

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MÜHENDİSLİK YÖNETİMİ**

**RÜZGÂR ENERJİSİ PROJESİ KURULUMUNUN
İNCELENMESİ**

DÖNEM PROJESİ

VOLKAN SERT

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2017

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MÜHENDİSLİK YÖNETİMİ**



**RÜZGÂR ENERJİSİ PROJESİ KURULUMUNUN
İNCELENMESİ**

DÖNEM PROJESİ

VOLKAN SERT

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2017


YÜKSEK LİSANS PROJE ONAY FORMU

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Mühendislik Yönetimi Tezsiz Yüksek Lisans, Öğrencisi Volkan SERT, tarafından hazırlanan “RÜZGÂR ENERJİSİ PROJESİ KURULUMUNUN İNCELENMESİ” başlıklı Yüksek Lisans Projesi tarafımdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından Yüksek Lisans Projesi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Aliye Ayça SUPÇİLLER

Danışman


Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 25/08/2017 tarih ve 34/08... sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Müdür

Bu dönem projesinin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.


VOLKAN SERT

ÖZET

RÜZGÂR ENERJİSİ PROJESİ KURULUMUNUN İNCELENMESİ

TEZSİZ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI DÖNEM PROJESİ

VOLKAN SERT

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MÜHENDİSLİK YÖNETİMİ

(DANIŞMANI:YRD. DOÇ. DR. ALİYE AYÇA SUPÇİLLER)

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2017

Rüzgâr enerjisi, fosil yakıt kullanımına ihtiyaç duymadığından çevre dostu bir enerji biçimidir. Rüzgâr türbinlerinin, termik santraller ya da dizel santraller gibi emisyonları yoktur. Rüzgâr enerjisinin en önemli özelliği, yenilenebilir enerji kaynağı olmasıdır. Bu sebepten dolayı fosil yakıtlar gibi tükenmesi söz konusu değildir.

Rüzgâr, günümüz yenilenebilir enerji teknolojileri arasında fayda – fiyat karşılaştırmasında önde gelenlerdendir. Henüz gelişmekte olan hidrojen yakıt pilleri ve güneş panellerinin üretim maliyetleri çok fazla ve verimleri düşüktür. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında iyi bir çözüm olsa da hali hazırda üretilen elektrik enerjisi ile rekabeti çok zordur. Ancak çok yüksek hızlarda, sürekli rüzgâr alan bölgelerde kurulması rekabet gücünü arttırmaktadır. Kurulum maliyetleri çok fazla olsa da bakım ve işletme giderleri çok azdır.

Bu tez çalışması kapsamında, rüzgâr enerjisinin tarihçesi ve günümüzde elektrik enerjisi üretimi için çok fazla tercih edilen rüzgâr enerji sistemleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Rüzgâr Enerjisi, Rüzgâr Türbini, Kurulum, Fizibilite

ABSTRACT

WIND ENERGY PROJECT INSTALLATION REVIEW

MSC (NON-THESIS)

VOLKAN SERT

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

INDUSTRIAL ENGINEERING

ENGINEERING MANAGEMENT

(SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. ALİYE AYÇA SUPÇİLLER)

DENİZLİ, AUGUST 2017

Wind energy is a clean renewable energy and does not depend on fossil fuel. Wind power plants do not have air polluting emissions. The most important feature of wind energy is that it is a source of renewable energy. For this reason, it is not a matter of exhaustion like fossil fuels.

Wind is one of the leading comparisons of utility-price among today's renewable energy technologies. The renewable systems, still on development such as photo-voltaic batteries, hydrogen powered fuel-cells have very large production costs, and low efficiency. Although it is a good solution among renewable energy sources, it is very difficult to compete with in the electricity production. However, at very high wind speeds, the establishment of continuous windy areas increase competition. At the same time, although the installation costs are very high, maintenance and operation costs are very low.

In this master of science thesis, the history of wind energy and wind energy systems, which are highly preferred for today's electric energy production, are explained in detail.

KEYWORDS: Wind Energy, Wind Turbine, Installation, Feasibility

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vi
SEMBOL LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. RÜZGÂR ENERJİ SİSTEMLERİNİN İNCELEMESİ	2
2.1 Tarihsel Gelişim	2
2.2 Dünya Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli.....	7
2.3 Rüzgâr Enerjisi Çalışmaları.....	10
2.4 Rüzgâr Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları	11
2.4.1 Rüzgâr Enerjisinin Avantajları	11
2.4.2 Rüzgâr Enerjisinin Dezavantajları	12
3. TÜRKİYE’NİN RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİ	13
3.1 Rüzgâr Potansiyelinin Sınıflandırılması.....	14
3.2 Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi	15
3.3 Türkiye’deki Rüzgâr Enerji Santralleri	16
4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ	19
4.1 Rüzgâr Enerjisi Türbinlerinin Tanımı	19
4.1.1 Rüzgâr Türbinlerinin Özellikleri ve Yapısı	19
4.2 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması	20
4.2.1 Rüzgâr Kuvvetinden Yararlanma Şekline Göre Sınıflandırma ...	21
4.2.1.1 Rüzgârın Direnç Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler	21
4.2.1.2 Rüzgârın Kaldırma Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler	22
4.2.1.3 Yükselen Hava Akımlı Rüzgâr Türbinleri	22
4.2.2 Pervane Ekseninin Konumuna Göre Sınıflandırması	23
4.2.2.1 Yatay Eksenli Türbinler	23
4.2.2.2 Düşey Eksenli Türbinler	24
4.3 Modern Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri Oluşturan Elemanlar	26
4.3.1 Makina Dairesi (Nacelle).....	27
4.3.2 Kanatlar.....	27
4.3.3 Kanatların Bağlantı Noktası.....	28
4.3.4 Düşük Hız Mili (Şaftı)	29
4.3.5 Dişli Kutusu	30
4.3.6 Mekanik Frenli Yüksek Hızlı Mil (Şaft).....	31
4.3.7 Elektrik Jeneratörü	31
4.3.8 Rota (Yaw) Mekanizması	32
4.3.9 Elektronik Kontrolör.....	32
4.3.10 Hidrolik Sistem	33
4.3.11 Soğutma Birimi Fanı.....	33
4.3.12 Kule.....	33
4.3.13 Anemometre ve Rüzgâr Gülü	34
4.3.14 Yatak.....	34

4.3.15	Hız Kontrolörü.....	34
5.	RÜZGÂR ENERJİSİ MATEMATİK DENKLEMLERİ.....	36
5.1	Enerji Dönüşümü.....	36
5.1.1	Rüzgâr Enerjisinin Gücü.....	36
5.1.2	İdeal Risk Teorisi ve Betz Limiti.....	39
6.	RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ETKİLENDİĞİ VE ETKİLEDİĞİ	
ETMENLER.....		44
6.1	Basınç, Sıcaklık, Nem ve Çevre.....	44
6.2	Rüzgâr Engelleri.....	45
6.2.1	Çalkantı Etkisi (Wake Effect).....	45
6.2.2	Türbinlerin Yerleşim Etkisi (Park Effect).....	46
6.2.3	Tünel Etkisi (Tunnel Effect).....	47
6.2.4	Tepe Etkisi (Hill Effect).....	47
6.3	Rüzgâr Türbini Alanının Seçimi.....	48
6.4	Kanat Sayısı Etkisi.....	49
6.5	Kule Yüksekliğinin Etkisi.....	51
7.	SONUÇ.....	52
8.	KAYNAKLAR.....	53
9.	ÖZGEÇMİŞ.....	55

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Eski zamanlarda Rüzgâr Türbini Kullanım Alanları.....	3
Şekil 2.2: Gedser Rüzgâr Türbini.....	3
Şekil 2.3: Darrieus Tipi Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri.....	4
Şekil 2.4: Deniz Üstü (Off Shore Wind) Rüzgâr Santralleri.....	5
Şekil 2.5: İzmir – Çeşme, Alaçatı Mevkiinde Bulunan Türkiye'nin İlk Rüzgâr Santrali.....	6
Şekil 2.6 Ülkeler Bazında 2015 Avrupa RES Kurulu Gücü Haritası.....	10
Şekil 2.7: Yatay Eksenli Bir Rüzgâr Türbini ve Rüzgâr Santrali.....	11
Şekil 2.8: Göç Yollarına Kurulan Türbinler.....	12
Şekil 3.1: Türkiye Rüzgâr Hızı Potansiyelini Gösteren Harita.....	16
Şekil 4.1: Savonius Rüzgâr Türbini ve Yapısı.....	21
Şekil 4.2: Darrieus Rüzgâr Türbini ve Yapısı.....	22
Şekil 4.3: Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini.....	23
Şekil 4.4: Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini.....	25
Şekil 4.5: Rüzgâr Türbininin Temel Parçaları.....	26
Şekil 4.6: Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Örnek Nacelle Yapısı.....	27
Şekil 4.7: Kanat İmalatı.....	28
Şekil 4.8: Montaj Sırasında Kanatlar (Uşak RES).....	29
Şekil 4.9: Rüzgâr Türbini Şaftı.....	30
Şekil 4.10: Dişli Kutusu.....	30
Şekil 4.11: AC Jeneratör.....	31
Şekil 4.12: Rüzgâr Türbini Kulesi (Yalova RES Şantiyesi).....	34
Şekil 5.1: Betz Modeli.....	39
Şekil 5.2: Betz Güç Faktörü Grafiği.....	42
Şekil 6.1: Engel Etrafında Rüzgâr Akışı.....	45
Şekil 6.2: Wake Etkisi.....	46
Şekil 6.3: Türbin Yerleşim Planı.....	46
Şekil 6.4: Tünel Etkisi.....	47
Şekil 6.5: Tepe Etkisi.....	48
Şekil 6.6: Hakim Rüzgâr Yönü.....	48
Şekil 6.7: Kanat Sayısı Etkisi.....	50
Şekil 6.8: Çeşitli Yükseklikteki Kuleler.....	51

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Tarihteki Bazı Rüzgâr Türbinleri.....	4
Çizelge 2.2: İlk Büyük Ebatlı Rüzgâr Türbini Performansları.....	6
Çizelge 2.3: Dünya Çapında RES Kurulu Gücü.....	8
Çizelge 2.4: Bölgelere Göre Yıllık Güçler.....	9
Çizelge 3.1: Yıllık Ortalama Rüzgâr hızı $> 7,0$ m/s - 50 m.....	16
Çizelge 3.2: Türkiye'deki Rüzgâr Enerji Santralleri için Kümülatif Kurulum.....	17
Çizelge 5.1: Rüzgâr Türbinlerindeki Bazı Bileşenlerin Verimleri.....	43

SEMBOL LİSTESİ

- C_p : Türbin güç faktörü
- K : Rüzgârdaki kinetik enerji (Joule)
- v : Ölçüm yüksekliğindeki rüzgâr hızı (m/s)
- m : Havanın kütlesi (kg)
- ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m³)
- V : Hava hacmi (m³)
- A : Rotor süpürme alanı (m²)
- Δt : Ölçüm zamanı (s)
- E_y : Enerji yoğunluğu (W/m²yıl)
- A : Rotor süpürme alanını (m²)
- f : Yıllık esme saat sayısı (saat/yıl)
- v_u : Rotora gelen havanın hızı
- v_b : Kanatlara çarpan havanın hızı
- v_d : Rotordan çıkan havanın hızı

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim ve çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkıları ile beni yönlendiren proje danışmanım Yrd. Doç. Dr. Aliye Ayça SUPÇİLLER'e, ayrıca çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Son yıllarda fosil yakıtların yüksek miktarlarda tüketiminden kaynaklanan çevresel kirlenmenin küresel ısınmayı ciddi şekilde etkiler duruma gelmesi, fosil bazlı yakıtların sınırlı oluşu ve ithal enerji kaynaklarına gittikçe artan bağımlılık dünya genelinde alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi teşvik etmektedir. Özellikle, 1997 yılında Kyoto protokolünün imzalanmasından sonra CO₂, NO_x ve SO_x tabanlı emisyonlarının azaltılması uluslararası bir problem olarak benimsenmiş ve bu alanda yapılan yasal uygulamalar açısından lider konumunda olan AB üye ülkeleri arasında yenilenebilir tabanlı enerji kaynaklarından enerji üretilmesi hedefi konulmuştur.

Ülkemizin sahip olduğu mevcut yenilenebilir enerji (ağırlıklı olarak hidroelektrik) santrallerinde yapılan üretim değerlendirildiğinde, çevre dostu enerji üretimi yaptığımız ve mevcut AB hedefini tutturduğumuz ortaya çıksa da bu durumun ilerleyen yıllarda da korunması için artan enerji talebinin karşılanırken yapılacak yatırımların önemli bir kısmının yenilenebilir enerji kaynakları tabanlı üretim yapan santrallere yapılması gerekmektedir.

Yaptığım bu Tez çalışmanın da rüzgâr enerjisi tarihçesi ve günümüzde gelinen son nokta olmak üzere; rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi sağlayan rüzgâr türbinleri ayrıntılı olarak tanıtılmış ve rüzgâr türbinlerine etki eden etmenlerden bahsedilmiştir.

2. RÜZGÂR ENERJİ SİSTEMLERİNİN İNCELEMESİ

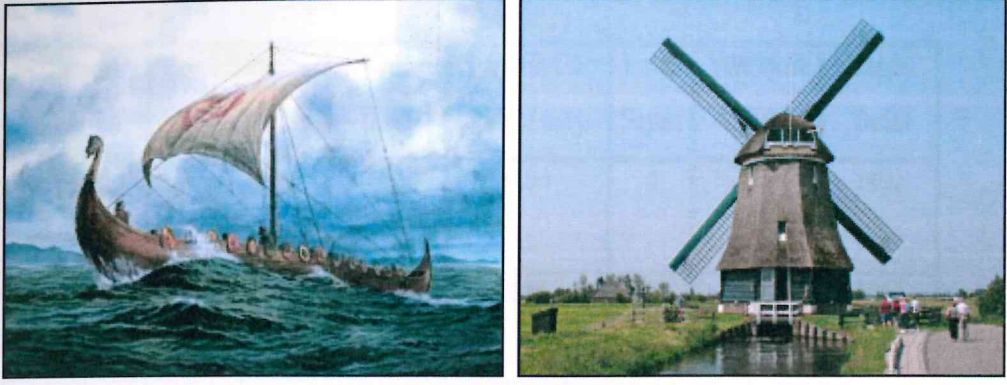
2.1 Tarihsel Gelişim

Tarihte rüzgâr enerjisinin kullanımı yelkenli gemilerle başlamıştır. Buradaki kullanım elektrik enerjisi üretimi olmasa da rüzgârın önemli bir doğal kaynak olduğu anlaşılmıştır. Jeneratör teknolojilerinde meydana gelen gelişmeler rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünü de sağlamıştır.

Rüzgâr enerjisi ilk kullanımı M.Ö. 2000 yıllarına kadar uzanmaktadır. Rüzgâr enerjisi ilk olarak Orta Doğuda kullanılmıştır. M.Ö. 17. Yüzyılda Babil kralı Hammurabi döneminde Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanılan rüzgâr enerjisinin, aynı dönemde Çin'de de kullanıldığı belirtilmektedir. Persler M.S. 7.yüzyıl ortalarında dikey eksenli rüzgâr değirmenleri yaygın olarak kullanılmıştır (Hayli 2001).

