

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOCAELİ/ DARICA BÖLGESİNİN RÜZGÂR ENERJİSİ
POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ VE BÖLGE İÇİN
SEÇİLEN BİR RÜZGÂR TÜRBİNİNİN EKONOMİK
ANALİZİ

FATİH TÜYSÜZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOCAELİ/ DARICA BÖLGESİNİN
RÜZGÂR ENERİSİ POTANSİYELİNİN
BELİRLENMESİ VE BÖLGE İÇİN
SEÇİLEN BİR RÜZGÂR TÜRBİNİNİN
EKONOMİK ANALİZİ

FATİH TÜYSÜZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ SALİH ÖZEN ÜNVERDİ

GEBZE
2019

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**WIND ENERGY POTENTIAL OF
KOCAELI/ DARICA REGION AND
ECONOMIC ANALYSIS OF A WIND
TURBINE CHOSEN FOR THE REGION**

FATİH TÜYSÜZ

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR
ASSIST. PROF.DR. SALİH ÖZEN ÜNVERDİ**

GEBZE

2019



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/07/2019 tarih ve 2019/30 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 18/07/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Fatih TÜYSÜZ'ün tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Salih Özen ÜNVERDİ

ÜYE

: Doç. Dr. Ahmet Sinan ÖKTEM

ÜYE

: Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Prof. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU

Gebze Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bu tezde ilk aşamada Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Kocaeli/Darıca ve Gebze yerleşkelerinde bulunan rüzgâr enerjisi gözlem istasyonlarının (istasyon numarası: 18410 ve 17639) 2016 yılı içerisindeki bir saatlik aralıkla ölçtüğü rüzgâr hızı, yönü, sıcaklığı ve basıncı verilerine dayanılarak Darıca'nın rüzgâr enerjisi potansiyeli tespit edilmiştir.

Weibull dağılımı istatistiki yöntem olarak rüzgâr enerjisi potansiyeli hesaplamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bir bilgisayar programı olan WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) elde edilen saatlik verileri istatistiki olarak daha küçük anlara yayarak rüzgâr hızı ortalamasını tespit edebilmek adına daha hassas sonuçlar vermektedir.

Yapılan bu veri analizinin ardından söz konusu bölge rüzgâr enerji potansiyelinin ortalama hız esas alınarak seçilen bir rüzgâr türbiniyle elektrik enerjisi üretimi bakımından uygun olup olmadığı tespit edilmiştir. Çalışmada Alstom, Enercon, GE, Leitwind, Nordex, Vestas gibi firmaların ürettiği rüzgâr türbinlerinin performansları bölge için ölçülen rüzgâr enerjisi verileri uygulanarak değerlendirilmiştir. Bölge için en uygun olan Leitwind marka LTW77 model 1 MW kapasiteli bir rüzgâr türbini santralinin ekonomik analizi ve amortisman süresi hesapları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Darıca, Ekonomik Analiz, Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli, Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu.

SUMMARY

In this thesis, first of all the wind energy potential of Darıca region is determined based on the hourly wind speed, direction, temperature and pressure data measured at wind energy monitoring stations (station number: 18410 and 17639) in Kocaeli / Darıca and Gebze campuses of the General Directorate of Meteorology in the year of 2016.

Weibull distribution is often used as a statistical method for measuring wind energy potential of a region. Computer program WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) provides more sensitive results by spreading the hourly wind energy data to every second statistically based on the moment method.

After the analysis of the wind energy data, it is determined whether the wind energy potential of the subject region is suitable for electric power generation by a selected wind turbine. In the study, performances of the wind turbines manufactured by Alstom, Enercon, GE, Leitwind, Nordex, Vestas are evaluated by applying collected wind energy data of the region. The economic and payback period analyses of 1 MW Leitwind brand LTW77 model wind turbine, whose performance is found to be the most suitable for the region, are performed.

Key Words: Darıca, Economic Analysis, Weibull Probability Density Function, Wind Power Potential.

TEŞEKKÜR

Danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Salih Özen ÜNVERDİ'ye, lisans eğitimimde farklı bakış açısıyla vizyonumu genişleten Prof. Dr. Halil ÖZER'e, akademik kariyer hususunda bana her zaman motivasyon sağlayan arkadaşlarım makine mühendisleri İbrahim ŞEN & Fevzi ŞAHİN'e, ailemizin neşe kaynağı yeğenlerim Sedef, Ekrem ve Kerem'e en içten teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİ	3
2.1. Enerjinin Tanımı	3
2.2. Dünyada Enerjinin Görünümü	4
2.2.1. Fosil Kaynaklar	5
2.2.2. Elektrik Üretimi	5
2.3. Ülkemizin Enerji Görünümü	6
3. RÜZGÂR ENERJİSİ	9
3.1. Rüzgâr Enerjisinin Gelişim Süreci	10
3.2. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları	12
3.3. Rüzgâr Enerjisinin Dezavantajları	12
3.4. Rüzgâr Enerjisinin Türkiye’deki Durumu	12
3.6. Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası	13
4. RÜZGÂR TÜBRİNLERİ	15
4.1. Rüzgâr Türbini Nedir?	15
4.2. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması	15
4.2.1. Yatay (YERT) ve Dikey (DERT) Eksenli Rüzgâr Türbinleri	16
4.3. RES Elemanları	17
4.3.1. Türbin Kulesi	19
4.3.2. Pervane	19
4.3.3. Gövde (Nasel)	20

4.3.4. Göbek	21
4.3.5. Dişli Kutusu	21
4.3.6. Frenler	21
4.3.6.1. Aerodinamik Frenler	21
4.3.6.2. Mekanik Frenler	22
4.3.7. Jeneratör	22
4.3.8. Anemometre ve Yelkovan	23
4.3.9. Yalpa Mekanizması	23
4.3.10. Hidrolik Sistem	23
4.4. Rüzgâr Türbinlerinin Teknik Analizi	23
4.4.1. Rüzgâr Türbini Aerodinamiği	23
4.4.1.1. Eyleyici Disk Modeli	23
4.4.1.2. Kanat Elemanı Teorisi	27
4.4.2. Güç ve Kontrol Sistemleri	30
4.4.2.1. Kontrol Amaçları	30
4.4.2.2. Stall Kontrollü Türbinler	30
4.4.2.3. Pitch Kontrollü Türbinler	31
4.4.2.4. Rotor Yön Açısı Kontrolü (Yaw Control)	32
4.4.3. RES'lerdeki Temel Yük Kavramları	33
4.4.3.1. Aşırı Yükler	31
4.4.3.2. Yorulma Yükleri	33
5. PROJE YAKLAŞIMI	35
5.1. Rüzgâr Ölçüm Verilerinin Analizi	35
5.2. İstatistiksel Analiz (Weibull İstatistiksel Yöntemi)	35
5.3. Kinetik Enerji	36
5.4. Güç Yoğunluğunun Hesaplanması	37
5.5. Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Hesaplanmasında Kullanılan Bilgisayar Programları	38
5.5.1. WAsP	38
5.6. Rüzgâr Gücünün Hesaplanması	41
5.7. Kapasite Faktörü	43
6. RÜZGÂR SANTRALİ EKONOMİSİ	45
6.1. Sermaye Yatırım Maliyeti	46

6.2. Maliyetler Tablosu	47
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	56
EKLER	57



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
ρ	: Havanın Yoğunluğu
Φ	: Yerel Hava Hızı İle Rotor Düzlemi Arasındaki Aç
C_p	: Betz Sabiti
F	: Kuvvet
GW	: Gigawatt
K_F	: Kapasite Faktörü
kHz	: Kilohertz
km	: Kilometre
kWh	: Kilowatt saat
MW	: Megawatt
s	: Saniye
$DERT$	: Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini
$DMİ$	: Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
$EİE$	: Elektrik İdaresi Etüt İşleri Genel Müdürlüğü
$EWEA$	: The European Wind Energy Association
$GSYİH$	: Gayri Safı Yurtiçi Hâsıla
$GTÜ$	: Gebze Teknik Üniversitesi
IEC	: International Electrotechnical Commission
$IRENA$	: International Renewable Energy Agency
$REPA$	: Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası
RES	: Rüzgâr Enerjisi Santrali
RT	: Rüzgâr Türbini
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
$WAsP$	: Wind Atlas Analysis and Application Program
$YEKDEM$	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması
$YERT$	: Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Popülasyon, Ekonomik Büyüme ve Birincil Enerji İhtiyacı Öngörülleri.	4
2.2: Fosil Kaynakların Ömürleri.	5
2.3: Ülkelerin 2015 Yılı Elektrik Üretim Kapasiteleri.	6
2.4: Ülkemiz Elektrik Enerjisi Üretim Kaynakları.	7
2.5: Türkiye’de Enerji Üretimi Gelişimi.	7
2.6: Ülkemiz Enerji Kaynaklarının Yüzdesel Payları.	8
3.1: Rüzgâr Oluşumu.	8
3.2: Bilinen İlk Abd Rüzgâr Türbini 1888.	10
3.3: Darrieus Rüzgâr Türbini (Dikey Eksenli).	11
3.4: Ülkemizde Rüzgâr Enerjisi Yatırımlarının Gelişimi Süreci.	13
3.5: Türkiye Rüzgâr Hızı Haritası (50m Yükseklikte).	14
3.6: Kocaeli Rüzgâr Haritası.	14
4.1: Yatay ve Dikey (Düşey) Eksenli Rüzgâr Türbinleri.	16
4.2: Metrobüs Hattındaki DERT.	17
4.3: Rüzgâr Türbini Elemanları.	17
4.4: Kule Girişi Kapısı ve Kule İçİ Güvenlik Merdiveni.	19
4.5: Büyük Rüzgâr Türbinlerinde Gövde Bakımı.	20
4.6: Eyleyici Diskten Geçen Hava Akımı.	24
4.7: Bir Akım Tübünde Basınç ve Rüzgâr Hızı Değişimi.	25
4.8: Türbin Güç Katsayısının Değişimi.	27
4.9: Kanat Elemanı Şeması.	27
4.10: Kanat Kesiti Üzerine Etkiyen Aerodinamik Kuvvetler.	28
4.11: Kaldırma ve Direnç Kuvvet Katsayılarının Kanat Hücüm Açısına Göre Değişim Grafikleri.	29
4.12: Yalpa (Yaw) Kontrolü.	33
5.1: WAsP Ara Yüzü.	39
5.2: Rüzgâr Gülü.	40
5.3: Saatlik Veriler Doğrultusunda Rüzgâr Hızına Bağlı Frekans Dağılımı.	41
5.4: Kapasite Faktörü Haritası.	43
6.1: 2004-2012 Yılları Arasında Rüzgâr Türbini Fiyat Değişimi.	46

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
4.1: Türbin Tipleri.	15
4.2: Stall Kontrolüne Sahip Türbinlerde Güç-Rüzgâr Hızı Grafiği.	31
4.3: Pitch Kontrollü Bir Türbinin Güç-Rüzgâr Hızı Grafiği.	32
5.1: Leitwind V LTW77 1 MW Rüzgâr Türbini Özellikleri.	42
5.2: Weibull Parametreleri.	42
6.1: 60 MW Gücündeki Bir Rüzgâr Enerjisi Santraline Ait Yıllık Değişken Maliyetler ve Yüzdesel Oranları.	48
6.2: Örnek Bir Türbin Kurulumu İçin Varsayılan Değişkenler.	49
6.3: Rüzgâr Santrali Ekonomik Analiz Verileri.	50

1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusu, teknolojik gelişmeler (elektrikli otomobillerin yaygınlaşacak olması gibi) ve geleceğe dair projeksiyonlar elektrik enerjisine ihtiyacın katlanarak artacağını tahmin etmek için yeterli veriler. Enerji kaynağı olarak sadece kömür, doğalgaz ve petrol gibi limitli yakıtların kullanılması ile modern yaşamın sürdürülemeyeceği ispatlanmıştır. Bu kaynakların çevresel etkileri insanları yeni yöntemler bulmak üzerine yoğunlaştırmıştır: enerji verimliliği ve enerji kaynaklarının yenilenebilir türlere uzanan çeşitlendirilmesi.

Rüzgâr enerjisi, diğer enerji kaynaklarına kıyasla gerek üretim gerek tüketim aşamalarında çevreye daha az zarar veren bir enerji çeşididir. Esasında rüzgâr, insanoğlunun uzun sürelerden beri kullandığı bir kaynaktır. Öyle ki bu kaynak zamanında insanların yiyeceklerini yapmak için kullanılırken şimdilerde daha çok evlerini aydınlatmak için bir vasıtaadır. Kömür ve doğalgaza bir alternatif olarak düşünülen rüzgâr enerjisinin kullanım payı gerek toprak gerek okyanus üzerinde giderek artmaktadır [Uçar ve Balo, 2009].

Rüzgâr ölçüm istasyonları kanıtlamışlardır ki Türkiye rüzgâr enerjisinden verimli enerji üretimi elde edebilir [Akpınar ve Akpınar, 2009].

Ülkemiz enerji konusunda ithalat anlamında büyük bir tutar kaybetmektedir. Rüzgâr enerjisine doğru atılan adımlar çevresel etkileri de göz önüne alındığında fayda sağlayacaktır [Web 6, 2008].

Rüzgâr enerjisi düzeneklerinden elde edilen elektrik enerjisinin birim maliyeti ülkeden ülkeye değişkenlik gösterir. Rüzgâr enerjisi, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla elde edinimi zor olan, başlangıç yatırımı pahalı bir teknolojidir. Fakat rüzgâr türbini teknolojisi geliştikçe daha yüksek güçlerde üretim yapma kapasitesine sahip türbinler ve kuleler kurulmakta, dolayısıyla üretilen birim enerji (kWh) için gerekli yatırım maliyetini düşürmektedir [Kaya ve Koç, 2015].

Bu çalışma ile Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından saatlik aralıklarla 10m yükseklikte ölçülen rüzgâr hızı, yönü, atmosfer basıncı ve hava sıcaklığı verilerine dayanılarak, Weibull dağılımı metodu (moment yöntemi) ve ortalama hız tespiti vasıtasıyla Darıca/Kocaeli bölgesinin rüzgâr enerjisi potansiyeli tespiti yapılmıştır. Bu araştırma sonucunda söz konusu bölgenin rüzgâr enerjisi santrali kurulumu için uygun

olup olmadığı tespit edilmiş, ardından bölgeye kurulumu yapılabilecek bir santralin ekonomik analizi birtakım varsayımlarla yapılacaktır.

Mevcut durumda, Kocaeli ilinde toplam 2.120 MW kurulu güç kapasitesi bulunmaktadır [Web 1, 2018]. Bu, güç elde edinimi kaynaklarının, santral tiplerine göre dağılımında doğalgaz %90 oranla başı çekmektedir. Ardından kömür onu %9 ile takip ederken rüzgâr % 0.5’lik bir orana sahiptir.

Gelecek nesillere daha iyi çevresel koşullar bırakmak için birçok firma ve hatta kamu kuruluşu ihtiyaçlarını zamanla yenilenebilir enerjiden sağlamak adına yüzlerini yenilenebilir enerji kaynaklarına dönmektedirler. Örneğin Çayırova ilçesinde bulunan TSE yerleşkesindeki güneş enerjisi santrali normal şartlar altında senelik 1.280.000 kWh elektrik üretmekte 13,5 sentten kamuya sattığı kısmı haricinde kendi elektrik ihtiyaçlarına %45 oranında katkı sağlamaktadır.

Devlet kurumlarının (EİE, DMI) yaptıkları çalışmalarda Marmara Bölgesi’nde rüzgâr enerjisinden faydalanılabilir olduğu ortaya çıkmıştır [Nurbay, 2005].

Marmara bölgesinin Türkiye sanayisinin merkezi olduğu düşünüldüğünde, özellikle Çayırova ilçesinde kümelenmiş gerek elektrik üretim gerek tüketim tesislerinin çevreye, tabiatıyla insana verdiği zararlı salınımın önüne geçilebilmesi için bu bölgede yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek elzem hale gelmektedir.

2. ENERJİ

2.1 Enerjinin Tanımı

İş yapabilme kapasitesine enerji denmektedir. Enerjiyi iki ana sınıfa ayırabiliriz, bunlar:

- Kinetik enerji,
- Potansiyel enerjidir.

Ana enerji olarak adlandırdığımız bu sınıflandırma doğada birçok farklı enerji şeklinde bulunabilmektedir. Bunlardan en çok tercih edilen tipler kısaca şunlardır:

Mekanik Enerji: Elde edilen gücü hareket kabiliyeti ile iş yapabilen işe dönüştüren bir enerjidir. Hareket enerjisi (kinetik enerji) iş yapabilme kabiliyeti edindiğinde mekanik enerji adını almaktadır. Mekanik enerjiye dönüşen hareket enerjisinden doğrudan bir fiziki kuvvet alınabildiği gibi jeneratörler vasıtasıyla elektrik enerjisi de üretilebilmektedir.

Kimyasal Enerji: Kimyasal reaksiyon (özellikle H ve C atomlarının oksijen ile hızlı birleşmesi) sonucunda ortaya çıkan enerjiye kimyasal enerji denilmektedir. Kimyasal enerji; elektrik enerjisi ile diğer ihtiyaç şekillerine göre yeniden düzenlenebilmektedir.

Isı Enerjisi: Petrol, kömür, linyit, doğalgaz gibi fosil yakıtların içerdiği enerjinin oksijen ile yakılmasıyla ısı enerjisi elde edilmektedir. Oluşan ısı enerjisi ilk adımda çepeçevre etrafı içi saf su dolu boruları ısıtması vasıtasıyla buharı kızgın hale geçirmektedir. Ardından 300 ila 500 santigrat derecede kızgın buhar halini alan saf su rankine çevrimi göz önüne alınarak tasarlanan buhar türbinlerinde kanatlara çarpmakta ve mekanik enerji elde edilmektedir. Türbinlerin son aşamasında yer alan jeneratörler vasıtasıyla gerilim elde edilip şalt sahasından genel hatta elektrik enerjisi sağlanmaktadır.

Nükleer Enerji (Çekirdek Enerjisi): Uranyum, plütonyum, toryum gibi radyoaktif ağır atomik elementlerin parçalanması veya hidrojen, helyum, lityum gibi hafif çekirdeklerin reaksiyonları sonucunda meydana gelen enerji türüdür. Nükleer enerjinin kontrollü bir ortamda (nükleer santraller) ısı enerjisine ve sonra mekanik ve

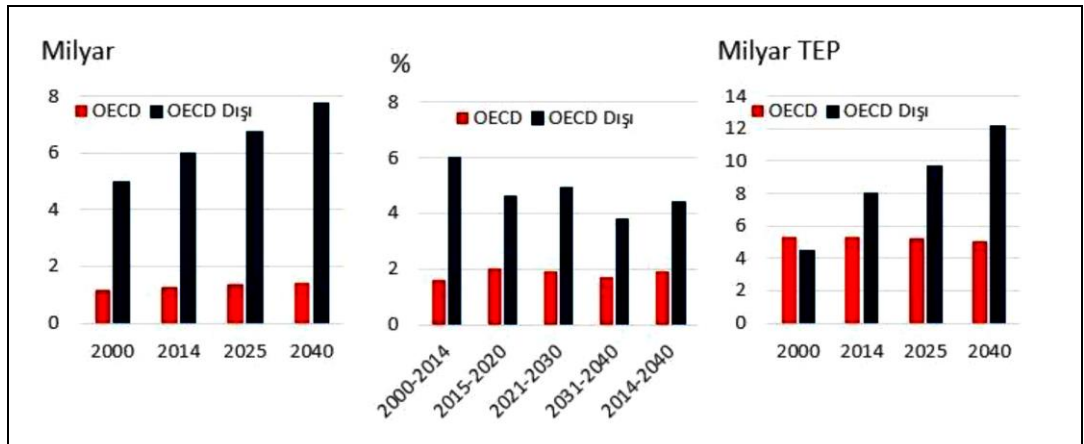
elektrik enerjisine dönüşmesi mümkündür. Nükleer enerjinin ani oluşumu ise (Atom, Hidrojen bombası) çok büyük bir enerjinin ortaya çıkmasına ve büyük yıkımlara neden olmaktadır. 21. yüzyılda birçok ülke, nükleer enerjiden, tehlike barındırmasına rağmen faydalanmaya devam etmektedir.

