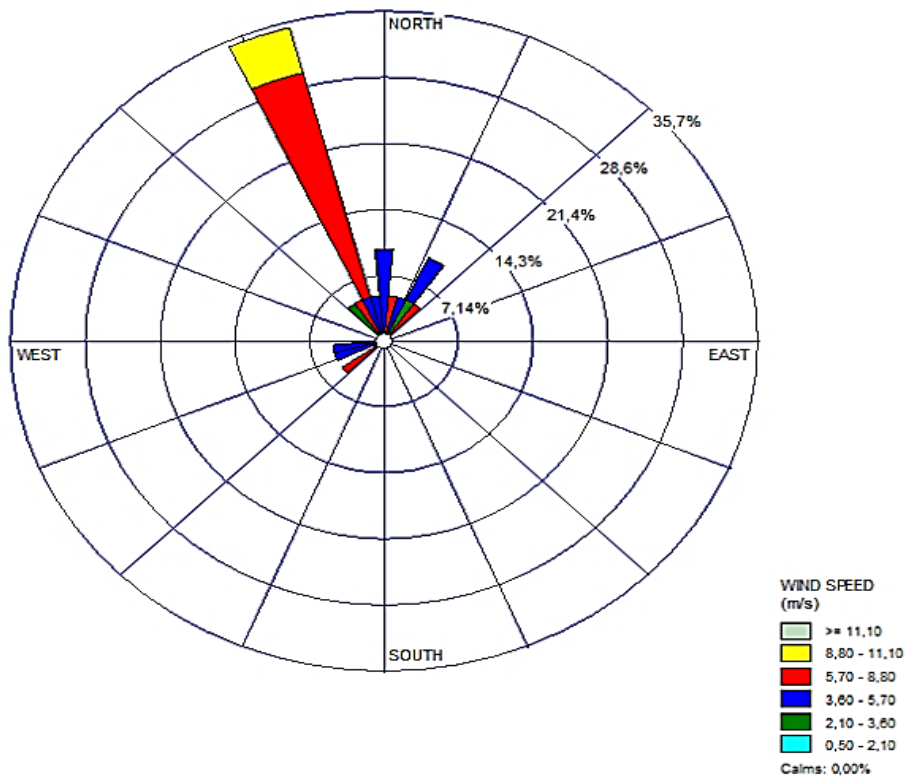
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.1. Mevsimlere göre rüzgar gülü diyagramı (a: ilkbahar, b: yaz, c:sonbahar, d: kış)

Şekil 6.1’de görüleceği üzere hakim rüzgar yönü ilkbahar ayında; Kuzey-Batı, yaz ayında; Doğu, sonbahar ayında; Güney-Batı, Kuzey-Doğu ve Kuzey ağırlıklı olarak, kış ayında ise; Kuzey-Batı ağırlıklı olarak belirlenmiştir.

Çalışma yapılan bölgenin rüzgar karakteristiğinin belirlenmesinde literatürde yaygın olarak kullanılan 4 farklı analiz metodu kullanılmış (Weibull dağılımı, Rayleigh dağılımı, Log-Normal dağılım, Gama dağılımı), her bir analiz metodunun RMSE (Ortalama hata kareleri toplamı) değerleri elde edilerek karşılaştırılmıştır. Referans bölge için RMSE değeri en düşük olan dağılım Çizelge 6.1’den görüleceği üzere Weibull dağılımıdır. Bölge için en düşük RMSE değerine sahip olan dağılım en uygun sonucu vereceği için çalışmanın tamamında en düşük hata değerine sahip olan Weibull dağılımı rüzgar hızı ve rüzgar gücü analizi için kullanılmıştır.

Çizelge 6.1. İstatiksel analiz metodları için referans bölgeye göre RMSE değerleri

	Weibull Dağılımı	Rayleigh Dağılımı	Log-Normal Dağılımı	Gama Dağılımı
RMSE	0.0040	1.3030	0.4800	0.0070

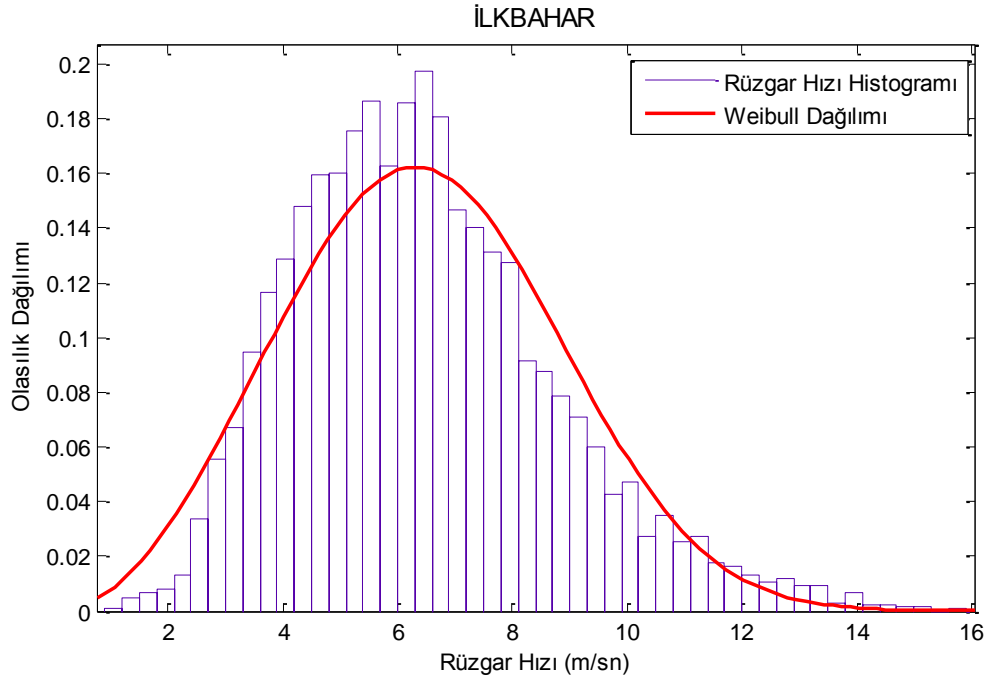
Çalışma yapılacak olan bölgenin mevsimsel rüzgar hızı karakteristiği, rüzgar hızı ölçüm direğinden alınan rüzgar hız verileri kullanılarak belirlenmiştir. Mevsimsel karakteristik; ortalama rüzgar gücü yoğunluğu, şekil parametresi, ölçek parametresi, ortalama rüzgar hızı ve standart sapma parametrelerine bağlı olarak analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları Çizelge 6.2’de verilmiştir. En yüksek ortalama rüzgar hızı verileri yaz aylarında (Mayıs, Haziran, Temmuz), en düşük ortalama rüzgar hızı verileri ise kış aylarında (Kasım, Aralık, Ocak) elde edilmiştir. Çizelge 6.2 incelendiğinde; en düşük ölçek parametresinin 6.078 m/sn değeri ile kış mevsiminde elde edildiği