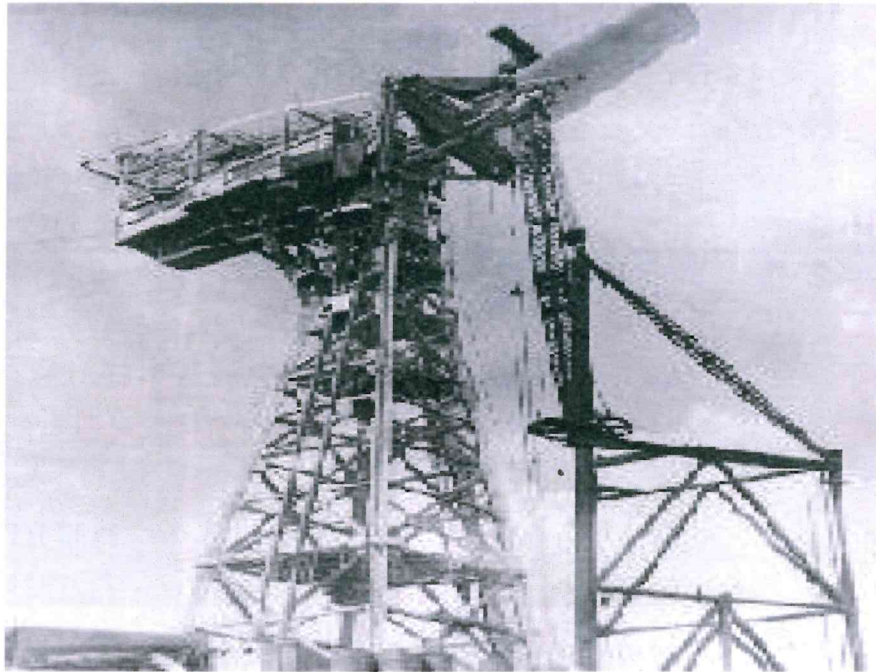
Yel değirmenleri, ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. Türklerin ve İranlıların ilk yel değirmenlerini M.S. 7. yüzyılda kullanmaya başlamalarına karşın, Avrupalılar yel değirmenlerini ilk olarak Haçlı seferleri sırasında görmüşlerdir. (Şekil 2.1) Fransa ve İngiltere'de rüzgâr değirmenlerin kullanılmaya başlanması 12.yüzyılda olmuştur.

18.Yüzyılın sonları itibari ile yalnızca Hollanda'da 10.000 yel değirmeni bulunmaktadır. 19. yüzyıla gelindiğinde rüzgâr enerjinin en önemli kullanım alanı su pompaları olmuştur. Bununla beraber, rüzgâr türbini olarak isimlendirilen ilk makineler 1890'ların başlarında Danimarka'da yapılmıştır. İlk rüzgâr türbinlerinin ürettikleri güç miktarları az olsa da günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte ürettikleri güç miktarları bir hayli artmıştır ve bu artış rüzgârı önemli bir enerji kaynağı haline getirmiştir (Özgener 2002).



Şekil 2.1: Eski Zamanlarda Rüzgâr Türbini Kullanım Alanları

1959 yılında 200 kW gücünde Gedser Türbini işletmeye alınmış (Şekil 2.2), 1970 yılında gücü 650 kW olan büyük türbin ile değiştirilmiştir. Bu dönemde rüzgâr jeneratörleri üzerinde İsviçre, Avusturya ve İtalya'da da teknolojik çalışmalar yapmaktaydı. Amerika'da 1970'lerde büyük tip yatay eksenli makineler üzerinde yeniden çalışılırken, dikey eksenli Darrieus tipi (Şekil 2.3) makineler üzerinde de çalışmalar başlatılmıştır. Ucuz petrol döneminde süreklilik kazanamayan rüzgâr enerjisi, 1974-1978 yılları arasındaki yapay petrol bunalımlarının ardından, gündeme daha çok girmiştir (Hayli 2001).



Şekil 2.2: Gedser Rüzgâr Türbini

Çizelge 2.1: Tarihteki Bazı Rüzgâr Türbinleri

Türbin ve Ülke	Çap	Süpürme Alanı	Güç [kW]	Spesifik Güç [kW / m ²]	Kanat Sayısı	Yükseklik [m]	Yapım Tarihi
Poul La Cour, Danimarka	23	408	18	0.04	4	---	1891
Smith-Putnam, ABD	53	2231	1250	0.56	2	34	1941
F.L Smith, Danimarka	17	237	50	0.21	3	24	1941
F.L Smith, Danimarka	24	456	70	0.15	3	24	1942
Gedser, Danimarka	24	452	200	0.44	3	25	1957
Hütter, Almanya	34	908	100	0.11	2	22	1958



Şekil 2.3: Darrieus Tipi Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr enerjisinin gelişimine, 1980'li yıllarda Uluslararası Enerji Ajansı eşgüdümünde yürütülen araştırma geliştirme çalışmalarının büyük etkisi olmuştur. Günümüzde rüzgâr santralleri karalarda olduğu kadar denizlerde de kurulmaktadır.

Karadan denize geçiş ilk uygulamalarla teknik alanda başarılmış ve ticari uygulamaları da gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte daha gelişkin sistemler için AR-GE çalışmaları sürmektedir. Deniz üstü rüzgâr enerjisi (Şekil 2.4) ile ilgili ilk çalışmalar 1970’li yılların sonuna doğru Danimarka, Hollanda, İsveç ve ABD’de başlamıştır. 1980’li yılların başında bu çalışmalar Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) bünyesinde yürütülmüştür.



Şekil 2.4: Deniz Üstü (Off Shore Wind) Rüzgâr Santralleri

İlk deniz üstü “rüzgâr çiftliği” Danimarka’da Loland adası yanında kurulan Vindeby rüzgâr çiftliğidir. Bu çiftlikte 5 MW’lık enerji üretilebilmektedir. 1991 yılı ortalarında işletmeye açılan çiftlik, Danimarka Enerji Bakanlığı’nın 100 MW’lık projesinin bir bölümünü oluşturmaktadır. Avrupa’da 1995–1997 yılları arasında kapasitesi 12 MW olan rüzgâr santralleri kurulmuş olup bu santrallerin kapasitesi arttırılmaktadır. Sözgelimi İngiltere’nin doğu kıyısında, Inner Dowsing adı verilen bölgede karaya 5 km uzaklıkta yapılması planlanan bu santralde hedef 1.4 MW gücünde 9 türbin kurup 12,6 MW enerji üretmektir (Yalçın 2007).

Ülkemizde 1992 yılında Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği kurulmuştur ve Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliğine bağlanmıştır. Pek çok kamu kurumu ve özel sektörden katılan üyelerden oluşmaktadır. Enerji bakanlığının ve özellikle bu birliğin etkin çalışmaları sonucu, özel şirketler tarafından ilk defa 1998’lerde İzmir- Çeşme, Alaçatı mevkiinde (Şekil 2.5) ARES – Güç Birliği şirketi tarafından toplam 7.2 MW gücünde rüzgâr türbinleri kurularak elektrik üretimine geçilmiştir. Aynı yıllarda Çanakkale-Bozcaada’da Demirer Holding tarafından 10.2 MW’lık güçte rüzgâr türbinleri kurulmuştur. Bu türbinler dönmeye ve elektrik üretmeye devam ederken

ülkemizde pek çok yerde daha kurulması için büyük şirketlerin çalışmaları devam etmektedir.



Şekil 2.5: İzmir – Çeşme, Alaçatı Mevkiinde Bulunan Türkiye'nin İlk Rüzgâr Santrali

Çizelge 2.2: İlk Büyük Ebatlı Rüzgâr Türbini Performansları

Türbin ve Ülke	Çap [m]	Süpürme Alanı [m ²]	Kapasite [MW]	Çalışma Süresi	Üretimi GWh	Periyodu
Mod-1, ABD	60	2827	2	---	---	1979 - 83
Growian, Almanya	100	7854	3	420	---	1981 - 87
Smith-Putnam, ABD	53	2236	1.25	695	0.2	1941 - 45
WTS-4, ABD	78	4778	4	7200	16	1982 - 94
Nibe A, Danimarka	40	1257	0.63	8414	2	1979 - 93
WEG LS1, İngiltere	60	2827	3	8441	6	1987 - 92
Mod-2, ABD	91	6504	2.5	8658	15	1982 - 88
Nassudden, İsveç	75	4418	2	11400	13	1983 - 88
Mod-OA, ABD	38	1141	0.2	13045	1	1977 - 82
Tjæreborg, Danimarka	61	2922	2	14175	10	1988 - 93
Ecole, Kanada	64	4000	3.6	19000	12	1987 - 93
Mod-5B, ABD	98	7466	3.2	20561	27	1987 - 92
Maglarp, İsveç	78	4778	3	26159	34	1982 - 92
Nibe B, Danimarka	40	1257	0.63	29400	8	1980 - 93
Tvind, Danimarka	54	2920	2	50000	14	1978 - 93

(Gipe, 1995)

2.2 Dünya Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli

Dünyanın rüzgâr enerjisi potansiyelini tahmin etmek ve belirlemek zordur. Fakat bilimsel çalışmalar ham rüzgâr potansiyelinin sadece %10'nun kullanılmasına, dünyanın elektrik enerji gereksiniminin tamamının karşılanabileceğini göstermiştir.

Dünya Enerji Konseyi (WEC) dünya rüzgâr kaynağının teknik potansiyelini, km^2 başına 8 MW üretim kapasitesi ve %23 kapasite faktörü kabul ederek, dünya potansiyelini yılda 20000 TWh olarak tahmin etmiştir. Yerden 10 metre yükseklikte dünya yüzeyinin yaklaşık %27'sinin yıllık ortalama rüzgâr hızı 5,1 m/s'den daha yüksektir. Uygun olmayan arazi, yerleşim alanları, tarımsal amaçlar ve diğer arazi kullanımları nedeniyle bu alanların sadece %4'ü elektrik üreten rüzgâr tarlaları için uygundur. Bu alanlar kıta alanlarının 50° kuzey ve güney enlemleri arasında 1000 km^2 'lik sahil şeridi içinde bulunmaktadır. Ekonomik, estetik ve fiziksel planlama kısıtları nedeniyle bunun yaklaşık üçte birinin gerçekleştirilebileceği kabul edilmiştir. (Erdem 2015).

Bu hesaplamalar sadece karasal bölgeler için yapılmış olup, açık deniz (offshore) bölgelerinin de ihmal edilmeyecek ciddi bir potansiyel mevcuttur. Kıyıdan 10 km açıklıkta ve 10 m derinlikteki alanların potansiyeli 750 TWh/yıl iken, kıyıdan uzaklığı 30 km ve su derinliği 40 m olan yerlerde 3500 TWh/yıl düzeyine çıkmaktadır (Yalçın 2007).

Çin'deki offshore (deniz üstü) potansiyelinin ise, 30000 MW civarında olduğu yapılan fizibilite çalışmalarında ortaya çıkmıştır. Rüzgâr enerjisinde yerli üretim, ya doğrudan-dolaylı destek mekanizmaları ya da teknolojik uzmanlık ve istihdamdan kaynaklanan bölgesel avantajlar gibi yöntemlerle desteklenebilmektedir (Bayraç 2011).

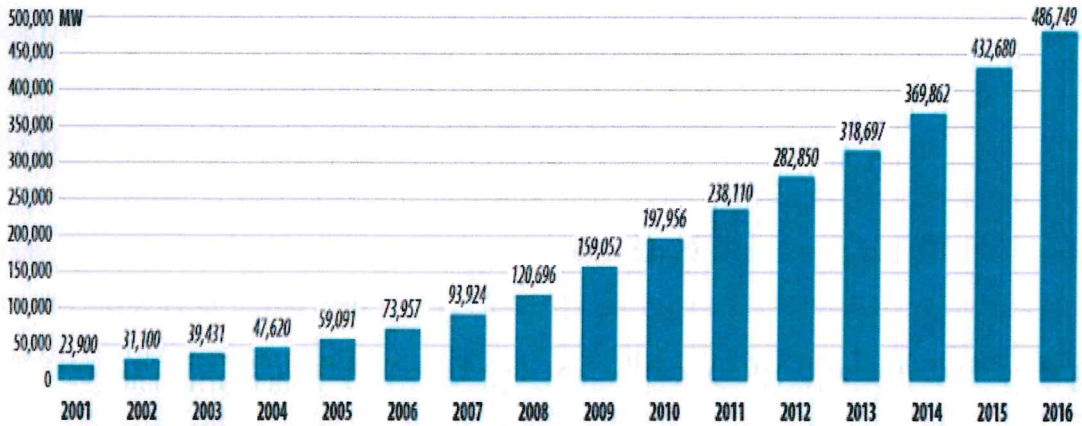
Rüzgâr enerjisinin gün geçtikçe önem kazandığı günümüz koşullarında dünya üzerinde de bu konuda birçok kapsamlı araştırma ve projeler yürütülmektedir. Küresel ısınmanın da etkisini yadsınmadığı bu koşullar dünya üzerinde rüzgâr enerjisinin kısa bir süre içerisinde daha yaygın olarak kullanılacağını sinyallerini vermektedir. Rüzgâr enerjisi dünyada ciddi biçimde yaygınlaşacaksa, öncelikle bu hedefleri gerçekleştirecek doğal kaynakların var olup olmadığını açıkça anlamak gerekir.

Uygulamada, elektrik üretiminde kaynak yetersizliğinin, rüzgâr gücü kullanımı açısından sınırlayıcı bir etken olma olasılığı yoktur. Dünyanın rüzgâr kaynaklarının 53.000 TWh/yıl olduğu hesaplanırken, 2020 yılına kadar dünya elektrik tüketiminin 25.579 TWh/yıl'a yükselmesi beklenmektedir. Bu nedenle teknik olarak elde edilebilecek küresel rüzgâr kaynağı, dünyanın tüm elektrik gereksinimi için yapılan tahminin iki katından fazladır.

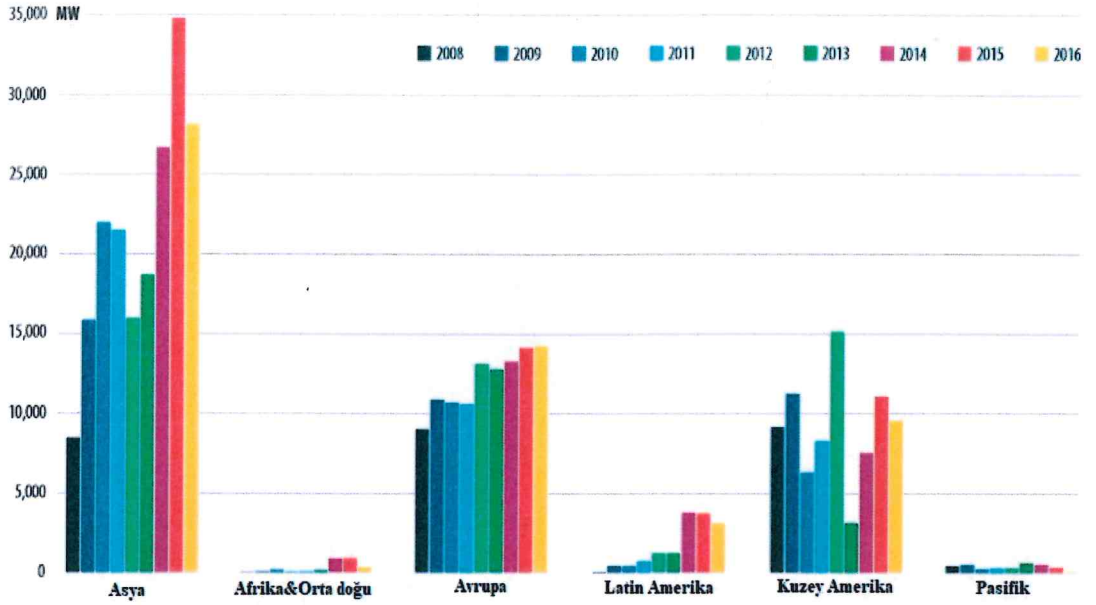
Bugüne kadar yapılmış araştırmalar, dünyanın rüzgâr kaynaklarının çok büyük ve neredeyse tüm bölgelere ve ülkelere yayılmış durumda olduğunu göstermektedir. Bunların büyüklükleri konusunda birçok değerlendirme yapılmıştır.

Bu tür çalışmalarda kullanılan yöntem, yer düzeyinden 10m yükseklikte, saniyede 5- 5,5 m/s aşkın ortalama yıllık rüzgâr hızları olan kaç kilometrekare alan mevcut olduğunu değerlendirmektir. Bugünün enerji üretim maliyetleri ile rüzgâr enerjisinin kullanılması için bu ortalama hız uygun kabul edilmektedir. Dünya rüzgâr enerjisi kurulu gücü (Çizelge 2.3) 2016 yılı itibariyle 486749 MW düzeyine ulaşmıştır (GWEC 2017).