Elektrik Enerjisi: Maddenin atom yapısındaki elektronların hareketleri sonucu ortaya çıkan enerjidir. Elektrik enerjisinin ortaya çıkması için kullanılan malzemenin elektron transferine uygun yapıda olması gerekmektedir.

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin türler arasındaki dönüşümünden bahsetmektedir. Mekanik enerjinin elektriğe, kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüşümü bu yasaya örnek gösterilebilir.

2.2. Dünyada Enerjinin Görünümü

Hızlı nüfus artışı beraberinde tüketimi getirmektedir. Gelişen teknoloji ve bu teknolojinin getirdiği enerji tüketimi büyük bir kaynak gereksinimi yaratmaktadır. Şekil 2.1’de dünya nüfusu, ülkelerin GSYİH ve enerji ihtiyaçlarının yıllarla nasıl gerçekleşeceğine dair bir öngörü sunulmuştur [Web 2, 2017].

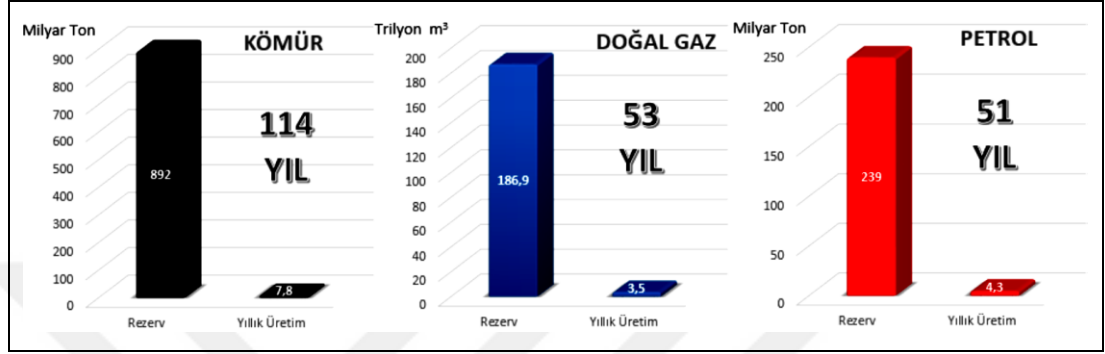


Şekil 2.1: Popülasyon, Ekonomik Büyüme ve Birincil Enerji İhtiyacı Öngörülleri.

Olası senaryolarda tükenir yakıt kaynaklarının zamanla kullanımının azalacağı fakat yine de ağır basan tarafta olacakları tahmin edilmektedir. Nükleer güce olan alakanın artacağı, sürdürülebilir kaynaklardan ise %16 oranında faydalanılacağı projeksiyonlarda mevcuttur.

2.2.1. Fosil Kaynaklar

Tükenir kaynakların dünya için faydasının sınırlı olduğu ve sürdürülebilir kaynaklara yönelimin gerekliliği sıklıkla enerji çevrelerinde gündeme getirilen bir gerçektir. Şekil 2.2’de bu kaynakların yaklaşık ömürleri hakkında bilgi verilmiştir.



Şekil 2.2: Fosil Kaynakların Ömürleri.

2.2.2. Elektrik Üretimi

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki yüzdesi gün geçtikçe artmaktadır. Ülkemizin uzun bir süredir üyesi olmaya çalıştığı Avrupa Birliği’nde üretilen elektriğin %29’unun sürdürülebilir kaynaklardan sağlandığı Eurelectric adlı dernekçe açıklanmıştır. En büyük 22 elektrik üreticisinin ürettikleri enerji ve payları Şekil 2.3’te verilmiştir [Web 2, 2017].

ÜLKE	Miktar (TWh)	Dünya Toplamındaki Payı (%)	SIRA
Çin	5.810,6	24,1%	1
ABD	4.303,0	17,9%	2
Hindistan	1.304,8	5,4%	3
Rusya	1.063,4	4,4%	4
Japonya	1.035,5	4,3%	5
Almanya	647,1	2,7%	6
Kanada	633,3	2,6%	7
Brezilya	579,8	2,4%	8
Fransa	568,8	2,4%	9
Güney Kore	522,3	2,2%	10
Birleşik Krallık	337,7	1,4%	11
Suudi Arabistan	328,1	1,4%	12
Meksika	306,7	1,3%	13
İran	281,9	1,2%	14
İtalya	281,8	1,2%	15
İspanya	278,5	1,2%	16
Türkiye	261,8	1,1%	17
Tayvan	258,0	1,1%	18
Avustralya	253,6	1,1%	19
Güney Afrika	249,7	1,0%	20
Endonezya	234,7	1,0%	21
Mısır	180,6	0,7%	22
TOPLAM DÜNYA	24.097,7	100%	

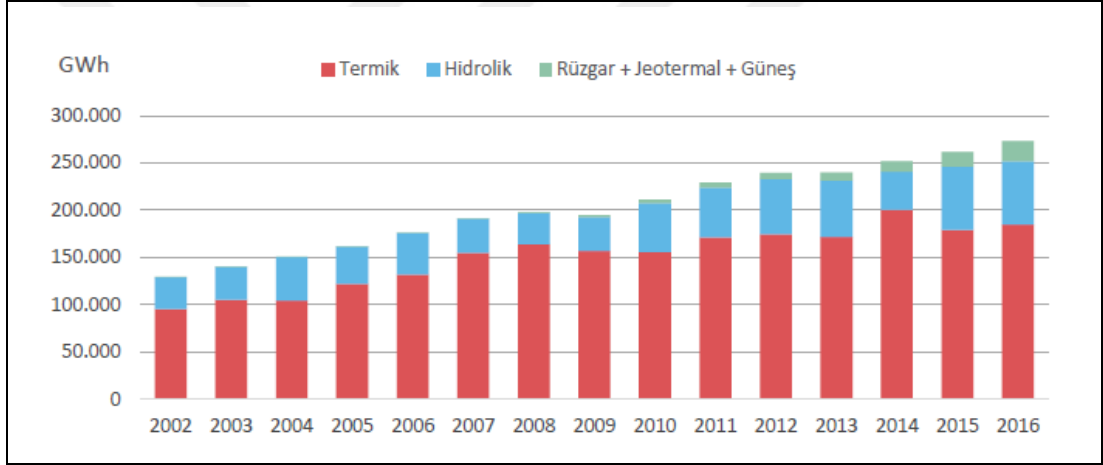
Şekil 2.3: Ülkelerin 2015 Yılı Elektrik Üretim Kapasiteleri.

2.3. Ülkemizin Enerji Görünümü

Ülkemizin 2016 yılı sonunda enerji bakanlığının sunduğu verilerle hazırlanan enerji üretimi tablosu Şekil 2.4'te verilmiştir. Tablodan okunduğu üzere rüzgâr, güneş ve jeotermal kaynaklı üretim 2002 yılında yüzde 0,1'den 2016 sonunda 7,8'e ulaşmıştır. Bu göstermektedir ki yenilenebilir kaynaklara eğilim ülkemizde yatırımcı bulan bir eylemdir [Web 2, 2017].

YIL	TERMİK	HİDROLİK	RÜZGAR + GÜNEŞ + JEOTERMAL
2002	73,9%	26,0%	0,1%
2003	74,8%	25,1%	0,1%
2004	69,3%	30,6%	0,1%
2005	75,5%	24,4%	0,1%
2006	74,8%	25,1%	0,1%
2007	81,0%	18,7%	0,3%
2008	82,7%	16,8%	0,5%
2009	80,6%	18,5%	1,0%
2010	73,8%	24,5%	1,7%
2011	74,8%	22,8%	2,4%
2012	73,0%	24,2%	2,8%
2013	71,5%	24,7%	3,7%
2014	79,5%	16,1%	4,3%
2015	68,5%	25,7%	5,8%
2016	67,6%	24,6%	7,8%

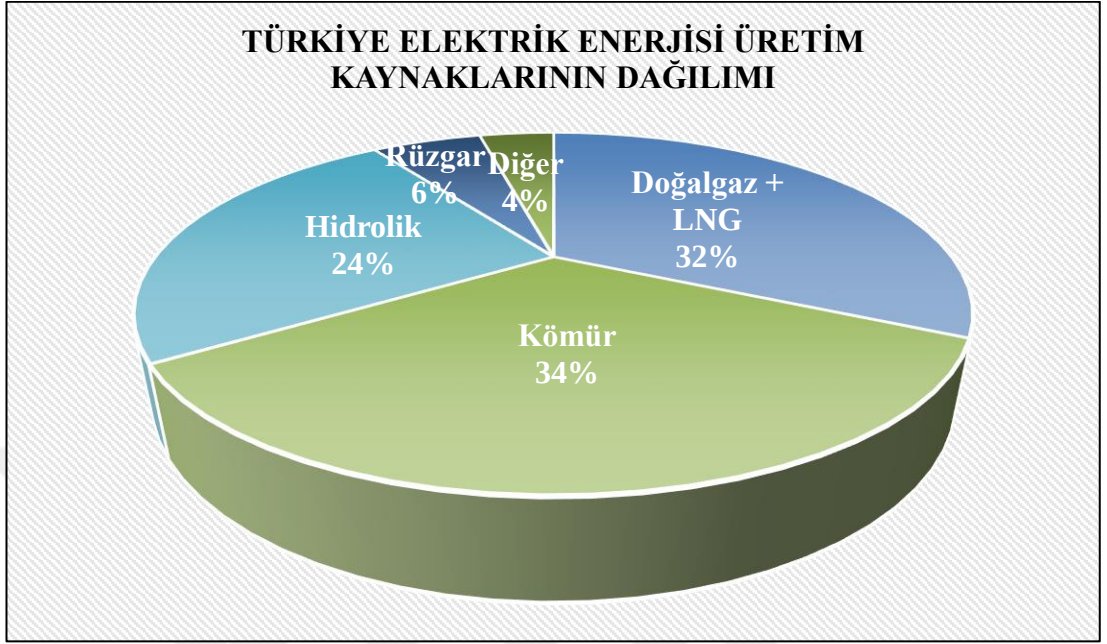
Şekil 2.4: Ülkemiz Elektrik Enerjisi Üretim Kaynakları.



Şekil 2.5: Türkiye’de Enerji Üretimi Gelişimi.

TEİAŞ’ın son on yıllık Üretim Kapasite Projeksiyon çalışması kapsamında enerji talebi artışı için iki senaryo öngörülmüştür. Yıllık ortalama %6,5 enerji artış oranı ile düşük enerji talebi senaryosu ve yıllık ortalama %7,5 enerji artış oranı ile yüksek enerji talebi senaryosu şeklinde tahmin çalışması yapılmıştır. Bu çalışmaya göre Türkiye’nin 2021 yılındaki enerji talebinin, yüksek enerji talebi senaryosuna göre 467,2 milyar kWh, düşük enerji talebi senaryosuna göre 424,7 milyar kWh olarak gerçekleşeceği tahmin edilmektedir. Her iki senaryoya göre, yaklaşık olarak 2021 yılındaki enerji talebinin 2011 yılına göre %184 ile %202 arasında artması olası görünmektedir [Köstekci, 2014]. Şekil 2.5’ten 2002 yılından sonra ülkemizdeki

kaynaklara göre elektrik üretim tesislerinin gelişimi ve yararlanılan kaynaklar okunabilmektedir.



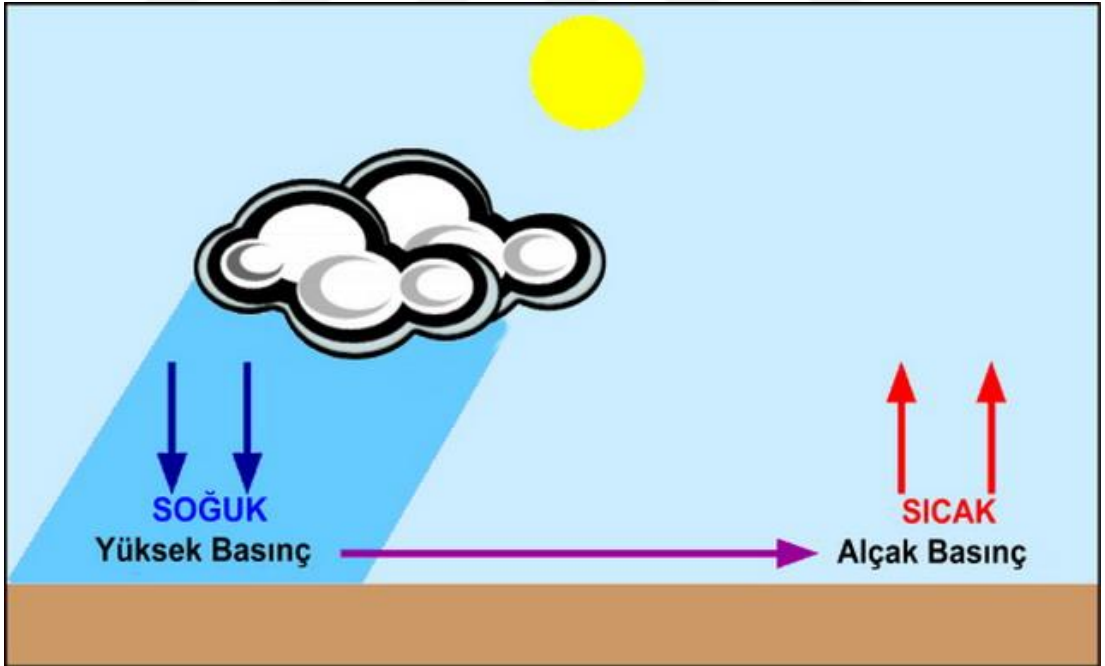
Şekil 2.6: Ülkemiz Enerji Kaynaklarının Yüzdesel Payları.

OECD kaynakları, ülkemizde bir yılda harcanan elektriğin en az iki mislinin kurulabilecek RES'ler ile karşılanabileceğini gösteriyor [Uyar, 2008].

3. RÜZGÂR ENERJİSİ

Tüm yenilenebilir enerji türleri (gelgit ve jeotermal enerji hariç) ve hatta fosil yakıtlardaki enerji bile en nihayetinde güneşten elde edilmektedir. Güneş dünyaya saatte 174.423.000.000.000 kilovat saat enerji yaymaktadır. Başka bir deyişle, dünya $1,74 \times 10^{17}$ watt güç almaktadır. Güneşten gelen enerjinin yaklaşık yüzde 1 ila 2'si rüzgâr enerjisine dönüşmektedir. Bu, dünyadaki tüm bitkiler tarafından biyokütleyle dönüştürülen enerjiden yaklaşık 50 ila 100 kat daha fazladır.

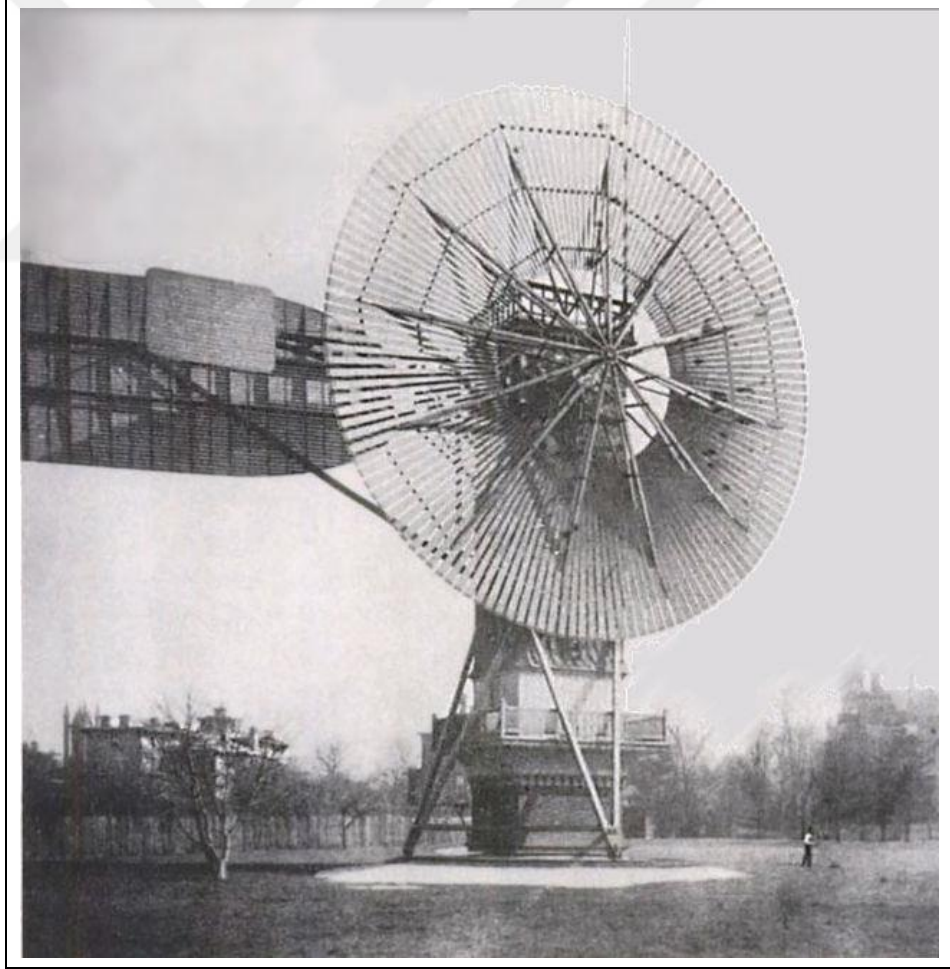
Ekvator etrafındaki bölgeler, 0° enlemde, dünyanın geri kalanından daha fazla güneş tarafından ısıtılır. Sıcak hava soğuk havadan daha hafiftir ve yaklaşık 10 km yüksekliğe ulaşana kadar gökyüzüne yükselir ve kuzey ve güneye yayılır. Eğer dünya dönmeseydi, hava basitçe Kuzey Kutbu ve Güney Kutbu'na gelirdi, batar ve ekvatora geri dönerdi. Dünyanın dönme etkisi ve güneşin havayı ısıtması sebebiyle yüksek basınçtaki basınç alçak basıncın olduğu kısma kayar ve rüzgâr oluşur. Rüzgâr oluşumu Şekil 3.1'de grafik olarak gösterilmiştir [Web 5, 2018].