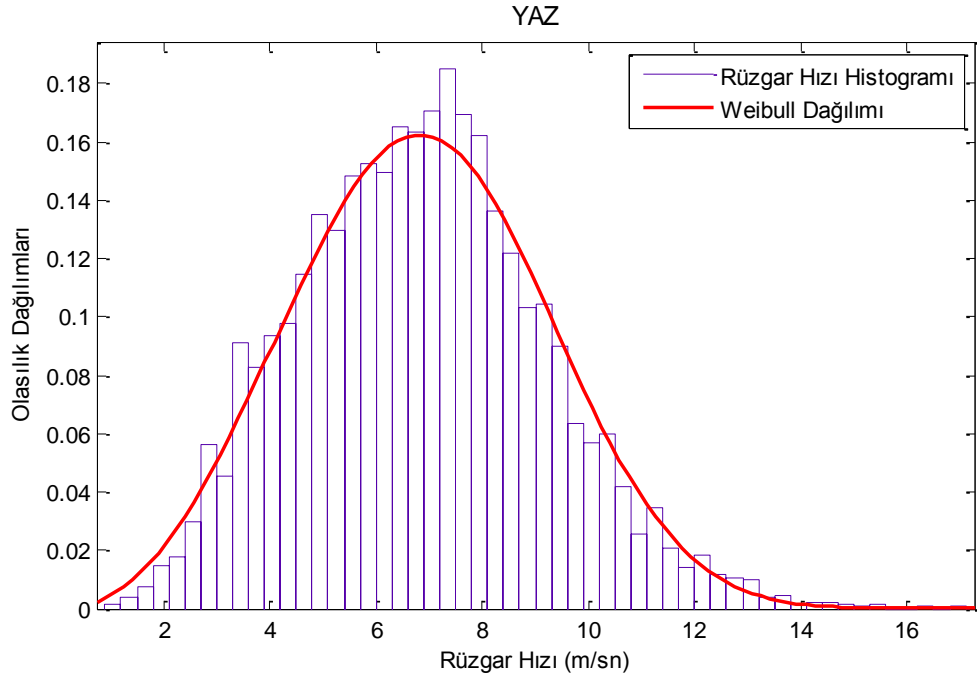
görülebilmektedir. Buna bağlı olarak en düşük ortalama rüzgar hızı verisinde kış mevsiminde olması bu durumu doğrulamaktadır.

Çizelge 6.2. Referans bölgenin mevsimsel rüzgar hızı karakteristiği

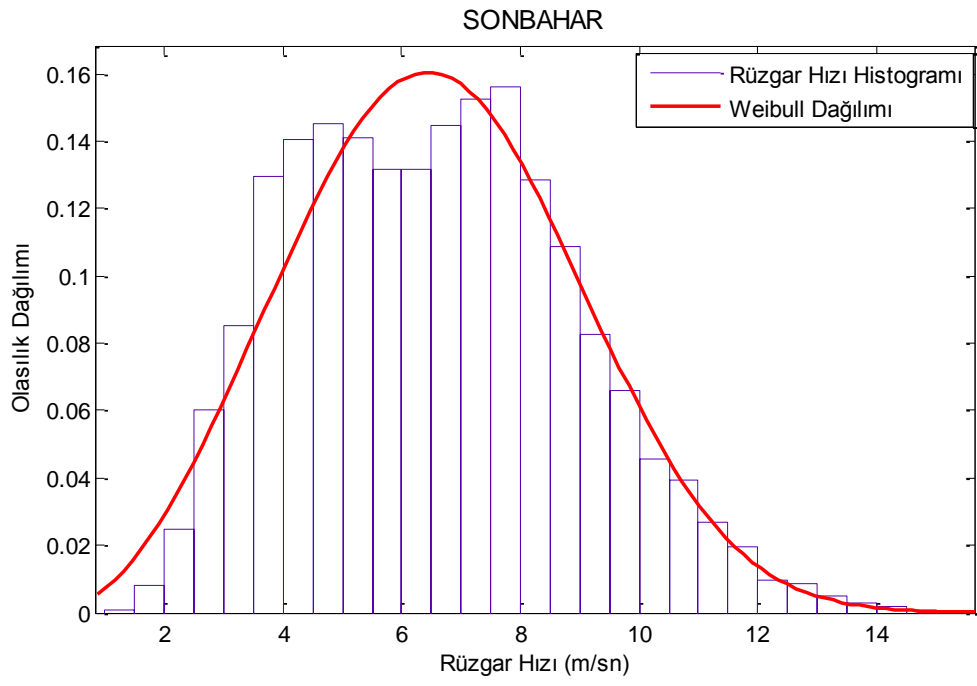
Mevsim	Ortalama Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/sn)	Ölçek Parametresi (m/sn)	Şekil Parametresi	Standart Sapma
İlkbahar	231.392	6.454	7.227	2.994	2.349
Yaz	268.650	6.865	7.663	3.2	2.351
Sonbahar	243.322	6.561	7.356	3.01	2.377
Kış	147.422	5.412	6.083	26.13	2.221

Referans bölgeden alınan rüzgar hızı verileri ile her bir mevsim için ayrı şekilde oluşturulan Weibull diyagramı Şekil 6.2' de gösterilmiştir.

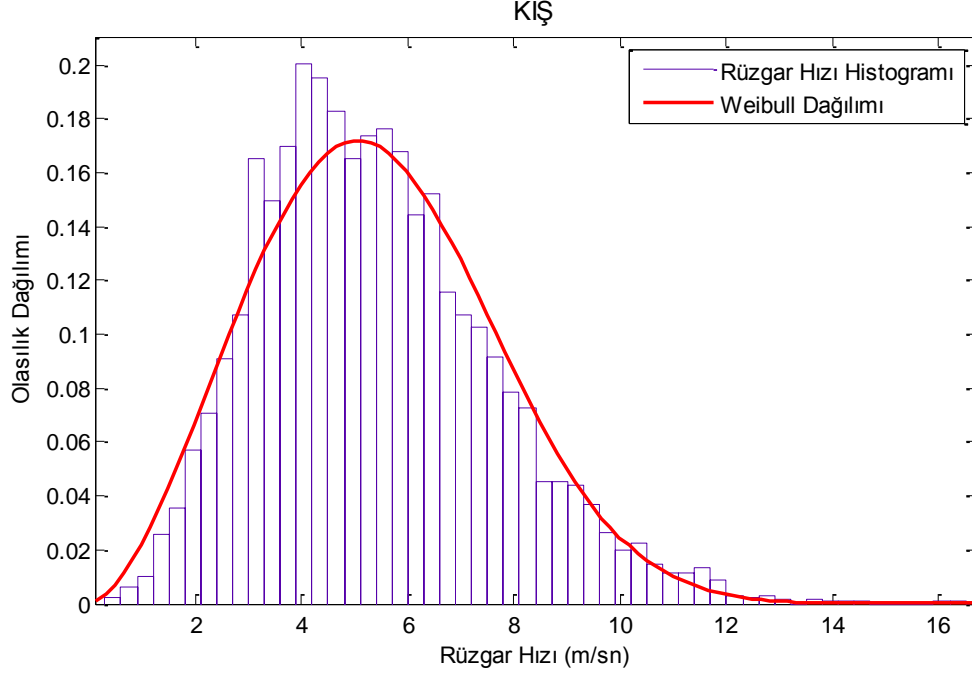




b)



c)



Şekil 6.2. Rüzgar hız histogramı ve Weibull diyagramı (a:ilkbahar, b:yaz, c:sonbahar, d:kış)

Bir sonraki aşamada her bir mevsim için senaryolarda belirlenmiş olan türbin yükseklikleri referans alınarak rüzgar kayma katsayısı değerleri hesaplanmıştır ve bu değerler Çizelge 6.3'te verilmiştir. Çizelge 6.3'ten görüleceği üzere rüzgar kayma katsayısı değeri olması gerektiği gibi yükseklik arttıkça azalmaktadır. Ayrıca en düşük rüzgar kayma katsayısı değeri ortalama rüzgar hızı değerinin en düşük olduğu kış mevsiminde elde edilmiştir.

