

**T.C.
MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ ANABİLİM DALI

**MUĞLA BÖLGESİ'NDE MERMER ENDÜSTRİSİNİN ELEKTRİK ENERJİSİ
TALEBİNİ KARŞILAMAK İÇİN, MATLAB PAKET PROGRAMI İLE
RÜZGAR ÇİFTLİĞİ TASARIM ÇALIŞMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MURAT CEYLAN

**HAZİRAN 2006
MUĞLA**

**T.C.
MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ ANABİLİM DALI

**MUĞLA BÖLGESİ'NDE MERMER ENDÜSTRİSİNİN ELEKTRİK ENERJİSİ
TALEBİNİ KARŞILAMAK İÇİN, MATLAB PAKET PROGRAMI İLE
RÜZGAR ÇİFTLİĞİ TASARIM ÇALIŞMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MURAT CEYLAN

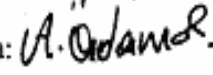
MUĞLA 2006

Prof. Dr. Muhammed ELTEZ danışmanlığında Murat CEYLAN tarafından hazırlanan bu çalışma 07/ 07 / 2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Enerji Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Başkan :...Prof. Dr. Muhammed ELTEZ İmza:



Üye :...Doç. Dr. Aydoğan ÖZDAMAR İmza:



Üye :... Yrd. Doç. Dr. Asude ELTEZ..... İmza:



Üye :..... İmza:

Üye :..... İmza

ÖNSÖZ

Endüstri devrimi ve yetmişli yıllarda meydana gelen petrol krizi sonrası temiz yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması gündeme gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisinin kullanımı gelişen teknoloji ile sürekli artmaktadır.

Bu tez çalışmasında MATLAB paket programı ile Rüzgar Çiftli Tasarım Aracı “RTA” oluşturulmuştur. RTA ile Muğla mermer işletme tesislerinin elektrik enerji ihtiyacını karşılamak için, Datça bölgesinde en verimli rüzgar çiftliği tasarımı ve Datça bölgesinin rüzgar iklim analizi yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında yardımlarını esirgemeyen tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Muhammed ELTEZ ve Yrd. Doç. Dr. Asude ELTEZ’e, proje çalışmalarında maddi destek veren Muğla Üniversitesi BAP birimine, rüzgar çiftliği tasarımı yapılan bölgenin tanıtılmasına yardımcı olan Reşadiyeli Sayın Nuri Bey’e, Çeşme-Germiyan’daki rüzgar santrali teknik gezisinde teknik açıdan yardımcı olan Sayın Elekt. Müh. Sarper Bey’e (Enercon) teşekkür ederim.

Murat CEYLAN

MUĞLA

01/06/2006

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	V
ABSTRACT	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
ÇİZELGELER DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GİRİŞ	1
1.1. Enerji ve Önemi	1
1.2. Yenilenebilir Enerjilere Olan Gereksinimler	1
1.3. Türkiye'nin Enerji Kaynakları	2
1.3.1. Fosil enerji kaynakları.....	3
1.3.2. Yenilenebilir enerji kaynakları.....	3
1.4. Türkiye'nin Enerjiye Bakışı.....	4
1.5. Türkiye'nin Rüzgar Atlası.....	6
1.5.1. Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyeli ve uygulamaları.....	8
1.6. Dünyada Rüzgar Enerjisi Kullanımı	9
1.7. Rüzgar Enerjisi.....	11
1.7.1. Coriolis kuvveti.....	11
1.7.2. Yüzey Rüzgarları	12
2. KAYNAK ÖZETLERİ	15
2.1. Rüzgar Gücüne Ait Hesaplamalar ve Formüller.....	15
2.2. Hız ve Güç Eşitlikleri.....	15
2.3. Hava Yoğunluğu	16
2.4. Rüzgar Türbininden Elde Edilen Güç	17
2.5. Uç Hız Oranı	20
2.6. Rüzgar İklimi	23
2.6.1. Rüzgar hız dağılımı	24
2.7. Rüzgar Hızı ve Enerji Hızı Ortalamaları.....	25
2.8. Yüksekliğin Etkisi.....	26
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ	28
3.1. Rüzgar Güç Sistemi Elemanları	28
3.1.1. Kule	28
3.1.2. Rotor kanatları.....	29
3.1.3. Generatör.....	30
3.1.4. Güç elektroniği.....	31
3.1.5. Dişli kutusu	32
3.1.6. Diğer türbin bileşenleri	32

3.2. Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamiği.....	33
3.3. İletim Kayıpları ve Generatör Verimleri.....	36
3.4. Güç Kontrolü.....	37
3.4.1. Aerodinamik (Pitch) kontrol	38
3.4.2. Maksimum güçte çalışma.....	39
3.5. Hız Kontrolü	40
3.6. Rüzgar Türbinleri Sistem Kontrolü.....	41
4. RÜZGAR SANTRALİ.....	43
4.1. Yerleşim Planı	43
4.2. Rüzgar Santrali Elektrik Sistemi.....	44
4.3. Rüzgar Türbinlerinin Enterkonnekte Şebekeye Bağlantısı	45
4.3.1. Elektrik dağıtım şebekesine bağlı rüzgar güç sistemi	46
4.3.2. Ara yüz Gereksinimi	47
4.4. Çevresel Etkiler	47
4.4.1. Görsel etki	48
4.4.2. Gürültü	48
4.4.3. Doğal yaşama etkisi	50
4.4.4. Elektromanyetik etki	50
4.5. Rüzgar Enerji Sistemlerinin Çevreye Yararları	50
5. MATERYAL ve YÖNTEM.....	53
5.1. Rüzgar Santrali Tasarımı	53
5.2. Rüzgar Santralinin Enterkonnekte Şebekeye Bağlantısı.....	54
5.3. Kapasite Faktörü	55
5.4. Yıllık Enerji Verimi	57
5.4.1. Brüt enerjinin değerlendirilmesi	57
5.4.2. Rüzgar türbinlerinin yerleşim verimi	58
5.4.3. Rüzgar çiftliği elektrik sistemi verimi.....	58
5.4.4. Rüzgar çiftliği kullanım verimi.....	59
5.5. Rüzgar Çiftliği için Gerekli Arazi.....	59
5.6. Ekonomik Analiz	60
5.6.1. Elektrik piyasasına göre ekonomik analiz.....	61
5.7. Rüzgar Çiftliği Proje Tasarım	63
5.7.1. Rüzgar çiftliği projesine giriş.....	63
5.7.2. Ayrıntılı rüzgar çiftliği tasarımı	64
5.7.3. Rüzgar çiftliği alt yapısı	64
5.8. Santralin Kurulmasında Resmi Prosedür	65
5.8.1. Otoprodüktör modeli	65
5.8.2. Otoprodüktör santral kurulması için yapılan işlemler.....	65
6. ARAŞTIRMA BULGULAR	67
6.1. Datça Bölgesi'nde Rüzgar Çiftliği Tasarımı.....	67
6.2. Rüzgar Çiftliği Tasarım Aracı Algoritması	70
6.3. Muğla Mermer İşletme Tesislerinin Güç Kapasiteleri.....	70
6.4. Rüzgar Çiftliği Tasarım Aracı Analiz Sonuçları.....	72
6.4.1. Rüzgar türbinlerinin aylık enerji üretimleri	72
6.4.2. Rüzgar türbinlerinin çalışma zamanları	73

6.4.3. Rüzgar çiftliklerinin türbin sayıları.....	74
6.4.4. Rüzgar çiftliği kapasite faktörleri.....	75
6.4.5. Rüzgar çiftliği için gerekli arazi.....	76
6.4.6. Rüzgar çiftliği birim enerji ve yatırım maliyetleri	77
6.4.7. Rüzgar çiftlikleri emisyon tasarrufları	79
6.4.8. Datça bölgesi rüzgar iklimi analizleri	80
6.4.9. Rüzgar türbinlerinin rotor güç katsayıları	85
6.4.10. Nominal rüzgar hızında türbinlerin güç katsayıları ve uç-hız oranları	86
7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	88
KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	97

**MUĞLA BÖLGESİNDE MERMER ENDÜSTRİSİNİN ELEKTRİK ENERJİ
TALEBİNİ KARŞILAMAK İÇİN, MATLAB PAKET PROGRAMI İLE
RÜZGAR ÇİFTLİĞİ TASARIMI ÇALIŞMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

MURAT CEYLAN

**MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

2006

ÖZET

Dünyada rüzgar enerjisinin kullanımı, rüzgar güç potansiyeli elverişli coğrafyalarda sürekli artmaktadır. Türkiye’de rüzgar güç potansiyeli yüksek bölgelerimiz olmasına rağmen, kurulu rüzgar güç santrallerimiz çok azdır. Ülke ekonomisine ve çevre sağlığına önemli faydalar sağlayan rüzgar enerjisinin kullanımının yaygınlaşması gerekir.

Bu tez çalışmasında, rüzgar enerjisi ve rüzgar güç sistemleri incelenmiştir. Son bölümde Muğla mermer endüstrisinin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için Datça-Reşadiye bölgesinde rüzgar çiftliği tasarımı yapılmıştır.

Rüzgar çiftliği tasarımı için, E.İ.E.’den Datça Bölgesi’nin 2003 yılı rüzgar verileri BAP bütçesi yardımı ile satın alınmıştır. Bu rüzgar verileri, sekiz farklı rüzgar türbin güç eğrileri ve katalog bilgileri, dört farklı türbin mesafelerinde yerleşim verim değerleri, Muğla mermer endüstrisi şirketlerinin kurulu güç kapasiteleri, rüzgar çiftliği tasarlanacak Datça-Reşadiye Bölgesi’nin topografya bilgileri, MATLAB yazılım programı ile yazılan “Rüzgar Çiftliği Tasarım Aracına” uygulanarak çeşitli analizler yapılmıştır.

Sekiz farklı türbin ve dört farklı türbin mesafelerindeki 32 farklı rüzgar çiftlikleri için; yıllık üretilen enerji, kapasite faktörleri, gerekli arazi alanı, emisyon tasarrufları, birim enerji maliyetleri, yatırım maliyetleri ve Datça Bölgesi'nin rüzgar iklimi analizleri yapılmıştır.

Rüzgar çiftliği tasarım aracı tek Datça bölgesine özgün değildir. Farklı bir bölge için, değişkenler değiştirilerek rüzgar çiftliği tasarım aracı kullanılabilir. İhtiyaçlarımıza uygun en verimli rüzgar çiftliği seçimi yapılır. Ayrıca, rüzgar çiftliği tasarım aracı basit ve esnek kullanıma sahiptir.

Anahtar Kelimeler : Rüzgar Çiftliği, Tasarım Çalışmaları, Rüzgar Türbinleri, Rüzgar Güç Potansiyeli, Rüzgar iklimi.

Sayfa Adedi : 97.

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Muhammed ELTEZ

**A WIND FARM DESIGN STUDY BY MATLAB PACKAGE PROGRAM IN
ORDER TO MEET THE ELECTRICAL ENERGY DEMAND OF MUĞLA
MARBLE INDUSTRY**

(M. Sc. Thesis)

MURAT CEYLAN

**MUĞLA UNIVERSITY
INSTITUTE of SCIENCE and TECHNOLOGY**

2006

ABSTRACT

In the world, the use of wind energy has been increasing continuously in the places where wind potential is suitable. Although we have regions in Turkey in which wind power potential is high, we have a very limited number of wind power plants. It is needed that the use of wind energy to become widespread, which provides significant advantages for our economy and environment.

In this thesis, wind energy and wind power systems have been analyzed. In the last section, a wind farm design is constructed in Datça-Reşadiye region in order to meet the need of electrical energy for marble industry in Muğla.

For the wind farm design, data on wind in Datça region for the year 2003 is bought from E.İ.E by the help of BAP budget. These data on wind, power curves and catalog information of eight different wind turbines, efficiency values of 4 different turbine distances, the power capacities of companies the marble industry in Muğla, the topographic information about Datça-Reşadiye region, in which the wind farm will be designed, have been applied on “Wind Farm Design Tool” and various analyses have been made.

For 8 different turbines and 4 different turbine distances in 32 different wind farms; analyses of the energy produced per year, capacity factors, land area required, emission savings, unit energy costs, capital costs and wind climate analysis in Datça region have been made.

The wind farm design tool is not unique to Datça region. This instrument can be used for different regions by changing the variables. The selection of the most efficient wind farm that fits our needs is done. Also, the wind farm design tool has simple and flexible usage.

Key Words : Wind Farm, Design Studies, Wind Turbines, Wind Power Potential, Wind Climate.

Pages : 97.