Şekil 3.1: Rüzgâr Oluşumu

3.1. Rüzgâr Enerjisinin Gelişim Süreci

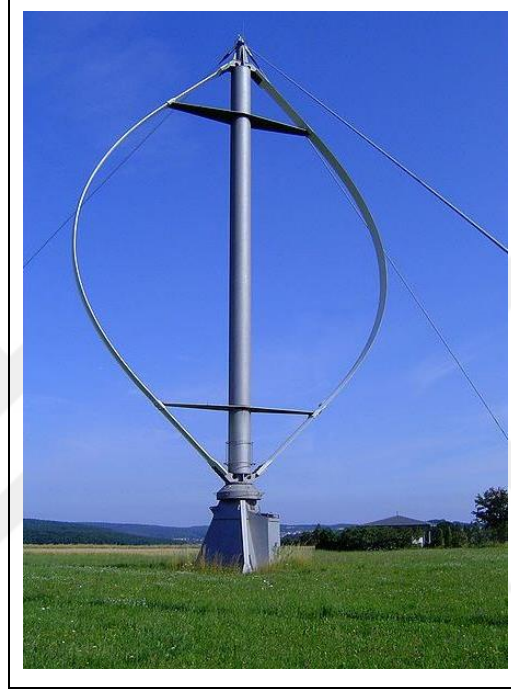
1887-88 yıllarında Charles F. Brush elektrik üretimi için otomatik olarak çalışan ilk rüzgâr türbini olduğuna inanılan makineyi inşa etti. Rotor çapı 17 m ve sedir ağacından 144 rotor kanadına sahip, dünyanın en büyük rüzgâr türbiniydi. 20 yıl boyunca çalışan bu mekanizma, aküleri mahzeninde şarj etti. Türbinin boyutuna rağmen, jeneratör sadece 12 kW'lık bir modeldi. Eski yavaş dönen Amerikan tipi rüzgârgülünü yüksek bir ortalama verime sahip olmamasıydı. Daha sonra Dane Poul la Cour, birkaç rotor kanadına sahip, hızlı dönen rüzgâr türbinlerinin, elektrik üretimi için yavaş hareket eden rüzgâr türbinlerinden daha verimli olduğunu keşfetti. Elektrik üretimi için oluşturulan ilk ABD rüzgâr türbini, Ohio'daki malikânesine elektrik sağlamak için mucit Charles Brush tarafından yapılmıştır [Gülbüz Öger, 2006].



Şekil 3.2: Bilinen İlk ABD Rüzgâr Türbini 1888.

1900'lı yılların başında Danimarka genelinde öğütölmüş tahıllar ve pompalama suyu gibi mekanik amaçlar için toplam 30 megawatt güç kapasitesine sahip yaklaşık 2.500 yel değirmeni kullanıldı.

Darrieus rüzgâr türbini adı verilen dikey eksenli bir rüzgâr türbini tasarımın, Fransız havacılık mühendisi Georges Jean Marie Darrieus tarafından patenti alındı. Bu tür rüzgâr türbini bugün hala kullanılmaktadır.



Şekil 3.3: Darrieus Rüzgâr Türbini (Dikey Eksenli).

İlk megavat büyüklüğündeki rüzgâr türbini, halen yerel bir elektrik dağıtım şebekesine bağlıdır. 1,25 MW'lık Smith-Putnam rüzgâr türbini, Vermont, Castletown'da kurulmuştur. 22 m uzunluğunda pervaneleri vardır.

ABD'deki ilk rüzgâr çiftliği santrali 1975'te aktif hale getirilmiştir ve 4.149 eve yetecek kadar güç üretilmiştir. NASA'nın 1987'de rüzgâr türbini programı tarafından 3,2 megavatlık bir rüzgâr türbini geliştirilmiştir. Bu projede, ilk büyük ölçekli değişken hızlı sürüş treni ve daha kolay taşıma sağlayan kesitli, iki kanatlı bir rotor kullanılmıştır.

2000'li yılların başında küresel anlamda rüzgâr gücü 17.400 MW yüke erişmiştir. 2008 yılında İngiltere genelinde yaklaşık 2000 rüzgâr çiftliği işletiliyordu

ve 1,5 milyondan fazla İngiliz evi için yeterli elektrik rüzgâr enerjisinden sağlanmaya başlanmıştı.

2013 yılında ABD’de ilk açık deniz rüzgâr çiftliği kurulmuştur. Rüzgâr enerjisi tüm bu süreç boyunca uzun bir yol kat etti, fakat büyümesi için hala çok uzun bir yolu var. Önümüzdeki on yıldaki büyümesinin şimdiye kadar olduğundan daha büyük olacağı tahmin edilmektedir [Vasi, 2011].

3.2. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları

Rüzgâr enerjisi rüzgâr hızının küpüyle orantılı olarak değişir. Türbinlerin ilk yatırım maliyetleri yüksek olsa da rüzgâr enerjisinin yenilenebilir ve ücretsiz oluşu başlı başına bir faydadır. Her şeyden önce rüzgâr, sınırsız, özgür ve yenilenebilir bir kaynaktır. Rüzgâr doğal bir oluşumdur ve rüzgârın kinetik enerjisini toplamak, akımları veya doğadaki rüzgâr çevrimlerini hiçbir şekilde etkilemez. Ayrıca, rüzgâr gücünün toplanması, elektrik üretmek için temiz ve kirletici olmayan bir yoldur. Diğer enerji santrallerinin aksine, hava, kirletici madde veya sera gazı yaymaz. Rüzgâr türbinleri, zarar vermeden rüzgârın kinetik enerjisi sayesinde elektrik üretir. Rüzgâr enerjisi, elektrik için fosil yakıtların yanmasından çok daha çevrecidir.

3.3. Rüzgâr Enerjisinin Dezavantajları

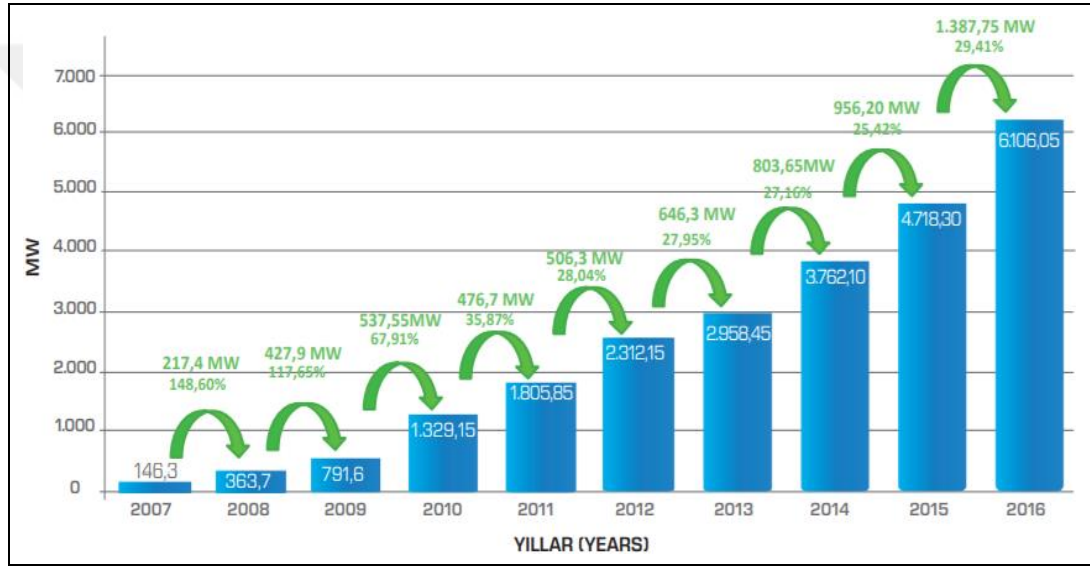
Rüzgâr gücünün iki büyük dezavantajı, başlangıç maliyetleri ve teknoloji hamlığıdır. Yüksek enerji maliyeti, kısmen, güvenilirliği ve enerji üretimini artıran ve sistem sermayesi giderlerini düşüren teknoloji yenilikleriyle doğrudan ele alınabilir. Maliyetleri düşürmek, güvenilirliği ve enerji üretimini artırmak, bölgesel dağıtım sorunlarını çözmek, kaynak alanını genişletmek, altyapı ve üretim tesisleri geliştirmek ve bilinen çevresel etkileri azaltmak için yeni teknolojiye ihtiyaç bulunmaktadır. Bu nedenle, bir rüzgâr enerjisi uygulamasının teknolojik gelişmeler sağlanıncaya kadar ertelenmesi gerektiği iddia edilebilir. Ayrıca gürültü sebebiyle tabii yaşama etkisi negatif etkiler arasında sayılabilir. Çevredeki radyo frekanslarını olumsuz anlamda etkileyebilirler.

3.4. Rüzgâr Enerjisinin Türkiye’deki Durumu

Türkiye’nin mevcut tüm elektrik üretimindeki kurulu gücü 88.551 MW’tır. Bu gücün içerisindeki %7.9’luk pay rüzgâra aittir.

2018 yılında Türkiye’de üretilen elektriğin %6’sı rüzgârdan elde edilmiştir Bu oran yaklaşık 20 GWh elektrik etmektedir.

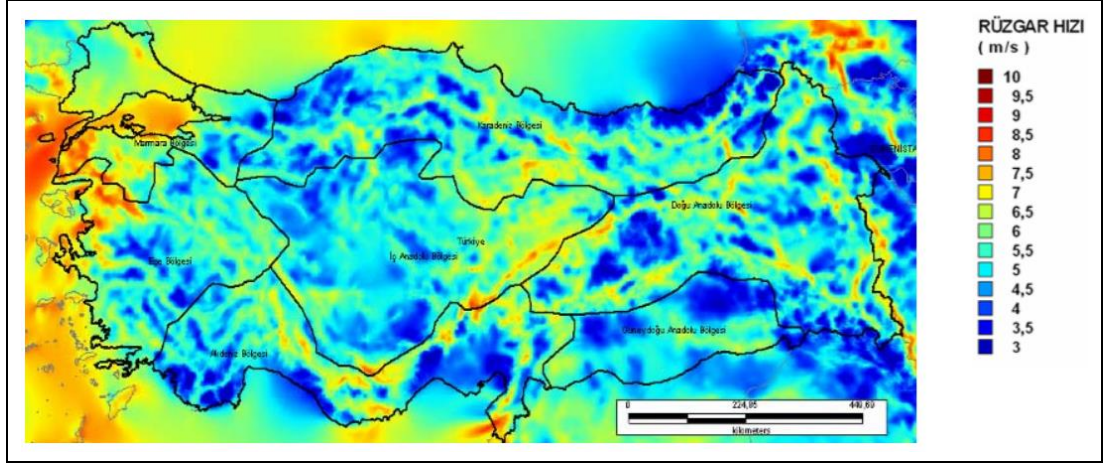
Rüzgâr enerjisi anlamında elde edilebilecek 48.000 MW gücün topraklarımızda mevcut olduğu tahmin edilmektedir. Ülke yüzölçümünün %1.3’üne denk gelmektedir [Web 2, 2017].



Şekil 3.4: Ülkemizde Rüzgâr Enerjisi Yatırımlarının Gelişimi Süreci.

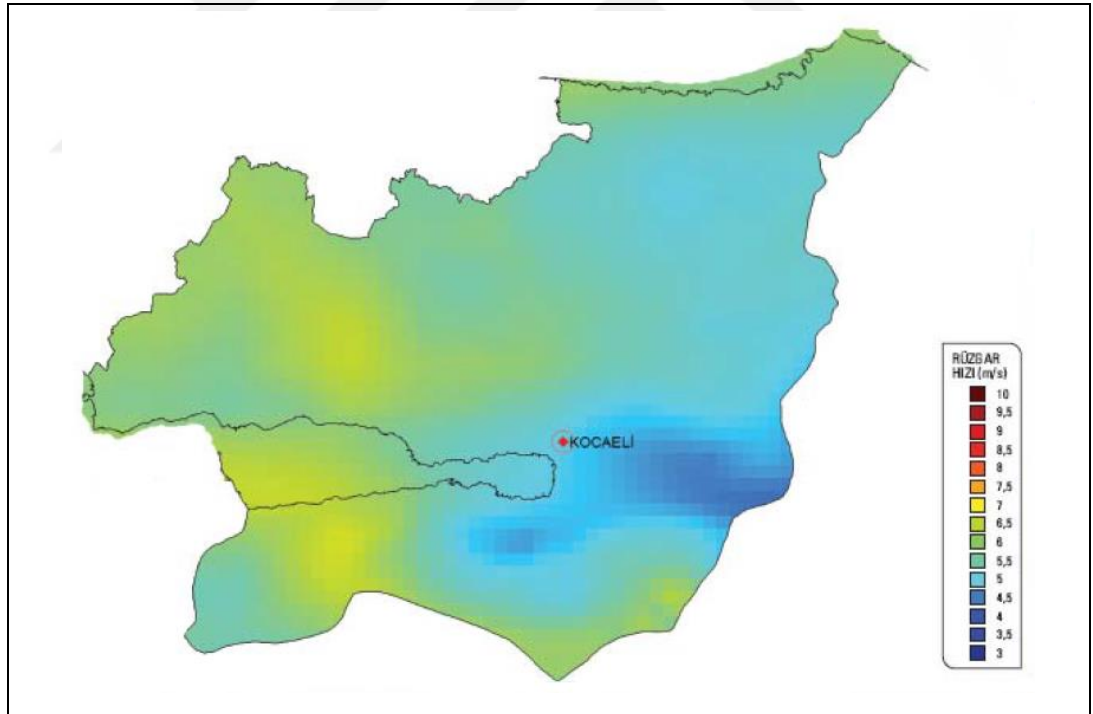
3.5. Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA)

REPA, coğrafi etkiler de göz önüne alınarak düzenlenen hava tahmini modeli ve rüzgâr akış modelleri kullanılarak bölgelerin rüzgâr hızlarının verildiği kaynak bir haritadır. Deniz ve kıyı bölgelerde rüzgâr hızlarının daha fazla olduğu haritadan görülmektedir. Optimum seviyede faydalanılmak istenen RES yatırımları için yatırım yapılacak bölgedeki rüzgâr hızının 7 m/s’den büyük olması beklenmektedir [Web 3, 2018].



Şekil 3.5: Türkiye Rüzgâr Hızı Haritası (50m Yükseklikte).

Yenilenebilir enerji genel müdürlüğünün Kocaeli ili geneli için oluşturduğu 50 metre yükseklikte ölçülen verilerle çizilen rüzgâr hız dağılım haritası Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6: Kocaeli Rüzgâr Haritası.

4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

4.1. Rüzgâr Türbini Nedir?

Rüzgâr türbini, en basit tanımıyla havadaki hareket enerjisini önce mekanik enerjiye ardından etrafına iletken sarılmış bir bobinin dönme enerjisini elektriğe çevirme prensibiyle çalışan bir düzendir.

Bir rüzgâr türbininin kanatları, teknolojisine bağı olarak dakikada 13 ila 20 devir arasında döner. Daha yüksek bir verime ulaşmak için rotorun hızının rüzgârın hızına göre değiştiği veya sabit kaldığı olur. Rüzgâr türbinlerinin ortalama yaşam döngüsü 25 yıldır. Rüzgâr teknolojisinin hızlı evrimi, dayanıklılığın daha da artacağına işaret etmektedir.

4.2. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

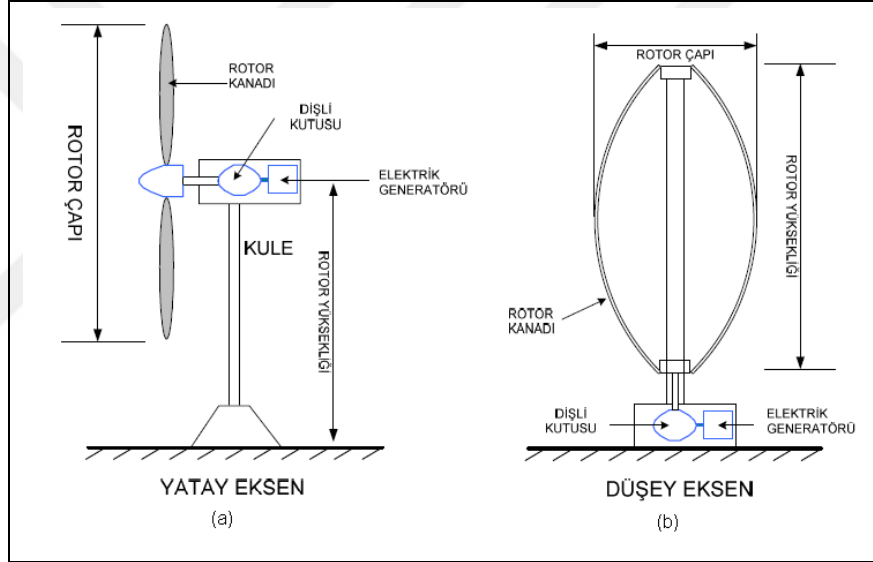
Dizayn açısından dikey, yatay ve nadiren de görülse eğik olarak rüzgâr türbinlerini üçe ayırmak mümkündür. Rotor devrine, ebatlarına, rüzgârı nereden aldığına ve kurulum yerleri gibi diğer faktörlere göre sınıflandırmak Tablo 4.1'deki gibi mümkündür [Elibüyük ve Üçgöl, 2014].

Tablo 4.1: Türbin Tipleri.



4.2.1. Yatay (YERT) ve Dikey (DERT) Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbini, rüzgâr endüstrisinin çoğunluğuna hâkimdir. Yatay eksen, rüzgâr türbininin dönen ekseninin yatay veya yere paralel olduğu anlamına gelir. Bununla birlikte, küçük rüzgâr ve mesken rüzgâr uygulamalarında, dikey eksenli türbinlerin yerini almıştır. Yatay kanatlara esen rüzgârın avantajı, belirli bir rüzgâr miktarından daha fazla elektrik üretebilmesidir. Bu nedenle, daha fazla rüzgârdan faydalanabilmek için yatay eksen doğru seçimdir. Ancak yatay eksenin dezavantajı, genellikle daha ağır olması ve türbülanslı rüzgârlarda iyi elektrik üretmemesidir. Düşey eksenli türbinlere örnek olarak zorlanmış koşullarda çalışan metrobüs hattı üzerindeki tasarımlar Şekil 4.2'deki gibi gösterilebilir.



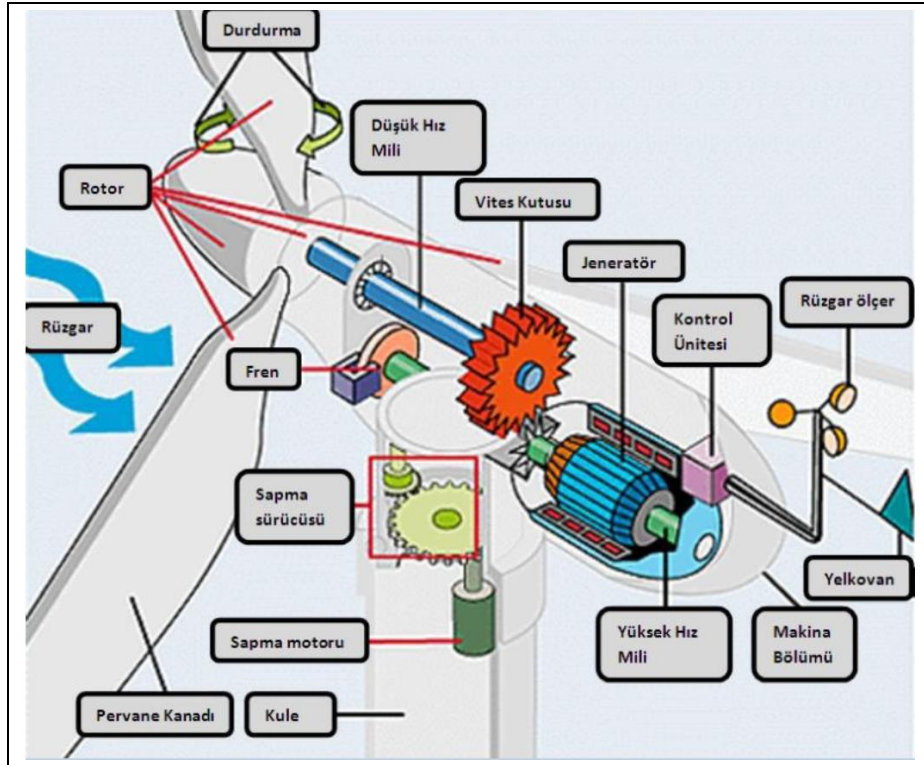
Şekil 4.1: Yatay ve Dikey (Düşey) Eksenli Rüzgâr Türbinleri.