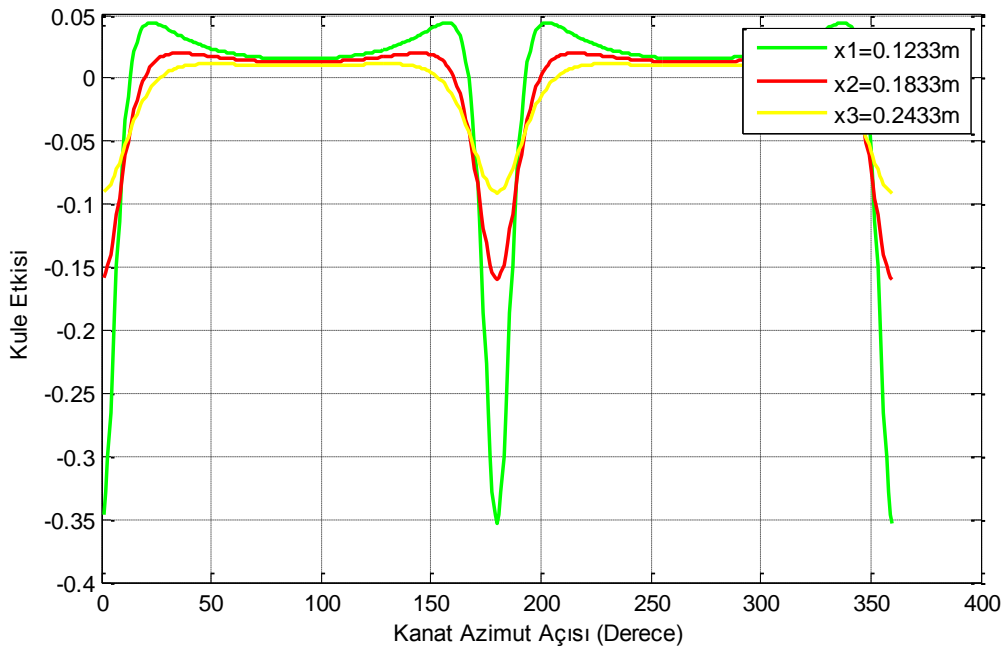
Çizelge 6.3. Mevsimlere ve belirlenen kule yüksekliklerine göre hesaplanan rüzgar kayma katsayıları

Mevsimler	Rüzgar Kayma Katsayısı α			
	h= 12 m	h= 24 m	h= 36 m	h= 48 m
İlkbahar	0.2208	0.2062	0.1983	0.1929
Yaz	0.2149	0.2008	0.1930	0.1877
Sonbahar	0.2192	0.2048	0.1969	0.1915

Kış	0.2378	0.2221	0.2136	0.2077
------------	--------	--------	--------	--------

Rüzgar kayma katsayısı değerleri hesaplandıktan sonra kule etkisi ve rüzgar kayması değerleri hesaplanmıştır. Kule etkisi hesaplanırken Eşitlik 5.2, rüzgar kayması hesabı yapılırken Eşitlik 5.1 kullanılmıştır.

Kanat-kule arası mesafe, kule etkisini belirleyen en etkili parametredir. Kule etkisinin senaryoda belirlenen kanat-kule arası mesafe değerlerine göre değişimi Şekil 6.3'te verilmiştir. Şekil 6.3'ten görüleceği üzere kanat-kule arası mesafe değeri arttıkça kule etkisi azalmaktadır ve kanat azimut açısı 180° 'de iken kule etkisi diğer kanat azimut açısı değerlerine göre gelen rüzgar hızı üzerinde daha bozucu bir etkiye sahiptir. Kanat azimut açısı 180° de iken kule etkisi değerleri Çizelge 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Farklı kanat kule arası mesafe değerlerinde kule etkisi değişimi

Çizelge 6.4. Farklı kanat-kule arası mesafelerde kule etkisi değişimi

Kule Etkisi Değerleri

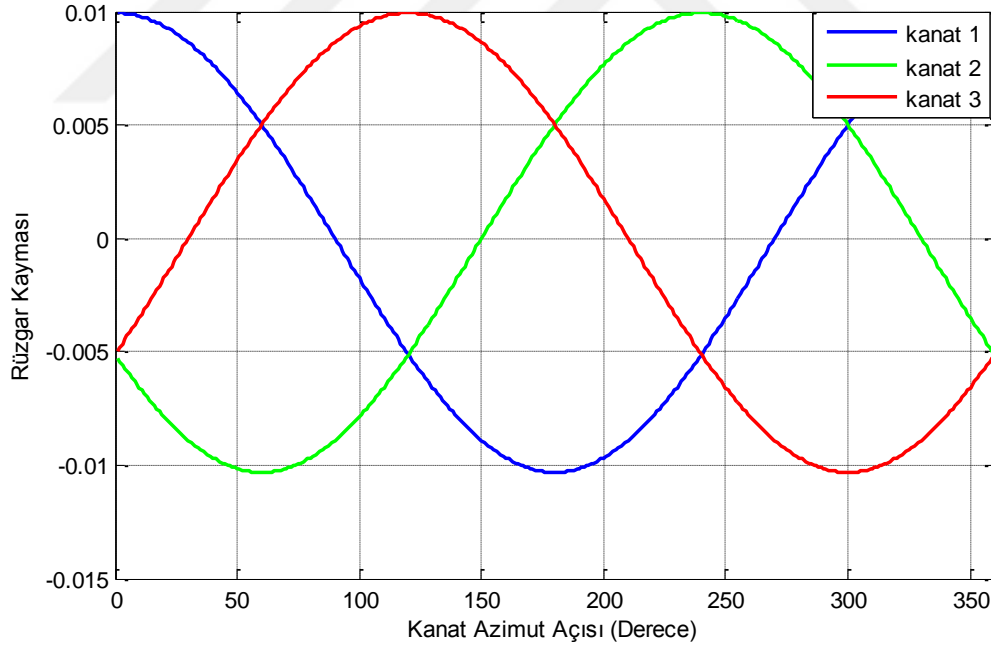
Mesafe (x) m	Kule Etkisi
0.12	- 0.356
0.18	- 0.158
0.24	- 0.087

Senaryoda belirlenen 4 farklı kule yüksekliği değerlerine göre hesaplanan rüzgar kayması değerleri Çizelge 6.5'te verildiği gibi hesaplanmıştır. Çizelge 6.5'ten görüleceği üzere kule yüksekliği arttıkça rüzgar kayması değeri azalmaktadır.

Çizelge 6.5. Farklı kule yüksekliği değerlerinde rüzgar kayma değerleri değişimi

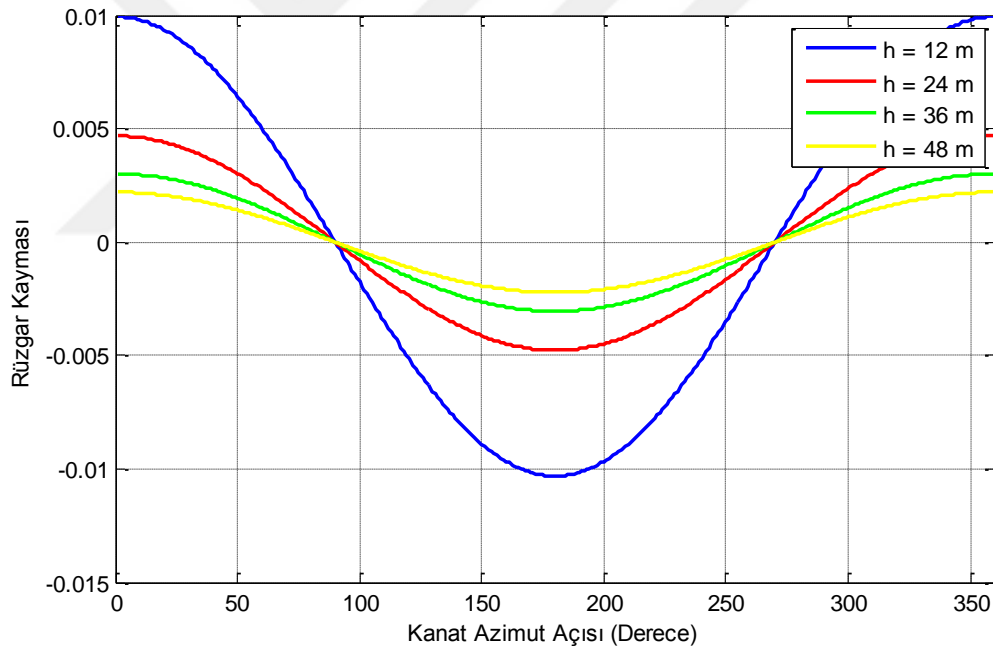
Rüzgar Kayma Değerleri				
Mevsimler	h= 12 m	h= 24 m	h= 36 m	h= 48 m
İlkbahar	-0.0103	-0.0047	-0.0030	-0.0022
Yaz	-0.0101	-0.0046	-0.0029	-0.0021
Sonbahar	-0.0102	-0.0047	-0.0030	-0.0022
Kış	-0.0111	-0.0051	-0.0032	-0.0024

Rüzgar kayması, türbinde bulunan her bir kanadın kanat azimut açısı değerine göre değişmektedir. Bu değişim Şekil 6.4'te verildiği gibidir. Şekil 6.4'ten görüldüğü gibi 3 kanatlı bir türbinde her bir kanat arasında 120° faz farkı bulunarak rüzgar kayma değeri değişmiştir.