Adviser : Prof. Dr. Muhammed ELTEZ

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Türkiye rüzgar atlası	7
Şekil 1.2. Türkiye haritasında rüzgar güç santrallerinin yerlerinin gösterimi.....	9
Şekil 1.3. Dünyamızın küresel ısınma durumu	11
Şekil 1.4. Küresel rüzgar hareketleri.....	12
Şekil 1.5. Deniz meltemi ve vadi rüzgarları.....	13
Şekil 2.1. “ $\rho.A.V$ ” sütunundaki hava kütesinin, kinetik enerjisi “ $\frac{1}{2}(\rho.A.V).V^2$ ”	16
Şekil 2.2. Genişletilmiş hava akımının Betz modeli.....	17
Şekil 2.3. Etkilenme katsayısı “e” ile “ C_p ” rotor güç katsayısı değişimi.....	19
Şekil 2.4. Türbin frekansı ve güç çıkışı a) Dönüş frekansı çok düşük; hareketli kanatlar boyunca bazı rüzgar akımları bozulmadan geçiyor b) Dönüş frekans optimum; tüm hava akımı etkileniyor c) Dönüş frekansı çok yüksek; enerji türbülans ve girdap hava akımlarında kayboluyor.....	21
Şekil 2.5. Farklı kanat sayılı rotorlar için uç-hız oranı “ λ ” ile rotor güç katsayısı “ C_p ” değişim eğrisi	23
Şekil 2.6. Rüzgar iklimi analizi.....	25
Şekil 3.1. Rüzgar türbin bileşenleri.....	28
Şekil 3.2. Enercon yeni rotor kanat geometrisi	29
Şekil 3.3. Enercon sandaviç rotor kanat yapısı	30
Şekil 3.4. Değişken-hızlı, sabit-frekanslı rüzgar güç sistemi şeması.....	31
Şekil 3.5. Kanat ucu yakınında hava akış hızları ve kuvvet bileşenleri.....	34
Şekil 3.6. Aerodinamik kesitte hava akışı ve kanat açıları	35
Şekil 3.7. Bonus 500 kW rüzgar türbininin hücum açısı ve kaldırma ve sürüklenme katsayılarının değişim karakteristiği	35
Şekil 3.8. Stall kontrol yönteminde kanat yüzeyindeki hava etkileşimi	36
Şekil 3.9. Rüzgar türbini mekanik sistem verimleri.....	37
Şekil 3.10. Güç kontrol projesi kullanarak maksimum güçte çalışma.....	40
Şekil 3.11. Türbin hız kontrolündeki beş bölge	41
Şekil 4.1. Düz bir arazideki rüzgar çiftliği için verimli kule mesafeleri.....	44
Şekil 4.2. Rüzgar santrali elektrik sisteminin tek hat şeması.....	44
Şekil 4.3. Şebekeye-bağlı değişken hız rüzgar güç sisteminin elektrik şeması	46
Şekil 4.4. 250 m mesafede diğer yaygın gürültü aktiviteleri ile rüzgar türbinlerindeki gürültü seviyesinin karşılaştırılması.....	49
Şekil 5.1. Enterkonekte şebekeye bağlı rüzgar santralinin tek hat şeması.....	54
Şekil 5.2. Dewind D4 serisi, rotor çapı 46 m, 600 kW rüzgar türbininin güç eğrisi.....	56
Şekil 5.3. Kare bir rüzgar çiftliği projesinde farklı mesafeler için yerleşim verimi	58
Şekil 5.4. 2006 elektrik piyasası tarifelerine O.G. dağıtım tesisi için enerji maliyeti.	62
Şekil 5.5. Rüzgar çiftliği için genel maliyet analizi	65
Şekil 6.1. Datça-Reşadiye bölgesi E.İ.E.’nin rüzgar ölçüm direği.	67
Şekil 6.2. Datça Rüzgar İstasyonunun harita üzerindeki yeri.	68
Şekil 6.3. Rüzgar çiftliği tasarım aracının algoritma akış şeması.	70

Şekil 6.4. Rüzgar türbinleri aylık enerji değerlerinin karşılaştırılması.	73
Şekil 6.5. Rüzgar türbinleri çalışma zamanlarının karşılaştırılması.	74
Şekil 6.6. Rüzgar çiftlikleri türbin sayılarının karşılaştırılması.	75
Şekil 6.7. Rüzgar çiftliği kapasite faktörlerinin karşılaştırılması.	76
Şekil 6.8. Rüzgar çiftliği arazi alanlarının karşılaştırılması.	77
Şekil 6.9. Rüzgar çiftliği birim enerji maliyetlerinin karşılaştırılması.	78
Şekil 6.10. Rüzgar çiftlikleri yatırım maliyetlerinin karşılaştırılması.	79
Şekil 6.11. Rüzgar çiftlikleri emisyon tasarruf değerlerinin karşılaştırılması.	80
Şekil 6.12. Datça bölgesi 2003 yılı aylık ortalama rüzgar hızları.	81
Şekil 6.13. Datça bölgesi 2003 yılı aylık rüzgar güç potansiyelleri.	82
Şekil 6.14. Tüm yönler için rüzgar hız ortalamaları.	83
Şekil 6.15. Tüm yönlerde rüzgar frekanslarının karşılaştırılması.	84
Şekil 6.16. Rüzgar hız dağılımlarının karşılaştırılması.	85
Şekil 6.17. Rüzgar türbinleri rotor güç katsayılarının karşılaştırılması.	86
Şekil 6.18. Ortalama rüzgar hızında her türbin için uç-hız oranları " λ " ve güç katsayılarının " C_p " karşılaştırılması.	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Türkiye'nin fosil enerji kaynaklarının miktarı.....	3
Çizelge 1.2. Türkiye'de elektrik güç kapasitesi gelişimi	6
Çizelge 1.3. Türkiye rüzgar atlasında gösterilen beş değişik rüzgar rejimi için toprak seviyesi üzerinden 50 m yükseklikte rüzgar güç potansiyelleri.....	7
Çizelge 1.4. Kasım 2003'e kadar bölgeleriyle beraber Türkiye'nin rüzgar enerji kurulumlarının dağılımı	9
Çizelge 1.5. 2006 yılı başında dünya rüzgar kurulu gücünün dağılımı	10
Çizelge 2.1. Değişik arazilerin pürüzlülük katsayıları	27
Çizelge 4.1. Yenilenebilir enerji kaynak kullanımı ile emisyon azalma oranları	51
Çizelge 4.2. Farklı bölgelerin geçmiş ve gelecekteki dünya enerji tüketimi ve karbon dioksit emisyon miktarları.....	52
Çizelge 6.1. Rüzgar çiftliği tasarım aracında kullanılan rüzgar türbin çeşitleri.....	69
Çizelge 6.2. Rüzgar çiftliği tasarım aracında kullanılan türbin mesafeleri ve yerleşim verimleri	69
Çizelge 6.3. Muğla mermer işletmelerinin kurulu güç değerleri.	71

SEMBOLLER DİZİNİ

a	Hücum açısı
A	Rotor kanatlarının süpürdüğü alan (m^2)
A_R	Rüzgar çiftliği arazi alanı (m^2)
B	Birim enerji maliyeti (ECU/kWh)
b	Ayar (pitch) açısı
c	Rüzgar hız dağılımı ölçek katsayısı
CD	Rotor kanadının sürüklenme katsayısı
CL	Rotor kanadının kaldırma katsayısı
C_p	Rotor güç katsayısı
C_{pmax}	Maksimum rotor güç katsayısı
d	Türbine giren rüzgarın tekrar eski haline gelinceye kadar olan mesafe (m)
dB	Ses basınç seviyesi
dB(A)	Ses güç seviyesi
d_c	Sütun ekseninde türbinler arası mesafe (m)
d_r	Satır ekseninde türbinler arası mesafe (m)
e	Etkilenme katsayısı
E	Rüzgar çiftliğinden üretilen yıllık net enerji (kWh/yıl)
E_g	Rüzgar çiftliğinden üretilen yıllık brüt elektrik enerjisi (kWh/yıl)
E_r	Rüzgar çiftliklerinden üretilebilecek yıllık nominal elektrik enerjisi (kWh/yıl)
$E_{tük}$	Yıllık tüketilen elektrik enerjisi (kWh/yıl)
f	Birim enerji çıkışı yakıt maliyeti (ECU/kWh)
F	Rüzgar türbinine etkiyen kuvvet (N)
$f_{(v)}$	Rüzgar hızlarının esme yüzdesi
F_a	Serbest rüzgar yönündeki eksen kuvveti (N)
F_c	Rüzgar çiftliği kapasite faktörü
F_d	Kanat dönüş yönündeki sürücü kuvvet (N)
h	İşletme süresi (h/yıl)

H_m	Bölgenin rakımı (m)
k	Rüzgar hız dağılımı şekil katsayısı
l	Rüzgar çiftliğinden elektrik dağıtım şebekesine olan uzaklık (km)
m	Birim enerji çıkışı çalışma ve bakım maliyeti (ECU/kWh)
\dot{m}	Hava akımının kütleli debisi (kg/s)
n	Rotor kanat sayısı
N	Rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbin sayısı
P	Aktif güç (kW)
P_{ort}	Rüzgar güç potansiyeli (W/m^2)
P_T	Rotor kanatlarında elde edilen mekanik güç (W)
P_{max}	Rüzgar türbininden elde edilen teorik maksimum güç (W)
P_w	Rüzgar gücü (W)
r	Yıllık faiz oranı
R	Rotor kanat yarıçapı (m)
R_y	Yatırım dönüşüm katsayısı
S	Görünür güç (kVA)
t_b	Rotor kanadının öndeki kanadın pozisyonuna gelinceye kadar geçen zaman (s)
t_w	Rotor kanatlarına giren ve çıkan düzgün hava akım zamanı (s)
u	Hareketsel rüzgar hızı (m/s)
V	Rotor kanatlarına giren rüzgar hızı (m/s)
V_e	Ortalama rüzgar enerji hızı (m/s)
v_i	Saatlik rüzgar hızları (m/s)
v_r	Rotor kanatlarına etkiyen bağıl rüzgar hızı (m/s)
V_R	Ölçülen rüzgar hızı (m/s)
V_T	Tahmin edilen teorik rüzgar hızı (m/s)
V_{ort}	Ortalama rüzgar hızı (m/s)
V_{ci}	Rüzgar türbini kalkınma rüzgar hızı (m/s)
V_{co}	Rüzgar türbini kesim rüzgar hızı (m/s)
V_o	Rotor kanatlarından çıkan rüzgar hızı (m/s)

V_1	Rotor kanatlarına etkiyen rüzgar hızı (m/s)
W	Rotor kanatlarının açısal hızı (rad/s)
Y	Rüzgar çiftliği yatırım maliyeti (ECU)
z	Rüzgar santralinin ömrü (yıl)
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
λ	Rotor kanatları uç-hız oranı
α	Arazi yüzeyinin sürtünme katsayısı
η_m	Rüzgar türbini dişli kutusu verimi
η_g	Rüzgar türbini generatör verimi
η_E	Rüzgar çiftliği elektrik sistem verimi
η_A	Rüzgar çiftliği kullanım verimi
η_L	Rüzgar çiftliği yerleşim verimi

KISALTMALAR DİZİNİ

ECU	Avrupa para birimi
ETKB	Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı
E.İ.E.	Elektrik İşleri Etüd İdaresi
O.G.	Orta Gerilim Dağıtım Tesisi
R.Ç.	Rüzgar Çiftliği
R.D.	Rotor çapı (Rotor Diameter)
R.T.	Rüzgar türbini
RTA	Rüzgar Çiftliği Tasarım Aracı
R.Ç.T.	Rüzgar Çiftliği Tasarımı
TEAŞ	Türkiye Elektrik Üretim İletim Anonim şirketi
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim şirketi
N	Kuzey
NNE	Kuzey kuzeydoğu
ENE	Doğu kuzeydoğu
E	Doğu
ESE	Doğu güneydoğu
SSE	Güney güneydoğu
S	Güney
SSW	Güney güneybatı
WSW	Batı güneybatı
W	Batı
WNW	Batı kuzeybatı
NNW	Kuzey kuzeybatı

1. GİRİŞ

1.1. Enerji ve Önemi

Günümüzde ülke kalkınmasının en önemli göstergelerinden biri, o ülkede kişi başına tüketilen enerjidir. Enerji, sanayileşmenin alt yapısı ve günlük hayatın vazgeçilmez bir unsurudur. Bu nedenle, enerji ihtiyacı ulusal ve uluslararası gündemde oldukça önemli bir yer tutar. Enerji kaynaklarının tükenebilir oluşu, dışa bağımlılığın varlığı ve çevresel etkiler sebebiyle; günümüzde ülkeler için güvenli, yeterli miktarda, ucuz ve temiz enerji üretmek, ekonomik ve sosyal hayatın temel problemleri arasında yerini almaktadır. Sanayisi, ekonomisi ve nüfusu ile hızla büyümekte olan ülkemizde paralel olarak enerji ihtiyacı sürekli artmaktadır. Bu nedenle, üretilen enerjinin yüksek verimle kullanılması, mevcut enerji kaynaklarının yanı sıra alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ait potansiyelin değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır (Etemoğlu ve İşman, 2004).