Şekil 4.2: Metrobüs Hattındaki DERT.

4.3. RES Elemanları

Şekil 4.1’de standart yatay ve düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin şematik görüntüleri ve pozisyonları görülmektedir. Bu unsurlar Şekil 4.3 üzerinde detaylı resmedilmiştir [Aydinyüz, 2015].



Şekil 4.3: Rüzgâr Türbini Elemanları.

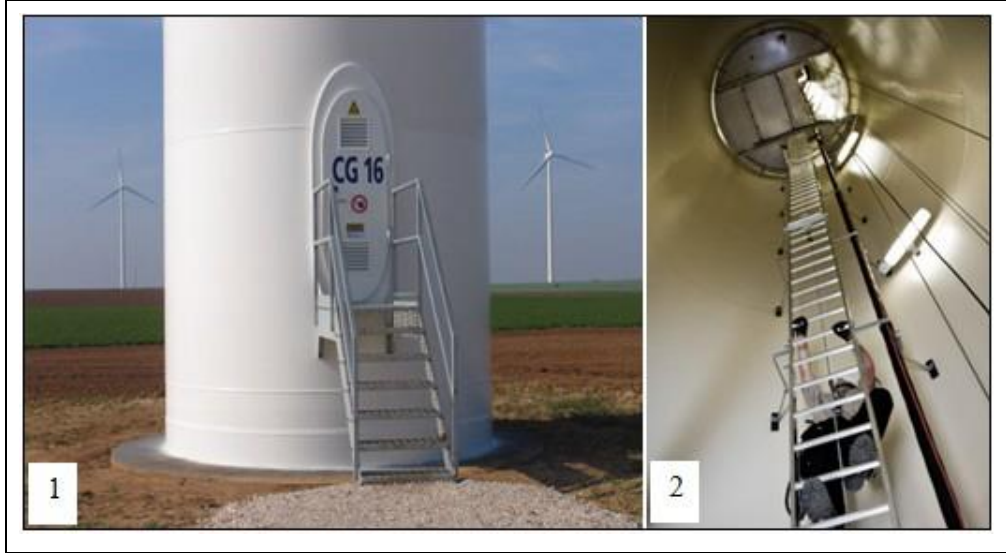
Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, kendisine esen rüzgârın engeller tarafından engellenemeyeceği kadar yükseltilen bir kule üst kısmına yerleştirilmiş bir gövde ve gövdeye bağlantısı yapılmış çarkın bir araya gelmesiyle oluşmaktadır.

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri genel olarak aşağıdaki elemanlardan oluşur;

- Kule,
- Pervane (Rotor),
- Gövde (Nasel),
- Göbek (Kanatların çarka bağlantısını sağlayan parça),
- Düşük hız şaftı,
- Dişli Kutusu,
- Yüksek hız şaftı,
- Mekanik fren,
- Elektrik jeneratörü,
- Elektrik kontrol sistemi,
- Hidrolik sistem.

4.3.1. Kule

Bütün elemanların üzerinde bulunduğu, elektrik kablolarının içinde yer aldığı taşıyıcı elemandır. Modern rüzgâr türbinleri, halka enine kesitli tüp şeklinde kuleler kullanılarak inşa edilirler [Aydinyüz, 2015].



Şekil 4.4: Kule Giriş Kapısı ve Kule İçi Güvenlik Merdiveni.

Tüp şeklindeki kule tasarımları sıklıkla kullanılan kule tipidir. Genellikle 20-30 metre uzunluğunda üretilirler. Bu tipteki kulelerin, giriş kapısı ve kule içi güvenlik merdiveni ve/veya asansörü mevcuttur. Şekil 16’da kule giriş kapısı (1) ve kule içi güvenlik merdiveni (2) gösterilmektedir. Bir türbin ünitesinde en pahalı kısım kuledir.

4.3.2. Pervane

Kanatların üzerinden hareket eden rüzgâr akışının etkisi ile dönerek kinetik enerjiyi mekanik enerjiye çeviren rüzgâr türbini elemanıdır. Diğer bir deyişle rüzgârın gücünü çark göbeğine aktaran elemandır.

Türbin kanatları yapımında uçak kanatlarında olduğu gibi kompozit malzemeler seçilmektedir. Cam lifli, karbon lifli bu kompozit materyaller plastik ahşap veya alüminyum malzemelere eşlik edebilmektedir. Küçük rüzgâr türbinlerinin tasarım aşamasında ağırlık veya sertliğe göre malzeme seçiminden çok üretim verimliliği ön plana çıkmaktadır. Büyük türbinlerde ise kanat yapısına uygun malzeme seçimi yer çekimi kuvveti etkisinden ötürü önem arz etmektedir [Karabağ, 2011].

Büyük rüzgâr türbinlerinde genellikle cam lifli güçlendirilmiş plastik malzemelere yer verilmektedir. Bu malzeme, hafiflik ve yüksek mukavemet sağlamasının ötesinde diğer malzemelere göre maliyeti olarak daha ekonomiktir. Karbon lifli güçlendirilmiş plastik imali kanatlar pahalı olması sebebiyle ekonomik açıdan kullanımlarını sınırlamıştır. Kopma mukavemeti 420 N/m^2 olan cam elyaf bu

özelliği açısından, St 52 çeliğine yakınsamaktadır. Karbon epoksi ile güçlendirilmesi halinde epoksi materyalin dayanımı 550 Pascal olabilmekte ve kopma mukavemeti açısından çelikten daha dayanımlı olabilmektedir.

4.3.3. Gövde (Nasel)

Gövde (Nasel) rüzgâr türbininin elemanlarını dış ortamdan korur. Rüzgâr türbininin tüm hareketli parçalarını içerisinde muhafaza eder. Gövde içerisinde bakım yapılması halinde bakım personeli gövde muhafazası içerisine türbin kulesinden girebilir. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere bakım elemanı gövde içerisinde kolaylıkla çalışabilmektedir.



Şekil 4.5: Büyük Rüzgâr Türbinlerinde Gövde Bakımı.

4.3.4. Göbek

Pervaneler ile gövde arasındaki mesnet görevi sağlayan bölümdür. Verimlilik açısından zaman zaman servo motorlar ile hareket ettirilebilir. Böylece kanatlar açılabilir, rüzgârın hızına göre yüzlerini rüzgâra dönerler. Göbek küresel grafitli dökme demir malzemeden yapılır. Şeklinin karmaşık, büyük ve yekpare olmasından dolayı göbek imalatında bu malzemenin kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Ayrıca göbeğin metal yorulmasına karşı da oldukça dirençli olması

gereklidir. Küresel grafitli dökme demir kullanımı ile normale göre kırılmaya karşı dayanıklılık arttırılmaktadır.

4.3.5. Dişli Kutusu

Rüzgâr türbinlerindeki dişli kutuları yavaş hızı, yüksek torku jeneratör için yüksek hıza çıkarmaya çalışan aygıtlardır. Şanzımanlar zorlu koşullar altında çalışırlar ve ömür sürelerinin yüksek olması istenir.

Şanzıman, rüzgâr türbinlerindeki komplikasyonlara neden olan bileşenlerden biridir. Şanzımanların bakım ve değiştirme maliyetleri ile birlikte çalışmayan şanzımanlardan kaynaklanan üretim kayıplarından kaynaklanan maliyetler, rüzgâr santrallerinin giderlerinin büyük bir kısmını oluşturur.

İhtiyaç duyulan elektriksel frekans değerini üretmede, çark açısal hızı genellikle jeneratörü döndürmek için yeterince hızlı değildir. Dönme sistemleri için gerekli hızlarda mekanik olarak bir artış ve azalış dişli takımları ile sağlanmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde vites kutusu diyebileceğimiz yapı düşük hızlı milin açısal hızını jeneratöre bağlanan yüksek hızlı milin süratine arttırmada kullanılırlar.

4.3.6. Frenler

Rüzgâr türbinlerinin gerektiğinde güvenli bir şekilde durdurulmasını sağlamak amacıyla türbin mekanizması üzerinde aerodinamik ve mekanik olmak üzere iki tip fren bulunmaktadır.

4.3.6.1. Aerodinamik Frenler

Aerodinamik frenler kanatların açılarının değiştirilmesi sonrasında rüzgârı karşılamayan bir açı kazanan pervane düzeninin yavaşlatma mantığı üzerine tasarlanmışlardır. Stall kontrollü rüzgâr türbinlerinde kanat ucunun 90°, hatve kontrollü ve aktif stall kontrollü türbinlerde kanadın kendi yatay eksenine etrafında 90° dönmesiyle frenleme sağlanır. Elektriklerin kesilmesi durumunda bu sistem yaylar yardımıyla çalıştığından frenleme tekrar devreye girebilmektedir. Frenleme sonrası tam durma birkaç tur dönüş sonrası gerçekleştiğinden ve ani bir durma olmadığından bu esnada kule üzerinde oluşan gerilme azdır.

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan kanat çapına göre kanat ucu dönen kısmı 3-7 m uzunluğunda olabilmektedir. Döner kısım karbon fiberden imal edilmiş şaft üzerine monte edilmiştir [Web 4, 2018].

4.3.6.2. Mekanik Frenler

Gerekli olması halinde rotoru durdurabilmek için yüksek hız şaftına yerleştirilmişlerdir. Türbin kanatlarının kontrolünü kaybetmeden yüksek hızlarda türbinlerinin emniyetli frekansları yakalaması için hızlı bir frenleme gerekebilir. Öyle ki; hız limitinin aşıldığı durumlarda şebeke bağlantısının kopararak çarkın güvenli olarak durdurulmasını sağlayabilsinler. Ayrıca bakım çalışmaları esnasında güvenlik gerekçesiyle mekanik frenler yardımıyla çark durdurulmaktadır.

Mekanik frenler hidrolik sistem içermektedirler; bu yüzden sistem içerisindeki hidrolik seviyesinin azalmamasına dikkat edilmelidir. Fren bloğu ve disk arasında sürtünme oluşturularak frenleme sağlanır. Frenleme esnasında oluşan gerilme miktarı yüksek olduğundan, fren bloğunun tasarımında özel alaşımlar tercih edilir. Arabalarda kullanılan fren sistemleri azami 300 °C'ye kadar çalışabilmekteyken, rüzgâr türbinlerinde kullanılan bu metal alaşımları 700 °C sıcaklık seviyelerine kadar çalışabilmektedir.

4.3.7. Jeneratör

Elektrik jeneratörü genellikle indüksiyon jeneratörü veya asenkron jeneratördür. Modern bir rüzgâr türbininde, maksimum elektrik gücü genellikle 600 ila 3000 kilowatt (kW) arasındadır. Kanatlardan gelen dönme enerjisini sarılı bobinleriyle gövde içerisinde elektriğe çevirir ve kule içerisinde yer alan kablolarla sahaya iletir.

4.3.8. Anemometre ve Yelkovan

Anemometre ve yelkovan, rüzgârın hızını ve yönünü ölçmek için kullanılır. Anemometrenin elektronik sinyalleri, rüzgâr hızı saniyede yaklaşık 5 metreye ulaştığında (10 knot) rüzgâr türbini başlatmak için rüzgâr türbininin elektronik kontrolörü tarafından kullanılır. Bu değer bu projede kullanılan türbin için 4m/s'dir.

Rüzgâr hızı, türbini ve çevresini korumak için saniyede 25 metreyi (50 knot) aşarsa, bilgisayarlar rüzgâr türbinini otomatik olarak durdurur. Rüzgâr gülü sinyalleri, rüzgâr türbininin elektronik kontrolörü tarafından, rüzgâr türbini rüzgâra karşı, yalpa mekanizmasını kullanarak döndürmek için kullanılır [Web 4, 2018].

4.3.9. Yalpa Mekanizması

Türbin, rüzgârın estiği yöne göre konumu yönlendirir. Yalpa (yaw) dişlisi kontrol ünitesi ve yelkovandan aldığı sinyal sonrasında yönünü daima rüzgârı karşısına alacak şekilde türbini konumlandırır.

4.3.10. Hidrolik Sistem

Hidrolik sistem, rüzgâr türbininin aerodinamik frenlerini sıfırlamak için kullanılır.

4.4. Rüzgâr Türbinlerinin Teknik Analizi

4.4.1. Rüzgâr Türbini Aerodinamiği

Türbin aerodinamiği türbinde oluşan rüzgâr kaynaklı kuvvet ve momentleri inceler. Rüzgâr türbini aerodinamiği iki ana yaklaşımla ele alınabilir: Bunlardan ilkinde rüzgârdan elde edilen enerji hesaplanır. Eyleyici Disk Modeli ile türbininin rüzgârdan elde edebileceği maksimum enerji dönüşüm katsayısı elde edilir. İkinci yaklaşımda ise rüzgâr türbini aerodinamiği ile türbin kanatlarına etkiyen kuvvetler hesaplanır [Akdoğan, 2011].

4.4.1.1. Eyleyici Disk Modeli

Bu modelde moment teorisi kullanılır. Rüzgâr türbini bir çeşit eyleyici disk olarak kabul edilir. Bu disk bir hava akımının içine yerleştirilmiştir. Disk sıkıştırılmaz kabul edilir. Hava akımının içine yerleştirilen disk, rüzgârın bir miktar kinetik enerjisini alır. Bu durumda Şekil 18'deki diskin girişindeki rüzgâr hızı V , diskin çıkışındaki rüzgâr hızı V_{∞} dan daha büyüktür [Bianchi et al, 2007]. Kütle akım hızı

eyleyici diskin önünde ve arkasında eşit olmalıdır. Bundan dolayı eyleyici disk alanı A_D , $A_{-\infty} > A_D > A_{\infty}$ aralığındadır. Kütlenin korunumu ilkesi şöyle ifade edilebilir:

$$\rho A_{\infty} V = \rho A_D V_D = \rho A_{-\infty} V_{-\infty} \quad (4.1)$$

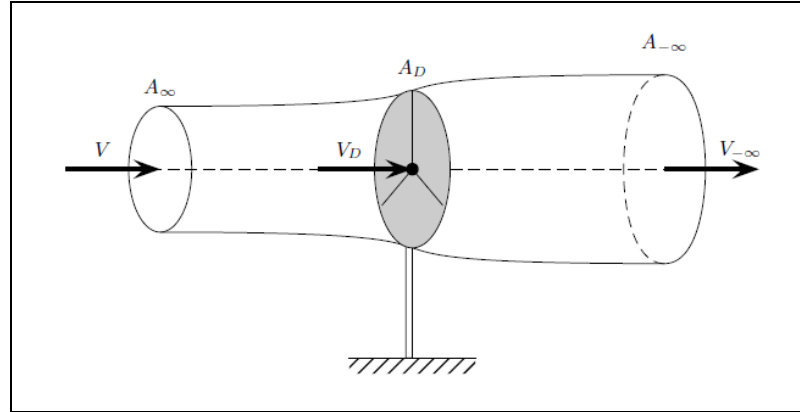
Burada ρ havanın özgül kütlesi, $A_{-\infty}$ eyleyici diskin arkasındaki hava kesit alanı, A_{∞} eyleyici diskin önündeki hava kesit alanı, V_D ise eyleyici disk üzerindeki rüzgâr hızıdır. Eyleyici disk tarafından hava akımına karşı oluşturulan kuvvet F_D , toplam hız kaybının kütle akım hızına çarpımıyla

$$F_D = (V - V_{-\infty}) \rho A_D V_D \quad (4.2)$$

olarak bulunur. Diskin üzerindeki rüzgâr hızı V_D , eksenel indüksiyon faktörü a sıfır ile bir arasında bir sayı olmak üzere

$$V_D = (1-a)V \quad (4.3)$$

olarak ifade edilebilir [Nak, 2013].

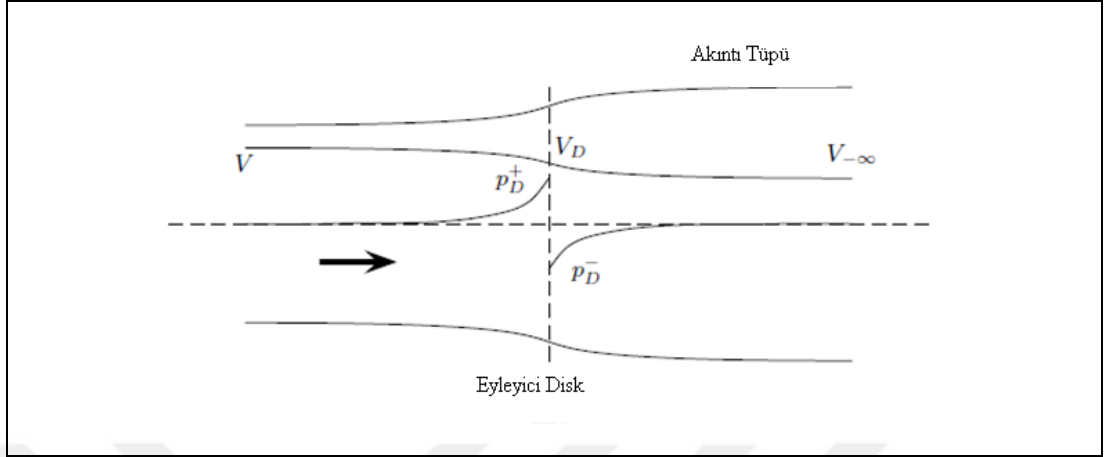


Şekil 4.6: Eyleyici Diskten Geçen Hava Akımı.

Eyleyici disk tarafından hava akımına karşı oluşturulan kuvvet, Şekil 4.6’da görülen eyleyici disk üzerindeki basınç kaybından kaynaklandığından,

$$F_D = (P_D^+ - P_D^-) A_D = (V - V_{-\infty}) \rho A_D V (1 - a) \quad (4.4)$$

olarak da verilebilir. Burada P_D^+ değeri eyleyici diskin önündeki, P_D^- ise ardındaki anlık basınç değeridir.



Şekil 4.7: Bir Akım Tübünde Basınç ve Rüzgâr Hızı Değişimi.