Şekil 6.4. Kanatlarda meydana gelen rüzgar kayması değişimi

Rüzgar kayması değerinin farklı kule yüksekliklerine göre değişimi Şekil 6.5’de verildiği gibidir.



Şekil 6.5. Farklı kule yüksekliği değerlerinde rüzgar kayma değişimi

Bir sonraki aşamada bozuk rüzgar hızı hesabı yapılmıştır. Ortalama bozuk rüzgar hızı her bir mevsim ve her bir senaryo için Weibull dağılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Ortalama bozuk rüzgar hızları Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Farklı kule yüksekliği ve mevsimler için hesaplanan bozuk rüzgar hızı değerleri

Bozuk Rüzgar Hızı Değerleri (m/s)					
Yükseklik	x Mesafesi				
		İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
h= 12 m	x= 0.12 m	6.43	6.84	6.53	5.37
	x= 0.18 m	6.41	6.83	6.52	5.36
	x= 0.24 m	6.40	6.82	6.51	5.35
h= 24 m	x= 0.12 m	7.49	7.94	7.61	6.34
	x= 0.18 m	7.47	7.92	7.60	6.33
	x= 0.24 m	7.45	7.91	7.59	6.32
h= 36 m	x= 0.12 m	8.19	8.66	8.32	6.98
	x= 0.18 m	8.18	8.64	8.31	6.97
	x= 0.24 m	8.17	8.63	8.30	6.96
h= 48 m	x= 0.12 m	8.73	9.2	8.86	7.47
	x= 0.18 m	8.72	9.18	8.85	7.46
	x= 0.24 m	8.71	9.17	8.84	7.45

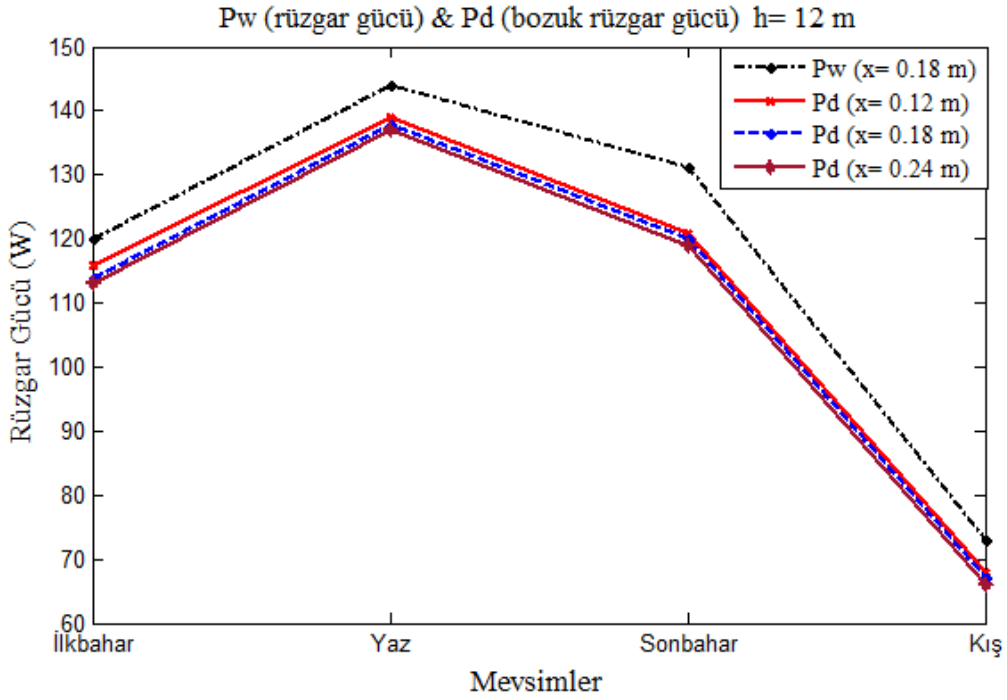
Referans yüksekliğe göre extrapolere edilen ortalama rüzgar hızları Çizelge 6.7’de verildiği gibidir. Extrapolere edilen rüzgar hızı değerlerini hesaplamada Eşitlik 3.5’den yararlanılmıştır.

Çizelge 6.7. Farklı kule yüksekliklerine extrapolere edilen rüzgar hızı değerleri

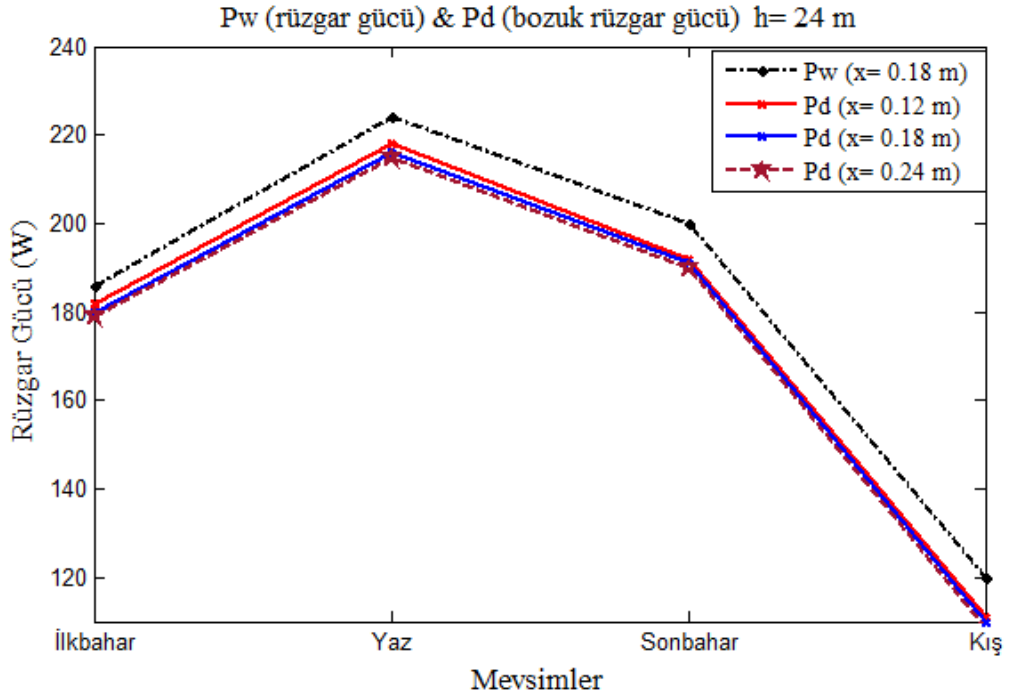
Extrapolere Edilen Rüzgar Hızı

Yükseklik	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
12 m	6.45	6.86	6.56	5.41
24 m	7.517	7.96	7.64	6.35
36 m	8.22	8.68	8.34	7.00
48 m	8.75	9.24	8.89	7.50