Dünya enerji ihtiyacındaki artış çevresel faktörlerle birleşerek araştırmaları doğal kaynakların kullanımındaki teknolojinin geliştirilmesine yönlendirmektedir. Bu olgu, bilimsel çevreleri, enerji dönüşüm araçlarını yeniden değerlendirmeye ve var olan sınırlı enerji kaynaklarından daha çok yararlanabilmek için yeni yöntemler geliştirmeye zorlamaktadır. Dünyadaki politik gelişmelere bağlı olarak enerji fiyatlarının sürekli artması, fosil yakıtların belli bir süre sonra bitecek ve üretiminin oldukça pahalı olması, alternatif enerji kaynaklarının tespit edilerek bu kaynaklardan yüksek verimle faydalanılmasını zorunlu kılmaktadır (Etemoğlu ve İşman 2004).

1.2. Yenilenebilir Enerjilere Olan Gereksinimler

Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı, bir çok Avrupa ülkelerinin enerji politikaları arasındadır. Yenilenebilir enerji kaynakları; biyokütle, biyogaz, hidrojen, okyanus, jeotermal, hidrolik, güneş ve rüzgar gibi fosil olmayan enerji kaynaklarıdır. Gelecek kullanımlar için deniz aşırı kaynaklardaki güvenlik sorununun artışı ile batıdaki petrol ve gaz kaynaklarının azalması; yenilenebilir ve

sürdürülebilir enerji kaynaklarına gereksinimi arttırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan gereksinim nedenleri, aşağıda sıralanmıştır:

1. Petrol ve gaz kaynaklarının güvenliği üzerine olan endişelerin artması.
 - Ortadoğu bölgesindeki muhtemel anlaşmazlıkların artışı.
 - Venezualla'daki petrol kaynaklarının kullanımındaki problemler.
 - Politik olarak kararsız bölgelerde büyük enerji kaynaklarının varlığı.
2. Uzun dönem içerisinde enerji talep tahmininde çok fazla artış beklentisi.
 - Meksika körfezi ve kuzey denizindeki üretimin azalması.
 - Suudi Arabistan'da 2020 yılına kadar petrol üretiminin çok az artabileceğinin tahmini.
 - Özellikle Avrupa ve Amerika'da petrole göre, doğal gaza olan talebin artışı.
3. Artan dünya nüfusu ve çevresel baskılar.
 - Küresel ısınma ve sera gazı etkisi.
 - İnsanların çevresel tehlike oluşumunu fark etmeleri.
4. Yenilenebilir enerji maliyetlerindeki düşüşler.
 - Yenilenebilir enerji maliyetlerinin, fosil yakıtlı enerji kaynaklarının maliyeti ile rekabet edebilir şekilde azalması (Keedwell, 2002).

1.3. Türkiye'nin Enerji Kaynakları

Türkiye, çok fazla fosil yakıtlı rezervlere sahip değildir. Linyit hariç; kömür, petrol ve doğalgaz rezervlerimiz sınırlıdır ve ülkemizin projelendirilmiş taleplerini karşılamaktan uzaktır. Uzun vadede baktığımızda, linyit maden rezervleri yeterli görünmemektedir, fakat Türkiye yeterli ölçüde yenilenebilir enerji kaynaklarına sahiptir (Kaya, 2004).

1.3.1. Fosil enerji kaynakları

Kömür, Türkiye için önemli bir yakıttır. Ülkemizde üretilen kömür temel olarak elektrik gücü, çelik ve seramik üretimi için kullanılmakla beraber, ülkenin toplam enerji tüketiminin % 24 civarındadır. Türkiye, büyük bir linyit kömürü üreticisidir; güneybatı ve güneydoğu Afşin-Elbistan havzasındaki madenlerden ekonomik olarak mümkün 7339 milyon ton rezerve sahiptir. Elbistan havzası toplamın % 40'ını oluşturan en büyük linyit madenidir. Türkiye'nin fosil enerji kaynakları Çizelge 1.1' de gösterilmektedir (Kaya, 2004).

Çizelge 1.1. Türkiye'nin fosil enerji kaynaklarının miktarı (Kaya, 2004).

Kaynaklar	Görünen	Mümkün	Olası	Toplam
Taş kömürü (milyon ton)	428	449	249	1126
Linyit (milyon ton)	7339	626	110	8075
Asfalt (milyon ton)	45	29	8	82
Bitümlü şist (milyon ton)	555	1086	269	1641
Petrol (milyon ton)	36	-	-	-
Doğal gaz (milyar metre küp)	8,8	-	-	-

1.3.2. Yenilenebilir enerji kaynakları

Türkiye, önemli yenilenebilir enerji kaynaklarına sahiptir. Yenilenebilir enerji üretimi, toplam birincil enerji kaynaklarının %14,4'ü civarındadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, kömürden sonra ikinci en büyük ülke enerji kaynağıdır. Türkiye'de temel yenilenebilir enerji kaynakları sırasıyla; hidrolik, biyokütle, rüzgar, biyogaz, jeotermal ve güneştir.

Son yıllardaki çalışmalara göre, Türkiye 'nin ekonomik olarak kullanılabilir hidrojen potansiyeli, bir yılda 125 000 GWh'dir. Türkiye hükümeti, yapım aşamasında olan barajların tamamlanması, diğer nehir ve kanallar üzerine tasarlanan

projelerin gerekleŒmesiyle 2020 yılına kadar hidroelektrik güç santrallerinin kapasitesini 35 000 MW'a çıkartmayı amaçlamaktadır.

Türkiye'de tahmin edilen kullanılabilir rüzgar enerji potansiyeli, 10 000 MW civarındadır. Marmara ve Ege bölgelerinde bulunan eski rüzgar değirmenleri bu bölgelerin rüzgar güç potansiyelinin iyi bir göstergesidir. Son yıllarda, rüzgar enerjisi teknolojisinde ilerleme bu enerji kaynağına özel sektörün ilgisini ekmiŒtir. Büyük Œirketler, yeni rüzgar güç santrallerinin yapımı için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na projelerini teklif etmiŒlerdir. Türkiye'nin rüzgar güç üretimi çok fazla değildir, ve toplam kurulu kapasitesi 20,1 MW'dır.

GneŒ enerjisi, Türkiye'de ilgi çekici bir potansiyele sahiptir. İlk alıŒmalar; ülkemizin bazı bölgelerde yüksek olmakla birlikte, bir günde 3,6 kWh/m² ortalama gneŒ iŒıęı yoğunluğuyla, yıllık 2640 saat gneŒlenme süresine sahip olduğunu göstermektedir. Türkiye'nin toplam gneŒ enerji potansiyeli bir yılda 15 milyon ton petrol yakıtı olarak hesaplanmıŒtır. Türkiye'de 2001 yılında, özellikle güney ve batı bölgelerimizde konut ve ticari sektörlerde gneŒ ısıtmalı üretim tahmini 287 000 ton petrol yakıtına eŒdeęerdir.

Türkiye'nin tüm jeotermal enerji potansiyeli 35000 MW tahmin edilmektedir. Bu kullanım özellikle doğrudan ısıtma için, 2020 yılına kadar 6,3 milyon petrol yakıtına artırılacağı mit edilmektedir.

Biyoktle enerjisi tarımsal artıklar, belediye atıkları, ağaç yakıtlar, hayvan atıkları ve diğer biyolojik kaynaklardan türetilen yakıtları içerir. Toplam geri dnŒebilir biyoenerji potansiyeli 16,92 milyon ton petrol yakıtı olarak tahmin edilmektedir. Tahmin; tarımsal artıklar, çiftlik hayvanı atıkları, ormancılık, ağaç iŒleme artıkları ve belediye atıklarına bağlıdır. 2001 yılı için biyoktle enerji üretimi, 6.98 milyon ton petrol yakıtına eŒittir (Kaya, 2004).

1.4. Türkiye'nin Enerjiye BakıŒı

Türkiye, dinamik ekonomik geliŒimine ve hızlı nüfus artıŒına sahiptir. Aynı zamanda, büyük bir ekonomiye ve parasal kararsızlığa sahiptir. Bu faktörlerin net etkisi ile, Türkiye'nin enerji talebini yıldan yıla artmaktadır. Bu geliŒmenin sürekli

sürmesi beklenmektedir, fakat gelişme taleplerini karşılamak için gerekli yatırımlar istenilen seviyede ilerlememektedir. Enerji talebinin karşılanması, Türkiye için çok önemlidir. Enerji üretimini ilerletmenin yanında, hava kirliliği önemli bir problemdir. Tahminler günümüz enerji politikasının bu şekilde devam etmesi durumunda, karbon emisyonunun hızlı bir şekilde artacağını göstermektedir. Bu yüzden, Türkiye'nin enerji ile ilişkili çevresel politikasının amacı, çevrenin korunması ve iyileştirilmesinin yanında, sürdürülebilir ekonomiyi ve sosyal gelişimi desteklemek için güvenilir ve ekonomik enerji sağlamaktır.

Türkiye Hükümeti, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması, yüksek karbonlu emisyonlu teknolojiler yerine düşük karbon emisyonlu yeni sistemlere yönelmek (kojenasyon, temiz kömür, birleşik saykılı güç santrallerindeki ileri yanma teknolojileri), enerji tasarrufu, enerji dağıtım sistemlerindeki kayıpların önlenmesi ile enerji verimliliğini artırarak CO₂ ve diğer sera gazlarının emisyonunu azaltma çabasıdır.

Türkiye'nin enerji talebi 2000 ve 2010 yılları arasında iki kat ve 2000 ve 2025 yılları arasında dört kat artabileceği tahmin edilmektedir. Bu hızlı artış, Türkiye'nin yüksek ekonomik gelişim oranı yüzündedir. 2010 yıllarına kadar üretim araçları için yatırımın tahmini miktarı, 45 milyar dolar civarındadır. Aynı zaman dilimi için iletim ve dağıtım araçları için 10 milyar dolar ilave yatırım gerekmektedir.

Bu hızlı enerji ihtiyacımızın karşılanması için, sürekli yatırımın sağlanması önemlidir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, gelecek 20 yıl içerisinde elektrik üretim kapasitesini büyük ölçüde arttırmak için plan yapmıştır. Burada en büyük payı, doğal gaz kaynaklı üretim almaktadır. Bakanlık aynı zamanda, yap-işlet-devret projesi ile yabancı yatırımcıların yeni güç santralleri yapmasını teşvik etmektedir. Çizelge 1.2'de Türkiye'nin elektrik güç kapasite gelişimi gösterilmiştir (Ocak vd., 2003).

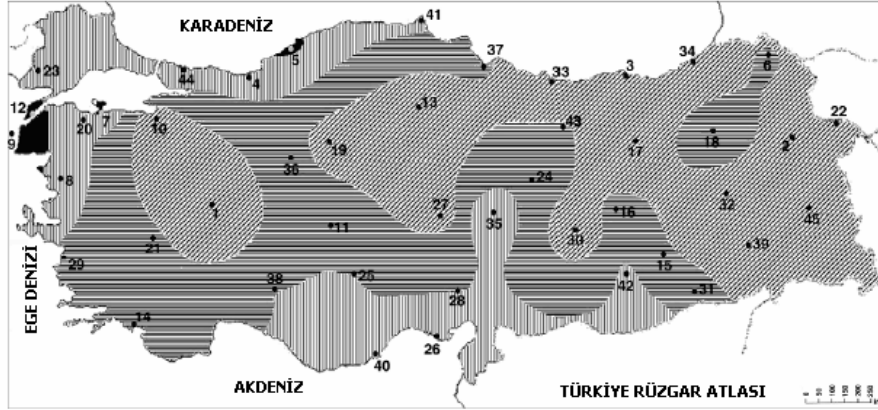
Çizelge 1.2. Türkiye’de elektrik güç kapasitesi gelişimi (Ocak vd., 2003).

Yakıt Çeşidi	2000		2010		2020	
	Kurulu Kapasite (MW _e)	Üretim (GWh)	Kurulu Kapasite (MW _e)	Üretim (GWh)	Kurulu Kapasite (MW _e)	Üretim (GWh)
Kömür	7 464	38 186	16 106	104 040	25 906	174 235
Doğal gaz	6 756	46 217	18 923	125 549	34 256	225 648
Petrol	2 124	9 531	3 246	18 213	8 025	49 842
Yenilenebilir	10 112	30 988	25 102	86 120	30 040	104 110
Nükleer	0,0	0,0	2 000	14 000	10 000	70 000
Toplam	26 457	124 922	65 377	347 922	109 227	623 835

1.5. Türkiye’nin Rüzgar Atlası

Elektrik enerjisi üretmek için ne kadar rüzgar gücünden yararlanacağımızı ve üretilen enerjinin miktarını belirlemek için bölgesel rüzgar gücü hakkında bilgiye sahip olmamız önemlidir. Rüzgar atlası, rüzgar enerjisinden enerji üretimi için potansiyel olarak uygun arazileri göstermek için hazırlanır, bölgesel ortalama rüzgar hızları ve güç potansiyelleri üzerine istatistiksel bilgiler tanımlar.