Bernoulli denklemi bir kanal gibi kabul edilen rüzgâr pervanesinin hemen önünde oluşan akışı kullanarak eyleyici disk teorisinde yer almaktadır. Denklem (4.5) ve (4.6) ideal koşullar altında bir akışkanın yaptığı toplam iş sıfır ise o akışkanın enerjisinin değişmeyeceğini belirtir. Buna göre eyleyici disk üzerindeki basınçlar,

$$\frac{1}{2}\rho V_D^2 + P_D^+ + \rho g z = \frac{1}{2}\rho V^2 + P_0 + \rho g z \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{2}\rho V_D^2 + P_D^- + \rho g z = \frac{1}{2}\rho V_{-\infty}^2 + P_0 + \rho g z \quad (4.6)$$

olarak verilir. 4.5 numaralı eşitlikten 4.6 numaralı eşitliği çıkardığımızda eyleyici diskteki basınç kaybının akışkanın kinetik enerji kaybına eşit olduğu

$$\frac{1}{2}(P_D^+ - P_D^-) = \frac{1}{2}\rho(V^2 - V_{-\infty}^2) \quad (4.7)$$

olarak bulunur. 4.7 numaralı eşitlik 4.4 numaralı eşitlikte yerine yazıldığında

$$V_{-\infty} = (1 - 2a)V \quad (4.8)$$

bağıntısı elde edilir. Burada a değerinin 0.5'i aşamayacağı görülmektedir. 4.4 numaralı eşitlikten eyleyici disk üzerindeki hava akımından kaynaklı kuvvetin

$$F_D = 2\rho A_D V^2 a(1 - a) \quad (4.9)$$

olduğu görülür. Eyleyici diskten elde edilen güç P_D ise 4.3 ve 4.9 eşitliklerinden

$$P_D = F_D V_D = 2\rho A_D V^3 a(1 - a)^2 \quad (4.10)$$

olarak hesaplanır. Rüzgâr türbini güç katsayısı rüzgâr türbininden elde edilen güç toplam rüzgâr gücüne bölünerek hesaplanır:

$$C_P = \frac{P_D}{P_V} \quad (4.11)$$

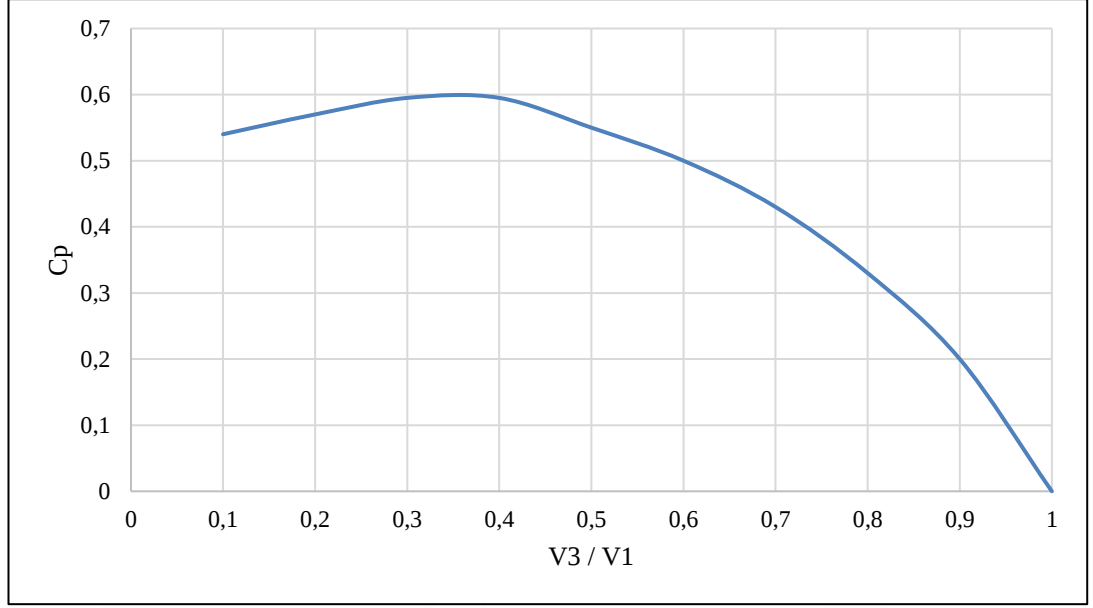
$$C_P = \frac{2\rho A_D V^3 a(1 - a)^2}{0,5\rho A_D V^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (4.12)$$

Burada C_P 'nin alabileceği en büyük değer “Betz limiti” olarak adlandırılır ve $a=1/3$ için $C_{p,max}=0.593$ bulunur. Rüzgârdan elde edilebilecek gücün maksimum teorik limitidir. C_P kanat ucu hız oranı ve kanat açısının fonksiyonu şeklinde elde edilir ve türbin üreticileri tarafından verilir. Kanat ucu hız oranı rüzgâr türbini kanatlarının ucundaki teğetsel hızı rüzgâr hızına bölerek

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{v} \quad (4.13)$$

olarak bulunur [Akdoğan, 2011]. Burada R rotor yarıçapı, ω_r rotor açısal hızı, v ise rüzgâr hızıdır.

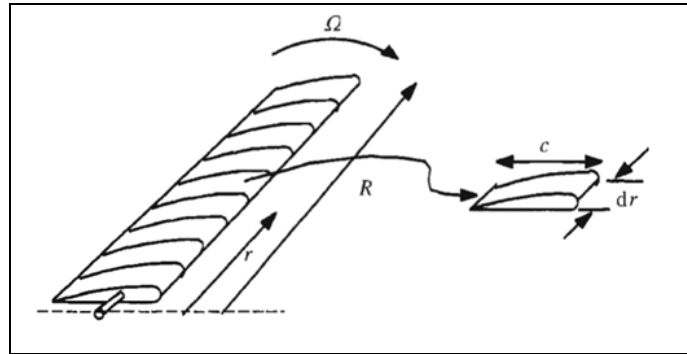
Türbine giren ve çıkan hızların gösterimi sırasıyla V_1 ve V_3 olarak kabul edilirse C_P katsayısının değişimi aşağıdaki grafikteki gibi gösterilebilir [Akdağ, 2008].



Şekil 4.8: Türbin Güç Katsayısının Değişimi.

4.4.1.2. Kanat Elemanı Teorisi

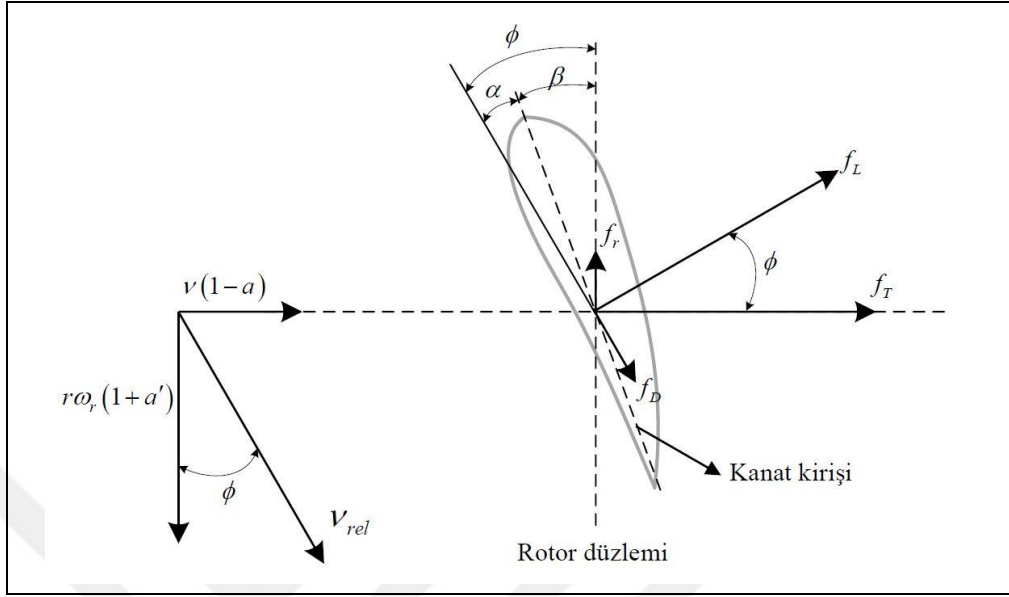
Kanat Elemanı Teorisi rüzgâr türbininin ürettiği gücü, kanatlar üzerine etkiyen moment ve kuvvetleri hesaplamakta kullanılır. Kanat elemanı rüzgâr türbinlerinin radyal yönde sonsuz küçük uzunlukta kanat dilimi üzerinden tanımlanır. Şekil 4.9'daki örnek bir çizimde kanat dilimi gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Kanat Elemanı Şeması.

Şekil 4.10'da kanat kesiti üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetler gösterilmiştir. f_L yerel hava hızına dik yönde kanada etkiyen kaldırma kuvvetini, f_D ise yerel hava hızı yönünde kanada etkiyen direnç kuvvetini göstermektedir. Yerel hava hızı ile rotor

düzlemi arasındaki açı Φ , kord ile rotor düzlemi arasındaki yunuslama açısı β , yerel hava hızı ile kord arasındaki hücum açısı ise α ile gösterilmiştir.



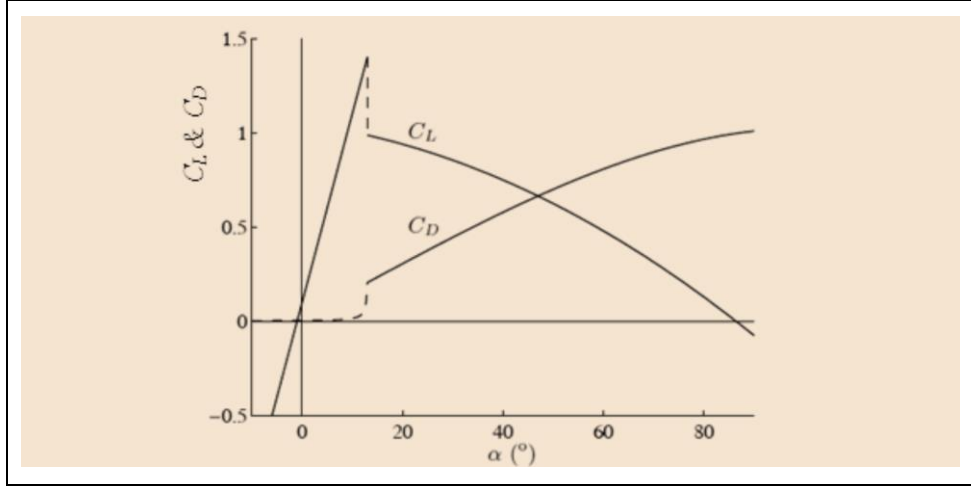
Şekil 4.10: Kanat Kesiti Üzerine Etkiyen Aerodinamik Kuvvetler.

Hava özgül kütlesi ρ , kesit kord uzunluğu c , kanat kesitinin yerel hava akımına göre hızı V_{rel} , kaldırma kuvveti katsayısı C_L ve direnç kuvveti katsayısı C_D olmak üzere birim uzunluktaki kanat dilimine etkiyen kaldırma ve direnç kuvvetleri

$$f_L = \frac{\rho c}{2} V_{rel}^2 C_L(\alpha) \quad (4.14)$$

$$f_D = \frac{\rho c}{2} V_{rel}^2 C_D(\alpha) \quad (4.15)$$

olarak hesaplanabilir. C_L ve C_D yerel hava hızı ile kord arasındaki hücum açısı α ya bağlı olarak değişir. Şekil 4.11’de tipik kaldırma ve direnç katsayılarının hücum açısına göre değişim grafikleri verilmiştir [Nak, 2013].



Şekil 4.11: Kaldırma ve Direnç Kuvvet Katsayılarının Kanat Hücum Açısına Göre Değişim Grafikleri.

Kaldırma ve direnç katsayıları hücum açısı $\alpha = 13^\circ$ civarında ani değişime uğramaktadır. Hücum açısı bu kritik değeri aştığında hava akımının kanat üst yüzeyinden ayrılması ve türbülans oluşumu sebebiyle C_L değeri düşerken C_D değerleri artmaya başlar, yani kanat hız kaybeder (stall). Kaldırma ve direnç kuvvetleri nedeniyle rotora teğetsel ve eksenel kuvvetler etkir. Teğetsel kuvvet sebebiyle kanada döndürme momenti etkir, eksenel itme kuvveti ise rotor, kule ve temeli devrilmeye zorlar. Birim kanat uzunluğuna etkiyen döndürme momenti

$$\tau_r = \frac{\rho c}{2} V_{rel}^2 r (C_L(\alpha) \sin(\phi) - C_D(\alpha) \cos(\phi)) \quad (4.16)$$

olup, tüm kanada etkiyen tork bu ifadenin radyal yönde integrali alınarak hesaplanabilir. Eşitlikten kaldırma kuvvetinin faydalı torku arttırdığı, direnç kuvvetinin ise azalttığı görülebilir. Rotora etkiyen dönme momenti

$$T_r = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\lambda, \beta) V^2 \quad (4.17)$$

olarak verilir. Bu eşitlikte boyutsuz tork katsayısı C_q güç katsayısı C_p 'nin kanat ucu hız oranına λ bölümü ile

$$C_q = C_p / \lambda \quad (4.18)$$

olarak elde edilir. Sabit hızda dönen, sabit kanatlı rüzgâr türbinleri rüzgâr hızı belli bir değeri aştığında (λ küçüldükçe) C_p güç katsayısının azalması sebebiyle frenleme davranışı sergiler. Türbin üzerindeki itme kuvveti artar ve kanatların dönme hızı azalır. Bu durum “Passive Stall Control” adıyla ifade edilir.

4.4.2. Güç ve Kontrol Sistemleri

Rüzgârın tahmin edilemeyen davranışlarını kontrol edebilmek, sistem üzerindeki etkisini sınırlandırabilmek adına kontrol sistemi türbinlerin olmazsa olmazıdır. Rüzgâr türbinlerinde kontrol sistemleri genel olarak tüm sistemin güvenli bir şekilde çalışmasından, türbinin çalışmasının optimize edilmesinden, hata sinyallerinden ve üretilen elektriksel gücün kalitesinden sorumludur [Nak, 2013].

4.4.2.1. Kontrol Amaçları

Rüzgâr türbinlerindeki kontrol sistemlerinin başlıca görevleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

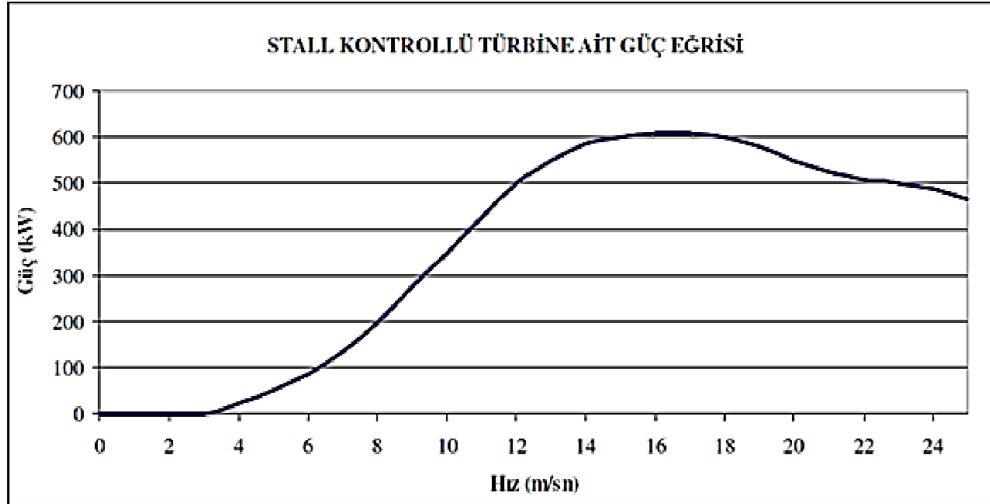
- Türbinin tasarımında beyan edilen başlatma ve durdurma hız aralığında çalışmasını sağlamak.
- Aerodinamik gücü ve açısal hızı nominal rüzgâr hızından büyük hızlarda kontrol etmek.
- Kısmi yük bölgesinde rüzgâr enerjisini tepe noktasına ulaştırmak.
- Türbin ekipmanlarını değişken yüklere karşı korumak.
- Farklı skalalardaki rüzgâr hızı için elektrik enerjisini, kontrollü bir şekilde şebekeye aktarabilmek.
- Elektrik enerjisinin kalitesini istenen düzeyde sunabilmek.

Rüzgâr türbinlerinde kullanılabilen kontrol sistemleri kanat açısıyla kontrol, rüzgâr hızına göre kontrol ve türbin gövde kısmının hareket kabiliyetiyle elde edilen kontrollerdir.

4.4.2.2. Stall Kontrolü

Bu tip türbinler göbeğe sabit bir açıda monte edilmiş rotor kanatlarına sahiptir. Bununla birlikte rotor kanadı profilinin geometrisi rüzgâr hızı çok yükseldiği andan itibaren, rotor kanadının rüzgâra bakmayan tarafında türbülans yaratacak şekilde aerodinamik olarak tasarlanmıştır. Stall kontrollü bir rüzgâr türbini için bir rotor kanadına yakından bakıldığında, uzunlamasına eksenini boyunca hareket ederken kesitin hafifçe büküldüğünü fark edilecektir. Bu kısmen rüzgâr hızı kritik değerine ulaştığında rotor kanadının yavaş yavaş durmasını sağlamak için yapılmaktadır. Stall kontrolünün temel amacı rotorun kendisi üzerinde hareketli parçalardan ve karmaşık bir kontrol sisteminden kaçınmaktır. Öte yandan stall kontrolü çok karmaşık bir aerodinamik tasarım problemini ve tüm rüzgâr türbininin yapısal dinamikleri ile ilgili tasarım zorluklarını (stall kaynaklı titreşimler gibi) yaratmaktadır. Şu anda dünyada kurulu olan rüzgâr türbinlerinin yaklaşık üçte ikisi stall kontrollü makinelerdir. Stall kontrolü altında çalışan örnek bir türbine ait güç-rüzgâr hızı eğrisi Tablo 4.2’de gösterilmiştir [Güney vd., 2001].

Tablo 4.2: Stall Kontrolüne Sahip Türbinlerde Güç-Rüzgâr Hızı Grafiği.



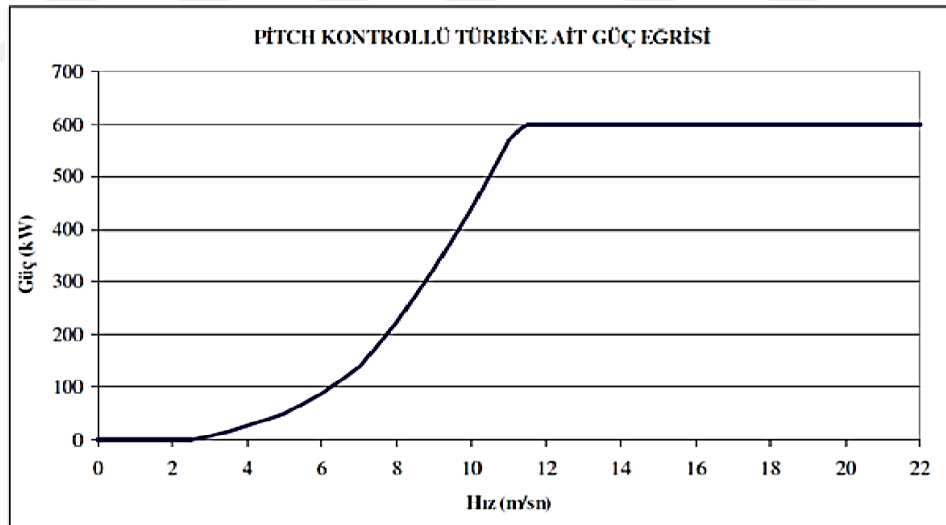
4.4.2.3. Pitch Kontrollü Türbinler

Bir pitch kontrollü rüzgâr türbininde türbinin elektronik kumandası türbinin güç çıkışını saniyede birkaç kez kontrol eder. Güç çıkışı çok yükseldiğinde kanat aralık

mekanizmasına bir komut göndererek rotor kanatlarını rüzgâr yönüne göre hafifçe döndürür. Öte yandan rüzgâr hızı tekrar azaldığında kanatlar tekrar rüzgâra doğru döner. Böylece rotor kanatları uzunlamasına eksenlerinin etrafında dönebilmektedir. Normal çalışma sırasında kanatlar bir kerede bir derecenin bir kısmını toplayacaktır ve aynı zamanda rotor da dönecektir. Rotor kanatlarının tam olarak gereken miktarda dönmesini sağlayan pitch kontrollü bir rüzgâr türbini tasarlamak akıllı mühendislik çalışması gerektirir. Pitch kontrollü bir rüzgâr türbininde rüzgâr hızı değişikçe bilgisayar rotor kanatlarını optimum açıda tutarak rüzgâr çıkış hızını maksimuma çıkarmak için kanatları birkaç derece döndürecekler. Pitch kontrol mekanizmaları genellikle hidrolik sistemler vasıtası ile çalışmaktadırlar.