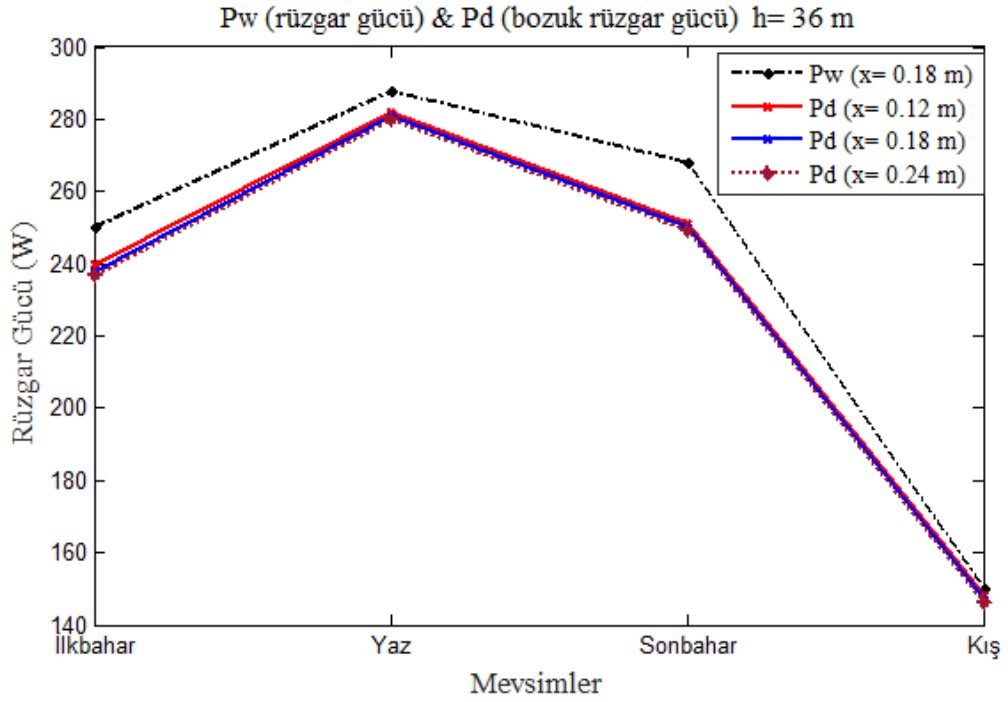
Rüzgar gücü her bir mevsim için ölçülen ve extrapolere edilen rüzgar hızı değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca bozuk rüzgar hızı değerlerine göre bozuk rüzgar güçleri farklı kanat-kule arası mesafe ve farklı kule yükseklikleri değerlerine göre hesaplanmıştır. Rüzgar gücü ve bozuk rüzgar gücünün değişimleri MATLAB programı yardımıyla elde edilerek Şekil 6.6'da verilmiştir.



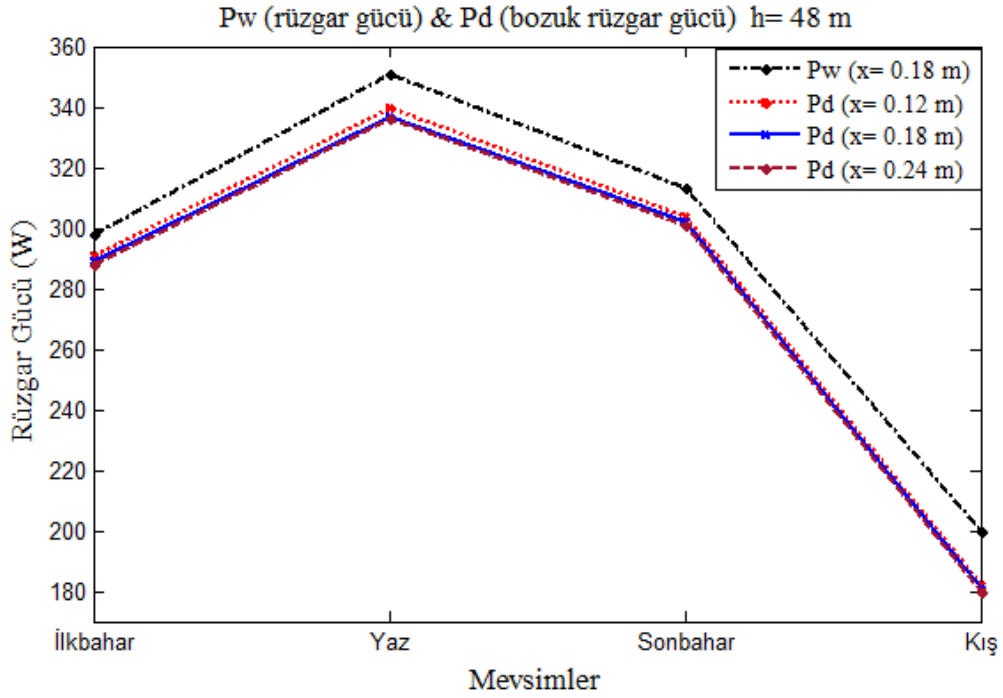
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.6. Farklı kanat-kule arası mesafelere göre elde edilen rüzgar gücü ve bozuk rüzgar gücü değerleri

Şekil 5.4'te verilen akış diyagramındaki adımlara göre bir sonraki aşamada türbin gücü ve bozuk türbin gücü değerlerinin belirlenmesi bulunmaktadır. Bu aşamada türbin gücünün belirlenebilmesi için referans türbinin güç eğrisine göre regresyon analizi yapılarak Eşitlik 5.6 ve 5.7 oluşturulmuştur. MATLAB yazılımı aracılığıyla yapılan regresyon analizinde en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Oluşturulmuş olan denklemlerin hata değerlerini belirlemek için RMSE ve R^2 (Determinasyon Katsayısı) kullanılmıştır. Belirleme katsayısı ve kök ortalama kare hata değerleri oluşturulmuş olan denklemler için Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Türbin için elde edilen rüzgar gücü eşitlikleri için RMSE ve R^2 değerleri

Eşitlikler	R^2	RMSE
Eşitlik 5.6	0.996	0.0032
Eşitlik 5.7	0.993	0.0047

Eşitlik 5.6 ve 5.7'deki formüller kullanılarak türbin için güç ve bozuk güç değerleri her bir mevsim için elde edilmiştir. Elde edilen bu güç değerleri Çizelge 6.9 ve 6.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.9. Türbin güç değerleri

Yükseklik	P_t (Türbin Gücü) (W)			
	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
12 m	47.75	52.28	48.58	33.64
24 m	78.60	98.20	83.89	46.89
36 m	110.39	133.22	116.19	57.61
48 m	136.84	163.18	144.18	77.88

Çizelge 6.10 Bozuk türbin gücü değerleri

Yükseklik	x Mesafesi	P_{td} (Bozuk Türbin Gücü) (W)			
		İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
h= 12 m	x= 0.12 m	47.59	51.53	48.36	32.87
	x= 0.18 m	47.42	51.15	48.29	32.68
	x= 0.24 m	47.33	50.78	48.22	32.48
h= 24 m	x= 0.12 m	77.46	97.28	82.59	46.80
	x= 0.18 m	76.61	96.37	82.16	46.70
	x= 0.24 m	75.77	95.91	81.73	46.61
h= 36 m	x= 0.12 m	108.96	132.20	115.22	56.84
	x= 0.18 m	108.48	131.17	114.73	56.46
	x= 0.24 m	108.01	130.66	114.25	56.07
	x= 0.12 m	135.80	160.96	142.59	76.61

h= 48 m	x= 0.18 m	135.28	159.85	142.06	76.19
	x= 0.24 m	134.77	159.30	141.54	75.77

Her bir mevsim ve senaryo için enerji kayıpları AIR-X 400 W türbininin katalog bilgilerinden alınan esme süresine dikkate alınarak Eşitlik 5.8'deki formül kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 6.11'de hesaplanan değerler gösterilmiştir.