Ölçümler Türkiye coğrafyasında homojen olarak dağıtılmış 96 meteorolojik istasyon ile yapılmaktadır. Türkiye’nin rüzgar atlasının hazırlanması için 45 istasyondan elde edilen bilgiler değerlendirilmiş ve Avrupa Rüzgar Atlası için kullanılan model WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) kullanılarak atlas çizilmiştir (Şekil 1.1). Bu atlas Çizelge 1.3’de verilen beş değişik rüzgar rejimi için toprak seviyesi üzerinde 50 m yükseklikte rüzgar güç potansiyellerini kapsar (Hepbaşlı ve Ozgener, 2003).



Şekil 1.1. Türkiye rüzgar atlası (Anonim u, 2002).

Çizelge 1.3. Türkiye rüzgar atlasında gösterilen beş değişik rüzgar rejimi için toprak seviyesi üzerinden 50 m yükseklikte rüzgar güç potansiyelleri (Anonim u, 2003).

Sembol	Kapalı araziler ^b		Açık araziler ^c		Kıyıları ^d		Açık deniz ^e		Tepeler ve bayırlar ^f	
	m / s	W / m ²	m / s	W / m ²	m / s	W / m ²	m / s	W / m ²	m / s	W / m ²
	>8,0	>250	>7,5	>500	>8,5	>700	>9,0	>800	>11,5	>1800
	5 - 6	150-250	6,5-7,5	300-500	7-8,5	400-700	8-9	600-800	10-11,5	1200-1800
	4,5-5	100-150	5,5-6,5	200-300	6-7	250-400	7-8	400-600	8,5-10	700-1200
	3,5-4,5	50-100	4,5-5,5	100-200	5-6	150-250	5,5-7	200-400	7-8,5	400-700
	<3,5	<50	<4,5	<100	<5	<150	<5,5	<200	<7	<400

^a Rüzgar potansiyeli rüzgarın gücünü tanımlar. Rüzgar türbinleri mevcut potansiyelin %20 ile %30 arasındaki bir değerden faydalanır. Potansiyel hesaplamaları; Deniz seviyesinde 1 Atm'lik standart basınç ve 15 °C sıcaklığa karşılık gelen 1,23 kg/m³ hava yoğunluğuna göre yapılmıştır.

^b Yerleşim yerleri ile yoğun tarımsal alanlar, ormanlar ve rüzgar engelleri (pürüzlülük sınıfı 3)

^c Az rüzgar engelli açık alanlar (pürüzlülük sınıfı 1)

^d Pürüzsüz deniz kıyıları ve çok az rüzgar engelli kıyıları.

^e Kıydan en az 10 km uzaklıktaki deniz yüzeyleri (pürüzlülük sınıfı 0)

^f 4 km çapında ve 400 m yüksekliğinde simetrik bir tepeye bağlı hesaplamalardan elde edilmiştir. Rüzgar hızının artışı tepenin yüksekliğine, uzunluğuna ve yapısına bağlıdır (Hepbaşlı ve Ozgener, 2003).

1.5.1. Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyeli ve uygulamaları

Türkiye, enerji verimliliğini artırmak için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu potansiyelin kullanımı, çevresel emisyonu azaltacak ve kaynak güvenliğini arttıracaktır. Türkiye, resmi olarak 774 815 km²'lik arazi yüzey alanına sahiptir. Kuzeyde Karadeniz, batıda Marmara ve Ege Denizi ve güneyde Akdeniz ile çok uzun kıyı şeridiyle çevrilidir. Şekil 1.6'da verilen rüzgar atlasına göre; Ege, Marmara ve Batı-Akdeniz yüksek rüzgar enerji potansiyeline sahip bölgelerdir. Türkiye'nin teorik kullanılabilir rüzgar güç potansiyelinin yaklaşık 88 000 MW olabileceği hesaplanmıştır. Ayrıca, Türkiye'nin ekonomik olarak 10 000 MW_e civarında rüzgar güç potansiyeline sahip olduğu tahmin edilmektedir.

Son yıllarda rüzgar enerjisi teknolojisinde ilerlemeler, bu enerji kaynağına özel sektörün ilgisini çekmiştir. Sonuç olarak, çok büyük şirketler yeni rüzgar güç santrallerinin yapımı için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na projelerini teklif etmişlerdir. Çizelge 1.4'de Kasım 2003'e kadar kurulan rüzgar güç santrallerinin dağılımını gösterirken, Şekil 1.2'de rüzgar güç santrallerinin Türkiye haritasında kuruluş yerlerini göstermektedir. Küçük rüzgar sistemleri hariç, 1,5 MW'lık ilk rüzgar güç santrali, Şubat 1998'de hizmete girdi. Rüzgar güç üretimi için toplam kurulu kapasite Kasım 2003 itibarıyla 20,1 MW'tır. Türkiye'de 2001 yılında elektrik üretiminin %80 termal ve hidroelektrik santrallerden sağlanmıştır. Aynı yıl, rüzgar gücünden elektrik üretimi 57 GWh ile toplam elektrik enerjisi üretiminin %0,05'dir (Hepbaşlı ve Ozgener, 2003).



(■) Çeşme-Alaçatı, (▲) Çeşme-Germiyan, (●) Bozcaada, (★) İstanbul.

Şekil 1.2. Türkiye haritasında rüzgar güç santrallerinin yerlerinin gösterimi (Hepbaşlı ve Ozgener, 2003).

Çizelge 1.4. Kasım 2003'e kadar bölgeleriyle beraber Türkiye'nin rüzgar enerji kurulumlarının dağılımı (Hepbaşlı ve Ozgener, 2003).

Projenin Adı	Yeri	Bölgesi	Hizmete giriş Tarihi	Türbin Kapasitesi (kW)	Türbin sayısı	Kurulu Kapasite (MW)	Rotor Çapı (m)	Generatör Tipi
Çeşme Germiyan	İzmir-Çeşme	Ege	Şubat 1998	500	3	1.5	40.3	Enercon-40
Çeşme Alaçatı	İzmir-Çeşme-Alaçatı	Ege	Kasım 1998	600	12	7.2	44	Vestas-V44
Bozcaada	Çanakkale-Bozcaada	Marmara	Haziran 2000	600	17	10.2	44	Enercon-40
İstanbul	İstanbul-Hadımköy	Marmara	Kasım 2003	600	2	1.2	44	Enercon-40
Toplam					34	20.1		

1.6. Dünyada Rüzgar Enerjisi Kullanımı

1970 yılında petrol fiyatlarındaki ani artış, özellikle ABD ve Avrupa kıtasında rüzgar türbinlerine olan ilgiyi arttırmıştır. 1980 yıllarında eski teknoloji rüzgar türbinlerinden elektrik enerjisi üretim maliyeti 80 cent/kWh iken, günümüzde

modern rüzgar türbinlerinden üretilen elektrik enerjisinin maliyeti 3,5-9,5 cent/kWh düşmüştür. Birim enerji maliyetinin düşmesi ve küresel enerji krizi kaygılarından dolayı, rüzgar enerjisinin kullanımı dünyada giderek yaygınlaşmaktadır (Anonim g, 2006).

2006 yılı başında dünya rüzgar santrallerinin kurulu gücünün kıtalara ve ülkelere göre dağılımı Çizelge 1.5’de gösterilmiştir. Dünyanın en fazla kurulu gücüne sahip ülkeler; 18 100 MW ile Almanya, 9 825 MW ile İspanya ve 8 957 MW ile ABD olarak sıralanmaktadır. ABD’de, Kaliforniya 2 117 MW ve Teksas 1 944 MW kurulu kapasitesi ile en fazla rüzgar gücüne sahip eyaletlerdir (Anonim h, 2006).

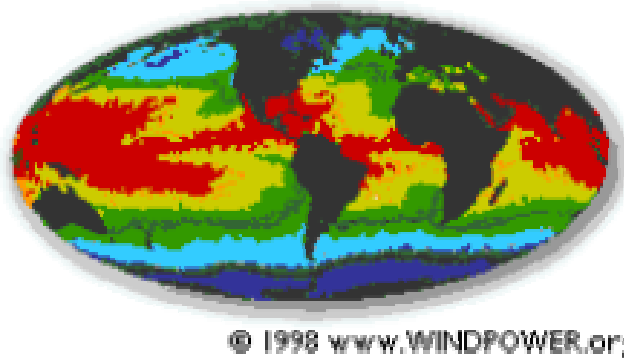
Çizelge 1.5. 2006 yılı başında dünya rüzgar kurulu gücünün dağılımı (Anonim h, 2006).

Kıtalar / Ülkeler	2005 (Ocak)	2006 (Ocak)	Kıtalar / Ülkeler	2005 (Ocak)	2006 (Ocak)
AVRUPA	MW	MW	Avustralya	380	572
Almanya	16628	18100	Yeni Zelanda	170	170
İspanya	8263	9825	Pasifik Adaları	11	40
Danimarka	3118	3129	Toplam	1501	1724
İtalya	1265	1711	ORTADOĞU VE AFRİKA	MW	MW
İngiltere	897	1337	MISIR	145	145
Hollanda	1078	1219	FAS	54	64
Portekiz	523	1000	Tunus	20	20
Fransa	390	760	İran	11	11
Avusturya	607	716	İsrail	8	8
Yunanistan	466	535	Fildişi	3	3
İsveç	442	492	Güney Afrika	3	3
İrlanda	353	441	Ürdün	2	2
Norveç	160	270	Toplam	246	256
Belçika	97	97	KUZEY AMERİKA	MW	MW
Finlandiya	82	82	ABD	6752	8957
Polonya	58	58	Kanada	444	593
Ukrayna	57	57	ASYA	MW	MW
Lüksemburg	35	35	Hindistan	2983	4225
Litvanya	26	26	Çin	764	765
Estonya	6	24	Güney Kore	8	48
Türkiye	20	20	Tayvan	16	16
Çekoslovakya	17	17	Sri Lanka	3	3
İsviçre	8	8	Bengladeş	0	1
Rusya	7	7	Toplam	3774	5058
Macaristan	6	6	LATİN AMERİKA	MW	MW
Letonya	6	6	Kosta Rika	71	71
Arnavutluk	6	6	Karayipler	55	55
Slovakya	5	5	Brezilya	48	48
G.Kıbrıs	2	2	Arjantin	26	26
Romanya	1	1	Kolombiya	20	20
Bulgaristan	1	1	Meksika	5	5
Toplam	34630	39993	Küba	0	5
Toplam AB	34375	39614	Şili	2	2
AB dışı Avrupa	255	379	Toplam	227	232
PASİFİK BÖLGESİ	MW	MW	Dünya Toplamı	47574	56813
Japonya	940	942	2005 Dünya artış oranı	% 19,42	

1.7. Rüzgar Enerjisi

Tüm yenilenebilir ve fosil yakıtların enerjileri, güneşten gelir. Güneş ışınımı, farklı güçlerde enerjiye sahip ışınlardan oluşur. Bu ışınımlardan yüksek enerjiye sahip zararlı ışınımlar termosferdeki belirli gazlar ve ozon tabakası tarafından soğurur. Bu tabakadan geçen güneş ışınımı bulutlar tarafından soğurur veya yansıtıldıktan sonra yeryüzüne ulaşır. Yeryüzüne ulaşan bu ışınımların bir kısmı, karalar ve denizler tarafından soğurur, bir kısmı yansıtılır. Güneş dünyamıza bir saatte 174 423 000 000 000 kWh enerji yaymaktadır. Güneşten gelen enerjinin yaklaşık %2'si rüzgar enerjisine dönüşür. Önemli bir bölümü, bitkiler tarafından biyokütle enerjisine dönüştürülmektedir (Watt ve Wilson, 2001).

Sıfır derece enlemde ve ekvatora yakın bölgeler, dünyanın diğer kısımlarına göre daha fazla ısınmaktadır. Şekil 1.3'de, NASA uydusundan çekilmiş küresel ısınma resminde ısınma yoğunlukları; kırmızı, turuncu ve sarı gibi sıcak renklerle tanımlanarak verilmiştir (Anonim c, 2003).



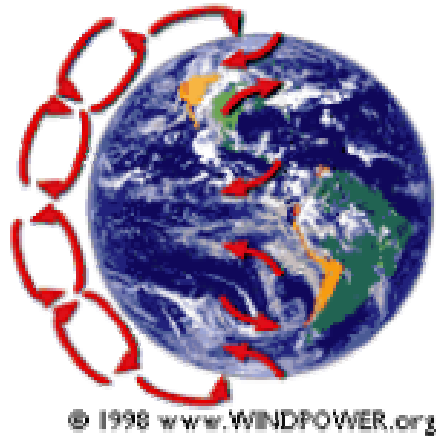
Şekil 1.3. Dünyamızın küresel ısınma durumu (Anonim c, 2003).

1.7.1. Coriolis kuvveti

Dünyamızın kendi eksenini etrafında belli bir hızla dönmesi, kuzey ve güney yarımkürelerde farklı etkilere yol açmaktadır. Dünyamızın kendi eksenini etrafında dönmesi ile yarımkürelerde oluşan kuvvetlere Coriolis Kuvveti adı verilmektedir. Rüzgar; ısınan havanın, dünyanın dönme kuvveti ile savrulması sonucunda oluşur.