Gücün rüzgâr hızıyla monoton olarak artarak belli bir rüzgâr hızından sonra sabit kaldığı pitch kontrollü bir türbinin güç-rüzgâr hızı eğrisi Tablo 4.3'te gösterilmiştir [Güney vd., 2001]. Bu çalışmada Darıca bölgesi için aktif pitch kontrollü bir türbinin teknik ve ekonomik performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

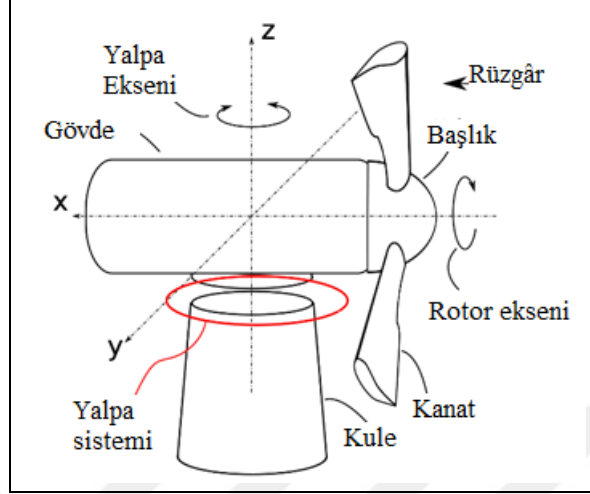
Tablo 4.3: Pitch Kontrollü Bir Türbinin Güç-Rüzgâr Hızı Grafiği.



4.4.2.4. Rotor Yön Açısı Kontrolü (Yaw Control)

Rüzgâr türbini optimizasyon çalışmalarının temel amacı enerji maliyetlerini düşürerek rüzgar çiftliklerini geleneksel enerji santrallerine rekabetçi kılmaktır. Yaw kontrol mekanizması esen baskın rüzgâr yönüne göre makine bölümünü kule eksenini etrafında döndürür. Bu sayede rüzgârdan elde edilen enerji miktarı artmaktadır. Yalpa

kontrol tekniği pratikte sadece küçük güçlü türbinler için tercih edilir (<1kW). Yalpa kontrollü türbinlerde rotor tüm yapıya zarar verebilecek döngüsel olarak değişen gerilmelere maruz kalmaktadır.



şekil 4.12: Yalpa (Yaw) Kontrolü.

4.4.3. RES'lerdeki Temel Yük Kavramları

Rüzgâr türbinleri inşa edilirken sisteme etkiyen aerodinamik kuvvet ve momentler ve elemanlarda ortaya çıkan gerilme değerleri hesaplanarak, kullanılan malzemelerin yorulma mukavemetlerinin yeterliliği test edilmelidir.

4.4.3.1 Aşırı Yükler

Rüzgâr türbinleri, rüzgârın kinetik (hareket) enerjisini yakalamak için üretilmiştir. Çok kanatlı, çok geniş kanatlı veya çok rotorlu türbinler rüzgâr bir kasırğa hızında eserken çok büyük kuvvetlere maruz kalacaktır. Rüzgâr enerjisi rüzgâr hızının üçüncü kuvvetiyle orantılıdır. Aşırı rzgrların etkisini sınırlamak için türbin üreticileri çok kanatlı türbinler üretmektense az kanatlı dar yapılı santralleri tercih ederler. Rüzgâra bakan kanatların darlığını telafi etmek için türbin üreticileri türbinlerin nispeten hızlı bir şekilde dönmelerini sağlamaya çalışmaktadırlar.

4.4.3.2 Yorulma Yükleri

Rüzgâr türbinleri dalgalanan rüzgârlara ve dolayısıyla dinamik kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu durum türbin özellikle çok çalkantılı bir rüzgâr ortamında bulunuyorlarsa malzeme yorulması ve kararlı elektrik üretimi açısından önem arz etmektedir. Rotor kanatları gibi dinamik bükülme zorlanmasına maruz kalan elemanlarda zamanla parça kırılmasına neden olabilecek çatlaklar oluşur. Tarihsel bir örnek üç haftadan kısa bir süre çalıştıktan sonra kullanımdan alınması gereken devasa (100 m rotor çaplı) Alman Growian makinesidir. Metal yorgunluğu birçok sektörde iyi bilinen bir sorundur. Dolayısıyla metal genellikle rotor kanatları için uygun bir malzeme değildir. Bir rüzgâr türbinini tasarlarken farklı bileşenlerin hem bireysel hem de müşterek olarak titreştiği frekans ve genlikleri önceden hesaplamak son derece önemlidir. Bir elemanın zorlanmasında ortaya çıkan dinamik gerilmeleri hesaplamak da önemlidir. Bu amaçla tüm rüzgâr türbininin dinamik yapısal davranışını analiz eden matematik esaslı bilgisayar modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller rüzgâr türbini üreticileri tarafından makinelerini güvenli bir şekilde tasarlamak için kullanılır.

5. PROJE YAKLAŞIMI

5.1. Rüzgâr Ölçüm Verilerinin Analizi

Rüzgâr enerjisi potansiyeli araştırılmak istenen bölgenin doğru bir hesaplama için ihtiyaç duyduğu hususlar sağlıklı bir ölçüm noktası, yeterli ölçüm kabiliyeti ve bu ölçümün dört mevsim süresince yapılmasıdır. Ölçüm noktasından bir sene süresince elde edilen veriler kullanılarak rüzgar hız ve yön dağılımı saptanır [Kurban vd., 2006]. Rüzgâr hızı sapma değeri küçük olan bölgeler RES projeleri için daha uygundur [Albostan vd., 2009].

Bu çalışmada 2016 yılı süresince saatlik aralıklarla Meteoroloji Genel Müdürlüğü Darıca (18410) ve Gebze (17639) rüzgâr ölçüm istasyonlarından alınan veriler kullanılmıştır. İki farklı istasyon seçilmesinin sebebi Darıca istasyonunun Saatlik Basınç (hPa) ölçüm kabiliyetinin bulunmamasıdır. En yakın istasyon olan Gebze istasyonu bu veriyi sağlamak için kullanılmıştır. 300 feet yükseklik farkı için hava yoğunluğunun yaklaşık %1 değiştiği göz önüne alınarak, bu iki santral arasındaki rakım farkının 216 feet olmasının türbin performansına olası etkisinin yaklaşık binde 5 mertebesinde kalacağı hesaplanarak gözlem istasyonunun yeri göz ardı edilmiştir. Gebze istasyonundan alınan basınç verisi ile hesaplanan hava yoğunluğu, Darıca santralinde ölçüm yapılmış gibi kabul edilmiştir.

- Konumu: Darıca (Boylam: D29.3892°, Enlem: K40.7736°)
- Yükseklik:110 m
- Konumu: Gebze (Boylam: D29.4342°, Enlem: K40.8230°)
- Yükseklik:176 m
- Hava yoğunluğu: 1,1729 gr /m³

5.2. İstatistiksel Analiz (Weibull İstatistiksel Yöntemi)

Rüzgâr enerjisi hesaplamaları yapılırken en çok tercih edilen istatistiki dağılımdan biri Weibull dağılımı metodudur. Yapılan araştırmalarda bu metodun rüzgâr karakteristiğine en uygun dağılımlardan biri olduğu görülmüştür. Fakat kimi

çalışmalarda özel coğrafi koşullarda bu dağılımın istenen yaklaşımlı sunamadığı da deneyimlenmiştir. Weibull dağılımının iki değışkeni vardır. Bunlar boyutsuz şekil değışkeni (k) ve hız ölçeğı değışkenidir (c). İki değışkenli Weibull olasılık dağılım fonksiyonu rüzgâr hızı v için yazılınca

$$F_w(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \int -\left(\frac{v}{c}\right)^k \quad (5.1)$$

Bulunur [Akdağ, 2008]. Ölçek parametresi c rüzgâr verilerinde referans bir değere sahiptir. şekil parametresi k'nin genellikle 1.5 ile 3 değışleri arasında olması beklenir. Weibull, birikimli dağılım fonksiyonu şeklinde yazıldığında

$$F_w(v) = 1 - \int \left(\frac{v}{c}\right)^k \quad (5.2)$$

halini alır. Bu denklem hızın bir değere eşit ya da küçük olma ihtimalini verir. Weibull değışkenlerini bulmak için birkaç farklı yöntem kullanılabilmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Moment Yöntemi
- Grafik Yöntemi
- En Yüksek Olabilirlik Yöntemi [Akdağ, 2008].

Rüzgâr verilerine uygulanan bu istatistik yaklaşım sonucunda bulunan şekil parametresi (k) genellikle ekvator çevresindeki bölgelerde 1, ılıman bölgelerde 2 ve rüzgar potansiyelinin yüksek olduğı yerlerde 3 sayılarına yakınsamaktadır [Akdağ vd., 2007].

5.3. Kinetik Enerji

Fizikte, bir nesnenin kinetik enerjisi, hareketi nedeniyle sahip olduğı enerji olarak tanımlanır. Belirli bir kütlenin dingin durumdan belirli bir hıza ulaşması için kütle üzerinde yapılması gerekli iş olarak da tanımlanabilir. Hızlanma esnasında bu enerjiyi kazanmış olan kütle hızı değışmedikçe bu kinetik enerjiyi korur. Enerjinin

korunumu yasası gereği aynı iş mevcut hızından dingin duruma geçerken kütle tarafından çevresine yapılır. Kinetik enerji v hızındaki m kütleli bir cisim için

$$Kinetik Enerji = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5.3)$$

olarak hesaplanır. Hava hareketi söz konusu olduğunda ρ havanın özgül kütlesi, A hızla dik kesit alanı, v hava hızı olmak üzere kütleli debi

$$\dot{m} = \rho Av \quad (5.4)$$

olarak ifade edilir. Rüzgârın birim zamanda taşıdığı kinetik enerji veya rüzgârın gücü (5.3) te kütle yerine (5.4) kütleli debi ifadesi yazılarak bulunur:

$$P(v) = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (5.5)$$

Denklem 5.5'ten anlaşıldığı gibi rüzgâr gücü hızının küpüyle orantılıdır. RES projelerinde hızın önemi buradan gelmektedir. Gücü etkileyen diğer değişkenler ise havanın özgül kütlesi ve türbin kanatlarının süpürdüğü alandır.

5.4. Güç Yoğunluğunun Hesaplanması

Rüzgârın kinetik enerjisi denklem 5.5'teki gibi elde edilmiştir. Birim alan için rüzgar gücü Weibull olasılık dağılım fonksiyonu ile çarpılıp mümkün olan tüm hız aralığında integre edilerek rüzgâr güç yoğunluğu elde edilir.

$$P_w = \int_0^{\infty} P(v)f(v)dv \quad (5.6)$$

Birim alan için rüzgâr gücü 5.5 ve Weibull rüzgâr hızı olasılık dağılım fonksiyonu 5.1 denklem 5.6'da yerlerine konarak rüzgâr güç yoğunluğu elde edilir:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \int_0^\infty v^3 \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv = \frac{1}{2} \rho \int_0^\infty v^2 k \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (5.7)$$

Sadeleştirmeler ve Gamma fonksiyonunun tanımı kullanılarak rüzgâr güç yoğunluğu denklem 5.8'deki gibi hesaplanabilir: [Almalı ve Ete, 2009]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (5.8)$$

5.5. Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Hesaplanmasında Kullanılan Bilgisayar Programları

Rüzgâr türbinlerinin verimli çalışabileceği optimum rüzgâr çiftliği kurulumun yapılabilmesi için bölge rüzgâr ölçümlerinin ve türbin performans analizlerinin doğru yapılması ve bölgeye en uygun türbin ve konum seçimi gerekir. Bu ihtiyaca yanıt vermek için birçok bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bunlara WindSim, RETScreen, Windographer WAsP, WindPRO, WindFarmer, Homer adlı yazılımlar örnek olarak gösterilebilir. Bu çalışmada WAsP programından yararlanılmıştır.

5.5.1. WAsP

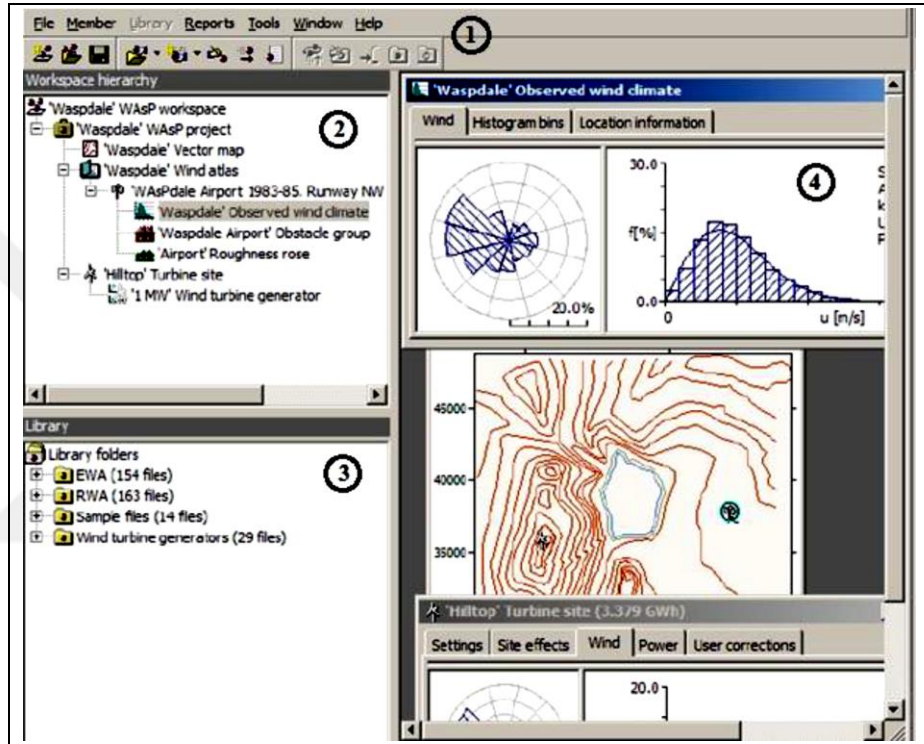
WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) yazılım paketi RES'ler ve RES çiftlikleri için rüzgâr kaynakları değerlendirmesi yapan, yerleştirme ve enerji verimi hesaplamalarında kullanılan Danimarka menşeli bir bilgisayar programıdır. WAsP yazılım paketi, dünyanın her yerindeki her türlü arazide bulunan sahalar için kullanılabilir. Program Danimarka Teknik Üniversitesi tarafından sunulmakta, öğrencilere kısıtlı süre için lisans verilebilmektedir.

WAsP, hesaplamalarını yaparken Weibull dağılımını istatistiki yöntem olarak kullanmaktadır. Program istenen veriyi sunabilmek için kullanıcıdan dört girdi istemektedir. Bunlar; rüzgâr verisi, bölge pürüzlülük verisi, çevresel şartlar, bölge coğrafi bilgisidir [Pusat, 2017]. Çevresel bilgilerin girilmemesi halinde ölçüm istasyonunun koordinatlarını dikkate alarak da hesaplama yapabilmektedir.

WAsP programının örnek ara yüzü Şekil 5.1'de sunulmuştur. Bu ara yüz dört kısımdan meydana gelmektedir. Üst bölgede, Microsoft ara yüzlerinde olduğu gibi

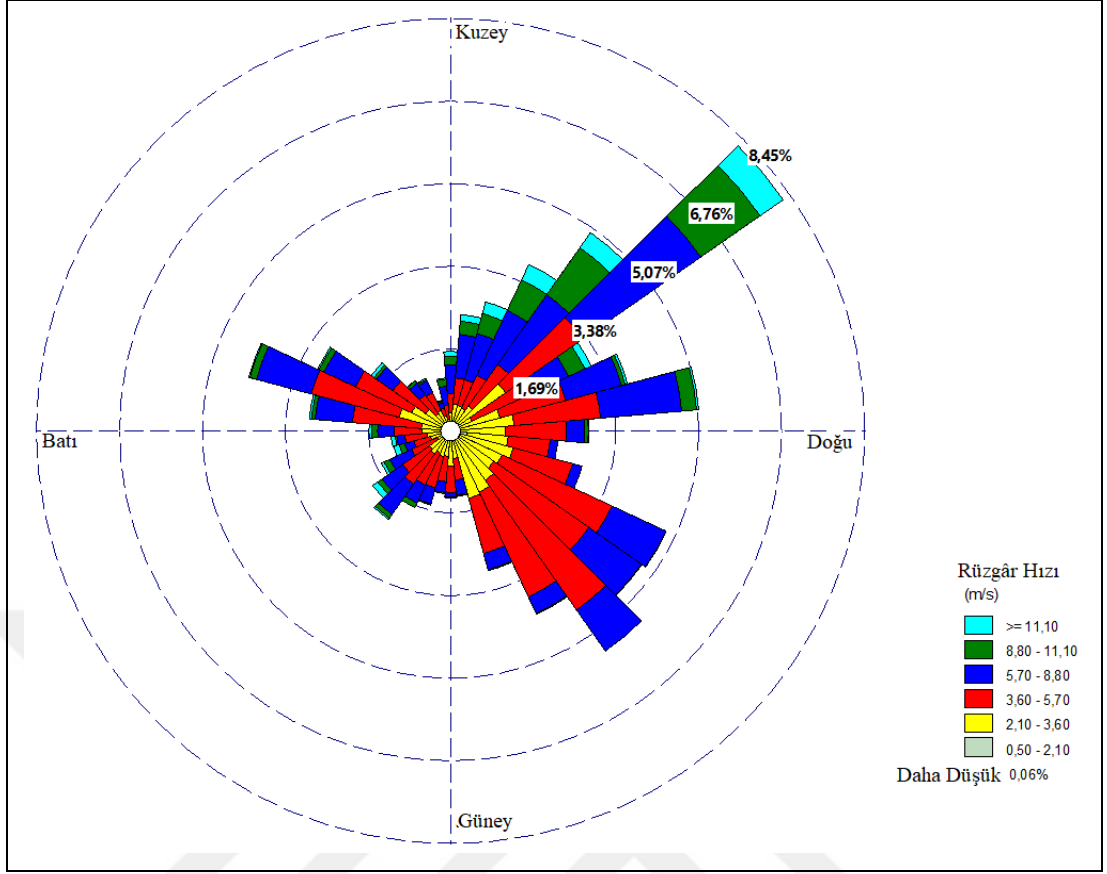
araç çubukları ve kısa yollara yer verilmiştir. İşaretli iki numaralı alanda sistem ağacı yer almaktadır. Kütüphane üç numaralı bölümde bulunmaktadır. Kütüphaneden daha önce programda tanımlı türbinlere ve örnek uygulamalara erişilebilmektedir. Dört numaralı bölümde programın çıktılarına, grafiklere ve haritalara yer verilmektedir.

Programa girilen veriler sayesinde bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyeli, Weibull sabitleri, ortalama rüzgâr hızı gibi çıktılara ulaşılabilir. Böylece edinilen bilgilerle rüzgâr atlasları üretilebilir.