Çizelge 6.11 Mevsimsel rüzgar kayıpları

		Enerji Kaybı (Her Bir Mevsim için kWh)			
Yükseklik	x Mesafesi	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
		h= 12 m	x= 0.12 m	0.557	2.552
x= 0.18 m	1.129		3.824	0.972	3.284
x= 0.24 m	1.421		5.094	1.224	3.951
h= 24 m	x= 0.12 m	3.900	3.119	4.427	0.313
	x= 0.18 m	6.776	6.227	5.897	0.629
	x= 0.24 m	9.643	7.778	7.365	0.949
h= 36 m	x= 0.12 m	4.876	3.490	3.315	2.624
	x= 0.18 m	6.496	6.970	4.968	3.932
	x= 0.24 m	8.113	8.706	6.619	5.238
	x= 0.12 m	3.526	7.547	5.393	4.319

h= 48 m	x= 0.18 m	5.285	11.305	7.186	5.753
	x= 0.24 m	7.042	13.180	8.976	7.185



7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Fosil yakıtların giderek tükenmesi, ekolojik dengeye ve canlılara zarar vermesi gibi nedenlerden dolayı enerji üretiminde sürekliliği olan, çevreci ve enerji üretim maliyeti daha az olan yenilenebilir enerji kaynaklarının son zamanlarda gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde önemini ve kullanılabilirliğini artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında bulunan rüzgar enerjisi ise optimum rüzgar koşullarının bulunduğu her yerde, ücretsiz yakıt olanağı sağladığı için ve temiz bir enerji kaynağı olmasından dolayı dünya üzerinde ve ülkemizde bir çok bölgede tercih edilmektedir. Rüzgar enerjisinden daha verimli şekilde yararlanabilmek için öncelikle rüzgar türbininin kurulacağı bölgenin rüzgar özellikleri analiz edilmelidir.

Yapılan bu çalışmada, öncelikle rüzgar türbini kurulmuş olan bölgenin rüzgar özelliklerinin analiz edilmesi ve ardından kule etkisi ve rüzgar kayması kavramlarının rüzgar hızı, rüzgar türbin gücü ve rüzgar enerji üretimi üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi kampüsünde bulunan yerleşke referans bölge olarak seçilmiştir. Rüzgar verileri 2017 yılı boyunca referans

alınan bölgede kurulmuş olan rüzgar ölçüm istasyonundan alınmıştır ve mevsimsel olarak rüzgar özellikleri belirlenmiştir. En yüksek ortalama rüzgar hızı verileri yaz aylarında, en düşük ortalama rüzgar hızı verileri ise kış aylarında elde edilmiştir. Bu çalışmada; rüzgar türbinin bulunduğu bölgeye göre yapılmış olan analizlerin sonuçları şu şekildedir:

1) Literatürde ağırlıklı olarak kullanılan 4 farklı istatistiksel analiz metodu için bölge karakteristiklerine göre analiz yapılmış ve referans alınan bölgenin istatistiksel rüzgar hızı analiz metodlarından olan Weibull dağılımında diğer istatistiksel analiz metodlarına göre daha doğru sonuçlar verdiği her bir analiz metodunun RMSE değerleri hesaplanarak görülmüştür.

2) Referans bölgenin rüzgar hızı karakteristiklerine göre rüzgar gülü diyagramları her bir mevsim için oluşturulmuştur ve bu diyagramlara göre referans bölge için hakim olan rüzgar yönleri belirlenmiştir. Hakim rüzgar yönleri ağırlıklı olarak İlkbahar mevsiminde; Kuzey-Batı, Yaz mevsiminde; Doğu, Sonbahar mevsiminde; Güney-Batı, Kuzey-Doğu ve Kuzey ağırlıklı olarak, Kış mevsiminde ise; Kuzey-Batı'dır.

3) Rüzgar kayma katsayısının belirlenmesinde bölgenin yer şekilleri özellikleri önemli rol oynamaktadır. Deniz, okyanus ve su birikintisi olan bölgelerde rüzgar kayma katsayısı daha düşük, ağaçlık, çalılık veya yerleşim merkezi olan bölgelerde rüzgar kayma katsayısı değeri literatürde belirlenen yüzey pürüzlülük uzunluğu değerleriyle bağlantılı olarak daha yüksektir. Pürüzlülük uzunluğu bölgenin pürüzlülük sınıfına göre, pürüzlülük sınıfı ise bölgenin coğrafik özelliklerine göre değişmektedir.

4) Rüzgar kayma katsayısının belirlenmesinde kule yüksekliği ve referans bölgedeki hız değerleri önemli rol oynamaktadır. Literatürdeki bir çok çalışmadan farklı olarak, yapılan bu çalışmada referans bölge için rüzgar kayma katsayısı değeri sabit bir değer olarak seçilmeyip, çalışmada kullanılan dört referans yükseklik için ayrı ayrı hesaplanmıştır ve böylece rüzgar kayma katsayısı değerinin sabit seçilmemesi yapılan analizde daha doğru bir yaklaşımla sonuç elde etmeyi sağlamıştır. Bu parametre değerinin sabit alınması dolaylı yoldanda olsa türbinden elde edilen rüzgar enerji üretimini etkilemektedir ve ne kadar doğru bir yaklaşımla ve bölgeye göre analizi yapılarak elde edilirse türbinden elde edilen enerji üretimi o kadar doğru şekilde belirlenebilir. Yükseklik değeri arttıkça rüzgar kayma katsayısı değerinin azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, rüzgar türbini kurulacak olan bölgenin rüzgar kayma

katsayısının belirlenmesinde kule yüksekliğinin de göz önünde bulundurulması gerektiğinin ve yalnızca bölgenin jeolojik özelliklerinin göz önünde bulundurulmasının doğru sonuç elde etmede yeterli olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte aynı yükseklikte ve farklı rüzgar hızı değerlerinde rüzgar kayma katsayısının belirlenmesinde yüksek rüzgar hızı değeri daha etkili olduğu görülmüştür.

5) Rüzgar hızının düzgün bir şekilde modellenmesi türbinden elde edilecek olan gücün daha doğru şekilde belirlenmesinde önemli rol oynar. Rüzgar hızı modellenmesi yapılırken literatürde etkin rüzgar hızı olarak da geçen bozuk rüzgar hızı kavramından yararlanılmaktadır. Bu çalışmada bozuk rüzgar hızı rüzgar kayması ve kule etkisi göz önünde bulundurularak modellenmiştir ve rüzgar kayması ve kule etkisi parametrelerinin rüzgar türbini kurulacak olan bölgeye göre rüzgar hızı modellenmesi yaparken göz önünde bulundurulması gereken iki kavram olduğu analiz sonuçlarında gözlenmiştir. Rüzgar kayması ve kule etkisinde etkili olan parametrelerin; kanat azimut açısı, kanat-kule arası mesafe, rüzgar kayma katsayısı ve türbin yüksekliği olduğu bu değerlere göre rüzgar kayması ve kule etkisinin değişimleri incelenerek görülmüştür.

6) Türbin kule yarıçapı ve kanat-kule arası mesafe parametreleri kule etkisini belirlemede en önemli parametrelerdir. Kule etkisi kanat-kule arası mesafeye bağlı olarak değişmektedir. Kanat-kule arası mesafe arttıkça kule etkisinin azaldığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada maksimum kule etkisi bozukluğu kanat azimut açısı 180° 'de iken ve kanat kule arası mesafe değeri 0.12 metre iken elde edilmiştir. Kule etkisinin, kanat azimut açısı 90° ve 270° arasındaki açı değerlerinde olduğunda daha baskın şekilde rol oynadığı analiz sonucunda elde edilen grafiklere göre yorumlanmıştır.

7) Yere yakın olan yüksekliklerdeki topoğrafik ve meteorolojik özelliklerden kaynaklı olarak gelen rüzgar hızı yerden daha uzak yüksekliklere göre daha fazla etkilenmektedir ve bu etki bozucu bir etki olarak enerji üretimine yansımaktadır. Senaryodaki yükseklikler baz alınarak yapılan hesaplamalara göre rüzgar kayma bozukluğunun en yüksek olduğu türbin yükselik değeri 12 m'dir.