Çizelge 2.3: Dünya Çapında RES Kurulu Gücü



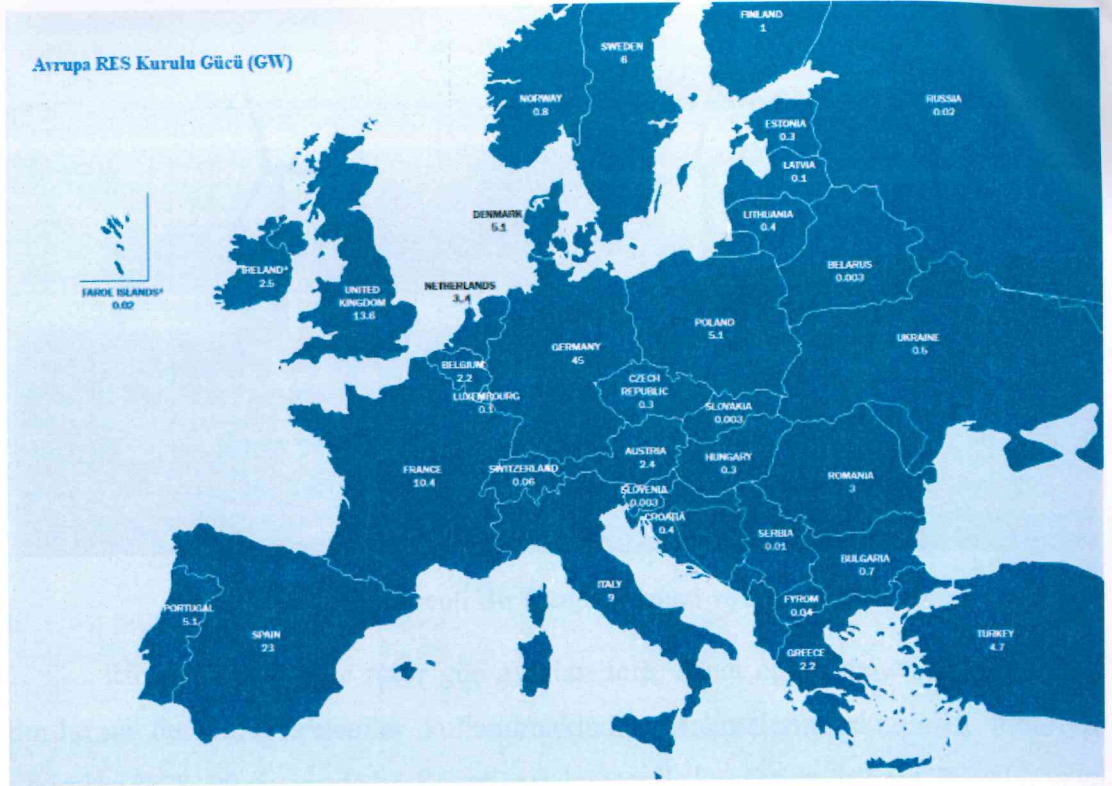
Çizelge 2.4: Bölgelere Göre Yıllık Güçler



Daha ayrıntılı değerlendirmeler, gerçekte beklenenden çok daha fazla sayıda potansiyel sahanın kullanılabilir olduğunu kanıtlamaktadır. Bunun iyi bir örneği Almanya'nın iç bölgelerindeki daha az rüzgârlı görünen sahaların keşfi olmuştur. Kaliforniya'nın dağ geçitlerinde olduğu gibi diğer örneklerde, yerel topografya olağanüstü iyi koşullar yaratmaktadır. Bu nedenle dünyadaki toplam rüzgâr kaynağının, bölgesel iklim gözlemlerine dayalı değerlendirmelerin gösterdiğinden daha da yüksek olmasıdır. Son olarak teknolojinin daha da geliştirilmesi 5 m/s'lik rüzgâr hızlarının kullanılma potansiyelini kesinlikle artıracaktır.

Çizelge 2.3'de de görüldüğü gibi her geçen gün dünyada rüzgâr enerjisi kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Rüzgâr enerjisi üretim kapasitesi 2009 yılında 159052 MW iken 38904 MW (%24)'lük artışla 2010'da 197956 MW'a çıkmıştır. Oysa bu rakam daha 2005 yılında sadece 59091 MW'dı. İki yıl içinde dünyada 34833 MW'lık rüzgâr tesisi kurulmuş olup, bu oran 2001 yılındakinden %45 daha fazladır. 2014 yılında 51165 MW, 2015 yılında 62818 MW, 2016 yılında ise 54069 MW rüzgâr enerjisi tesisi kurulmuş ve toplam kapasite 486749 MW'a ulaşmıştır.

Görüldüğü gibi tesis kurulma hızı, her yıl bir önceki yıldan daha fazla artmaktadır. Bu da rüzgâr enerjisinin önünün açık olduğunun bir göstergesidir.



Şekil 2.6: Ülkeler Bazında 2015 Avrupa RES Kurulu Gücü Haritası

2.3 Rüzgâr Enerjisi Çalışmaları

Günümüzde modern rüzgâr enerjisi sistemleri üzerinde çalışılmalarının hız kazanması ile birlikte birden çok türbin içeren rüzgâr çiftlikleri ile elektrik şebekelerinin beslenmesi amaçlanmıştır. Yapılan sistem analizlerinde rüzgâr enerjisi gelişiminde hub yüksekliği 70-130 m olan sistemler (1,5-5 MW) optimum büyüklük olarak tespit edilmiştir.

1990'lı yılların sonunda türbin güçleri 2500 kW'a yükselmiştir. Bugün için dünya piyasasında bulunan ve santral kurmak için kullanılacak rüzgâr türbinlerinin güçleri yaklaşık 3,5 MW'tır. Tümü yatay eksenli (Şekil 2.7) Propeller tipi türbinler olup, rotor kanat sayıları iki ile üç arasında değişmektedir. Genellikle önden rüzgâr alan tip türbinlerdir. Rotor çapları 100-140 m, rotor süpürme alanları 7850-15400 m², rotor dönüş hızları 12-18 devir arasındadır. Çalışmaya başlangıç rüzgâr hızı 3-4 m/s kadar olup nominal güçlerini 10-14 m/s rüzgâr hızlarında üretmektedirler. Çalışmanın durdurulması rüzgâr hızı 20-25 m/s arasındadır. Rotorların zarar görebileceği rüzgâr hızı 50 m/s'den büyüktür.



Şekil 2.7: Yatay Eksenli Bir Rüzgâr Türbini ve Rüzgâr Santrali

Rüzgâr hızına göre rotor güç ayarları için, kanat eğimi denetimli veya aktif durdurma denetimli sistemler kullanılmaktadır. Makinelerin teknolojisi itibariyle verimleri %98- 99 civarındadır. Kanatlar polyester ile kuvvetlendirilmiş fiberglas veya epoksi ile güçlendirilmiş fiber karbondan yapılmakta ve ağaç omurga ile desteklenmektedir. Mekanik frenleri disk fren iken, aerodinamik frenleri aktif kanat ayarı olmaktadır.

Rüzgâr enerjisi için bir diğer uygulama alanı küçük güçlerde olmak üzere oto prodüktör elektrik üretimi ve mekanik enerji ile su pompalamadır. Küçük güçlü rüzgâr jeneratörleri birkaç yüz W ile birkaç kW arasında değişmektedir. Bunlar küçük ve uzak yerler için güvenilir güç üretebilmek için kullanılabilir.

2.4 Rüzgâr Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları

2.4.1 Rüzgâr Enerjisinin Avantajları

- Rüzgâr enerjisi, fosil yakıtlarla, kömür ve doğal gazla yanmaya dayanan işletmeler gibi havayı kirletmez.
- Rüzgâr türbinleri asit yağmurlarına sebep olan atmosferik emisyonlar üretmez.
- Rüzgâr türbinlerinde enerji üretimi sırasında hammadde maliyeti yoktur.
- Rüzgâr enerjisi ülke içi enerji kaynağıdır.

- Rüzgâr enerjisi tükenmeyen rüzgâr gücünün yenilenebilir olmasına prensibine dayanır.
- Rüzgâr enerjisi hala yenilenebilir enerji kaynaklarından en düşük fiyatlılarından biridir.
- Rüzgâr türbinleri çiftliklere inşa edilebilir, böylece en iyi rüzgâr konumlarının bulunduğu kırsal bölgelerde ekonomiden faydalanır.
- Çiftçiler arazilerinde çalışmaya devam edebilir. Yakıt olarak rüzgârı kullanılmasından dolayı atmosfere zehirli gazlar vermezler.
- Rüzgâr çiftliklerinin söküm maliyetleri yoktur. Çünkü sökülen türbinlerin hurda değeri söküm maliyetlerini karşılamaktadır. Bu çiftliklerin ömürlerini tamamlamasından sonra türbinlerin kullanıldığı alan eski haline kolayca getirilmektedir.

2.4.2 Rüzgâr Enerjisinin Dezavantajları

- İlk kurulum maliyetlerinin yüksek olması rüzgâr santrallerinin en önemli dezavantajlarından biridir.
- Rüzgâr hızının sabit olmamasından dolayı üretilen enerji değişkendir.
- Yüksek verimli rüzgâr santralleri enerji ihtiyacının yüksek olduğu şehir merkezlerinden uzaktadır.
- Gürültüldürler ve kuş ölümlerine neden olur, radyo ve TV alıcılarında parazite neden olurlar. Bu nedenle birçok Avrupa ülkesinde büyük rüzgâr türbinlerinin yarattığı çevre sorunları nedeniyle milli park alanlarının sınırları içine ve çok yakınlarına kurulması yasaklanmıştır. (Şekil 2.8)



Şekil 2.8: Göç Yollarına Kurulan Türbinler

3. TÜRKİYE’NİN RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİ

Türkiye coğrafi konumu nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları önemli bir potansiyele sahiptir. Rüzgâr enerjisi bu kaynaklar içinde önemli bir yer kaplamaktadır. Türkiye, orta kuşakta yer almasından dolayı, soğuk ve sıcak hava kütlelerinin karşılaştığı bir alandır.

Rüzgârın oluşabilmesi için gerekli olan basınç farkını bu iki farklı hava kütlesi sağlar. Türkiye batı rüzgârları kuşağında yer alır. Balkan yarımadası üzerinden gelen kuzey rüzgârlarının etkisiyle, kış boyunca Karadeniz’de güçlü rüzgârlar oluşur. Fakat Karadeniz kıyılarının, sarp kayalıklardan ve ani yükselen tepelerden meydana gelmesi yüzünden bu rüzgârların gücünden yararlanılamamaktadır.

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) istasyonlarının 1970-1980 dönemi rüzgâr verileri değerlendirilerek, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak, DMİ tarafından yapılan ölçümler meteorolojik amaçlıdır (limatolojik, sinoptik, hava kirliliği vb.) ve yerel rüzgârların ölçümleri Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) kurallarına göre 10 m’de yapılmaktadır. Enerji amaçlı rüzgâr ölçümlerinde ise rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve çevre sıcaklığı gibi parametreler 30 m ve mümkünse türbin hub (göbek) yüksekliğinde en az bir yıl boyunca periyodik olarak ölçülmeli ve bilgisayar ortamında değerlendirilebilecek şekilde veri paketi olarak tespit edilmelidir (DMİ 2009).

Bu nedenle, ülkemizin rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgâr enerjisinin yurdumuz ekonomisine katkısının hızlandırılması, yatırımcılara rüzgâr enerjisi potansiyeli yüksek olan yerlerin sunulması için 2002 yılında EİE ve DMİ iş birliği ile "Türkiye Rüzgâr Atlası" yapılmıştır. Türkiye Rüzgâr Atlası genel olarak bir fikir vermektedir. Hazırlanmış olan Türkiye rüzgâr atlasına göre yer seviyesinden 50m yükseklikteki rüzgâr potansiyelleri incelendiğinde Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz Bölgelerinin en yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

3.1 Rüzgâr Potansiyelinin Sınıflandırılması

Lokal, bölgesel veya küresel rüzgâr kaynak bilgileri kullanılarak rüzgâr enerjisinin elektriksel güç üretim potansiyeli tahmin edilebilir. Fakat tahmin edilen farklı rüzgâr enerjisi potansiyelleri arasındaki ayrımı iyi yapmak gerekir. Rüzgâr kaynak potansiyeli tahminleri aşağıda belirtildiği gibi beş kategoride değerlendirilmelidir.

Meteorolojik Potansiyel: Mümkün olan rüzgâr kaynağına eşdeğer bir potansiyeldir.

Saha Potansiyeli: Meteorolojik potansiyele dayanılarak ortaya konulan bir değerlendirmedir. Güç üretimi için coğrafik olarak mevcut olabilecek sahalarla sınırlandırılır.

Teknik Potansiyel: Mevcut teknolojiyi de dikkate alarak saha potansiyelinden hesaplanan değerlerdir.

Ekonomik Potansiyel: Ekonomik olarak gerçekleştirilebilecek teknik potansiyel olarak tanımlanır.

Uygulanabilir Potansiyel: Bu potansiyel, belirli bir zaman diliminde devreye alınabilecek olan rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için teşvik ve kısıtlamaları da hesaba katarak elde edilir.

Rüzgâr enerjisi konusunda herhangi bir yatırıma başlamadan önce yatırımın yapılacağı yerin rüzgâr kaynağı özelliklerini iyi anlamak gerekir. En iyi rüzgâr alan sahalar nerelerdir, ilgilenilen sahadan ne kadar enerji elde edilebilir, rüzgâr türbin performansı türbülans veya diğer rüzgâr kaynak karakteristikleri tarafından etkilenecek mi, bunlar ilk akla gelen birkaç sorudur ve cevaplandırılması gerekmektedir. Rüzgâr enerjisi potansiyel atlasları bu ve benzeri soruların cevaplandırılması için başvurulması gereken en önemli kaynaklardan biridir.

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Türkiye rüzgâr kaynaklarının karakteristiklerini ve dağılımını belirlemek amacıyla üretilmiştir. Bu atlasla verilen detaylı rüzgâr kaynağı haritaları ve diğer bilgiler rüzgâr enerjisinden

elektrik üretimine aday bölgelerin belirlenmesinde kullanılacak bir alt yapı sağlamaktadır.

REPA, orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak üretilen rüzgâr kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlasıdır. Bu atlas yardımıyla Türkiye genelinde 200m x 200m x 200m x 200 m çözünürlüğünde;

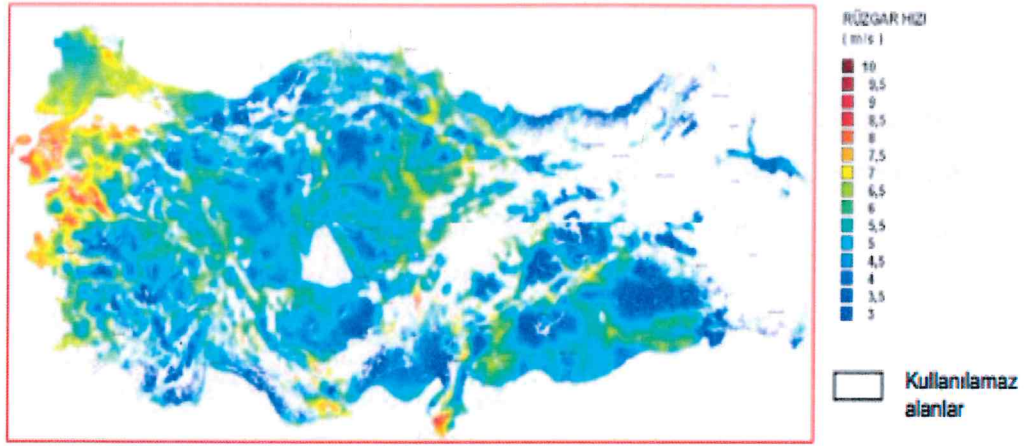
- 30, 50, 70 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik, aylık ve günlük rüzgâr hız ortalamaları,
- 50 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik ve aylık rüzgâr güç yoğunlukları,
- Referans bir rüzgâr türbini için 50 m yükseklikteki yıllık kapasite faktörü,
- 50 m yükseklikteki yıllık rüzgâr sınıfları,
- 2 ve 50 m yüksekliklerdeki aylık sıcaklık değerleri,
- Deniz seviyesinde ve 50 m yüksekliklerdeki aylık basınç değerleri öğrenilebilmektedir.

REPA ile denizlerimizde, kıyılarımızda ve yüksek rakımlı bölgelerimizde daha önce ölçemediğimiz yüksek yoğunluklu potansiyeller görünür hale gelmiştir (Malkoç 2007).

3.2 Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi

Rüzgâr enerjisi uygulamaları açısından uygun olmayan ve aşağıda belirtilen alanlar tespit edilmiştir.