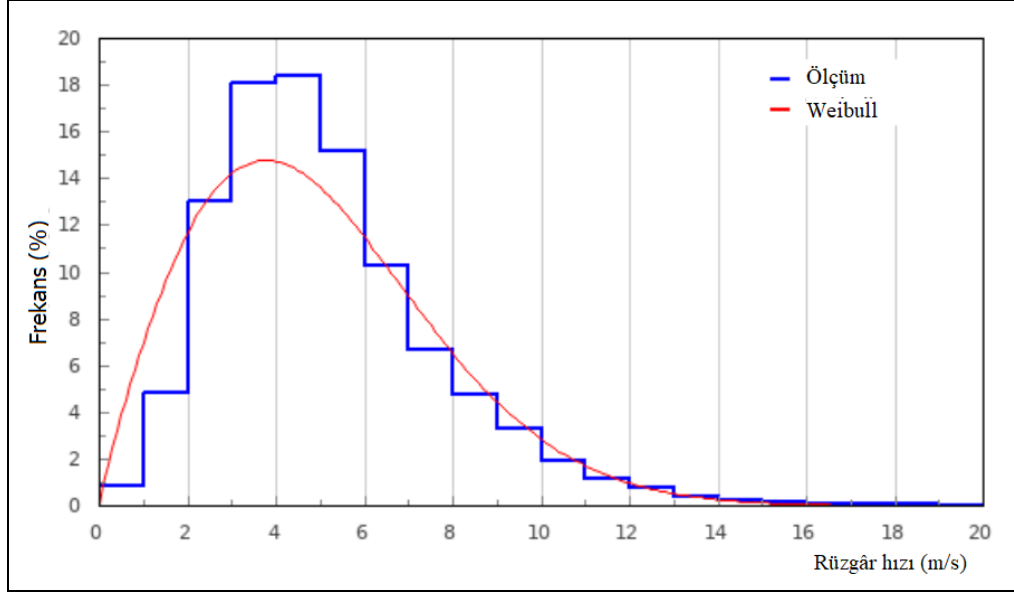
Şekil 5.1: WAsP Ara Yüzü.

Bunların yapılabilmesi için ilk iş verilerin programa uygun bir şekilde girilmesidir. WAsP programının verdiği çıktılarla hazırlanan, rüzgârın estiği yönüne göre sıklığı anlatan rüzgârgülü Şekil 5.2’de sunulmuştur. Darıca bölgesindeki baskın rüzgâr yönü kuzey doğu olarak bulunmuştur. Grafik, rüzgârın dış bölgeden halkanın merkezine doğru (blowing from) estiği göz önüne alınarak oluşturulmuştur [Güzel, 2014].



Şekil 5.2: Rüzgâr Gülü.

Programın verdiği Weibull parametreleri ile olasılık yoğunluk fonksiyonu Şekil 5.3'teki gibi çizilmiştir. Bu grafikteki mavi çizgi gerçek saatlik verilerle oluşturulan esme sıklığını ifade ederken kırmızı eğri, bu gerçek veriler ışığında istatistiki benzetim ile daha küçük anlardaki dağılımı ifade etmektedir.



Şekil 5.3: Saatlik Veriler Doğrultusunda Rüzgâr Hızına Bağlı Frekans Dağılımı.

5.6. Rüzgâr Gücünün Hesaplanması

A alanında esen rüzgâr gücü (P) olmak üzere, rüzgâr gücü

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5.9)$$

formülüyle tanımlanmaktadır. Bu denklemde A (m^2) türbin kanatlarının süpürme alanı, ρ (kg/m^3) sahanın coğrafi konumuna, ortam sıcaklığına ve basıncına göre belirlenen hava yoğunluğudur. Bu örnek projede süpürme alanı türbinin kanat açıklığı olan 76,6 m çap ile hesaplandığında $A=4.657 m^2$ 'dir.

Denklem 4.12'de yer verilen Betz yasası, rüzgar türbinini kullanarak rüzgardaki kinetik enerjinin en fazla 16/27'sini (%59) mekanik enerjiye dönüştürebileceğimizi belirtmektedir. Bu katsayı da denkleme yerleştirildiğinde:

$$P = C_{pBetz} \frac{1}{2} \rho A V_r^3 = 0,5926 \frac{1}{2} \rho A V_r^3 \quad (5.10)$$

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho \frac{\pi D^2}{4} V_r^3 \quad (5.11)$$

denklem 5.9 denklem 5.10 halini almaktadır. Burada V_r Darıca'da yer alan rüzgâr ölçüm istasyonunun sağladığı verilerden alınan ortalama rüzgâr hızını (m/s), C_p Betz katsayısını, D rüzgâr türbininin kanat çapını (m) ifade etmektedir [Güzel, 2014].

Bölge için seçilen türbin modeli Leitwind marka V LTW77 model 1 MW kapasiteli türbin modelidir. Bu modelin seçimi sırasında farklı markalar da denenmiş en yüksek kapasite faktörüne sahip olduğu için proje yaklaşımına konu edilmiştir. Yüksek kapasite faktörünün bu modelde yakalanmasının sebebi elektrik üretmeye başlama hızının daha büyük modellere göre düşük olması ve diğer modellere kıyasla daha küçük hızlarda tam güçte çalışabilmesidir. Üretici kataloğundan alınan model teknik bilgileri Tablo 5.1'de yer almaktadır [Web 7, 2018].

Tablo 5.1: Leitwind V LTW77 1 MW Rüzgâr Türbini Özellikleri.

Seçilen Türbine Ait Özellikler
Marka-Model: Leitwind marka LTW77 model 1 MW
Rotor Çapı=76.6 (m)
Süpürme Alanı= 4.657 (m ²)
Devreye Girme Rüzgâr Hızı= 3 (m/s)
Devreden Çıkma Rüzgâr Hızı= 25 (m/s)
Rotor Kontrol Sistemi= Aktif Pitch Kontrolü

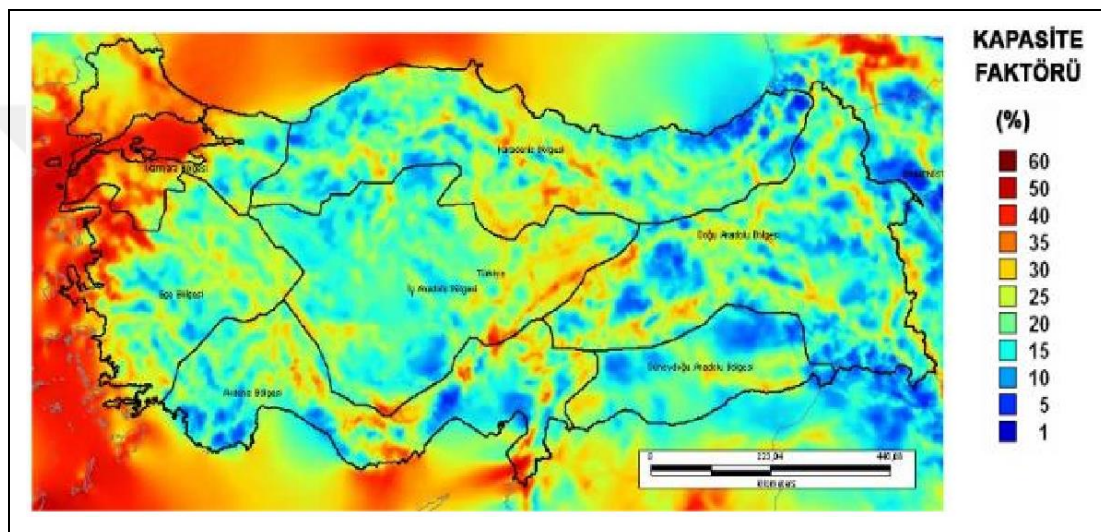
Yapılan hesaplamalar sonrasında ortalama hız değeri 5,14 m/s, ortalama hava yoğunluğu 1,1729 kg/m³ bulunmuştur. Değerler 5.11 denkleminde yerine konduğunda senelik kazanç için santralin edinimi 2.106.319 kWh olarak hesaplanmıştır. Santralin bir yılı oluşturan 8760 saatlik sürede tam güçte 2105 saat, operasyon gücünde ise 7046 saat çalışacağı hesaplanmıştır. Programın sunduğu Weibull parametreleri Tablo 5.2'de yer almaktadır. Tam güç ve operasyon gücü (cut in/ cut out) üretim değerleri türbin güç eğrisinden alınmıştır. 11 m/s ve sonrasında türbin tam güçte çalışmaktadır

Tablo 5.2: Weibull Parametreleri.

V_{ort}	5,14 m/s
Standart sapma	2,5 m/s
Ortalama güç yoğunluğu	144,5 W/m ²
c	5,61 m/s
k	1,87

5.7. Kapasite Faktörü

Kapasite faktörü türbininin kurulacağı bölgede rüzgâr hızına bağlı olarak enerji üretiminin verimliliğini göstermektedir. Bir rüzgâr türbininin kapasite faktörü, rüzgâr rejimine bağlı olarak türbinin üreteceği enerji ile türbinin anma gücünde üreteceği enerji arasındaki orandır. Genellikle kapasite faktörü yıllık bazdaki enerji üretimine göre belirtilir. Şekil 5.4'te Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Türkiye Kapasite Faktörü Haritası görülmektedir.



Şekil 5.4: Kapasite Faktörü Haritası.

$$K_F = \frac{E_{RT}}{P_R T} \quad (5.13)$$

$$K_F = \frac{\text{Üretilen Toplam Enerji}}{P_R \times 8760} \quad (5.14)$$

Burada:

K_F : Rüzgâr türbini kapasite faktörü

E_{RT} : Rüzgâr türbinin bulunduğu bölgedeki rüzgâr rejiminden ürettiği enerji (kWh)

$$P_R: \text{Rüzgâr türbini anma gücü (kW)}$$

T: Süre (saat)

Genellikle rüzgâr türbinlerinin kapasite faktörleri bölgeden bölgeye değişmekle beraber 0,25 ile 0,40 arasında çıkması beklenmektedir. Eğer kapasite faktörü 0,4 ve üzeri bir değere sahipse türbinin kurulacağı bölgenin çok verimli olduğunu gösterir.

Tablo 5.1’deki rüzgâr türbini için yapılan hesaplama sonucunda kapasite faktörü 0,24 olarak çıkmaktadır.

$$K_F = \frac{2.106.319 \text{ kWh/yıl}}{1.000 \times 8.760 \text{ h/ yıl}} = 0,24$$

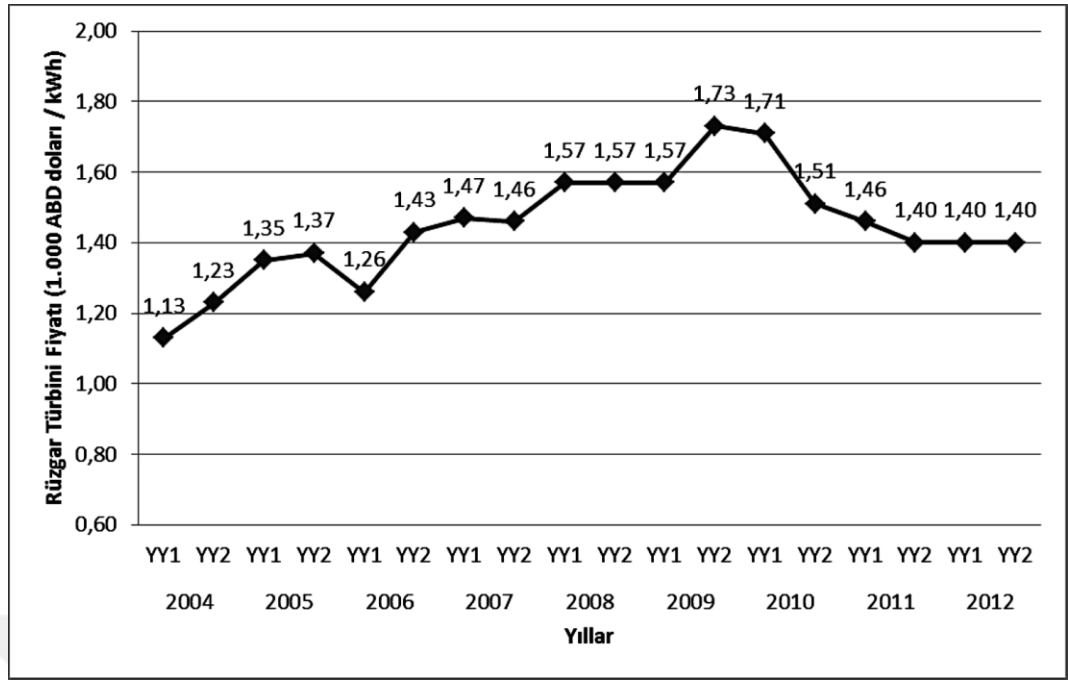


6. RÜZGÂR SANTRALİ EKONOMİSİ

Rüzgâr santralinin ekonomik analizleri ile bir santralin planlama sürecinde kâr-zarar hesabı yaklaşık olarak yapılabilmektedir. Analiz ile kurulum için gereken yatırım maliyetini saptamak işletme esnasında santrali yürür tutmak için gereken maliyeti belirlemek mümkündür. Ayrıca santralden elde edilebilecek yıllık hasılatı, birim enerji maliyetini ve amortismanı tahmin etmek yatırım için büyük önem arz etmektedir [Erdem vd., 2015].

Rüzgâr türbininden üretilen elektrik enerjisinin birim maliyeti, ülkeden ülkeye değişen birçok faktörden etkilenir. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgârdan elektrik üretimi için yatırım maliyeti diğer enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında yüksektir. Rüzgâr türbini teknolojisi geliştikçe daha yüksek güçlerde üretim yapma kapasitesi artmakta, bu durum ise üretilen kWh elektrik enerjisi için gerekli olan yatırım maliyetini düşürmektedir.

Rüzgâr santrali yatırımında rakamsal olarak en büyük kalemi rüzgâr türbinleri oluşturur. Dünyadaki teknolojik ve finansal gelişmelere bağlı olarak rüzgâr türbini fiyatları değişmektedir. 2000 ile 2002 yılları arasında türbin fiyatları 700 USD/kW iken 2009 yılında ABD’de 1.500 USD/kW, Avrupa da ise 1.800 EURO/kW olmuştur. 2011 yılında ise türbin fiyatlarının gerileyerek ortalama 1.470 EURO/kW olarak gerçekleşmiştir. Son yıllarda rüzgâr türbini fiyatlarının düştüğü gözlenmektedir. 2004 - 2012 yılları arasında dünyadaki rüzgâr türbini fiyat değişimi Şekil 6.1’de görülmektedir [IRENA, 2012].



Şekil 6.1: 2004-2012 Yılları Arasında Rüzgâr Türbini Fiyat Değişimi.

Bir rüzgâr enerjisi santralının yatırım maliyeti yatırım öncesinde ufak sapmalarla net olarak belirlenebilir. Rüzgâr enerjisi santrali yatırımları teknik ve finansal inceleme şeklinde iki aşamalı olarak analiz edilir. Teknik analiz, sahada en az bir yıl süreyle yapılan rüzgâr ölçümleri sonucunda maksimum güç elde edilebilmesi için gerekli türbin modelleri belirlenerek saha yerleşimlerinin yapıp kapasite faktörlerinin belirlenmesi ve ilgili mühendislik raporlarının hazırlanması sürecidir. Finansal analiz, teknik analiz sonrasında gelirler, giderler, amortisman, işletme giderleri gibi kalemler ile finansal projeksiyonların yapılarak nakit akışının belirlenerek yatırımın ekonomik uygunluğunun incelendiği süreçtir [Köstekci, 2014].

6.1. Sermaye Yatırım Maliyeti

Rüzgâr türbininden elektrik üretimi için birçok bileşenin bir arada olması gerekir. Kule, jeneratör, redüktör, rotor kanadı, kontrol üniteleri, sensörler, yıldırımdan koruma ilk aşamada akla gelen bileşenlerdir. Üretilen elektrik enerjisini şebekeye iletebilmek için kablolar, transformatörler, kesiciler, koruma röleleri, enerji iletim hatları, arazi, ulaşım yolları ve montaj diğer aşamadaki bileşenlerdir. İyi bir

mühendislik çalışmasının yanında bileşenlerin sermaye yatırımlarının finansal çalışmasının da yapılması gerekir [EWEA, 2009].

Bir rüzgâr enerjisi santrali yatırım maliyetleri şu şekilde sınıflandırılabilir

- Danışmanlık ve proje hazırlama maliyetleri: Sahada gerekli rüzgâr ölçümlerinin yapılması, gerekli izinlerin alınması, projelendirme ve mühendislik hesaplamalarının yapılması ile ilgili maliyetlerdir.
- İnşaat işleri maliyetleri: Rüzgâr türbini temellerinin yapılması, yolların yapılması, binaların yapılması gibi sahadaki inşaat işleri ile ilgili maliyetlerdir.
- Türbin ve montaj maliyetleri: Türbin kanadı, jeneratör, kule gibi türbini oluşturan parçaların üretimi, sahaya nakli ve saha montajı ile ilgili maliyetlerdir.
- Elektrik şebekesine bağlantı maliyetleri: Rüzgâr enerjisi santralinin elektrik şebekesine bağlantısı için gerekli olan transformatör, trafo merkezi, kablo, enerji nakil hattı gibi malzemelerin temini ve saha montajı ile ilgili maliyetlerdir.
- Diğer yatırım maliyetleri: SCADA (Denetleme, Kontrol ve Veri Toplama) sistemi gibi kontrol ve izleme sistemlerinin kurulması ve diğer maliyet kalemleridir.

6.2. Maliyetler Tablosu

Rüzgâr türbinlerinin de diğer endüstriyel cihazlar gibi belli periyotlarda bakımlarının yapılması gerekir. Rüzgâr türbinlerinin işletme ve bakım maliyetleri konvansiyonel tip elektrik üretim tesisleri ile kıyaslandığında daha düşüktür. Bir rüzgâr enerjisi santrali yatırımındaki en önemli değişken maliyet kalemleri şu şekilde sınıflandırılabilir:

- İşletme ve bakım maliyeti: Rüzgâr enerjisi santralinin işletilmesi, elektrik ve mekanik aksamın düzenli olarak bakımının yapılması, gerektiğinde onarılması ve değiştirilmesi için yapılması gereken faaliyetlere ait maliyetlerdir.

- Arazi ve trafo merkezi maliyetleri: Rüzgâr santralının kurulu olduğu arazinin kiralık olması durumundaki yıllık kira ve elektrik şebekesine bağlanmak için ilgili idareye ödenen bağlantı ücretlerine ait maliyetlerdir.
- Sigorta ve vergi maliyetleri: Rüzgâr enerjisi santralının sigortalanması ve üretilen elektrik enerjisinden sağlanan kazancın vergilerine ait maliyetlerdir.
- Yönetim ve denetim maliyetleri: Rüzgâr enerjisi santralının yönetilmesi için gerekli olan idari faaliyetler, tahmin, uzaktan kontrol ve ölçüm hizmetlerinin maliyetleridir.

Değişken maliyetler sabit maliyetler gibi tahmin edilmesi kolay olmayan maliyetlerdir. Değişken maliyetler ülkeden ülkeye ve rüzgâr santrali sahalarının yerlerine göre farklılık göstermektedir. Değişken maliyetlerle ilgili olarak genelleme yapacak kadar yeterli veri henüz bulunmamaktadır. Ancak mevcut veriler ışığında 1980 yılından günümüze işletme ve bakım maliyetlerinin azaldığını söylemek mümkündür [IRENA, 2012]. Tablo 6.1’de 60 MW gücündeki bir rüzgâr enerjisi santraline ait yıllık değişken maliyetlerin rakamsal ve yüzdesel oranları yer almaktadır [Köstekci, 2014].