8) Referans alınan türbinden elde edilen türbin gücü ve bozuk türbin gücü değerlerini belirlemek için türbin güç kataloğundan ve regresyon analizinden yararlanılarak rüzgar hızı değerlerine göre seçilmesi gereken iki ayrı denklem elde edilmiştir ve türbin güçleri hesaplanmıştır. En düşük türbin gücü ve bozuk türbin gücü değerleri, rüzgar hız değerlerine bağlı olarak Kış mevsiminde elde edilmiştir. En yüksek türbin gücü

değerleri ise referans bölgeye göre Yaz mevsiminde elde edilmiştir. Referans bölge parametre ve özelliklerine göre yükseklik arttıkça türbinin ürettiği gücün arttığı ve kanat-kule arası mesafe arttıkça türbinin güç üretiminin azaldığı yapılan hesaplamalar sonucunda görülmüştür.

9) Rüzgar kayması ve kule etkisi değerleri göz önüne alınmadan hesaplanan türbin gücü değerleri ve bu kavramlar göz önüne alınarak hesaplanan bozuk türbin gücü değerleri karşılaştırıldığında; aslında bu parametrelerin türbin gücü üretiminde etkili bir şekilde rol oynadığı ve dikkate alınarak bölgeye göre analizin gerçekleştirilmesi gerektiği doğrulanmıştır. Bu şekilde analiz yapılmadan elde edilen türbin gücü değerleri türbinin ne kadar güç ürettiği konusunda yanıltıcı olabilir ve doğru sonuçları vermeyebilir. Bu parametrelerin özellikle yüksek güçlü türbinler için türbinin kurulacağı bölgeye ve türbinin özelliklerine göre doğru şekilde analiz edilmesi gerektiği yapılan çalışmadaki hesaplamalara göre yorumlanmıştır.

10) Mevsimsel enerji kayıpları incelendiğinde yaz aylarında maksimum enerji kayıplarının olduğu görülmüştür. Kurulmuş olan ölçüm direğinin parametrelerine göre yıllık enerji kaybı 9.210 kWh olarak hesaplanmıştır. Kanat kule arası mesafe arttıkça enerji kayıplarının da arttığı görülmektedir. Enerji kaybı değeri senaryolarda belirtilmiş olan diğer kanat-kule arası mesafelerden daha az olduğu için bu bölgede kanat-kule arası mesafenin 0.12 metre seçilebileceği belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan 400 Watt'lık rüzgar türbini için enerji kaybının en az olduğu kış mevsiminde yaklaşık olarak % 3'lük bir enerji kaybı meydana gelmiştir. Enerji üretimi amaçlı kullanılan çok yüksek güçlü türbinlerde %3'lük bir enerji kaybı yıllık olarak türbinden elektrik üretimini fazlasıyla etkileyeceğinden bu parametrelerin bölgeye göre optimizasyonun yapılması ve doğru hesaplanarak uygun türbin modelinin belirlenmesi enerjiyi daha verimli kullanmak adına önem arz etmektedir.

8. KAYNAKLAR

- Akbulut, A., 2018. Güneş Enerjisi Sistemlerinde Kullanılan Fotovoltaik Panelin Modellenmesi ve Performans Değerlendirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi) Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Akdağ, S.A., Bagiorgas, H.S., Mihalakakou, G., 2010. Use of Two-Component Weibull Mixtures in the Analysis of Wind Speed in the Eastern Mediterranean. Applied Energy 2010 87:2566-2573.
- Akdağ, S.A., Güler, O., 2010. Evaluation of Wind Energy Investment Interest and Electricity Generation Cost Analysis for Turkey. Applied Energy 2010 87:2574-2580.
- Anonim-1, 2018. Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi. <http://www.teknoelektrik.com/blog-26/ruzgar-enerjisinin-tarihcesi.html>, (08.08.2018).
- Anonim-2, 2018. Türkiye'nin İlk Rüzgar Enerji Santrali Alize Germiyan. <http://www.demirer.com.tr/santral/alize/cesme/index.html>, (08.08.2018).
- Anonim-3, 2018. Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Gücü. <https://steemit.com/tr/@hawk28/rzgarenerjiverzgargc-5vgaizi4tv>, (12.09.2018).
- Anonim-4, 2018. Meteoroloji Rüzgar Açık Ders Slaytı. https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/3484/mod_resource/content/0/meteoroloji_5_ASA.pdf, (11.08.2018).
- Anonim-5, 2018. Rüzgar Enerjisi, Rüzgar Türbinleri. <https://nanofons.blogspot.com/p/ruzgar-hareket-halindeki-havann.html>, (19.09.2018).

- Arslan, F.M., Tuzcu ve H., Günerhan, H., 2017. Konut Tipi Rüzgar Türbini Kanatlarının Teorik Modellenmesi ve Güç Üretimini Etkileyen Belirli Aerodinamik Özelliklerin Karşılaştırılması. 4. Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi, İzmir.
- Bardal, L.M., Sætran L.R., Wangsness E., 2015. Performance Test of 3 MW Wind Turbine-Effects of Shear and Turbulence. *Energy Procedia* 80:83–91.
- Behçet, R., Gül, H., Oral, H., ve Oral, F., 2014. Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Bakımından Malatya İlinin Doğu Anadolu Bölgesindeki Yeri. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1):65-73.
- Bekele, G., Palm B., 2009. Wind Energy Potential Assessment at Four Typical Locations in Ethiopia. *Applied Energy* 2009 86:388-396.
- Bulut, Y.M., Açikkalp, E., 2013. Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Hesaplanmasında Parametre Tahmin Yöntemlerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım ve Teknoloji*. 1(2):49-54.
- Chang, T.J., Wu, Y.T., Hsu, H.Y., Chu, C.R., Liao, C.M., 2003. Assessment of Wind Characteristics and Wind Turbine Characteristics in Taiwan. *Renewable Energy* 2003 28:851-871
- Çalışkan, M., 2011. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Mevcut Yatırımlar. Rüzgar Enerjisi ve Santralleri Semineri, İstanbul.
- Çetin NS., 2001. Küçük Güçlü Bir Rüzgar Türbini Tasarımı ve Elektrik Enerjisi Eldesi. VI. Türk Alman Enerji Sempozyumu, s.83-93, İzmir.
- Çetin, N.S., 2006. Şebeke Bağlantısız PM Generatörlü Rüzgar Türbinlerinin YSA ile Sistem Optimizasyonu. (Doktora Tezi), Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Das, S., Karnik, N. ve Santoso, S., 2011. Time-Domain Modeling of Tower Shadow and Wind Shear in Wind Turbines. *International Scholarly Research Network ISRN Renewable Energy Volume 2011, Article ID 890582, 11 pages doi:10.5402/2011/890582.*
- Demir, G., 2018. Makine Öğrenme Algoritmaları Kullanarak Rüzgar Hızı Tahmininde Meteorolojik Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Dolan, D.S.L., Lehn, P.W., 2006. Simulation Model of Wind Turbine 3P Torque Oscillations due to Wind Shear and Tower Shadow. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol:21, No:3, September 2006 717-724.
- Doty, S., Turner, W.C., 2007. *Energy Management Handbook Sixth Edition*. Taylor and Francis Ltd, USA, 909p.
- Elibüyük, U., Üçgül, İ., 2014. Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri. *Yekarum e-Dergi*. Cilt:2 Sayı:3.
- Emeksiz, C., 2014. Şekil Hafızalı Alaşımlar Kullanarak Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Değişken Devirli Rüzgar Türbini Modellemesi. (Doktora Tezi). Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Emniyetli, G., 2007. Evsel Elektrik İhtiyacının Karşlanması için Rüzgar Türbini Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi) Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya.
- Fırtın, E., Güler, Ö. ve Akdağ, S. A., 2011. Investigation of Wind Shear Coefficients and Their Effect on Electrical Energy Generation. *Applied Energy* 88:4097–4105