- Rakımı 1500 metrenin üzerinde ve eğimi %20'den fazla olan bölgeler
- Yerleşim alanları
- Kara ve demir yolları ile hava alanları ve limanlar
- Sulak alanlar ve nitelikli orman alanları
- Koruma Alanları (milli parklar vb.)
- Enerji santralleri
- Emniyet bantları



Şekil 3.1: Türkiye Rüzgâr Hızı Potansiyelini Gösteren Harita

Çizelge 3.1: Yıllık Ortalama Rüzgâr hızı > 7,0 m/s - 50 m (Malkoç 2007)

YILLIK ORTALAMA RÜZGAR HIZI (m/s)	ORTALAMA RÜZGAR GÜÇ YOĞUNLUĞU (W/m ²)	TOPLAM KURULABİLECEK GÜÇ MİKTARI (MW)
7,0 – 7,5	400 – 500	29 259,36
7,5 – 8,0	500 – 600	12 994,32
8,0 – 9,0	600 – 800	5 399,92
> 9,0	> 800	195,84
	Total	47 849

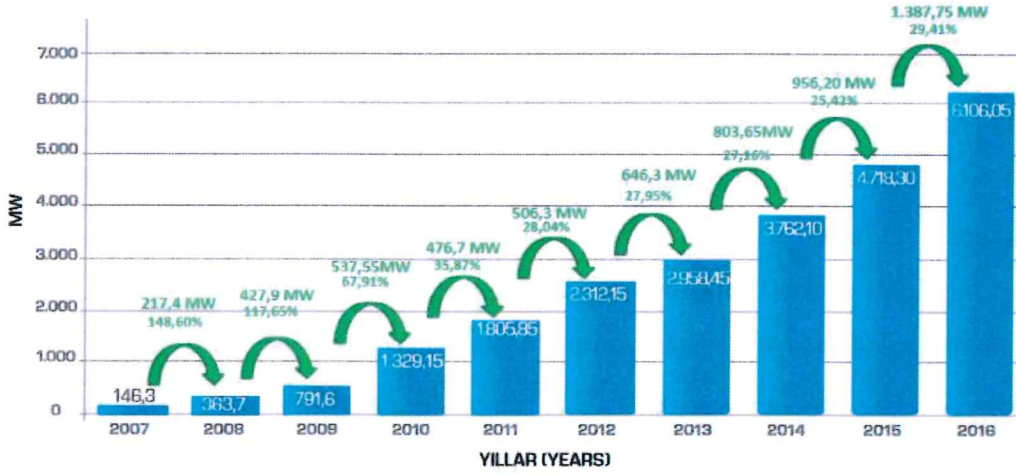
3.3 Türkiye'deki Rüzgâr Enerji Santralleri

Türkiye'de rüzgâr enerjisinden elektrik üretim amaçlı ilk modern rüzgâr türbini Çeşme Altın Yunus tesislerinde 1985'te kurulmuştur. Bu rüzgâr türbininin gücü 55 kW'tır. Bu gücüne 12 m/s'lik rüzgâr hızında erişen türbinde, Çeşme koşullarında yılda ortalama 100.000 kWh elektrik enerjisi üretilmektedir. İlk rüzgâr elektrik santrali yine aynı bölgede oto prodüktör statüsünde kurulmuştur. Bu rüzgâr çiftliğinde her biri 500 kW gücüne sahip 3 adet rüzgâr türbini bulunmaktadır. 21 Şubat 1998 tarihinde işletmeye alınmıştır ve kurulu gücü 1.5 MW'tır.

Türkiye'deki rüzgâr enerjisinden yararlanılarak yapılan ilk Yap-İşlet-Devret model elektrik santrali, 28 Kasım 1998 tarihinde işletmeye açılan Çeşme Alaçatı'daki rüzgâr santralidir.

Toplamda 7,2 MW kurulu güce sahip olup 600 kW gücünde 12 tane türbinden oluşmaktadır. Türkiye’de 3’üncü rüzgâr çiftliği toplam kurulu kapasitesi 10,2 MW olarak Haziran 2000’de Bozcaada’da işletmeye alınmıştır. Bu rüzgâr çiftliğinde 600 kW gücüne sahip 17 tane türbin bulunmaktadır. İstanbul’da 1,2 MW’lık rüzgâr elektrik santrali oto prodüktör statüsünde 2003 yılında İstanbul’da işletmeye alınmıştır. İstanbul Silivri’de 2006 yılında 850 kW’lık rüzgâr türbini devreye girmiştir. Bandırma’da 30 MW’lık rüzgâr santrali de 2006’da işletmeye alınmıştır. Toplam kurulu güç kapasitesi ise 2006 yılı itibari ile 101,25 MW’ tır (Deloitte 2011). 2016 yılı itibari ile de son durum Çizelge 3.2’de görülmektedir.

Çizelge 3.2: Türkiye’deki Rüzgâr Enerji Santralleri için Kümülatif Kurulum



Türkiye’de rüzgâr enerji sektörünün başlangıcı 5346 Sayılı “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına ilişkin Kanun” çerçevesinde YEK’lere dayalı üretim yapan tesislere ilişkin destek yöntemleri aşağıda anlatılmıştır:

- Kanun kapsamındaki YEK’lerden üretilen elektrik enerjisi, perakende satış lisansı sahibi tüzel kişiler tarafından aşağıda yazılı hükümlere göre tesis edilen ikili anlaşmalar çerçevesinde satın alınır.

a) Perakende satış lisansı sahibi tüzel kişilerin her biri, bir önceki takvim yılında satışa sundukları elektrik enerjisi miktarının, ülkede sattıkları toplam elektrik enerjisi miktarına oranı kadar, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından ilan edilen YEK Belgesi elektrik enerjisinden satın almakla yükümlü

olup ülkede arz edilen YEK Belgeli toplam elektrik enerjisi miktarının yeterli olması halinde, perakende satış lisansı sahibi tüzel kişilerin alım yükümlülüğü bir önceki takvim yılında sattıkları elektrik enerjisi miktarının yüzde sekizinden daha az olamayacaktır.

- b) 2011 yılı sonuna kadar bir takvim yılı içerisinde bu Kanun kapsamında satın alınacak elektrik enerjisi için uygulanacak fiyat; EPDK'nın belirlediği bir önceki yıla ait Türkiye ortalama elektrik toptan satış fiyatı olacaktır. Bu fiyatı her yılın başında en fazla %20 oranında artırmaya Bakanlar Kurulu yetkili bulunmaktadır.
- c) 2011 yılı sonundan itibaren bu fiyat uygulaması işletmede yedi yılını tamamlamış olan YEK Belgeli elektrik enerjisi üreten tesisler için sona ermektedir. Perakende satış şirketleri, bu Kanun kapsamında almakla yükümlü oldukları YEK Belgeli elektrik enerjisini, öncelikle işletmede yedi yılını doldurmamış olanlardan EPDK'nın belirlediği bir önceki yıla ait Türkiye ortalama elektrik toptan satış fiyatına göre satın almakla ve aldıkları elektrik enerjisi miktarı yüzde sekizin altında kaldığı takdirde bu orana ulaşmak için kalan gerekli miktarı, ikili anlaşmalar çerçevesinde Türkiye ortalama elektrik toptan satış fiyatından yüksek olmamak üzere piyasa koşullarında satın almakla yükümlüdürler.

• Yeterli jeotermal kaynakların bulunduğu bölgelerdeki valilik ve belediyelerin sınırları içinde kalan yerleşim birimlerinin ısı enerjisi ihtiyaçlarını öncelikle jeotermal ve güneş termal kaynaklarından karşılamaları esas alınmaktadır.

• Kanun kapsamındaki enerji üretim tesis yatırımları, kullanılacak elektromekanik sistemlerin yurt içinde imalat olarak temini, güneş pilleri ve odaklayıcı üniteler kullanan elektrik üretim sistemleri kapsamındaki yapılacak AR-GE ve imalat yatırımları, biyokütle kaynaklarını kullanarak elektrik enerjisi veya yakıt üretimine yönelik AR-GE tesis yatırımları Bakanlar Kurulu kararı ile teşviklerden yararlandırılmaktadır (Deloitte, 2011).

4. RÜZGÂR TÜRİNLERİ

4.1 Rüzgâr Enerjisi Türbinlerinin Tanımı

Tahrik edilen kısmı ile dönme hareketi yapan ve bir akışkanda bulunan enerjiyi milinde mekanik enerjiye dönüştüren makineler türbin olarak adlandırılmaktadırlar. Rüzgâr türbinleri ile ilgili tanımlar, değişik kaynaklarda birbirleriyle çelişmektedir.

Bu Konudaki En Genel Tanımlama; Pervane kanatları, pervane göbeği ve pervane miline rotor veya türbin denilir. Pervane mili dişli kutusuna bağlıdır. Dişli kutusunu jeneratöre bağlayan mile de jeneratör mili denir. Bunların tümü kule tarafından taşınır. Kule ile yer bağlantısı da temel aracılığıyla sağlanır. Tüm bu elemanlara, en genel halde rüzgâr enerjisi tesisi adı verilir. Bu gerçeğe rağmen, yerli ve yabancı literatürde, rüzgâr enerjisi tesisi yerine, rüzgâr türbini tabiri kullanılmaktadır.

4.1.1 Rüzgâr Türbinlerinin Özellikleri ve Yapısı

Rüzgâr enerjisi üretimi için kullanılan türbinler teknolojik gelişmeler sayesinde gün geçtikçe modernleşmektedir. Performansı arttırıcı sistemler ile rüzgâr dünden bugüne yel değirmenlerinden modern türbinlere kadar basamak basamak bir gelişim göstermiştir. Modern türbinlerin genel yapısı;

- Modern rüzgâr türbinleri 2-3 kanatlıdır.
- Kanat çapları yaklaşık olarak 30 m ile 70 m arasındadır.
- Rüzgâr hızı sürekli değişkendir. Ancak, şebekeye enerji, rüzgâr jeneratörü ve kanat özellikleri ile yaklaşık olarak değişmeden verilmektedir.
- İki rüzgâr türbini arasındaki uzaklık yaklaşık olarak 200 m ile 600 m arasında değişmektedir. Bu nedenle arazinin geri kalan büyük bir kısmı tarım, hayvancılık ve diğer amaçlar için kullanılabilir.
- Enerji üretimi rotor yüksekliğinde rüzgâr hızının küpüne ve kanatların süpürme alanına bağlıdır.
- Her türbin bilgisayar sistemi ile denetlenmektedir.

- Türbin güçleri birkaç kW'tan birkaç MW'a kadar değişebilmektedir.
- Rüzgâr türbinleri karaya kurulduğu gibi denizlerde de kurulabilmektedir.

Rüzgâr türbinindeki elektrik üretimini gerçekleştiren jeneratör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Rüzgâr enerjisi dönüştürme sistemleri 50W ile 2-3 MW arasında mekanik veya elektrik gücü sağlayabilmektedir. Rüzgâr hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artmaktadır.

Özgül rüzgâr gücü, hava debisine dik birim yüzeye düşen güçtür. Topoğrafik koşullara göre yerden 50 m yükseklikte özgül güç, hız 3,5 m/s den küçük iken $50W/m^2$ den az olabileceği gibi hız 11,5 m/s den büyük iken $1800W/m^2$ den çok olabilmektedir. Ortalama rüzgâr hızı yıldan yıla değişebilir. Rüzgâr hızının değişkenliğinden dolayı, rüzgâr enerjisi potansiyelinden elde edilecek enerji, yıllık ortalama hız değerinden hesaplanan enerjiden daha fazla olmaktadır. Bu yüzden belli bir bölgede rüzgâr türbinleri ile üretilebilecek elektrik enerjisi üretim miktarının hesabında, yıllık ortalama rüzgâr hızından çok gözlemlenen dağılım veya Weibull dağılımı ile hesap edilmiş rüzgâr hızı sıklık dağılımı kullanılmaktadır. Türbin tarafından üretilen enerjinin miktarı, rüzgâr hızı dağılımına bağlıdır. Rüzgâr hızları, frekans dağılımına bağlı olarak, aynı ortalama rüzgâr hızına sahip farklı yerlerde iki kata varabilecek güç yoğunluğu farklılıkları olabilir. Bu durum küp çarpanından kaynaklanmaktadır.

Elde edilen rüzgâr kayıtları, kalite kontrolü yapılarak istatistik çözümler de kullanılmak üzere değerlendirilir. Değerlendirmelerde, hem uzun dönemli rüzgâr kayıtlarını elde etmek, hem de farklı site ve farklı yüksekliklerde rüzgâr özelliklerini belirlemek için rüzgâr hızı dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu fonksiyonlar, Weibull dağılımı, Rayleigh dağılımı ve Rüzgâr gülüdür.

4.2 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri, direnç, kaldırma ve yükselen hava kuvvetinden yararlanmalarına göre, pervane ekseninin yatay ya da düşey olmasına göre sınıflandırılmaktadırlar.

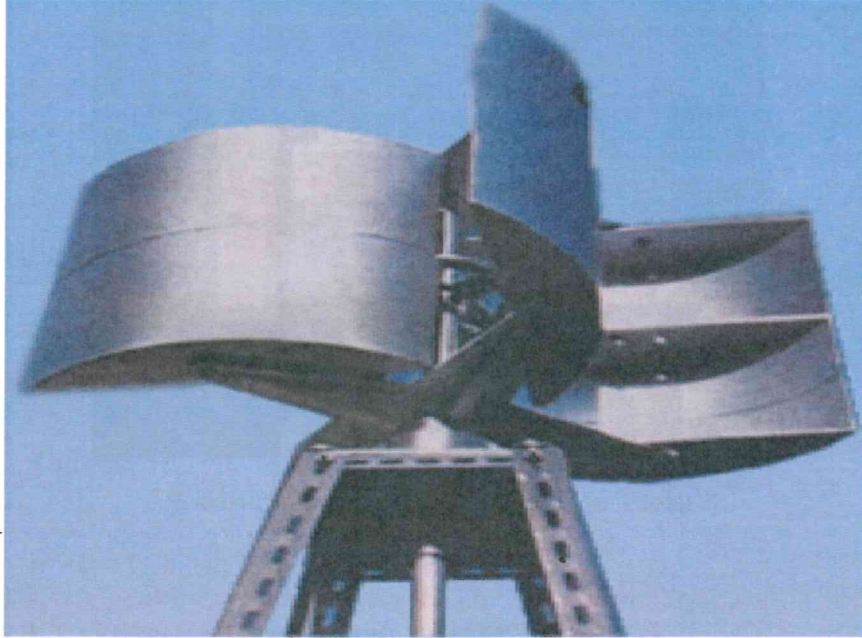
4.2.1 Rüzgâr Kuvvetinden Yararlanma Şekline Göre Sınıflandırma

Rüzgâr türbinleri rüzgâr kuvvetinden yararlanma şekillerine göre 3 kısımda incelenirler. Bunlar;

- Rüzgârın Direnç Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler
- Rüzgârın Kaldırma Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler
- Yükselen Hava Akımlı Rüzgâr Türbinleri

4.2.1.1 Rüzgârın Direnç Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler

Direnç kuvvetinden yararlanan türbinlerde, rüzgâr basıncından dönme hareketi oluşmaktadır. Örnek olarak; kepçe tipi anemometreler, Fars çarkı ve Savonius türbini gösterilebilir (Şekil 4.1). Direnç kuvvetinden yararlanan türbinler, pistonlu pompalar ile su pompalanması gibi yüksek moment gereken yerlerde kullanılmaktadırlar.