Tablo 6.1: 60 MW Gücündeki Bir Rüzgâr Enerjisi Santraline Ait Yıllık Değişken Maliyetler ve Yüzdesel Oranları.

Değişken Maliyetler	Miktar (\$/yıl)	Toplam Maliyet İçerisindeki Oran (%)
Parça ve işçilik	1.381.000	70,3
Sigorta	135.000	6,9
Beklenmedik durumlar	100.000	5,1
Arazi kirası	90.000	4,6
Vergiler	68.000	3,5
İletim hattının bakımı	80.000	4,1
Diğer	111.000	5,6
TOPLAM	1.965.000	100

Günümüz RES projeleri firmadan firmaya değişmekle birlikte ortalama 25 yıllık bir ömre ve yaklaşık 150.000 saatlik işletme beyanına uygun tasarlanmaktadır. Bunun yanında türbinin gerçek ömrü, türbinin kalitesi ve bölgenin hava şartlarıyla da ilişkilidir.

Tablo 6.2’de örnek bir rüzgâr türbini inşaatı ve işletmesi aşamasında oluşan üretim parametreleri, işletme giderleri, yatırım harcamaları ve yatırımın öz sermaye ile yapılması halinde karşılaşılabilecek kalemler yer almaktadır [Yıldırım, 2017].

Tablo 6.2: Örnek Bir Türbin Kurulumu İçin Varsayılan Değişkenler.

VARSAYIMLAR	Değer	Birim
Yatırım Harcamaları		
Türbin Maliyeti	900.000	USD
Türbinin KDV'si İçin Ödenen Oran	20,00%	
Şalt Sahası Maliyeti	20.000	USD
Arazi Temini	3.000	m ²
Arazi Maliyeti	3	USD/ m ²
Yol Maliyeti	50.000	USD
Proje Planlama Maliyeti	12.500	USD
Lisans Ücretleri	5.000	USD
Bakım Onarım Ekipmanları	25.000	USD
Diğer Maliyetler	5.000	USD
İşletme Giderleri		
Bakım Onarım Giderleri	10.000	USD/ Yıl
Güvenlik Giderleri	5.000	USD/ Yıl
Sistem Kullanım Giderleri	12.000	USD/ Yıl
Elektrik Kalite Gideri	1.000	USD/ Yıl
Sistem İşletim Gideri	1000	USD/ Yıl
Faaliyet Giderleri Artış Oranı	1%	%
Üretim Parametreleri		
Birim Ünite Gücü	1	MW
Elektrik Satış Fiyatı	0,073	USD/ kWh
İlk Yıl Elektrik Üretimi	2.106.319	kWh

Rüzgâr türbinine ait birinci maliyet kalemi yatırım harcamalarıdır. Bu grup altında yer alan türbinin maliyet değeri KDV hariç 900.000 USD olarak ele alınmıştır. Lokasyonun şalt sahasının maliyeti için 20.000 dolarlık öngörü sunulmuştur. Yaklaşık 3.000 m² arazi kullanımı ayrılacak olsa metre kare fiyatı başına 3 USD'den toplamda 9.000 USD arazi fiyatı tahmin edilmektedir. Bölgenin denize yakın olması ve türbinin sahil kesimlerinde inşa edileceği varsayıldığında erişim yolunun açılması için yaklaşık 50.000 dolar masraf yeterli görülmektedir. Projeyi geliştirecek takım için yaklaşık 12.500 USD harcama yapılmaktadır. Kamuya yatırıma başlamadan önce MW başına 10.000 dolar lisans ücreti ödenmektedir. Ek olarak bakım onarım ekipmanları ve sürpriz maliyetler için 30.000 dolarlık ekipman alımı/ kiralama bedeli olarak hesaba katılmıştır.

Kurulum tamamlanıp devreye alma gerçekleşikten sonra işletme giderleri ortaya çıkmaktadır. Senelik bakım-onarım giderleri 10.000 dolar olarak ön görülmüştür. Tekli RES yatırımlarında aktif olarak türbin başında çalışan olmayacağından saatlik, dışarıdan alınan hizmet için masraf olarak yıllık 5.000 dolar olarak belirlenmiştir. Türbin işletmede olduğu sürece kamuya ödenen sistem kullanım gideri yıllık megawatt başına 12.000 USD'nin yanında elektrik kalite gideri olarak 1.000 USD ve işletim gideri olarak 1.000 USD harcama yapılacaktır.

Proje için Leitwind marka V LTW77 model 1 MW kapasiteli türbin seçilmiştir. Elektrik satış fiyatı Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM)'nden alınmıştır. Kurum RES'lerden üretilen elektriği alacağına dair garanti vermekte ve kWh başına 7,3 sent olarak güncel rakamı sunmaktadır.

Finansal tablodaki son kalemler girişimin banka destekli olması durumunda gerçekleşecek senaryolara dairdir. Bu projenin öz sermaye ile işletmeye alındığı varsayılmıştır.

Tablo 6.3: Rüzgâr Santrali Ekonomik Analiz Verileri.

Santral Kapasite Faktörü	0,24
Yıllık Hasılat	153.761 (\$)
Birim Enerji Üretim Maliyeti	0,187 (\$/kWh)
Geri Ödeme Süresi	16,5 Yıl
Net Şimdiki Değer	2.065.000 \$

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Karbon salınımının her geçen gün daha kritik seviyelere ulaşması ve bu konudaki kısıtlamalar (Kyoto Protokolü) yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim konusunda sürdürülebilir kalkınmayı hedefleyen ülkeler için bir itici güç olmaktadır. Enerji kaynakları özelindeki projeksiyonlarda fosil kaynakların ömürlerinin insan ömrü ile ilişkilendirildiğinde çok da uzun olmadığı görülmektedir. Bu anlamda, karbon ayak izini azaltmaya çalışan ülkeler için güneş, jeotermal, hidroelektrik ve rüzgâr gibi yeşil enerji çeşitlerine dönüşüm zaruret haline gelmektedir.

Bu çalışmada, Weibull dağılımı kullanılarak Kocaeli/ Darıca bölgesinin 2016 yılına ait saatlik rüzgâr verilerinin değişimi incelenmiştir. Rüzgâr enerjisi potansiyelinin saptanabilmesi için saatlik verilerden daha hassas bir aralıkta hesaplamalar yapılabilmesi için bir istatistik dağılım metodu olan Weibull denkleminde faydalanılmıştır. Weibull dağılımında Moment Metodu kullanılarak çözümler sunun WASP programından elde edilen sonuçlar Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nden alınan Darıca’ya ait rüzgâr hızı verilerinde standart sapma beklenen değerler arasında çıkmıştır. Rüzgâr enerjisi potansiyelinin hesabı yapılırken standart sapmanın sıfıra yakınlığı o bölgede rüzgâr rejiminin düzenli olduğunu ifade etmektedir.

Yatırım projelerinin tamamında olduğu gibi yenilenebilir enerji projelerinde özellikle de RES yatırımlarında proje geliştirme süreci önemlidir. İyi bir finansal modellemede yatırımın sonuçlarını etkileyecek olan girdi parametrelerinin, güncel ve mümkün olduğunca gerçeğe yakın olması gerekmektedir. Finansal ölçeklendirmeden elde edilen sonuçlardan yararlanarak yatırımın geleceği doğru tahmin edilebilir. Bu da projelerin yatırıma değer olup olmadıkları, projelerin ne oranda verim sağladığı, projenin kendini ne kadar sürede geri ödediği ve projeden hangi oranda bir net kar elde edilebileceği bilgisine ulaşmakta yardımcı olmaktadır.

Örnek yatırımın olası durumu değerlendirildiğinde 25 yıl olarak kabul edilen ekonomik ömrü, yatırımın yarı ömründen bir miktar daha fazla sürede amorti ettiği görülmektedir. Yapılan analizler sonucunda tahmin edilen rüzgâr hızının yerleşkede oluşması halinde RES yatırımının kısa dönemde olmasa da uzun dönemde kazanç sağlayabileceği sonuç olarak çıkartılabilir.

Öte yandan bu araştırma sonucunda RES'lerin en büyük maliyet kaleminin açık ara santrallerin kendileri olduğu görülmüştür. Santrallerin kendilerini karşılama sürelerinin en azından üçte bir oranında olabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarındaki KDV kalemlerinin düşürülmesi RES'leri yatırım açısından daha cazip hale getirecektir. Bölgesel kalkınma ajanslarının hibe programlarının ülke geneline yaygınlaşması da yatırımcıları rüzgârdan elektrik elde etmeye sevk edecek bir başka önemli itici güç olacaktır.

Alternatif enerji kaynaklarına yönelmenin bir devlet politikası olarak kabul edilmesi ve santrallerin yurt içinde üretiminin teşvik edilmesi halinde kur farkından etkilenmeyen, yerli ve milli türbinlerin üretimi, yatırım yapılan bir teknolojinin daha kısa sürede kâr etmesi anlamına gelecektir. İşsizlik oranlarının arttığı 2019 yılı içerisinde ithalata yönelmektense ülkenin kendi iç dinamiklerini kullanması vatandaşlara yeni iş kolları yaratması şüphesiz ki tüm yurttaşların faydasına olacaktır. Rüzgâr enerjisinden faydalanma anlamında hala ham olarak görülebilecek teknolojinin, fosil kaynakların tükenmesi ile birlikte daha çok gelişmesi maliyet fiyatlarının azalmasını sağlayacak bu da sektördeki çalışmaların önemini daha da parlatacaktır.

Rüzgâr enerjisine ait kapasitenin bulunabilmesi için bu gibi çalışmalar geleceğe ışık tutabilecektir. En büyük ithalat kalemi enerji olan ülkemizin, fosil yakıt kaynaklarından ziyade yenilenebilir öz kaynaklarına yönelimi ve yatırımı, gelişmekte olan ülkeler sınıfında yer alan ülkemiz ekonomisine büyük katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Akdağ S. A., (2008), “Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ve Ekonomik Analizinde Weibull Dağılımının Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Akdağ S. A., Dinler A., Menteş Ş. S., (2007), “Rüzgâr Karakteristiğinin Analizi”, YEKSEM, 1 Kasım 2007, Gaziantep.

Akdoğan Ş., (2011), “Değişken Hızlı Değişken Kanat Açılabilir Bir Rüzgâr Türbinin Modellenmesi, Simülasyonu ve Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.

Akpınar S., Akpınar E. K., (2009), “Estimation of Wind Energy Potential Using Finite Mixture Distribution Models”, Energy Conversion and Management, 50, 877-884.

Almalı N. M., Ete T., (2009), “Ortalama Rüzgar Hızı ve Güç Yoğunluğunun Hesaplanması”, V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 97-102, Diyarbakır, 19-21 Haziran.

Avcı B., (2012) “Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi”, Bitirme projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi.

Aydinyüz G., (2015), “Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Yapısal Analizi”, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi.

Bianchi, F.D., Battista H. D., Mantz R. J., (2007), “Wind Turbine Control Systems”, 1th Edition, Springer-Verlag London Limited.

Büyükçolpan H. S., (2015), “Rüzgâr Türbin Kulelerinin Tasarımında Kullanılacak Rüzgâr Yüklerinin Belirlenmesine Yönelik Bir Karşılaştırma”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Elibüyük U., Üçgül İ., (2014), “Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri”, Journal of YEKARUM, 3, 1-14.

Erdem O., Batur B., Bilge Z. D., Temir G., (2015), “Bozcaada’da Kurulacak Olan Bir Rüzgâr Enerjisi Santralinin Ekonomik Analizi”, Tesisat Mühendisliği Sayı 148, 22-27.

EWEA, (2009), The Economics of Wind Energy, The European Wind Energy Association.

Güney İ., Noğay S., Taşkın S., (2001), “Rüzgâr Türbinlerinde Kontrol ve Güvenlik Sistemleri”, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, 137-144, Kayseri, 12-13 Ekim.

Gürbüz Öger Ö., (2006), “Pelton Tipi Rüzgâr Türbini Kullanarak Elektrik Enerjisi Üretme”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

Güzel S., (2014), “Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Hesaplamasında Kullanılan Bilgisayar Programlarının Karşılaştırması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

IRENA, (2012), Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, International Renewable Energy Agency.

IRENA, (2013), Renewable Power Generation Costs in 2012: An Overview, International Renewable Energy Agency.

Karabağ S., (2011), “Rüzgâr Türbini Kanadı İmalatı”, İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi, 1-17, İzmir, 23-24 Aralık.

Kaya K., Koç E., (2015) “Enerji Üretim Santralleri Maliyet Analizi”, Mühendis Ve Makina, Cilt 56 (660), 61-68.

Köstekci M., F., (2014), “Bir Bölgenin Rüzgâr Verileri Kullanılarak Rayleigh Yöntemi İle Rüzgâr Türbini Ekonomiklik Analizi ve Deneysel Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi.

Kurban M., Kantar Y., Hoccoğlu F.O. “Rüzgâr Enerji Potansiyelinin Araştırılmasında Weibull ve Rayleigh Dağılımları'nın Kullanılması“, Sakarya University Journal of Science, 10 (1), 14-21.

Nak H., (2013), “Değişken Hızlı Değişken Açılı Rüzgâr Türbinlerinin Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Nurbay N., (2005), “Türkiye’de rüzgâr enerjisinin kullanımı ve İzmit’in meteorolojik şartlarına uygun optimum rüzgâr türbini seçimi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi.

Pusat Ş., (2017), “Sakarya Üniversitesi İçin Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Belirleme Çalışması”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23 (4), 352-357.

Uçar A. ve Balo F., (2009), “Investigation of Wind Characteristics and Assessment of Wind Generation Potentiality in Uludağ-Bursa”, Turkey. Applied Energy, 86, 333-339.

Vasi I. B., (2011), “Winds Of Change”, 1th Edition, Oxford University Press.

Web 1, (2018), <https://www.enerjiatlası.com/sehir/kocaeli/>, (Erişim Tarihi: 18/06/2019).

Web 2, (2017), https://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2f1%2fDocuments%20ve%20Tabii%20Kaynaklar%20G%c3%b6r%c3%bcn%c3%bcm%c3%bc%2fSayı_1_5.pdf, (Erişim Tarihi: 20/06/2019).

Web 3, (2018), <http://www.yegm.gov.tr/YEKrepa/YALOVA-REPA.pdf>, (Erişim Tarihi: 17/07/2019).

Web 4, (2018), <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/comp/index.htm>, (Erişim Tarihi: 17/07/2019).

Web 5, (2018), <https://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojiyegir.aspx?s=10>, (Erişim Tarihi: 17/07/2019).

Web 6, (2008), http://www.emo.org.tr/ekler/747cefbcb0b84abe_ek.pdf, (Erişim Tarihi: 22/07/2019).

Web 7, (2018), <https://www.leitwind.com/Products/LTW77-800-850-1.000-kW>, (Erişim Tarihi: 22/07/2019).

Yıldırım H. H., (2017), “Rüzgâr Enerjisi Santral Yatırımlarında Geri Ödeme Süresinin Monte Carlo Simülasyonu ile Belirlenmesi”, İşletme İktisadî Enstitüsü Yönetim Dergisi, 82, 76-104.



ÖZGEÇMİŞ

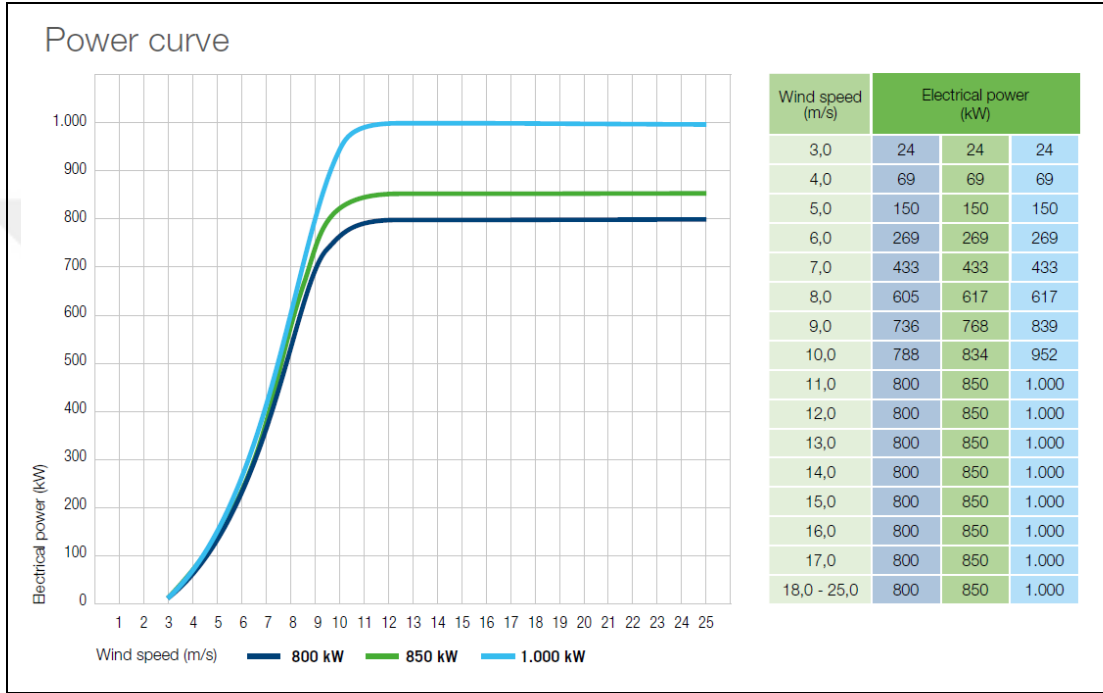
Fatih TÜYSÜZ, 2006 yılında başladığı Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2011 yılında 2.98 ortalama ile tamamladı. 2012 yılında bitirdiği askerlik görevinin ardından aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladı. 2015 yılından 2018'e kadar TSE Gebze Kalite Kampüsünde belgelendirme alanında İnceleme Uzmanı sıfatıyla çalışmasının ardından halen çalışmakta olduğu Ataşehir'deki TSE'nin ithalat birimine tayin oldu.



EKLER

Ek A: Diğer Ekler

Bölge için seçilen türbine ait katalog değerleri üretici el kitabında Şekil A1.1'deki gibi verilmiştir.



Şekil A1.1: Türbine Ait Katalog Değerleri.

Tablo A1.1: Bölgenin Hız Sınıfları ve Esme Frekansları.

0 - 1 m/s	0.83	10 - 11 m/s	1.88
1 - 2 m/s	4.84	11 - 12 m/s	1.15
2 - 3 m/s	13.05	12 - 13 m/s	0.73
3 - 4 m/s	18.05	13 - 14 m/s	0.41
4 - 5 m/s	18.38	14 - 15 m/s	0.22
5 - 6 m/s	15.17	15 - 16 m/s	0.12
6 - 7 m/s	10.28	16 - 17 m/s	0.07
7 - 8 m/s	6.67	17 - 18 m/s	0.05
8 - 9 m/s	4.74	18 - 19 m/s	0.04
9 - 10 m/s	3.28	19 - 20 m/s	0.04

Rüzgâr hızı verilerinin ölçüldüğü Darıca istasyonunun konumu Şekil A1.2’deki haritada gösterilmiştir.



Şekil A1.2: MGM Darıca Rüzgâr Hızı Ölçüm İstasyonu.