- Fyrippis, I., Axaopoulos, P.J., Panayiotou, G., 2010. Wind Energy Potential Assessment in Naxos Island, Greece. *Applied Energy* 2010 87:577-586.
- Genç, M., 2013. Rüzgar Enerji Sektöründe Kule ve Temel Teknolojileri. https://www.tureb.com.tr/files/turek/2013/sunumlar/mert_genç.pdf, (12.09.2012).
- Global Wind Statics, GWEC 2017. Wind Power Capacity in the World. <https://gwec.net/global-figures/interactive-map/>, (10.08.2018).
- Global Wind Statistics, GWEC 2017., <http://gwec.net/global-figures/graphs/>, (26.06.2018).
- GWEC, 2017. Global Statics. http://gwec.net/wp-content/uploads/2018/04/5_Top-10-cumulative-capacity-Dec-2017.jpg, (10.08.2018).
- IEA, 2017. Renewables Information: Overview (2017 Edition). <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/RenewablesInformation2017Overview.pdf>, (10.08.2018).
- Kaya, A., 2016. Keşişleme, Kible, Rodos, Karayel, Yıldız, Poyraz, Gündoğusu ve Günbatısı Nedir?. <https://www.tech-worm.com/kesisleme-kible-lodos-karayel-yildiz-poyraz-gundogusu-gunbatisi-nedir/>, (11.08.2018).
- Kaya, K., Koç, E., 2015. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı ve Üretim Esasları. *Mühendis ve Makine*. 56 (670):38-48.
- Keleş, D., 2012. Bir Rüzgar Türbini Tasarımı ve Geliştirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kırsar, A.O., 2009. Rüzgardan Enerji Üretimi ve Rüzgar Türbinlerinin Evrimi. Rüzgar Enerjisi. http://www.emo.org.tr/ekler/86f1c29518c700e_ek.pdf?dergi, (11.09.2018).
- Kuang, Y., Zhang, Y., Zhou, Y., Li, C., Cao, Y., Li, L., Zeng, L., 2016. A Review of Renewable Energy Utilization in Islands. *Renew Sustain Energy Rev* 2016; 59:504–513
- Kurban, M., Hocoğlu, F.O., Kantar, Y.M., 2007. Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Tahmininde Kullanılan İki Farklı İstatiksel Dağılımın Karşılaştırmalı Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 13(1):103-109.
- Kurt, G., 2011. Dişli Kutulu ve Dişli Kutusuz Rüzgar Türbini-Generatör Sistemlerinin Karşılaştırılması. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Lia, J., Wanga, X.,Yua X.B., 2018. Use of Spatio-Temporal Calibrated Wind Shear Model to Improve Accuracy of Wind Resource Assessment. *Applied Energy* 2018 213:469-485.
- Masters, G.M., 2004. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Willey & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Mert, İ., Karakuş, C., Peker, F., 2014. Antakya Bölgesi Rüzgar Karakteristiğinin İncelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*. 5(1):13-22.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü, MGM 2018., <https://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojiyegir.aspx?s=10>, (07.08.2018).
- Nurbay, N., Çınar, A.Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması. http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf. (19.09.2018).
- Ömeroğlu, Ö., 2012. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Dizaynında Kule Boyu, Çark Çapı ve Kanat Profili Seçiminin Analizi ve Eskişehir İli İçin Bir Uygulama. (Yüksek Lisans Tezi) Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Özpinar, M.A.,2007, Yenilenebilir Enerji Santrallerinde Yapay Sinir Ağları Yöntemiyle Enerji Üretiminin Modellenmesi ve Planlanması. (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, İ., Çelik, A., 2006. Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Kullanım Durumu ve Geleceğe Yönelik Beklentiler. Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Derg. 37 (2):267-274, 2006 ISSN:1300-9036.
- Patel, M.R., 2006. Wind and Solar Power Systems. CRC Pres, Boca Raton, Second Edition, 448, London.
- Rehman, S., Al-Abbadi, N.M., 2005. Wind Shear Coefficients and Their Effect on Energy Production. Energy Convers Manage 2005 46:2578-2591.
- Rehman, S., Al-Hadhrami L.M., Alam Md. M., Meyer, J.P., 2013. Empirical Correlation Between Hub Height and Local Wind Shear Exponent for Different Sizes of Wind Turbines. Sustainable Energy Technologies and Assesments 2013 4:45-51.
- Shata, A.S.A., Hanitsch R., 2006. Evaluation of Wind Energy Potential and Electricity Generation on the Coast of Mediterranean Sea in Egypt. Renewable Energy 2006 32:1183-1202
- Sinha, S., Chandel, S.S., 2015. Review of Recent Trends in Optimization Techniques for Solar Photovoltaic–Wind Based Hybrid Energy Systems. Renew Sustain Energy Rev 2015; 50: 755–769.
- Sintra, H., Mendes, V.M.F., Melício, R., 2014. Modelling and Simulation of Wind Shear and Tower Shadow on Wind Turbines. Procedia Technology 17:471–477.
- Stival, L.J.L., Guetter A.K., Andrade F.O., 2017. The Impact of Wind Shear and Turbulence Intensity on Wind Turbine Power Performance. Espaço Energia Issue 27 October 2017:11-20.
- Taşkın, B., 2013. Niğde İlinde Kurulabilecek Rüzgar Enerji Santralının Fiziksel ve Ekonomik Analizi. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- TEİAŞ, 2017. Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2017-2021). <https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2017-12/KapasiteProjeksiyonu2017a%C4%9Fustos.pdf>, (09.08.2018).
- The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living, http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/AE_hub_height.html, (02.07.2018).
- TÜREB, 2018. Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu. https://www.tureb.com.tr/files/tureb_sayfa/duyurular/2018/03/turkiye_ruzgar_en_ erjisi_istatistik_raporu_ocak_2018.pdf, (09.08.2018).
- Uzol N.S., Uzol O., 2013. Effect of Steady and Transient Wind Shear on the Wake Structure and Performance of a Horizontal Axis Wind Turbine Rotor. Wind Energy 2013;16:1-17.
- Ünsalver, C., 2008. Rüzgar Enerji Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Wagner, R., Courtney, M., GGottschall, J., Lindelöw-Marsden, P., 2011. Accounting for the Speed Shear in Wind Turbine Power Performance Measurement. Wind Energy 2011; 14:993-1004.
- Wagner, R., Courtney, M., Larsen, T. J., Schmidt Paulsen, U., 2010. Simulation of Shear and Turbulence Impact on Wind Turbine Performance. Risø-R-1722(EN) January 2010 ISSN 0106-2840 ISBN 978-87-550-3801-1.

- Wan, S., Cheng L., Sheng X., 2017. Numerical Analysis of the Spatial Distribution of Equivalent Wind Speeds in Large-Scale Wind Turbines. Journal of Mechanical Science and Technology 31(2): 965-974
- Wen, B., Wei, S., Wei, K., Yang, W., Peng, Z., Chu, F., 2017. Power Fluctuation and Power Loss of Wind Turbines due to Wind Shear and Tower Shadow. Front. Mech. Eng. 2017, 12(3): 321-332, doi: 10.1007/s11465-017-0434-1.
- YEGM, 2017. İşletmedeki Rüzgar Elektrik Santralleri. http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/isletmedeki_resler.aspx, (09.08.2018).
- YEGM, 2018. Rüzgar Enerjisi. http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar_enerjisi.aspx, (09.08.2018).

9. ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, Soyadı : Tuğçe ÇETİN

Doğum Yeri : Mezke / SAMSUN

Doğum Tarihi : 23.10.1992

Yabancı Diller : İngilizce

Uyruk : Türkiye Cumhuriyeti

Cep Tel : 05071165528

E-posta : tugce.cetin00@gmail.com

Öğrenim Durumu

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Lisans	Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği	2015
Lise	Ondokuz Mayıs Anadolu Lisesi, Fen Bilimleri	2011