Sıcak hava, en çok ekvator kuşağında oluşur ve bu kuşaktan kuzey ve güney yarım küreyi örten atmosfere doğru 10 km yükselerek, arkasında alçak basınçlı bir alan bırakır. Coriolis kuvvetleri; her iki yarım kürede 30° enlem kuşağında yoğunlaştığı için, ekvator dan yükselerek gelen yüksek basınçlı hava hareketlerini frenlemekte, ve yüzeye alçak basınçlı alana doğru itmektedir. Kutuplar, soğuk bölgeler olduğundan hava yoğunlaşarak yüksek basınç alanları oluşturur. Ekvator ise, güneşe yakın olması sebebiyle, sıcak bölgeler olduğu için hava genişterek kutuplara doğru yükseldiğinden alçak basınç alanları oluşturur. Basınç farklılıkları hava hareketini hızlandırırken Coriolis kuvvetleri, enlem boylam arasında hava hareketlerinin yönünü belirler. Şekil 1.4’de görülen bu hava hareketlerine küresel rüzgarlar denir.

Dünyamızı saran 10 km kadar kalınlıktaki hava tabakası, rüzgar gücünün yönünün belirleyicisidir. Bu tabakanın en dış halkasından yeryüzünün 1 km kadar yükseklerine kadar esen rüzgarlara küresel rüzgarlar denir (Yerebakan, 2001).



Şekil 1.4. Küresel rüzgar hareketleri (Anonim c, 2003).

1.7.2. Yüzey Rüzgarları

100 m’den düşük yükseklikteki rüzgarlar, dünya yüzeyinin coğrafi yapısından çok etkilenirler. Yüzey pürüzlülüğü engeller nedeniyle rüzgarı yavaşlatır ve rüzgar yönlerinde değişimler olur. Rüzgar türbinleri genelde 100 m’den daha az yükseklikte olduğundan, rüzgar güç sistemleri için yüzey rüzgarları önemlidir (Şen, 2003).

Dünyamızın yüzeyi, su ve kara tabakası ile örtülmüştür. Kara tabakasının topografyası engebeli iken, denizler dünyamızın formuna uymuşlardır. Küresel rüzgarlar yüzey rüzgarlarına dönüşürken; yüzeyin topografyası, rüzgar yönünün ve şiddetinin değişmesine neden olmaktadır.

Yeryüzünün eşit ısınmamasından dolayı, bir çok yüksek ve alçak basınçlı bölgeler vardır. Hava, bu bölgelerin arasında dolaşarak, bazı yüzey rüzgarlarını oluşturur. Karaların yalnızca yüzeyi ısıtıldığından, daha hızlı ısınırlar ve çabuk soğurlar. Denizler ise, ısınan su yüzeyinin dalga hareketi ile uzaklaşması ve yüzeyden derinlere doğru daha büyük mesafe ısıtılmasından dolayı, geç ısınırlar ve geç soğurlar.

Gündüz kara ve denize eşit miktarda güneş ışınımı düşmesine rağmen, karalar daha hızlı ısınarak yüzeyinde alçak basınçlı bir alan bırakarak yükselir. Hava deniz üzerinde yüksek basınçlı hava kütlesiyle karşılaşınca soğur ve karaya doğru alçalmaya başlar. Şekil 1.5'in sol tarafında görüldüğü üzere, bu hava hareketine deniz meltemi denir. Geceleri ise, daha sıcak olan deniz üzerinde bir alçak basınç alanı oluşur. Bu durumda hava karadan denize doğru hareket ederek kara meltemlerini oluşturur. Geceleri kara ve deniz arasındaki sıcaklık farkı daha az olduğundan, rüzgarlar daha hafif eser (Watt ve Wilson, 2001).



Şekil 1.5. Deniz meltemi ve vadi rüzgarları (Anonim c, 2003).

Vadilerde geceleri yüzeyle temas eden hava katmanı hızlı bir şekilde soğur, giderek yoğunlaşarak alçalır ve aşağılara doğru hafif serin bir rüzgar eser. Gündüzleri ise vadinin yamaçlarına temas eden hava katmanı hızla ısınır ve yamaçlardan tepelere doğru bir rüzgar eser. Şekil 1.5'in sağ tarafında görüldüğü üzere bu rüzgarlara vadi rüzgarları denir (Watt ve Wilson, 2001).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Rüzgar Gücüne Ait Hesaplamalar ve Formüller

Rüzgar türbinleri hareket halindeki havada bulunan kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürürler. Rotoru döndüren kinetik enerji havanın yoğunluğuna, rüzgar hızına ve rotor alanına bağlıdır. Rüzgar hızı, yüzeyin pürüzlülüğüne ve yüksekliğe bağlı olarak değişir. Havanın yoğunluğu ise, mevsimsel olarak basınç ve sıcaklığa bağlı olarak değişir. Bu değişkenlere göre rüzgar hızı ve güç eşitliklerini tanımlayacağız (Çakan, 2000).

2.2. Hız ve Güç Eşitlikleri

“V” rüzgar hızı ile taşınan, “m” kütleli havada kinetik enerji, aşağıdaki şekilde verilir:

$$\text{Kinetik enerji} = \frac{1}{2} . m . V^2 \text{ (J)} \quad (2.1)$$

Taşınan havadaki güç birim zamandaki kinetik enerjinin akış oranıdır.

Böylece:

$$\text{Güç} = \frac{1}{2} . (\text{kütlesel debi}) . V^2 \quad (2.2)$$

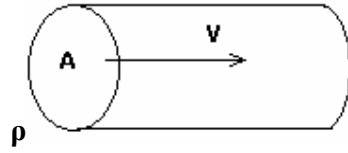
P_w = Rüzgar gücü, (W)

ρ = Havanın yoğunluğu, (kg/m³)

A = Rotor kanatlarının süpürdüğü alan, (m²)

V = Rüzgar hızı, (m/sn)

Hacimsel debi “A*V”, m³/s’, kütlesel debi, “ ρ .A.V” kg/s’dir. Rüzgar gücü aşağıdaki şekilde yazılır (Patel, 1999).



Şekil 2.1. “ $\rho.A.V$ ” sütunundaki hava kütleinin, kinetik enerjisi “ $\frac{1}{2}(\rho.A.V).V^2$ ” (Twidel ve Weir, 1986).

$$P_w = \frac{1}{2}(\rho.A.V).V^2 = \frac{1}{2}.\rho.A.V^3 \quad (W) \quad (2.3)$$

İki rüzgar çiftliği, tüm rüzgar türbinlerinin dönen kanatlarının süpürdüğü birim alanda ürettikleri güç potansiyeli ile karşılaştırılır. Aşağıdaki ifade ile yazılır:

$$\text{Güç potansiyeli} = \frac{1}{2}.\rho.V^3 \quad (W/m^2) \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.3), karşıdan esen rüzgar gücünü tanımlar. Kanatların süpürdüğü havanın yoğunluğu ve rüzgar hızının küpü ile doğru orantılı değişir. Karşıdan esen rüzgar gücünün tümü kanatlara aktarılamaz, bir kısım güç azalan bir hız ile sürekli olarak havanın akış yönünde kanatlardan ayrılır (Patel, 1999).

2.3. Hava Yoğunluğu

Rüzgar gücü kanatların süpürdüğü havanın yoğunluğu ile doğru orantılı değişir. Deniz seviyesinde havanın yoğunluğu, 1 atm basınç ve 60 °F sıcaklıkta 1,225 kg/m³’dür. Bu şartlar referans olarak kullanılarak, “ ρ ” belirli sıcaklık ve basınç bölgeleri için doğrulanır. Sıcaklık ve basınç her ikisi yükseklik ile değişir. Havanın yoğunluğunu etkileyen bileşenler, deniz seviyesinden 6 000 m yüksekliğe kadar geçerlidir. Aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

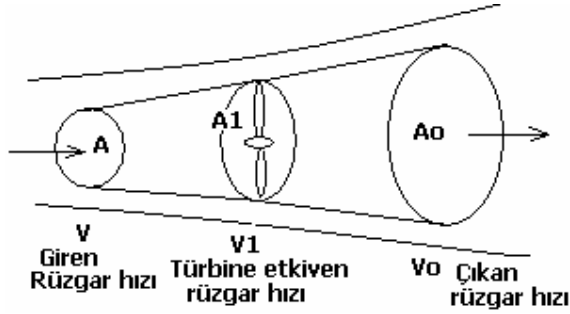
$$\rho = \rho_0 . e^{-\left(\frac{0.297.H_m}{3048}\right)} \quad (2.5)$$

H_m =Bölgenin yüksekliği, (m)

Örneğin 2 000 m yükseklikte havanın yoğunluğu $0,986 \text{ kg/m}^3$ iken, deniz seviyesinde ise $1,225 \text{ kg/m}^3$ değerindedir (Patel, 1999).

2.4. Rüzgar Türbininden Elde Edilen Güç

Rotor kanatlarına aktarılan gerçek güç giren ve çıkan rüzgar güçleri arasındaki farktır. Böylece türbine etkiyen kuvvet; havanın kütleli debisi ile ivmesindeki azalma farkıdır.



Şekil 2.2. Genişletilmiş hava akımının Betz modeli (Twidel ve Weir, 1986).

$$F = \dot{m}.V - \dot{m}.V_o \quad (2.6)$$

Bu kuvvet, hava akımının düzgün olduğu varsayılarak uygulanır. Türbine etkiyen güç;

$$P_T = F.V_1 = \dot{m}.(V - V_o).V_1 \quad (2.7)$$

Birim zamanda hava akımında kaybolan enerji, rüzgardan elde edilen türbin gücünü verir:

$$P_T = \frac{1}{2}.\dot{m}.(V^2 - V_o^2) \quad (2.8)$$

Eşitlik (2.7) ve (2.8)'i eşitlersek;

$$(V - V_o).V_1 = \frac{1}{2}(V^2 - V_o^2) \quad (2.9)$$

Böylece rüzgar türbinine etkiyen rüzgar hızı;

$$V_1 = \frac{V + V_o}{2} \quad (2.10)$$

P_T = Rotor tarafından elde edilen mekanik güç veya türbin çıkış gücü, (W)

V = Rotor kanatlarına giren rüzgar hızı, (m/s)

V_o = Rotor kanatlarından çıkan rüzgar hızı, (m/s)

V_1 = Rotor kanatlarına etkiyen rüzgar hızı, (m/s)

Rotor kanatlarına etkiyen hava akımının kütleli debisi;

$$\text{Hava akımının kütleli debisi} = \rho.A.\frac{V + V_o}{2}, \text{ kg/s} \quad (2.11)$$

Elektrik generatörünü süren rotordan elde edilen mekanik güç;

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \left[\rho.A.\frac{(V + V_o)}{2} \right] (V^2 - V_o^2) \quad (2.12)$$

Yukarıdaki eşitliği yeniden düzenlersek;

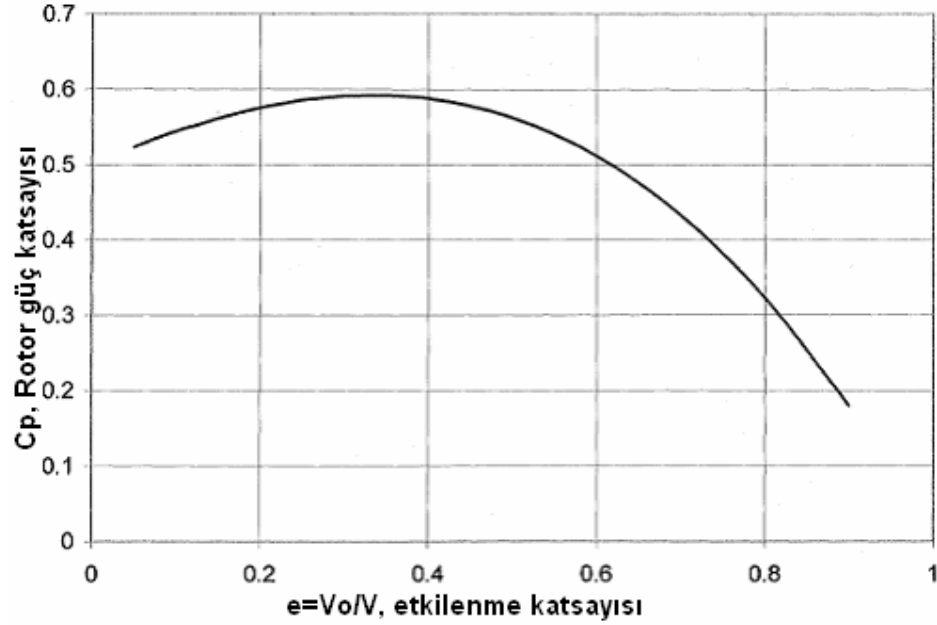
$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho.A.V^3 \cdot \frac{\left(1 + \frac{V_o}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_o}{V}\right)^2\right]}{2} \quad (2.13)$$

Rotor kanatlarından elde edilen mekanik güç, giren rüzgar gücünün “ C_p ” güç katsayısı ile çarpımından oluşur;

$$P_T = P_w \cdot C_p \quad (2.14)$$

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_o}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_o}{V}\right)^2\right]}{2} \quad (2.15)$$

$$e = \frac{(V - V_1)}{V} = \frac{V_o}{V} \quad (\text{etkilenme katsayısı}) \quad (2.16)$$



Şekil 2.3. Etkilenme katsayısı “e” ile “C_p” rotor güç katsayısı değişimi (Patel, 1999).