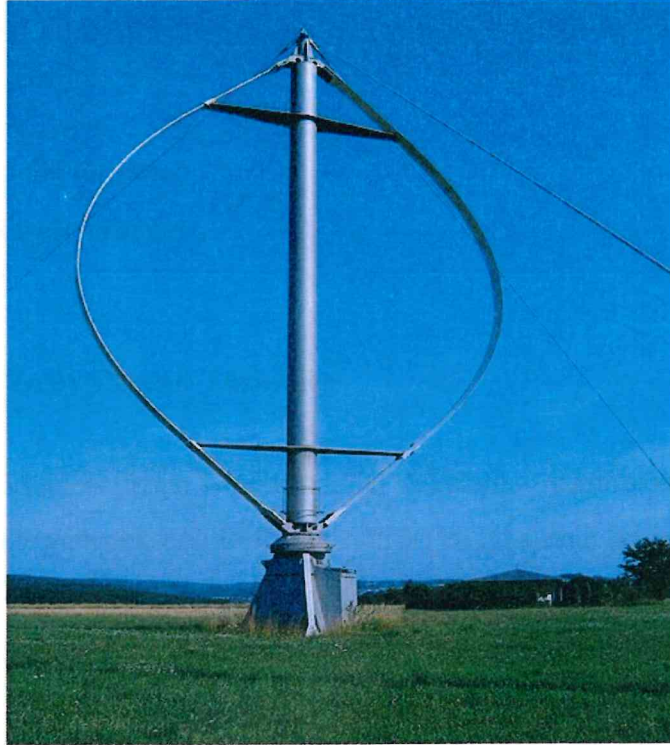


Şekil 4.1: Savonius Rüzgâr Türbini ve Yapısı

4.2.1.2 Rüzgârın Kaldırma Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler

Kaldırma kuvvetinden yararlanan türbinlerde rüzgâr; yüzeye belli bir açıyla gelir ve yüzeye etkileyen hava hızının doğrultusuna dik olarak oluşan kaldırma kuvveti, dönme hareketine dönüşür. Yüzey öncesinde yüksek basınç, yüzey arkasında ise alçak basınç oluşmaktadır.

Örnek olarak, düşey eksenli Darrieus türbini (Şekil 4.2) ve kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbinleri gösterilebilir. Rüzgâr türbinleri, nominal güçlerine göre de 5kW ile 100kW arasında olanlar küçük güçlü, 100kW'ın üstünde ise büyük güçlü rüzgâr türbinleri olarak sınıflandırılır.



Şekil 4.2: Darrieus Rüzgâr Türbini ve Yapısı

4.2.1.3 Yükselen Hava Akımlı Rüzgâr Türbinleri

Yükselen hava akımlı rüzgâr türbinleri, hava hareketindeki kinetik enerjiden yararlanan türbinlerdir. Enerji dönüştürücüsü yükselen hava akımlı rüzgâr türbinleri (güneş enerjisi konveksiyon bacası), güneş ışınları enerjisi tarafından ısıtılan havanın yükselmesi ve yükselen havadaki kinetik enerjinin de rüzgâr türbinini tahrik etmesi

prensibine göre çalışmaktadır. Isıtılarak yükselmesi istenen hava, üstten cam veya plastik malzemeden yapılmış geçirgen bir çatı ile örtülüdür ve bu çatının ortasında yer alan betonarme bacada yükselir.

Yükselen hava akımlı rüzgâr türbinlerinde elde edilen güç; kollektör verimi, kollektör enine kesit alanı, havanın sabit basınçta özgül ısı kapasitesi, dış ortam sıcaklığı, güneş sabiti ve bacanın yüksekliğine bağlıdır. Buradaki baca yüksekliği arttıkça, elde edilen güç de artmaktadır.

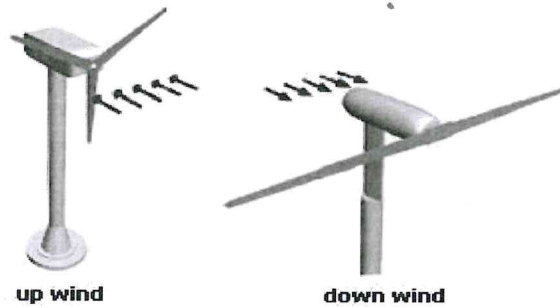
4.2.2 Pervane Ekseninin Konumuna Göre Sınıflandırması

Rüzgâr türbinleri pervane eksenlerinin konumlarına göre 2 ayrı kategoride sınıflandırılırlar. Bunlar;

- Yatay eksenli türbinler
- Düşey eksenli türbinler

4.2.2.1 Yatay Eksenli Türbinler

Dönme eksenleri rüzgâr yönüne paralel ve kanatlar rüzgâr yönüne diktir. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir Rotor, rüzgârı en iyi alacak şekilde döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Yatay eksenli türbinlerin çoğu rüzgârı önden alacak şekilde tasarlanır. Rüzgârı arkadan alan türbinlerin ise, yaygın bir kullanım alanları yoktur (Şekil 4.3). Yatay eksenli türbinlerde rotor, dişli çark, jeneratör ve fren bir kule üzerinde yatay şafta bağlanmışlardır.



Şekil 4.3: Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini

Rotor'a iki veya üç kanat bağlıdır. Üç kanatlı rotor sürekli üretim sağlayıp daha sessiz çalışmasına karşın, bu tip rotorların maliyetleri yüksektir. 500 kW ile 3 MW arasındaki türbinler için rotor çapı (D) genellikle 40-140 m arasında değişmektedir. Rotor genellikle kulenin önünde yer alır. Rotorun kulenin arkasında kalması halinde kulenin yarattığı türbülans türbin verimini düşürmektedir. Rotorun türbin önünde rüzgâr doğrultusuna göre ayarlanabilmesi için elektrikli yönlendiriciler bulunur. Kule genellikle çelikten imal edilir. Büyük türbin kuleleri betondan da olabilmektedir.

Jeneratörün sabit hızlı olması halinde rotor hızının kontrolü gerekmektedir. Aksi halde aşırı rüzgâr hızlarında rotor kontrolsüz hızlanır ve kazaya sebep olur. Rotor kontrolü iki şekilde yapılmaktadır;

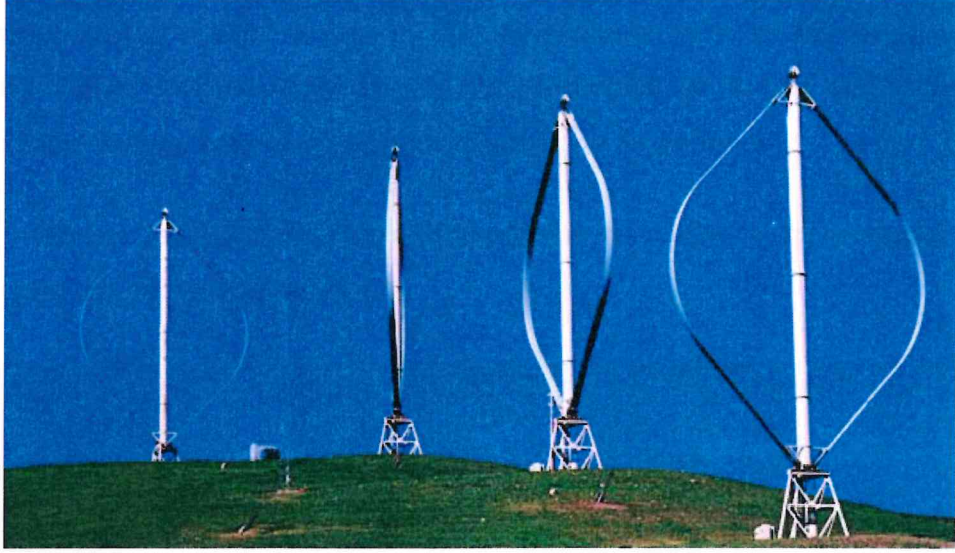
- a) Rotor kanatlarının uygun dizaynı ile rüzgâr hızı belirli bir değerin üstüne çıksa dahi (örneğin: 25 m/s) türbin hızı sabit kalmaktadır (stall control).
- b) Kanatların rüzgâr doğrultusu ile açısının bir hidrolik sistemle değiştirilmesi (pitch control) ile rotor kontrolü sağlanabilmektedir. Çok yüksek hızlarda kanatlar rüzgâra en az direnç gösterecek şekilde çevrilerek türbin hızı ayarlanabilmektedir. Bunun hidroelektrikteki benzeri Kaplan türbinleridir. Açısı değiştirilebilen rotor kanatlarının diğer faydası düşük rüzgâr hızlarında da yüksek verimin elde edilebilmesidir. Asenkron jeneratörlerin rüzgâr türbinlerinde kullanılmaya başlanmasıyla birlikte tüm rüzgâr hızlarında enerji dönüşümü mümkün kılınmıştır.

Senkron jeneratör kullanılan rüzgâr türbinlerinin hızını jeneratörün dizayn hızına çıkartmak için rotor ile jeneratör arasında dişli çark kullanılmaktadır. Ancak bu hem maliyeti hem de bakım masraflarını arttırmaktadır.

4.2.2.2 Düşey Eksenli Türbinler

Bu türbinlerin dönme eksenleri düşey ve rüzgâra diktir. Kanat kirişleri dönme eksenine dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Düşey eksenli türbinlerde, kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur.

Aynı ilke Savonius rotorlarda daha özel bir şekilde kullanılır. Bu rotorda güç katsayısı 0,15'den daha azdır. Bu nedenle güç üretiminde tercih edilmezler.



Şekil 4.4: Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini

Kanatlar bir düşey mile bağlanmıştır. Bu türbinler G.J.M. Darrieus isimli bir Fransız mühendis tarafından 1931'de icat edildiğinden Darrieus türbini olarak da isimlendirilir. Yatay eksenli türbinlere göre üstünlükleri şunlardır;

- Rüzgâr doğrultusundan etkilenmez. Dolayısıyla yönlendiriciye ihtiyaç yoktur.
- Bütün elektromekanik aksam yerde olduğu için yatırım ve bakım masrafları daha azdır.

Buna karşılık düşey eksenli türbinlerinin başlıca iki eksikliği vardır;

- Türbin kanatları dizaynı dolayısıyla verimleri düşüktür.
- Kanatların yere yakınlığı sonucu düşük rüzgâr hızına maruz kalırlar, bu ise enerji üretimini azaltır.

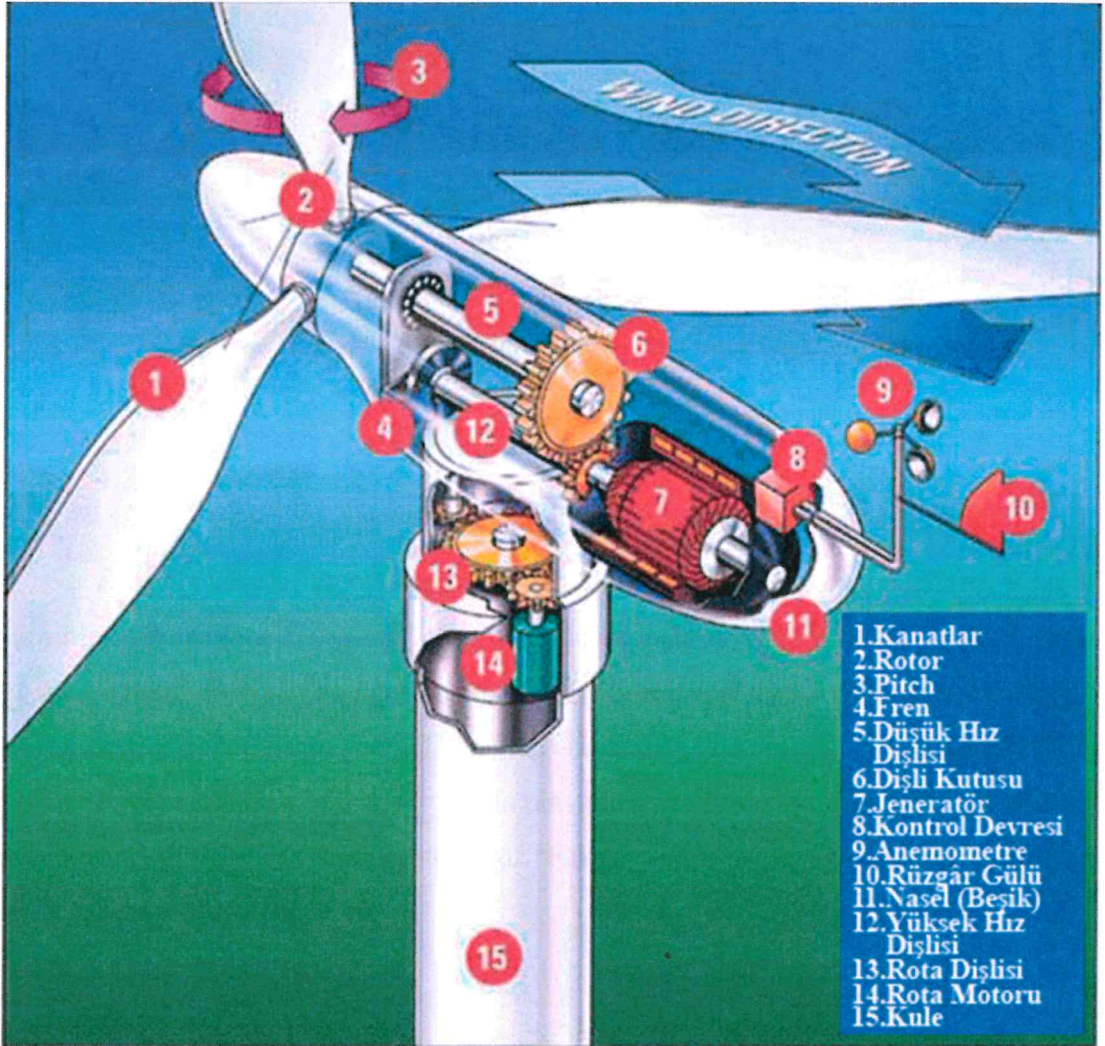
Verim düşüklüğü nedeniyle düşey eksenli rüzgâr türbinleri fazla uygulama alanı bulamamıştır.

Uygulama Kanada ve Kaliforniya'daki birkaç ünite ile sınırlı kalmıştır. "H" türbini denen ve bir kulenin tepesinde düşey mil (şaft) üzerine yerleştirilen türbin araştırma konusu oluyorsa da henüz ekonomik açıdan verimli olamamıştır.

4.3 Modern Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri Oluşturan Elemanlar

Yer konumuna göre, rotoru yatay eksenle çalışan yatay eksenli rüzgâr türbinleri, daha geleneksel ve daha modern bir kullanımı sunarlar. Bir rüzgâr türbinin elektrik sistemi mekanik enerjinin elektrikselle enerjiye dönüşümü sağlayacak tüm ekipmanın yanında, kontrol ve izleme ekipmanlarını da içermelidir.

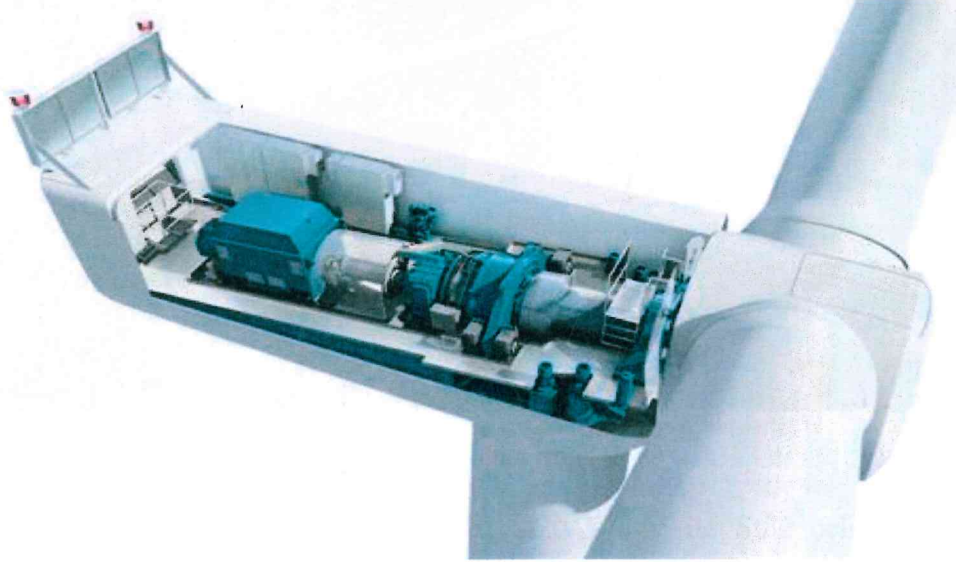
Modern yatay eksenli kanatlı rüzgâr türbinlerini oluşturan ana elemanlar (Şekil 4.5) aşağıdaki gibi sıralanabilirler;



Şekil 4.5: Rüzgâr Türbininin Temel Parçaları

4.3.1 Makina Dairesi (Nacelle)

Rüzgâr türbininin dişli kutusunu ve jeneratör dahil ana parçalarını içine alan kısımdır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6: Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Örnek Nacelle Yapısı

4.3.2 Kanatlar

Rüzgârı yakalar ve onun gücünü kanatların bağlantı noktasına aktarır. Rüzgâr türbinlerinin pervaneleri; çelik, elyaf ile güçlendirilmiş plastik (cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı) ve ağaçtan imal edilebilmektedir (Şekil 4.7). Modern rüzgâr türbinlerinin kanatlarının hemen hemen tamamı, cam elyafı ile güçlendirilmiş polyester veya epoksi gibi, cam elyafıyla plastikten üretilmektedirler. Çelikten üretilen kanatların eğilmeye dayanımı büyüktür. Fakat, yorulma dayanımları ve korozyon sorunu yaratmaktadırlar.