Eşitlik (2.10) kullanarak;

$$e = \frac{(V - V_o)}{2.V} \quad (2.17)$$

Eşitlik (2.15) ve (2.16) kullanarak;

$$C_p = \frac{(1+e).(1-e^2)}{2} \quad (2.18)$$

Şekil 2.32’de etkilenme katsayısı e’ye göre “C_p” fonksiyonunun birinci türevi veya eğimin sifıra eşit olduğu noktada rotor verimi “C_p” maksimumdur.

$$\frac{dC_p}{de} = 0 \quad (2.19)$$

Eşitlik (2.19)’dan; maksimum “C_p” için etkilenme katsayısı e=1/3 ve Cp=16 / 27 hesaplanır.

“ C_p ”, rotor kanatlarına etkiyen rüzgar gücünün bir katsayısıdır. Kalan güç türbinden çıkarak kaybolur. C_p ’nin değeri, etkilenme katsayısına bağlıdır. Etkilenme katsayısı “ e ” ile C_p ‘nin değişim eğrisi Şekil 2.3’de görülmektedir. Etkilenme katsayısı “ e ”, 1/3’e eşit olduğunda, maksimum rotor verimi C_p 0,59 elde edilir (Patel, 1999). “Betz yasasına” göre, rüzgar türbini rüzgarın kinetik enerjisinin en fazla %59’nu mekanik enerjiye çevirebilir. Bu kural, disk biçimli rotoru olan rüzgar türbinlerinde geçerlidir (Anonim t, 2005).

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot 0,59 \quad (\text{W}) \quad (2.20)$$

C_p ’nin teorik maksimum değeri 0,59’dur. Uygulamada, ulaşılabilen maksimum “ C_p ” değeri, yüksek hızlı iki kanatlı türbinler için, 0,5 değerinin altında iken, düşük hızlı çok kanatlı türbinler için 0,2 ile 0,4 arasındadır.

Herhangi bir bölgenin rüzgar güç potansiyeli, eşitlik (2.21) ile birim alandaki rüzgar gücü olarak ifade edilir (Patel, 1999).

$$P_{\text{ort}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot V^3 \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.21)$$

2.5. Uç Hız Oranı

Rüzgar türbinleri, hava hareketinin geniş bir akımında yer alırlar. Çalışan rüzgar türbini bölgesi içinden geçen hava, saparak yönünde değişimler oluşabilir. Bu yüzden, rüzgar türbinlerinin verimleri farklı sınırlardadır. Temel olarak, hava hareketinin kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye dönüştükten sonra, kalan enerji türbinden ayrılmaktadır.

Bu bölümde, yapılan analizlerle dinamik uyum için gerekli şartlar açıklanacaktır. Rüzgar türbinini optimum verimde çalıştırmak istiyorsak, aşağıda bahsedilen çalışma durumlarından uzak tutmamız gerekir:

- Kanatlar hızlı bir şekilde dönüyorsa, türbin çıkış bölgesinde hava hareketi bozularak türbülanslı, girdaplı bir hava oluşturur. Arka taraftaki rüzgar türbinlerine düzgün bir rüzgar akımı ulaşmaz, veya

- Kanatlar yavaş bir şekilde dönüyorsa, türbin çıkış bölgesinde hava hareketinde çok az bir bozulma oluşur, çoğunluğu bozulmadan geçer.

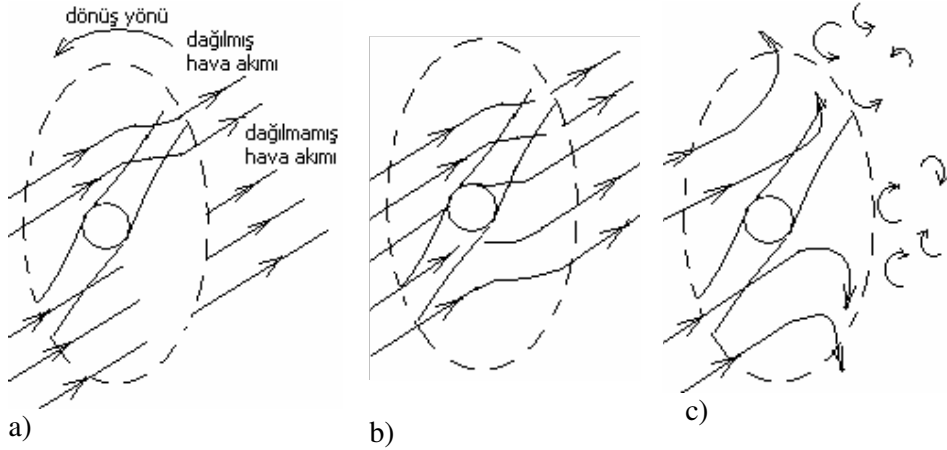
Yukarıda söylediğimiz maddeler, rüzgar türbinini verimli noktadan uzaklaştırır. Böylece en iyi verim elde etmek için, her rüzgar hızında dönme frekansı ile uyum göstermek önemlidir. Güç çıkışı; bir önceki kanat öndeki kanatın pozisyonuna gelinceye kadar geçen zaman “ t_b ” ile, türbin çıkışı bozulan hava akımının tekrar eski haline gelinceye kadar geçen zaman t_w ’nin fonksiyonudur. “ t_w ” kanadın biçimi ve boyutuyla değişir, rüzgar hızıyla ters orantılıdır.

“W” açısal hızında “n” kanatlı türbin için;

$$t_b \approx \frac{2\pi}{n.W} \quad (2.22)$$

$$t_w \approx \frac{d}{V} \quad (2.23)$$

Burada “V” giren rüzgar hızı, “d” ise türbine giren rüzgarın türbin çıkışı bozulduktan sonra tekrar eski haline gelinceye kadar olan mesafedir.



Şekil 2.4. Türbin frekansı ve güç çıkışı a) Dönüş frekansı çok düşük; hareketli kanatlar boyunca bazı rüzgar akımları bozulmadan geçiyor b) Dönüş frekans optimum; tüm hava akımı etkileniyor c) Dönüş frekansı çok yüksek; enerji türbülans ve girdap hava akımlarında kayboluyor (Twidell ve Weir, 1986).

$t_w \approx t_b$ eşit olduğunda maksimum güç çıkışı elde edilir. Eşitlik (2.22) ve (2.23) kullanarak;

$$\frac{n.W}{V} = \frac{2\pi}{d} \quad (2.24)$$

Bu eşitliklerin her iki tarafını, kanat uç yarıçapı “R” ile çarparsak ; uç hız oranı “ λ ”, aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$\lambda = \text{kanat uç hızı} / \text{kanatlara giren rüzgar hızı} = R.W / V \quad (2.25)$$

Optimum güç çıkışı:

$$\lambda \approx \frac{2\pi}{n} \left(\frac{R}{d} \right) \quad (2.26)$$

$d \approx k.R$ kabul ettiğimizde, $k \sim 1$ olduğunda maksimum güç çıkışı için uç hız oranı elde ederiz;

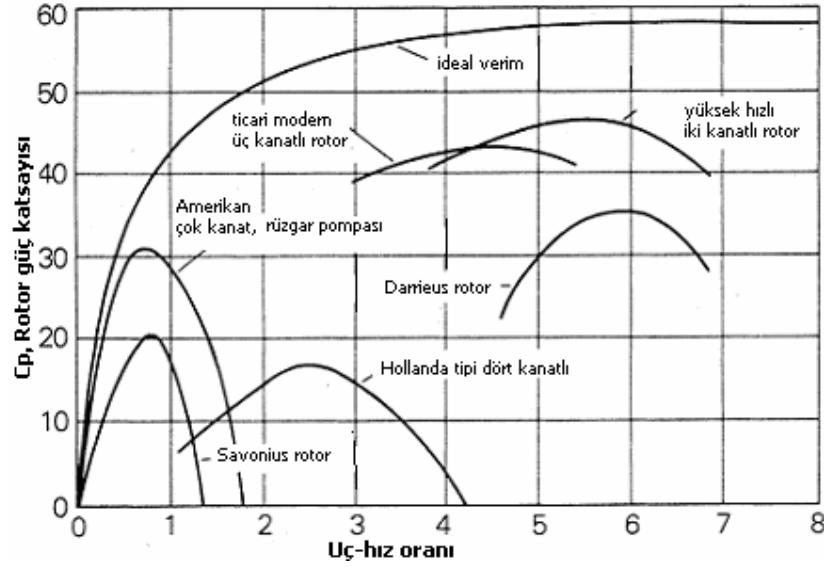
$$\lambda = \frac{2\pi}{k.n} \quad (2.27)$$

Uygulamada “n” kanatlı türbin için $k \sim 1/2$ kabul edilir.

$$\lambda = 4.\pi/n \quad (2.28)$$

Örneğin, iki kanatlı türbin için $\lambda \approx 4.\pi/2 \approx 6$, üç kanatlı türbin için, $\lambda \approx 4\pi/3 \approx 4$ eşit olduğunda, maksimum güç katsayısı “ C_{pmax} ” oluşur.

Rüzgar türbinlerinde dayanıklılık çok önemli bir konudur. Türbin kanatlarında mekanik gerilmeler ve kulenin titreşim durumlarındaki rezonans frekansları belirli sınırlar altında tutulursa rüzgar türbini daha uzun ömürlü olmaktadır. Bunun için kanatlar iyi tasarlanmalıdır, ve optimum uç hız oranı yukarıda bulunan değerlerin %30 üzerinde olabilir (Twidell ve Weir, 1986).



Şekil 2.5. Farklı kanat sayılı rotorlar için uç-hız oranı “λ” ile rotor güç katsayısı “Cp” değişim eğrisi (Patel, 1999).

2.6. Rüzgar İklimi

Rüzgar türbinlerinden elde edilen gücü etkileyen parametrelerin en önemlisi, rüzgar hızıdır. Rüzgar, herhangi bir bölgede hiçbir zaman kararlı değildir. Hava sistemlerinden, bölgesel arazi yapısından ve toprak seviyesindeki yükseklikten etkilenir. Rüzgar hızı dakika, saat, gün, mevsim ve yıllık olarak değiştiğinden rüzgar modelleri genellikle bir yıllık periyot üzerinden tekrarlanır. Bu nedenle, rüzgar enerji potansiyeli değerlendirilmek istenen bir alanın rüzgar hız değerlerinin, zaman içindeki dağılımının doğru olarak saptanması çok önemlidir. Burada yapılacak bir yanlışlık, elde edilen enerjinin beklenenin altında gerçekleşmesine neden olabilecektir. Bu da, yapılacak yatırımın zarar etmesine yol açacaktır.

Bir bölgeye rüzgar türbini kurulduğunda; bu rüzgar türbininden elde edilebilecek olan elektrik enerjisi miktarını tahmin etmeyi amaçlayan rüzgar ölçümlerinin sağlıklı olabilmesi için, en az on yıl ölçüm yapmak gerekir. Bu da, hiçbir proje için ekonomik olmayacağından, genel olarak bir yıl rüzgar ölçümleri yapılır ve sonuçları değerlendirilir.

Rüzgar hızının ölçülmemesi durumunda Danimarka Meteoroloji Teşkilatı'nın Riso Meteoroloji İstasyonu'nda geliştirilmiş olan WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) paket programında Avrupa Rüzgar Atlası kullanılarak, bir bölgenin rüzgar hız dağılımı tahmin edilebilir. Fakat bu yöntem, karmaşık arazilerde sağlıklı sonuç vermemektedir (Eltez vd., 2001).

2.6.1. Rüzgar hız dağılımı

Rüzgar hız dağılımı, belirli rüzgar hızlarına karşılık rüzgar hızlarının olasılığını tanımlar. Matematiksel iki parametrelili Weibull dağılımı, rüzgar hız dağılımını tanımlamak için kullanılır. Weibull dağılımı, rüzgar bilgisi ve rüzgar enerjisi uygulamalarına uyum gösterdiği için kullanılır (Karsli ve Geçit, 2002).

Rüzgar hızlarının Weibull ve Rayleigh fonksiyonuna uyup uymadığının kontrolü, istatistik hipotez testleri yardımıyla yapılabilir (Eltez vd., 2001).

Şekil 2.6'nın sağ tarafında bölgenin gerçek ölçüm dağılım histogramı, ve hesaplanan Weibull katsayılarına göre; Weibull uyumu, eğri şeklinde çizilerek karşılaştırma yapılmıştır. İki weibull dağılım katsayılı eşitlik aşağıdaki şekilde tanımlanır (Anonim f, 2004).

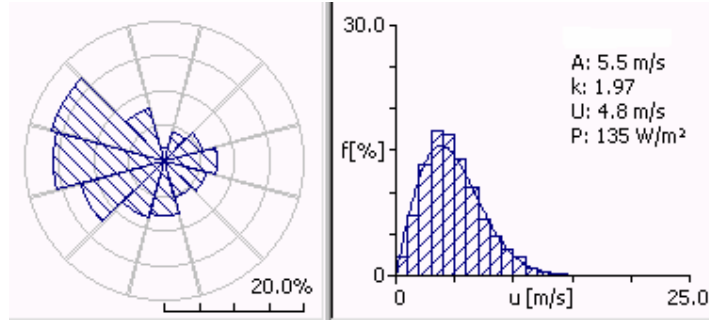
$$f_{(v)} = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad 0 < v < \infty \quad (2.29)$$

v: Rüzgar hızı.

k: Weibull şekil katsayısı.

c: Weibull ölçek katsayısı.

Özellikle Avrupa'daki rüzgar hızı, k=2 ile Rayleigh olasılık dağılımına sahiptir. Eşitlik (2.29) o zaman basit bir ifadeye dönüşür. Tek ölçek katsayısı "c" ile karşılaştırma yapılır (Patel, 1999).



Şekil 2.6. Rüzgar iklimi analizi (Anonim f, 2004).

Şekil 2.6'nın sol tarafındaki grafik, radyan olarak 12 yönde rüzgar frekansını gösteren rüzgar gülüdür. Arazi rüzgar istatistiğine bağlı olarak 8, 12 veya daha fazla yön parçalarına bölünebilir. Günümüzde kullanılan kutupsal rüzgar istatistiğinin çoğu, aşağıdaki gibi 30° merkez açılı daire dilimleriyle 12 yöne bölünür.

0 derece: (345 derece ile 15 derece arası) (E)

30 derece: (15 derece ile 45 derece arası) (ENE)

60 derece: (45 derece ile 75 derece arası) (NNE)

90 derece: (75 derece ile 105 derece arası) (N) olarak sırayla bölünür (Anonim e, 2004).

2.7. Rüzgar Hızı ve Enerji Hızı Ortalamaları

Ortalama rüzgar hızı " V_{ort} ", rüzgar hızı toplamlarının ölçüm sayısına oranı olarak tanımlanır:

$$V_{ort} = \frac{\sum_i^n v_i}{n} \quad (2.30)$$

Burada $\sum_i^n v_i$ rüzgar hızları toplamıdır. Rüzgar gücü rüzgar hızının küpüyle orantılı olduğu için, rüzgar güç potansiyeli hesaplarında hız olarak " V_e " ortalama

enerji hızı (küp kök hız, RMC) esas alınırsa daha doğru sonuçlar elde edilir (Toklu, 2002).

$$V_e = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^3}{n} \right]^{1/3} \quad (2.31)$$

2.8. Yüksekliğin Etkisi

Toprak seviyesindeki engeller rüzgar akışını dağıttığı için, rüzgar hızı yükseklikle artar. Engembeli bir arazide, yükseklik ile rüzgar hızının artışı bizi şaşırtabilir. Bu yüzden, arazinin topografya yapısı ve istenen yükseklikte rüzgar hızının değerlendirilmesi önemlidir. Genellikle, ölçümler, 10 m yükseklikte ölçülür. Fakat, birçok rüzgar türbini yükseklik ile güç artışını arttırmak ve türbülansı azaltmak için 10 metreden daha uzun kulelere kurulur.

Farklı yüksekliklerde rüzgar hızlarını hesaplamak için, aşağıdaki “Güç Yasası” metodu kullanılır.

$$V_T = V_R \left(\frac{h_T}{h_R} \right)^\alpha \quad (2.32)$$

$V_R = h_R$, referans yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı.

$V_T = h_T$, teorik yükseklikte tahmin edilen teorik rüzgar hızı.

α = Arazi yüzeyinin sürtünme katsayısı.

Sürtünme katsayısı, düz araziler için düşük ve pürüzlü araziler için yüksektir (Gipe, 1999). Çeşitli arazi sınıfları için “ α ” değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Değişik arazilerin pürüzlülük katsayıları (Patel, 1999).

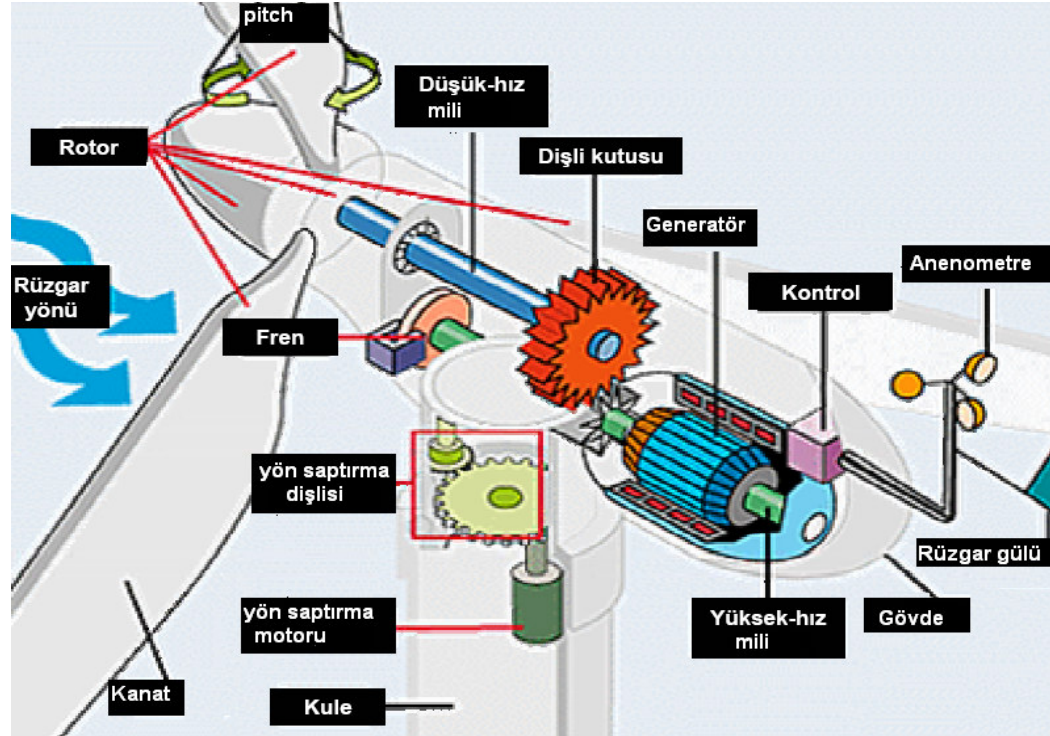
Arazi tipi	Sürtünme katsayısı (α)
Göl, okyanus ve düzgün araziler	0,1
Toprak seviyesinde uzun otlaklar	0,15
Uzun ekinler, çalılık araziler	0,2
Çok ağaçlı ormanlar	0,25
Az ağaçlı ve bitki örtülü küçük bir kasaba	0,3
Yüksek binalı şehirler	0,4

Rüzgar türbinlerine yaklaşık 1000 m etki yarıçapında ve türbin göbek yüksekliğinin $\frac{1}{4}$ den yüksek olan binalar, çitler gibi engeller pürüzlülük öğeleri değildir, yöresel engel olarak göz önüne alınması gerekir.

Ayrıca, düzgün eğimli tepe üzerine rüzgar türbini yerleştirilirse; rüzgar akış hatları sıkıştığı için, tepe etkisinden dolayı rüzgar hızından daha fazla yararlanır. 25 m yükseklikte, 100 m yarıçapındaki tepede, 30 m göbek yüksekliğindeki türbin düz bir araziye göre % 33 daha fazla enerji üretmektedir (Anonim e, 2004).

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

3.1. Rüzgar Güç Sistemi Elemanları



Şekil 3.1. Rüzgar türbin bileşenleri (Anonim t, 2005).

Şekil 3.1’de, rüzgar türbininde yer alan belli başlı elemanlar gösterilmiştir. Bunlar sırasıyla; kule, kanatlar, rotor, anemometre, fren düzeneği, dişli kutusu, generatör, gövde, aerodinamik (pitch) kontrol, yüksek ve düşük hızlı mil, kontrol sistemi, kule rüzgar vanası, yön saptırma (yaw) motorudur.

3.1.1. Kule

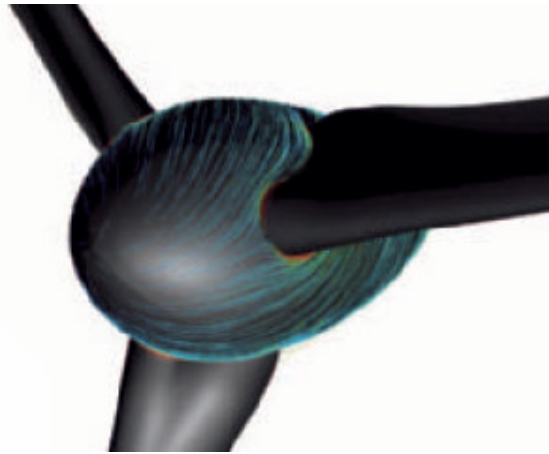
Rüzgar kulesi türbini destekler ve gövde elemanlarını taşır. Gövde elemanlarının ayrıntıları, Şekil 3.1’de projelendirilmiştir. Kulelerde çelik ve beton malzeme kullanılır. Kule tasarımı boru veya kafes şeklinde olabilir. Kule tasarımındaki temel sorun, dinamik yapıdır. Değişik rüzgar hızı altında meydana gelen titreşim saykılıları, kule ve rotor kanatlarının yorulmasına, gerilmesine sebep olur. Değişik rüzgar hızı altında kule, rotor ve gövde elemanlarının titreşim

saykılarını uygun aralıkta tutmak için komple model analizleri yapılır. Türbin kulesinin oturduğu temel, betonarme inşaat olup 40-50 m kuleyi taşımak için 120 m² dairesel bir temel atılır. Büyük vinçler yardımıyla kuleler inşaat temeline yerleştirilir. Çelik boru kuleler flanş bağlantılı 2 veya 3 parçadan oluşur (Yerebakan, 2001).

3.1.2. Rotor kanatları

Rotor kanatları, hareket halindeki havanın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren en önemli parçalardır. Kanatların yapı özellikleri türbin tipine göre değişiklik göstermektedir. Modern türbinlerin kanatları cam elyafla güçlendirilmiş plastikten üretilir. Çelikten üretimlerin eğilmeye dayanımları çok iyidir. Fakat, kanatlarda yorulma ve korozyon problemi oluşmaktadır. Cam elyafın kopma mukavemeti 420 N/mm² ile St-52 çeliğinin kopma mukavemeti olan 520 N/mm² yakındır (Toklu, 2002).

Rüzgar türbini üretici firması Enercon, gövde ve rotor kök kısımlarında direnci azaltarak, gövde civarındaki hava akımının kanatlara etkimesini sağlamıştır. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere, kanat profilinin tüm uzunluğu boyunca hava akışı sağlanır. Bu yeni kanat tasarımında kanat uçlarında aşırı basınç yüzünden oluşan türbülans ve gürültü emisyonları azaltılmıştır (Anonim 1, 2005).



Şekil 3.2. Enercon yeni rotor kanat geometrisi (Anonim 1, 2005).

Bu kanat modülünün dışındaki cam liflerin iç boşluğu, pompa ve hortum kullanılarak reçine ile doyurulur (Şekil 3.3.) (Anonim 1, 2005).



Şekil 3.3. Enercon sandaviç rotor kanat yapısı (Anonim 1, 2005).

3.1.3. Generatör

Rüzgar türbinlerinde; senkron, asenkron ve D.C. (Doğru Akım) generatör olmak üzere üç değişik generatör kullanılmaktadır. Küçük güç sistemlerinde eskiden kullanılan doğru akım generatörlerinin yerini sabit mıknatıslı generatörler almıştır. Orta ve büyük güç sistemlerinde ise, senkron ve asenkron generatörler kullanılmaktadır. Bu generatörlerde üretilen elektrik enerjisi, güç elektroniği sistemleri ile istenilen gerilim ve frekans seviyesine dönüştürülmektedir (Yerebakan, 2001).

Senkron generatör, kendinden uyarım avantajına rağmen pahalıdır. Enercon E-48 silindirik generatörün en önemli özelliği, dişli kutusuz sistem tasarımıdır. Silindirik generatör, hareketli disk rotor üzerine yerleştirilmiş 60 adet kutup pabucu ile uyarılır (Anonim 1, 2005).

İndüksiyon generatörün dezavantajı, mıknatıslanma akımını şebekeden çekmesi ve böylelikle reaktif güç tüketmesidir. Bu sorun ise, generatörün terminal uçlarına kondansatör bağlanarak giderilir. Böylelikle, güç katsayısı artırılmış olur.