Şekil 4.7: Kanat İmalatı

Cam elyafının kopma mukavemeti, 420 N/nm^2 ile St52 çeliğinin kopma mukavemeti 520 N/nm^2 'ye yakındır. Karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin kopma mukavemeti ise, 550 N/nm^2 ile çelikten daha iyidir. (Arıcasoy 2006).

Cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin ana sorunu, elastisite modülünün çeliğe nazaran çok düşük olmasıdır. Bu nedenle, çok uzun kanatlarda cam elyaf yerine, elastisite modülü karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzeme kullanılır.

Ayrıca kanatlarda rüzgâr enerjisinden maksimum düzeyde yararlanmak için kendi eksenleri etrafında 90° hareket kabiliyetine sahiptirler.

4.3.3 Kanatların Bağlantı Noktası

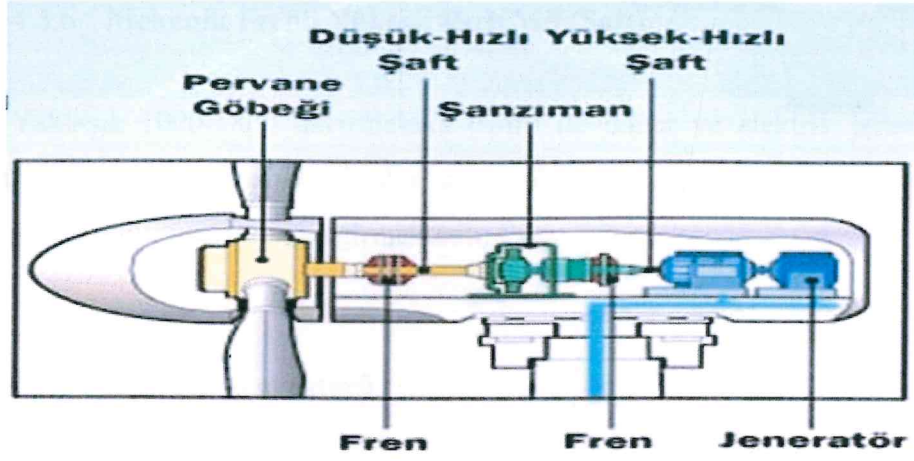
Kanatların gövde ile olan bağlantı noktalarını oluşturur. Bu noktalar, bazı türbinlerde verimliliği artırabilmek için servo kontrollü hareketli parçalardan oluşur. Bu sayede kanatlar açılabilir olarak kontrol edilir ve rüzgârın hızına göre optimum açıda kontrol sağlanır.



Şekil 4.8: Montaj Sırasında Kanatlar (Uşak RES)

4.3.4 Düşük Hız Mili (Şaftı)

Rüzgâr türbinini kanatların bağlantı noktası yüksekliğinden dişli kutusuna bağlar. Modern bir rüzgâr türbin rotoru 12-16 devir/dakika (rpm) kadar, nispeten yavaş dönmektedir. Alınan kinetik enerjiyi (dönme hareketi) dişli kutusuna ileterek, devirin artırılması sağlanır. Modern rüzgâr türbinlerinin örnek şaftı Şekil 4.9’da verilmiştir.

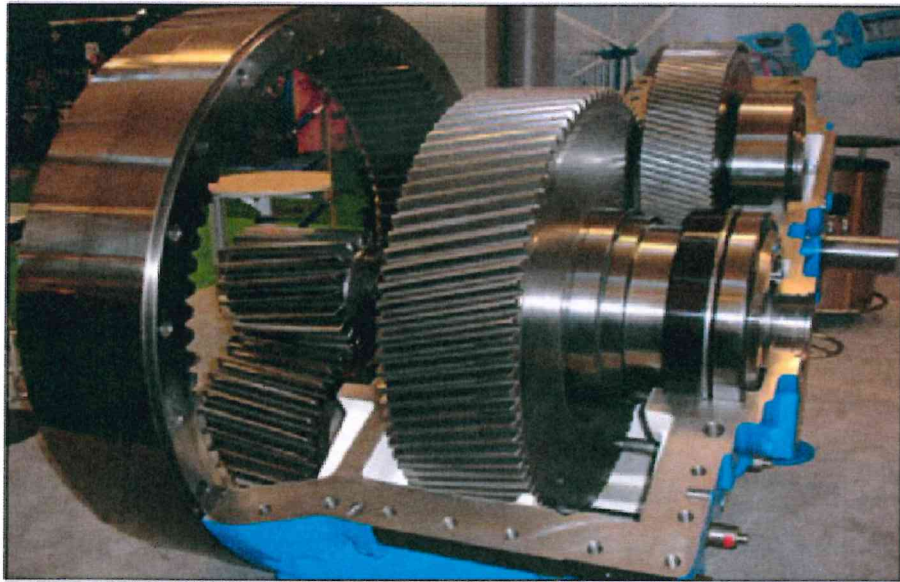


Şekil 4.9: Rüzgâr Türbini Şaftı

4.3.5 Dişli Kutusu

Pervane milindeki enerji, jeneratöre bir dişli sistemi ile aktarılır. Dişli sistemi, pervane milinin devir sayısını jeneratörün gerek duyduğu devir sayısına çıkarır. Dişli kutusu bir rüzgâr türbinin en ağır parçasıdır (Şekil 4.10).

Düşük hızlı milden (şafttan) yaklaşık olarak 50 kat daha hızlı dönen yüksek hızlı mil ise sağındadır. Düşük hızlı mil ile yüksek hızlı mili birbirine bağlayan bu parça, elektrik üretmek için birçok jeneratörün ihtiyaç duyduğu dönüş hızı olan dakikada 12-16 (rpm) devirden, dakikada 1000-1800 (rpm) devire kadar çıkarır.



Şekil 4.10: Dişli Kutusu

4.3.6 Mekanik Frenli Yüksek Hızlı Mil (Şaft)

Yaklaşık 1000-1800 devir/dakika (rpm) ile döner ve elektrik jeneratörünü çalıştırmaktadır. Aerodinamik frenler arıza olduğu zaman veya acil durdurma zamanları mekanik fren devreye girmektedir.

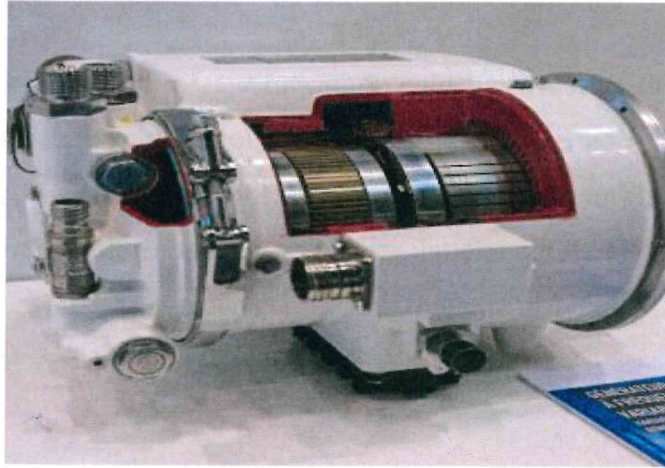
4.3.7 Elektrik Jeneratörü

Rüzgâr enerjisi tesislerinde kullanılan jeneratörler, alternatif akım veya doğru akım jeneratörleri olabilmektedir. Burada elde edilen elektrik akımı, yetersiz kalitede alternatif akım veya doğru akım bile olsa, çeşitli güç elektroniği düzenekleriyle şebekeye uygun hala getirilebilmektedir.

Doğru akım jeneratörleri, büyük güçlü rüzgâr enerjisi tesislerinde tercih edilmemektedir. Bunun nedeni, sık bakım gereksinimi sahip olmaları ve alternatif akım jeneratörlerine göre daha yüksek maliyetli olmalarıdır.

Doğru akım jeneratörleri, günümüzde sadece küçük güçlü rüzgâr enerji tesislerinde akülere enerji depolamak için kullanılmaktadır.

Direkt şebekeye bağlantı sistemlerinde; alternatif akım jeneratörlerini oluşturan asenkron veya senkron jeneratörlerin millerinin devir sayısı $n_{senkron}=60f/p$ (d/d) bağlantısı ile verilir. Burada “f” Hertz biriminde elektrik şebekesi frekansı, “p” çift kutup sayısı ve “n” dakikada devir sayısıdır.



Şekil 4.11: AC Jeneratör

Dişlideki kayıplar ve gürültünün önlenmesi amacıyla, çok kutuplu jeneratörü olan dişli kutusuz türbinler de kullanılmaktadır. Bu bağıntıdan da anlaşılacağı gibi, jeneratörün kutup sayısı arttıkça, 50 Hz'lik elektrik şebekesi frekansına uygun akım için gereken jeneratör mili devir sayısı da azalmaktadır. Bu nedenle, yüksek kutup sayılı jeneratörler de dişli kutusuna gerek kalmamaktadır.

Asenkron jeneratör kullanılan rüzgâr türbinlerinin bağlandıkları şebekeye olan etkileri ikiye ayrılabilir;

- Kararlı hal güvenliği
- Güç kalitesi

Kararlı hal güvenliğindeki amaç rüzgâr gücü enjekte edildiğinde, şebeke güç kararlılığı koşullarını kontrol etmektir. Güç kalitesi analizi ise rüzgâr hızındaki değişmelere karşı üretilen gerilim dalgasındaki bozulmaları izler (Ramos 2002).

4.3.8 Rota (Yaw) Mekanizması

Yaw mekanizması, rüzgâr gülünü kullanarak rüzgâr yönünü belirleyen elektronik kontrol sistemi tarafından yönetilmektedir. Rüzgâr yönü değiştiği zaman yaw mekanizması devreye girer, elektrik motorları ile nacelle gereken yöne doğru döndürülmektedir.

4.3.9 Elektronik Kontrolör

Elektronik kontrolcü, rüzgâr türbininin çalışma şartlarını sürekli olarak takip eden ve yaw mekanizmasını kontrol eden bir bilgisayar sistemidir. Herhangi bir arıza (dişli kutusu aşırı ısınması, aşırı vibrasyon gibi) durumunda türbini otomatik olarak durdurur ve türbin operatörü bilgisayarına fiber iletişim ağı ile bilgi gönderir. Ayrıca türbinin devreye girme ve devreden çıkma hızlarında da türbinin durdurulması işlemi elektronik kontrolcü vasıtasıyla yapılmaktadır.

4.3.10 Hidrolik Sistem

Türbinin aerodinamik frenlerini ayarlamak için kullanılır. Türbinin aşırı hızlanması durumunda kanat kontrolü ve gövde kontrolü ile yavaşlama sağlanamıyorsa veya bu tür kontrol sistemlerinin bulunmadığı eski tip türbinlerde hidrolik fren sistemi kullanılmaktadır.

4.3.11 Soğutma Birimi Fanı

Elektrik jeneratörünü soğutan kısımdır. Ayrıca dişli kutusunun yağını soğutan bir yağ soğutma birimini de bulundurur. Bazı türbinler su-soğutmalı jeneratörlere sahiptir.

4.3.12 Kule

Rüzgâr türbininin kulesi, nacelle ve rotoru üzerinde taşır. Genellikle kulenin yüksek olması bir avantajdır çünkü, rüzgâr hızları yerden yükseldikçe artar. Tipik olarak 3 MW'lık modern bir rüzgâr türbininin kulesi 80-100 m yüksekliktedir. Kuleler tüp ya da kafes biçimindedir.

Tüp biçimli kuleler çalışanlar için daha avantajlıdır, çünkü gerektiğinde bir merdivenle içerden türbinin tepesine çıkmak daha kolaydır. Kafes kulelerin avantajı esas olarak ucuz oluşlarıdır.

Kule malzemesi, genelde çelik veya betondur. Modern rüzgâr türbinleri, halka enine kesitli kulelere sahiptir Kule yüksekliği, yüksekteki daha rüzgâr hızlarından yararlanmanın getirisi ile yüksekliğe bağlı artış gösteren kule maliyeti arasındaki optimum çözümle belirlenir.

Kule boyutlandırılmasındaki bir diğer parametrede, eğilme doğal frekansı, kule malzemesi ve dolayısıyla maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Rüzgâr türbinlerinin tüm imalat giderlerinin %11-20' si kule imalatına aittir.



Şekil 4.12: Rüzgâr Türbini Kulesi (Yalova RES Şantiyesi)

4.3.13 Anemometre ve Rüzgâr Gülü

Rüzgârın hızını ve yönünü ölçmek için kullanılmaktadır. Rüzgâr hızı 3 m/s'ye eriştiğinde türbini harekete geçirmek için rüzgâr türbininin elektronik kontrolcüsü tarafından anemometrenin gönderdiği elektronik sinyaller kullanılmaktadır. Eğer rüzgâr hızı 25 m/s'yi aşarsa bilgisayar, türbini ve çevresindekileri korumak için rüzgâr türbinini otomatik olarak durdurur. Rüzgâr gülünden gelen sinyaller, rüzgâr türbini elektronik kontrolcüsü tarafından alınarak, yaw mekanizması yardımıyla rüzgâra karşı türbini döndürmek için de kullanılmaktadır.

4.3.14 Yatak

Yatak, kulenin en üstünde bulunan ve içerisinde dişli kutusunu, düşük ve yüksek hız milini, jeneratörü, kontrolörü ve fren sistemini taşıyan kısımdır. Türbinden oluşan vibrasyonları sönmölemek ana görevidir.

4.3.15 Hız Kontrolörü

Rüzgâr türbinin çalışma aralığını belirleyen kısım hız kontrolörüdür. Rüzgâr türbinlerinin enerji üretimine başlayacağı rüzgâr hızı (cut-in speed) ve türbinin devre

dışı kalacağı rüzgâr hızı (cut-out speed) değerlerinin uygulanması hız kontrolörü tarafından yapılmaktadır.

5. RÜZGÂR ENERJİSİ MATEMATİK DENKLEMLERİ

5.1 Enerji Dönüşümü

Türbin rotoru aerodinamik olarak dizayn edilmiş kanatları vasıtasıyla rüzgâr dalga enerjisinin bir kısmının yakalayarak mekanik enerjiye çevirir. Düşük hızlı bu mekanik enerji, sistemde kullanılan jeneratörün tipine göre dişli kutusu kullanılarak veya kullanılmayarak, jeneratörün aracılığı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Jeneratörün çıkışından alınan elektrik enerjisi tasarlanan sistemin mimarisine (topoloji) göre transformatör kullanılarak veya direk güç elektroniği devreleri ile şebekeye aktarılmaktadır.

5.1.1 Rüzgâr Enerjisinin Gücü

Rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için en temel veriler rüzgârın hızı ve esme saat sayıdır. Bu veriler kullanılarak bir yöreye ait rüzgâr potansiyelini ortaya koymak mümkündür. Bunun için, rüzgâr potansiyelini tanımlayan kinetik enerjinin hesaplanması gerekmektedir. Havanın bir ağırlığı ve hızı olması nedeniyle bir kinetik enerjisi vardır. Rüzgâr hareket halindeki hava olup sahip olduğu kinetik enerji şu şekilde verilir.

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5.1)$$

Burada;

- K: Rüzgârdaki kinetik enerji (Joule)
- v: Ölçüm yüksekliğindeki rüzgâr hızı (m/s)
- m: Havanın kütlesi (kg)

Havanın kütlesi m(kg) olmak üzere;

$$m = \rho \times V \quad (5.2)$$

Burada;

- ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
- V : Hava hacmi (m^3)

Havanın hacmi ise;

$$V = v \times A \times \Delta t \quad (5.3)$$

Formülü ile hesaplanır. Burada;

- v : Ölçüm yapılan yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s)
- A : Rotor süpürme alanı (m^2)
- Δt : Ölçüm zamanı (s)

Böylece, (5.2) bağıntısı (5.1) bağıntısında yerine konularak, kinetik enerji eşitliğinde gerekli düzenlemeler yapılacak olursa, rüzgâr enerjisi (K) Joule cinsinden aşağıdaki bağıntı ile tanımlanmış olur;

$$K = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times \Delta t \times v^3 \quad (5.4)$$

Bu eşitlik birim zaman Δt 'ye bölünürse, birim zamandaki enerji, yani rüzgârın anlık gücü (P);

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

Değişik rüzgâr hızlarına sahip yörelerin rüzgâr güç ve enerjilerini karşılaştırmak amacıyla, rüzgâr güç ve enerji yoğunluğu teriminden yararlanılmaktadır.

Buna göre (5.5) eşitliği düzenlenecek olursa; P, ölçüm yüksekliğinde birim alana düşen güç yoğunluğu (W/m^2) şu şekilde olur;

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \times \rho \times v^3 \quad (5.6)$$

Güç yoğunluğunu, yıllık esme sayısı “f” ile çarparsak enerji yoğunluğu E_y elde edilir. Bu sonuca göre enerji yoğunluğunu bulacak olursak;

$$E_y = \frac{P}{A} \times f = \frac{1}{2} \times \rho \times v^3 \times f \quad (5.7)$$

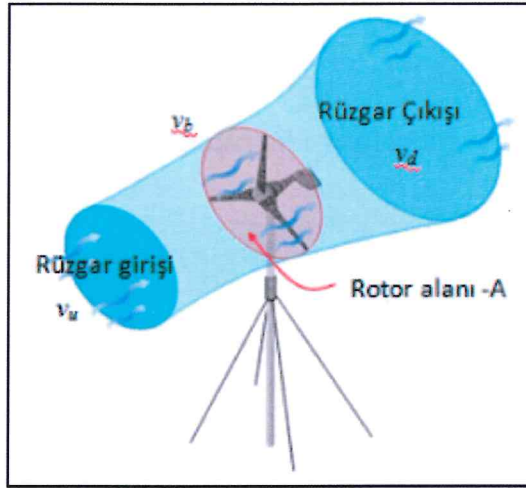
Burada;

- E_y : Enerji yoğunluğu (W/m^2 yıl)
- A: Rotor süpürme alanını (m^2)
- f: Yıllık esme saat sayısını (saat/yıl)

Rüzgâr, kinetik enerjisi nedeniyle doğal bir potansiyel enerjiye sahiptir. Bunun bilinen fiziksel konular ve teknolojik imkânlar sayesinde yararlı enerjiye çevrilen miktarına “Rüzgâr enerjisi teknik potansiyeli” denir. Teorik olarak bulunan enerji yoğunluğu pratik olarak elde edilen uygulamalarla enerji kayıplarından dolayı örtüşmemektedir.

5.1.2 İdeal Risk Teorisi ve Betz Limiti

Rüzgârdan enerji elde etmek için kurulacak türbinin boyutları aerodinamik yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Sistem ne kadar ideal olursa olsun rüzgârdan elde edilecek enerjinin bir üst limiti vardır. Betz tarafından 1926 yılında belirlenen bu limite Betz limiti denir. Betz, söz konusu teoriyi hesaplarken hareketli diskin önünde, üzerinde ve gerisindeki hava akımları için enerjinin korunumu yasalarını kullanılmıştır. Betz'in ideal disk teorisine göre; diskten geçen havanın akış hızı, disk alanının her noktasında eşit olmasına rağmen basınç ani olarak düşer. Bu basınç farkından dolayı diskin hareket enerjisi artmış olur. Betz teoremine (Şekil 5.1) göre hesaplama yapılırken, akışın sürekli, homojen ve sıkıştırılmaz olduğu, disk üzerindeki basınç değişiminin disk üzerindeki her noktada aynı olduğu, sonsuz sayıda kanat olduğu ve diskin önünde ve arkasında türbülans olmadığı kabul edilecektir (Avcı ve Yılmaz 2012).



Şekil 5.1: Betz Modeli

Betz teorisine göre türbinin toplam gücü;

$$P_T = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v_b (v_u^2 - v_d^2) \quad (5.8)$$

- v_u : Rotora gelen havanın hızı

- v_b : Kanatlara çarpan havanın hızı
- v_d : Rotordan çıkan havanın hızı

Türbin içindeki rüzgârın ortalama hızı;

$$v_b = \left(\frac{v_u + v_d}{2}\right) \quad (5.9)$$

Türbinin toplam gücü;

$$P_T = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times (v_u + v_d)(v_u^2 - v_d^2) \quad (5.10)$$

Bu eşitlik düzenlenirse aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$P_T = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v_u^3 \left(1 + \frac{v_d}{v_u}\right) \left(1 - \frac{v_d^2}{v_u^2}\right) \quad (5.11)$$

Bu ifade, ilk bulunan (5.5) eşitliğindeki P gücüne bölünürse;

$$\frac{P_T}{P} = \frac{1}{2} \times \left(1 + \frac{v_d}{v_u}\right) \left(1 - \frac{v_d^2}{v_u^2}\right) \quad (5.12)$$

Burada güç faktörü (C_p) ve yavaşlatma faktörü (n);

$$C_P = \frac{P_T}{P} \quad n = \frac{v_d}{v_u} \quad (5.13)$$

$$C_P = \frac{1}{2} \times (1 + n)(1 - n^2) \quad (5.14)$$

Olarak tanımlanır.

Bu denklemde maksimum güç faktörünü (C_P) bulmak için yavaşlatma faktörüne (n) göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{d}{dn} C_P = \frac{1}{2} \frac{d}{dn} \times (1 - n^2 + n - n^3) \quad (5.15)$$

Türev alma işlemi yapıldıktan sonra elde edilen denklem;

$$\frac{d}{dn} C_P = \frac{1}{2} \frac{d}{dn} [(1 - n)^2 \times (1 + n) \times (1 - 2n)] = 0 \quad (5.16)$$

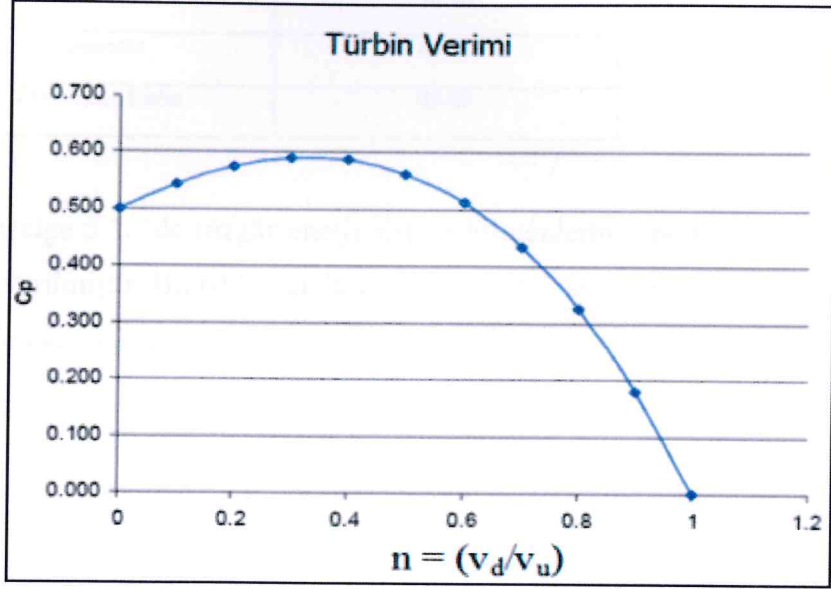
$$\frac{1}{2} [(1 - n) \times (1 - 3n)] = 0 \quad (5.17)$$

$n_1 = 1/3$ $n_2 = -1$ bulunur. Yavaşlatma faktörü (n) hiçbir zaman negatif değer olamayacağından $1/3$ alınır ve denklemde yerine konulursa;

$$C_{Pmax} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{9}\right) = 0,5926 \quad (5.18)$$

Elde edilir. Şekil 5.2’de C_p -n grafiği görülmektedir.

Serbest rüzgâr türbininden alınacak maksimum verim %59,26 olarak bulunur. Bir rüzgâr türbiniyle, rüzgârın tüm enerjisinden faydalanmak en azından böyle bir sistem için mümkün değildir. Belki gelecekte daha değişik bir sistem tasarlanarak verim artışı sağlanabilir.



Şekil 5.2: Betz Güç Faktörü Grafiği

Rüzgâr; türbininden, rüzgârdan aldığımız enerji ölçüsünde yavaşlamış olarak çıkmaktadır. Eğer rüzgârdaki tüm enerjiyi alabilseydik, rüzgârın türbinden durgun halde çıkması veya geri dönmesi gerekirdi. Fakat bu durumda da türbine rüzgârın diğer taraftan girmesi engellenir ve hiç enerji elde edilemezdi.

Günümüzdeki rüzgâr türbinleri için “ C_p ” değeri yaklaşık olarak 0,35–0,40’tır. Bunun nedeni: hava direnci, rotorun oluşturduğu türbülans ve aktarma organları ile elektrik sistemi gibi noktalardaki kayıplardır. Bulduğumuz “ C_p ” maksimum güç faktörü teorik bir değerdir. Uygulamada bu değer çok daha düşüktür. Ayrıca devreye mekanik-elektrik kayıplar da girmektedir. Ancak mekanik-elektrik verimlilik (η) değeri 1’e yakın bir değer olduğundan hesaplamalarda ihmal edilebilir. Bu bilgiler dikkate alınarak güç eşitliğimiz;

$$P = \frac{\rho}{2} \times A \times v^3 \times C_p \times \eta \quad (5.19)$$

Çizelge 5.1: Rüzgâr Türbinindeki Bazı Bileşenlerin Verimleri

RES	VERİM	VERİM
BİLEŞENLERİ	Küçük Güçlü Sistem (%)	Büyük Güçlü Sistem(%)
Kanat, Türbin	20-40	40-50
Dişli Ünitesi	70-80	80-95
Jeneratör	65-85	85-95
Elektriksel İletim	95-98	95-98

Çizelge 5.1. 'de rüzgâr enerji sistem bileşenlerinin pratikteki yaklaşık verim değerleri verilmiştir. Bu tablodan da görüleceği gibi, asıl verim kaybı kanat ve türbin sisteminden kaynaklanmaktadır (Boztepe 2009).

6. RÜZGÂR TÜRİNLERİNİN ETKİLENDİĞİ VE ETKİLEDİĞİ ETMENLER

6.1 Basınç, Sıcaklık, Nem ve Çevre

Rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü ile birlikte diğer bazı meteorolojik parametrelerin de ölçülmesi son derece faydalı olacaktır. Özellikle rüzgâr enerjisi hesaplamalarında kullanılan bir değer olan hava yoğunluğunu hesaplayabilmek için basınç, çevre sıcaklığı ve nemlilik değerleri ölçülmesi gerekmektedir.

Topografya rüzgârın yönü, hızı ve dağılımında önemli bir rol oynar. Dağ silsileleri, tepe ve kayalıklar, rüzgâr profillerini büyük ölçüde etkiler. Dağ silsileleri eğer denize paralel, hâkim rüzgâr yönüne dik, orta eğimli (10-22°) ve özellikle ağaçsız ise enerji üretimine uygun yerlerdir. Zirvede rüzgâr hızı, eğim ve dağ grubunun büyüklüğüne bağlı olarak artar. Bu nedenle, tepenin üst ön kısmı tesis için uygundur. Fakat tepenin üst arka kısmı türbülans nedeniyle göz önüne alınmaz.

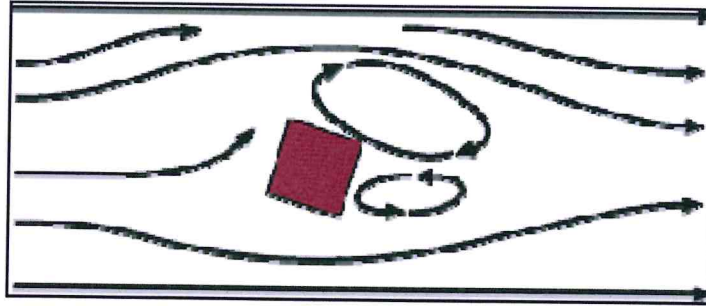
Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi, seçilecek bölgenin meteorolojik özelliklerine ve en önemlisi de kullanılacak türbinin tasarımına bağlıdır. Seçilen bölgeden ekonomik olarak enerji üretebilmek için rüzgâr hızı ve yön ölçümleri, topoğrafik yapı ve arazi pürüzlülüğü çok iyi belirlenmelidir. Rüzgâr türbinlerinin kurulması tasarlanan bölgede türbin tarafından üretilebilecek elektrik enerjisinin hesaplanabilmesi için, meteorolojik ve bölge verilerinin çok iyi analiz edilmesi gerekir. En yaygın olarak kullanılan hesaplama yöntemi Danimarka'da RISO Laboratuvarlarında geliştirilmiş bulunan "Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Programı (WASP)"dir.

Arazi seçiminden sonra kapasiteyi belirleyen en önemli unsur üretilen elektriğin nereye verileceğidir. Ulusal dağıtım sistemine verilecekse araziye en yakın iletim hattı belirlenerek gerekli düzenlemeler yapılmalıdır. Bölge seçimini kısıtlayan bir faktör de rüzgâr çiftliği için (birçok rüzgâr türbininin bir arada bulunduğu yerler) geniş arazi gerektirmesidir. Bu santral alanlarında türbinlerin birbirlerine çok yakın yerleştirilmesi birbirlerinin rüzgârlarını keseceği için uygun değildir. Santral alanının

en çok kullanıldığı alan %1'i geçmez ve geri kalan arazi tarım ve hayvancılık amacıyla kullanılabilir (Sülün 2007).

6.2 Rüzgâr Engelleri

Rüzgâr engelleri (binalar, ağaçlar vb.) rüzgâr hızını önemli ölçüde düşürebilir ve sıklıkla türbülansa sebep olurlar. Şekil 6.1.'de görüldüğü gibi engel etrafında rüzgâr akışı oluşur. Bu engel yüksekliğinde, üç tane türbülans bölgesi verilebilir. Türbülans engelin arkasında, engelin önüne göre daha belirgindir. Bundan dolayı, rüzgâr türbinini engellere uzak noktalarda tasarlamalıyız. Engeller rüzgâr hızını, engele akış yönünde azaltır. Rüzgâr hızındaki bu azalma engelin gözenekli olmasına da bağlıdır. Bundan dolayı rüzgâr santrali tasarımında engeller de hesaba katılmalıdır. Eğer türbinler birbirine yakın (1km'den daha yakın) ve temel rüzgâr yönünde tasarlanırsa bunu da bir engel olarak görmek ve hesaplamaları buna göre yapmak gerekir (Ağçay 2007).



Şekil 6.1: Engel Etrafında Rüzgâr Akışı

6.2.1 Çalkantı Etkisi (Wake Effect)

Bir rüzgâr türbini enerji ürettiğinden, türbine gelen rüzgârın türbinden çıkan rüzgârdan daha düşük bir enerjiye sahip olması gerekir. Bir rüzgâr türbini daima aşağıya doğru esen bir rüzgâr gölgesi oluşturur. Gerçekte Şekil 6.2.'da görüldüğü gibi türbin arkasında bir wake (uyanma, çalkantı) meydana gelecektir.

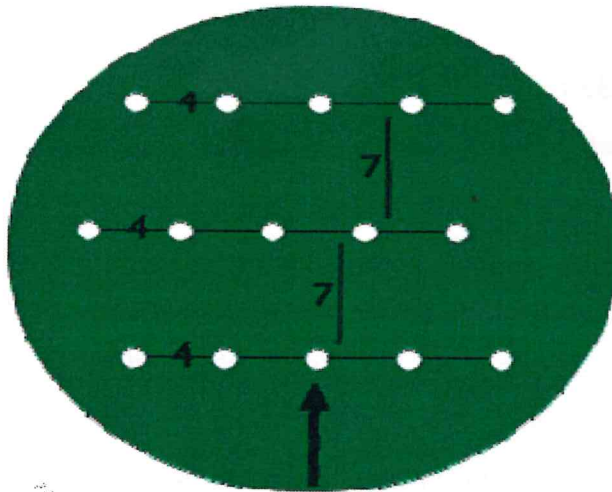
Türbin uçlarına duman eklenirse, bir türbinin arkasındaki wake izini görmek mümkündür (Ağçay 2007).



Şekil 6.2: Wake Etkisi

6.2.2 Türbinlerin Yerleşim Etkisi (Park Effect)

Her rüzgâr türbini rüzgârdaki enerjiyi alıp elektrik enerjisine çevirdikten sonra rüzgârı yavaşlatır. Bundan dolayı türbin yerleşim planında, türbinler arasında, hâkim rüzgâr yönünde yeterli mesafe bırakılmalıdır. Diğer taraftan, türbinlerin elektrik bağlantıları için türbinleri mümkün olduğunca yakın planlamalıyız. Türbin yerleşim planında, türbinler arasında hâkim rüzgâr yönünde rotor çapının 7 katı, düşey yönde 4 katı mesafe bırakılmalıdır. Şekil 6.3.'de görüldüğü gibi 3 sıradan oluşan ve her sırada 5 türbin olan bir örnek vardır (beyaz noktalar türbini temsil etmektedir). Hâkim rüzgâr yönünde (ok ile gösterilmiş) türbin sıraları arasında rotor çapının 7 katı ve aynı sıradaki türbinler arasında rotor çapının 4 katı mesafe bırakılmıştır (Ağçay 2007).

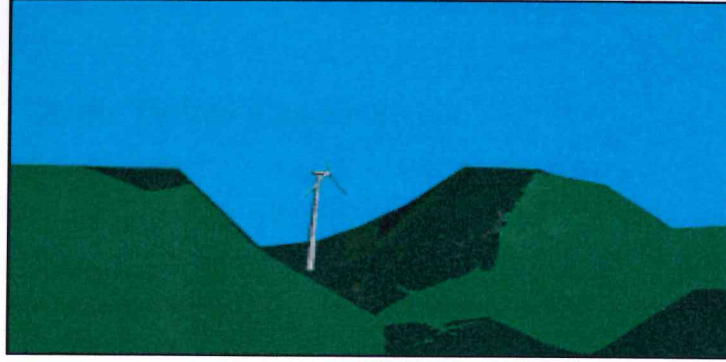


Şekil 6.3: Türbin Yerleşim Planı

6.2.3 Tünel Etkisi (Tunnel Effect)

Yüksek binaların arasında veya dar dağ geçitlerinde yürüdükümüzde bu etkiyi hissederiz. Hava, binalar veya dağlar arasında rüzgârlı taraftan sıkıştırılır ve rüzgârın hızı engeller arasında hissedilir derecede artar. Rüzgâr açık alanda 6m/s hızla esiyorsa doğal tünelde (dağlar aralarında) 9m/s hızla esebilir. Şekil. 6.4.'de görüldüğü gibi, rüzgâr türbinini bu şekilde bir tünele yerleştirerek çevre arazide esen rüzgârdan daha yüksek bir rüzgâr hızı elde edilir.

İyi bir tünel etkisi elde etmek için türbini yumuşak engellerin arasına yerleştirmek gerekir. Eğer tepeler çok pürüzlü ve engebeli olursa alanda türbülanslar oluşmaktadır (Ağçay 2007).

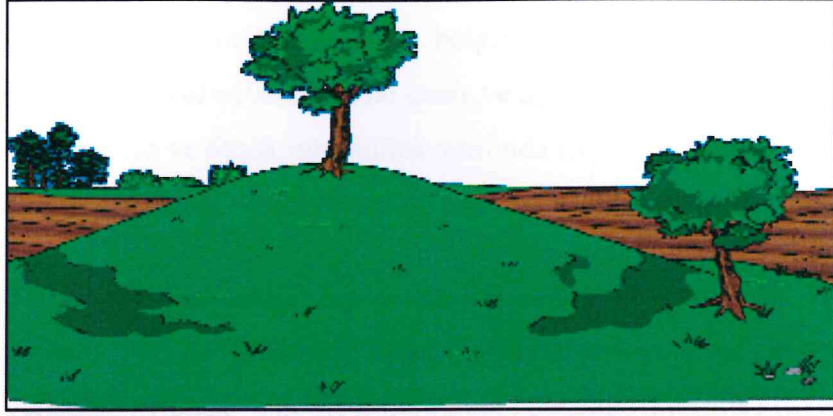


Şekil 6.4: Tünel Etkisi

6.2.4 Tepe Etkisi (Hill Effect)

Türbin yerleşiminde uygulanan yaygın bir yolda, türbini tepenin üstüne yerleştirmektir. Şekil 6.5'de görüldüğü gibi özellikle rüzgârın hâkim yönünde geniş alanlar varsa bu yerleşim daha avantajlıdır. Tepelerde rüzgâr hızı yere göre daha yüksektir. Rüzgâr, rüzgâr türbini rotorundan geçerken çok düzensizdir. Eğer tepe sarp (dik) ise veya engebeli ise türbülansı da göz önünde bulundurulmalıdır. Topografya, rüzgârın yönü, hızı ve dağılımında önemli bir rol oynar. Dağ silsilesi, tepe ve kayalıklar rüzgâr kalitesini büyük ölçüde etkiler. Dağ silsileleri, eğer denize paralel, hâkim rüzgâr yönüne dik, orta eğimli ve özellikle çıplak ise, enerji üretimine en uygun yerlerdir. Zirvede rüzgâr hızı, eğim ve dağ grubunun büyüklüğüne bağlı olarak artar.

Bu nedenle, tepenin üst ve ön kısmı tesis için uygundur. Fakat, tepenin üst ve arka kısmı türbülans nedeniyle uygun değildir (Ağçay 2007).



Şekil 6.5: Tepe Etkisi

6.3 Rüzgâr Türbini Alanının Seçimi

Rüzgâr çiftliği kurarken (rüzgâr tarlası) göz önünde bulundurulması gereken faktörler; Arazinin engebeli olmaması, rüzgâr engelleri, park etkisi, tünel etkisi, tepe etkisi olarak düşünülebilir. Rüzgâr türbinini yerleştirecek en uygun yeri bölgenin doğal şartlarına bakarak seçilmektedir. Eğer bölgede ağaçlar, çalılar, fundalıklar varsa bunlara bakarak rüzgârın hâkim yönünü kolayca belirlenebilir (Şekil 6.6.).



Şekil 6.6: Hâkim Rüzgâr Yönü

Meteoroloji verileri (30 yıllık bir periyotta çıkarılmış rüzgâr gülü) en iyi rehberdir. Fakat bu rüzgâr verileri direk olarak santral kurmayı düşünülen bölgeden elde edilmemiş olabilir. Eğer kurulum yapmak planlanıyorsa, bölgede rüzgâr türbini varsa bunlardan elde edilen veriler bölgenin rüzgâr şartlarını tespit etmede en iyi

rehber niteliğindedir. Almanya ve Danimarka gibi ülkelerde ülke geneline yayılmış çok sayıda türbin olduğundan, imalatçı firmalar kurulundan sonrası için hesaplanan değerlerde üretim garantisi vermektedir.

Rüzgâr şartlarını belirledikten sonra bölgenin hakim rüzgâr yönünde geniş ve açık olup olmadığı kontrol edilir. Eğer bu geniş ve açık alanda hakim rüzgâr yönünde birkaç tane engel varsa ve düşük pürüzlülük sınıfında ise bunlar kabul edilebilir. Eğer bölgede türbin yerleştirecek tepeler varsa bu çok verimli olur (Hill Effect).

Türbin alanının seçiminde toprak şartları analizi de gereklidir. Hem türbin temeli için fizibilite hem de türbinin ağır parçalarını bölgeye götürmek için yol yapımı fizibilitesi gereklidir. Rüzgâr hızı ölçümlerindeki hassaslık (kesinlik) rüzgâr enerjisi planlamasında diğerlerine (hava tahmini vb.) göre daha önemlidir (Ağçay 2007).

6.4 Kanat Sayısı Etkisi

Türbin dizayn edilirken ilk göz önüne alınması gereken parametre kanat sayısıdır. Rüzgâr türbinleri kanat sayısı 1 ile 40 arasında değişecek şekilde dizayn edilebilmektedir. Kanat sayısının çok olduğu durumlar düşük uç hızı oranlı rotorlar için kullanılmaktadır. Bu durum yüksek kalkma momentinin gerektiği su pompalanması gibi uygulamalar için geçerlidir. Yüksek uç hızı oranlı rotorlar elektrik enerjisi üretmek için kullanılır ve 2 veya 3 kanatlı olarak tasarlanmaktadır.

Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin kullanılmasının temel amacı, pervanelere etki eden yüksek çizgisel hızın düşürülmesidir. Bu türbinler aerodinamik açıdan dengesizdir. Bu nedenle istenmeyen bazı yüklere neden olur. Bu mekanizmayı dengelemek için, göbek kısmına ek yapılar ilave etmek gerekir. Diğer yandan gürültü seviyesi de yüksektir. Uç hızı üç kanatlı pervaneler ile kıyaslandığında iki kat daha fazladır. Değişik kanat örnekleri Şekil 6.7.'de verilmiştir.



Şekil 6.7: Kanat Sayısı Etkisi

İki kanatlı rüzgâr türbinleri 20-25 yıl öncesine kadar Avrupa ülkelerinde ve Amerika'da kullanılmıştır. Bu türbinler ekonomik açıdan avantajlı gibi görünse de ek yapılarla üç kanatlı türbinlerle aynı maliyete gelmektedir. Üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde görülmeyen bir eylemsizlik momenti oluşur.

Eylemsizlik momenti;

$$I = m \times r^2 \quad (6.1)$$

- m: Dönen cismin kütlesi
- r: Dönme ekseninden bu kütleye çizilen uzaklık

Sistemin dengede durabilmesi için sallanan bir göbek olmalıdır.

Günümüzde hem verim açısından hem de estetik açısından en çok kullanılan model üç kanatlı türbinlerdir. Bu türbinler hız ne olursa olsun sabit bir eylemsizlik momentine sahiptir. Üç ve daha fazla kanadı olan bu tür türbinler bu avantaja sahiptir. Bu avantajından dolayı göbek kısmına ek bir yük getirmez. Ayrıca gürültü seviyesi de diğerlerine göre daha düşüktür (Ağçay 2007).

6.5 Kule Yüksekliğinin Etkisi

Kule, rüzgâr türbinlerinde nacelle ve rotoru taşır. Kuleler genellikle tüp şeklinde çelik, kafes yapılı veya betonarme olarak inşa edilir. Halat destekli direk tipi kuleler genellikle küçük türbin uygulamalarında kullanılır. Tüp şeklindeki kule şekli en çok tercih edilen kule şeklidir. Genellikle 20 – 30 metre yükseklikte üretilir. Kafes yapılı kuleler çelik profillerin kaynaklanarak birleştirilmesi ile oluşturulur. En temel avantajları maliyetlerinin düşük olmasıdır. Benzer boyutlarda bir tüp kulenin hemen hemen yarısı kadar malzeme ve yapım maliyeti vardır. Birçok küçük türbin halat destekli direk tipi kule kullanılarak inşa edilir. En büyük avantajı ağırlığının çok az ve maliyetlerinin çok düşük olmasıdır. Dezavantajları ise araziye kurulum zorluğu ve tarım alanlarının kullanımını engellemesidir. Rotorun kulenin tepesine yerleştirilmesi durumunda direğin gölgesi kanatlar üzerinde etkili olmayacağı için daha yüksek güç elde edilebilir. Şekil 6.8.'de değişik yüksekliklerde kuleler görülmektedir.



Şekil 6.8: Çeşitli Yükseklikteki Kuleler

7. SONUÇ

Fosil enerji kaynaklarının yakın gelecekte tükenecek olmasından ve çevresel etkilerinden dolayı bütün dünya alternatif enerji kaynakları arayışına girmiştir. Bu bağlamda rüzgâr enerjisi, hammadde maliyetinin olmaması, dışa bağımlılığı azaltması, temiz ve yenilenebilir olması gibi nedenlerle dünyada her geçen gün daha fazla dikkat çekmekte ve daha fazla talep görmektedir.

Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretim sürecinin karbon üretiminden bağımsız olması, yani atmosfer kirliliğine sebebiyet vermemesi nedeniyle bu kaynak “temiz enerji olarak” da nitelendirilmektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan rüzgâr enerjisi kullanımının yaygınlaşması her açıdan önem taşımaktadır.

Rüzgâr enerjisi potansiyeli açısından Türkiye oldukça verimli bir ülkedir. Ancak, bu potansiyelin kullanımı bakımından diğer ülkelere kıyasla ülkemizde sektörün henüz gelişme aşamasında olduğu görülmektedir.

Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli yüksek olan ülkemizde, rüzgâr enerjisi yoğunluğu arttırmak için çalışmalar yapılmalıdır. Rüzgâr Enerjisinin potansiyelin yüksek olduğu bölgelerin iletim hatları iyileştirilmeli ve Türkiye Rüzgâr Tahmini sistemi kurulmalı, şebekede oluşan teknik sorunlar en aza indirgenmelidir. Danimarka, rüzgâr tahmini yöntemiyle rüzgâr enerjisi ile belirli bir üretim planlaması yapabilmekte ve bazı özel durumlarda şebeke limitlerini bu verilere güvenerek aşabilmektedir. Benzer bir sistemin Türkiye içinde kurulmalıdır.

8. KAYNAKLAR

- Ağçay, M., “Rüzgâr Elektrik Santrali Tasarımı”, Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü*, İstanbul, 41-42, (2007).
- Arıcasoy, O., Kompozit Sektör Raporu[online], (15 Haziran 2017), <http://www.ito.org.tr/Dokuman/Sektor/1-57.pdf>, (2006).
- Avcı B., Yılmaz T. B., “Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü*, İzmir, (2012).
- Bayraç, H.N., “Küresel Rüzgâr Enerjisi Politikaları ve Uygulamaları”, *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Uludağ Journal of Economy and Society*, cilt XXX (sayı 1), 37-57, (2011).
- Deloitte, (2011), Yenilenebilirler için yeni hayat Yenilenebilir enerji politikaları ve beklentiler, Enerji ve doğal kaynaklar endüstrisi, Ankara.
- Demir, M., “Avrupa ve Türkiye’deki Biyokütle Enerjisi”, Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendislik Bölümü*, Balıkesir, (2009).
- DMİ, *Klimatoloji 2*, Ankara: Çevre ve Orman Bakanlığı Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, (2009).
- Erdem, O., “Bozcaada’da CFD Programı Kullanılarak Bir Rüzgâr Enerji Santralinin Potansiyelinin Belirlenmesi”, *Tesisat Mühendisliği*, sayı 147, sayfa 20-26, (2015).
- Global Wind Energy Council, Global Wind Statistics [online], (4 Haziran 2017), http://www.tureb.com.tr/files/bilgi_bankasi/dunya_res_durumu/gwec_prstats2016_en_web.pdf, (2017).
- Hayli, S., “Rüzgâr Enerjisinin Önemi Dünya’da ve Türkiye’deki Durumu”, *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, cilt 11 (sayı 1), sayfa 1-26, (2001).
- Malkoç, Y., “Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli ve Enerji Profilimizdeki Yeri [online]”, (28 Temmuz 2017), <http://www.solar-academy.com/menus/Turkish-Wind-Data.023202.pdf>, (2007).

Özgener, Ö., “Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgâr Enerjisi Kullanımı”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, cilt 4 (sayı 3), 159-170, (2002).

Ramos, C.J., Martins, A.P., Araujo, A.S., “Current Control in the Grid Connection of the Double – Output Induction Generator Linked to a Variable

Rüzgâr Enerji Santrallerinde Genel Sistem Verimi [online], (6 Haziran 2017), http://www.yarbis1.yildiz.edu.tr/web/userCourseMaterials/tanriov_3c9e3ba52607a4b692baa816cbbbc5dd.pdf.

Sülün, M., “Rüzgâr Enerjisi”, Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü*, İzmir, (2007).

Yalçın, U., “Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi Kullanılarak Rüzgâr Enerjisi Santral Yer Seçimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2007).

9. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Volkan SERT

Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir 09.03.1988

Lisans Üniversite : İstanbul Teknik Üniversitesi – Makina Mühendisliği

Y. Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi (Devam)

Elektronik posta : volkan-sert@windowslive.com

İletişim Adresi : Servergazi Mah. Atakent 11 sokak BeldeKent Sitesi B blok No:6 Daire:10 Merkezefendi/DENİZLİ