Eğer türbin kalkınma hızı, indüksiyon makinasının nominal devir sayısından büyükse, indüksiyon makinası generatör olarak çalışır şebekeye güç verir, düşük ise motor olarak çalışarak şebekeden güç çeker. İndüksiyon makinasının motor olarak çalışmasını önlemek için, ters akım koruma rölesi ile indüksiyon generatörü şebekeden ayrılır (Yerebakan, 2001).

Günümüz modern rüzgar türbinlerinde çift kutup sargılı indüksiyon generatörleri kullanılır. Nordex N-43 rüzgar türbininde 600/125 kW ve 4/6 kutuplu asenkron sincap kafesli generatör kullanılır. Düşük rüzgar hız zamanlarında generatör 6 kutup 125 kW sargıda, yüksek rüzgar hızlarında 4 kutup 600 kW sargıda çalışır. Generatör tork dalgalanmalarını soğuran, elastik kardan mil yolu ile dişli kutusuna bağlanır. Yüksek güç çıkışında güvenilir çalışmayı sağlamak için, generatör elektriksel fanlı çevre hava ile soğutulur. Gövde üzerinde generatöre bağlı kauçuk makinanın gürültü yayını azaltır (Anonim a, 2005).

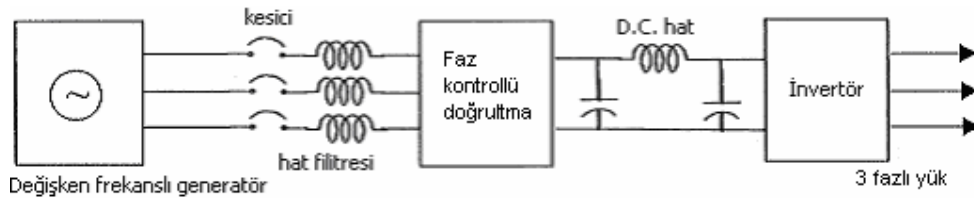
3.1.4. Güç elektroniği

Modern rüzgar güç sistemlerinde aşağıdaki güç elektroniği devreleri kullanılır.

Faz kontrollü doğrultma, değişken A.C. gerilimi D.C. gerilime dönüştürür.

İnvertör, D.C. gerilimi A.C. gerilime dönüştürür.

Dönüştürücülerde kullanılan yarı iletken elemanlarının bazıları; BJT transistör, MOSFET transistör, IGBT transistör, SCR tristör, GTO tristör güç yarı iletkenleridir (Sen,1987).



Şekil 3.4. Değişken-hızlı, sabit-frekanslı rüzgar güç sistemi şeması (Patel, 1999).

Sadece aerodinamik (pitch) kontrol tekniği, etkin gerilim ve güç çıkışı kontrolü için yeterli değildir. Rüzgar türbini generatörünün sürekli olarak değişen gerilim, frekans ve gücünü kontrol etmek için, faz kontrollü doğrultma/invertör arayüz elemanı kullanılır (Şekil 3.4.). Faz kontrollü doğrultma, rüzgar türbini generatörünün değişken gerilimini D.C. (Doğru Akım) güç sinyaline dönüştürürken, invertör D.C. sinyali uygun A.C. (Alternatif Akım) sinyale dönüştürür. Referans gerilim ve A.C. bara gerilimi arasındaki hataya göre invertörün gerilim çıkışı kontrol edilir. Aktif güç noktası ve gerçek invertör güç çıkışındaki hataya bağlı olarak referans sinyalin açısı ayarlanarak aktif güç çıkışı kontrol edilir (Sharma vd., 2004).

3.1.5. Dişli kutusu

Dişli sistemi, kanat milinin düşük devir sayısını generatörün ihtiyaç duyduğu yüksek devir sayısına çıkarır. Örneğin, Nordex N-54 türbininde dişli kutusu çevrim oranı 1:70'dir. Bu türbinde pervane rotorunun devir sayısı 22 d/dk iken, generatör milinin devir sayısı 1500 d/dk olmaktadır (Toklu, 2002).

Günümüzde dişli kutusu kullanılmadan doğrudan senkron generatör miline bağlı çok kutuplu tasarımlar vardır. Generatör direkt elektrik şebekesine bağlı olmadığı için, senkron generatör düşük hızlıdır. Dişli sistemlere göre; hareketli parçaların az olması, ve düşük hızlı olması sürtünme kayıplarını azaltır. Mekaniksel aşınma az olduğu için, periyodik bakım süresi ve türbin çalışma süresi artar. Dişli kutusuz tasarımın dezavantajı çok kutuplu senkron generatör kullanılmasından dolayı generatör kütlesi ağırdır (Anonim 1, 2005).

3.1.6. Diğer türbin bileşenleri

Anemometre: Rüzgar hızını ölçüp kontrolör sistemine ileten ölçüm cihazıdır.

Kontrol sistemi: Türbinleri iletim ve kesim hızlarında maksimum güçte çalışmasını sağlayan ve kritik sınırı geçen aşırı rüzgarlarda durduran kontrol sistemidir.

Aerodinamik (pitch) kontrol: Kanatları, aşırı yüksek veya düşük hızlarda dönüşünü kontrol eden kanat mekanizmasıdır.

Rüzgar gülü: Rüzgar yönünü ölçerek, değişimlere göre yön saptırma (yaw) motoru ile haberleşmeyi sağlar.

Yön saptırma (yaw) sürücüsü ve motoru: Rüzgar türbinleri rotorlarını rüzgara doğru yönlendirir. Rüzgarın hız değişimine göre, rotor kafasını rüzgara dik tutacak şekilde ayarlayan mekanizmadır (Yerebakan, 2001).

Hidrolik sistem: Hidrolik sistem; kanat uçları, yön saptırma frenleri, yön saptırma sürücüleri, rotor freni ve başlığı gibi farklı temel parçaların çalışması için yağ basıncı sağlar.

Frenler: Birincil frenleme sistemi aerodinamik kanat uç frenidir. İkincil fren yüksek hız miline yerleştirilmiş disk frenidir. Her iki sistem birbirlerinden bağımsız olarak herhangi bir tehlikeli durumdan güvenli duruma ulaşabilmek için rüzgar türbinini yavaşlatabilir.

Aerodinamik Fren: Frenleme pozisyonlarına dönen kanat uçlarında merkezkaç kuvvetlerine neden olur.

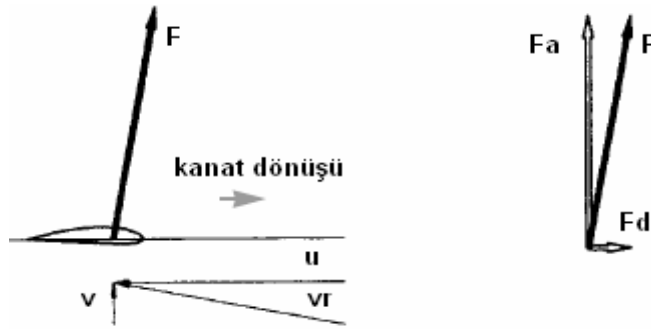
Disk Fren: Yüksek hız milindedir. Fren güç kaynağı veya sistem arızalanması durumunda yay parçası ile otomatik olarak çalışabilir.

Normal frenleme için, kanat uçları hidrolik basıncının azaltılması ile frenleme pozisyonuna dönerler. Rüzgar hızı kesim hızına ulaştığında, disk fren aktif olur ve rüzgar türbinini durgun hale getirir. Acil frenleme durumlarında, her iki frenleme sistemi ani olarak aktif olur (Anonim a, 2005).

3.2. Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamiği

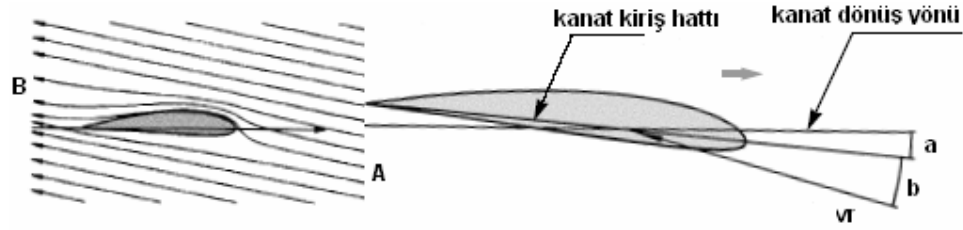
Aerodinamik, hava akımı içerisindeki nesnelere hareketini ve hava akımının ürettiği kuvvetleri fiziksel yasalarla inceleyen bir bilim dalıdır. Rüzgar türbin kanatları, hava akımının girdiği ön kenar düz, arka kenar daha kıvrımlı olarak asimetrik biçimlidir, bu biçime kanatların aerodinamik şekli denir. Aerodinamik şekiller kanat performansını çok etkiler, kanat biçimindeki ufak bir değişiklik güç eğrisi ve gürültü seviyesini önemli olarak değiştirir. NACA ve LM serisi kanat çeşitleri rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır.

Şekil 3.5’de rüzgar türbini rotor kanatlarının dönüşü gösterilmektedir. Rotor kanadı döndüğünde, kendi hareketinden dolayı rotor dönüş yönünde hareketli rüzgar ile karşılaşır. Kanadın herhangi bir yerinde hareketli rüzgarın “ u ” büyüklüğü, rüzgar türbin kanadının açılma hızına, ve rotor yarıçapına bağlıdır (R.W). Serbest rüzgar “ v ” ile hareketli rüzgar “ u ” vektör bileşenleri kanat yüzeyine etkiyen net bağıl rüzgarı “ v_r ” meydana getirir. Bağıl rüzgar kanat yüzeyine “ F ” kuvveti ile etkir. “ F ” kuvvetinin bileşenlerinden “ F_d ” sürücü kuvveti dönüş yönünde tork üretirken, “ F_a ” eksen kuvveti serbest rüzgar yönünde kanat kıvrımlarından türbin arkasına akmaya çalışır (Stiesdal, 1999).



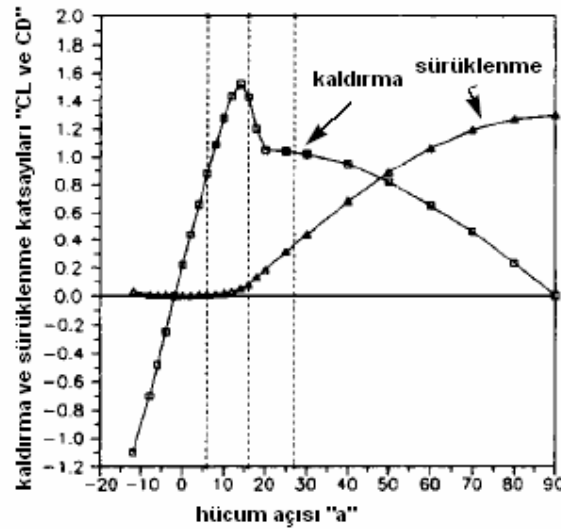
Şekil 3.5. Kanat ucu yakınında hava akış hızları ve kuvvet bileşenleri (Stiesdal, 1999).

Rüzgar türbin kanatları kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerine maruz kalır. Kaldırma “Bernoulli yasası” olarak bilinen fiziksel bir yasadır. Bu yasa yüzey üzerinde hava akış hızı arttığında, basıncın düşeceğini ifade eder. Aerodinamik biçimin arka yüzeyi, rüzgarın giriş kenarındaki ön yüzeyden daha kıvrımlıdır. Şekil 3.6’de A noktasına doğru hareket eden hava akımı iki kola ayrılır. B noktasında birleşir. Arka yüzey üzerinde hava akımı A’dan B’ye daha uzun mesafede akar. Böylece, arka yüzey üzerinde hava akımı ön yüzeye göre daha hızlı olması sağlanır, ve basınç düşürülür. Bu basınç farkı kanadın kaldırma kuvvetini artırır (Stiesdal, 1999). Sürüklenme kuvveti bağıl rüzgar hızı yönünde iken, kaldırma kuvveti bağıl rüzgar hızına dik açıdadır (Godfrey, 1996).



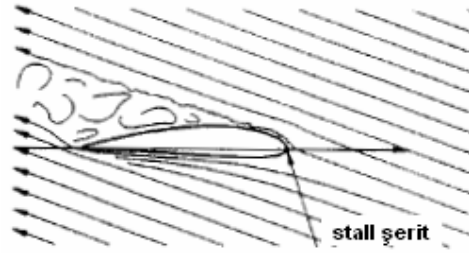
Şekil 3.6. Aerodinamik kesitte hava akışı ve kanat açıları (Stiesdal, 1999).

Farklı rüzgar hızlarında kanat hareketini anlayabilmek için, farklı hücum açılarında kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini nasıl değiştiğini anlamamız gerekir. Hücum açısı "a", ayar (pitch) açısı "b" ile gösterilir. Ayar açısı kanadın herhangi bir yerinde sabit değerdedir, fakat rüzgar hızı arttıkça hücum açısı artmaktadır. Hücum açısı "a" değiştikçe, kanadın aerodinamik özellikleri değişmektedir. Hücum açısının artışı ile, kaldırma ve sürüklenme katsayılarındaki değişim şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Bonus 500 kW rüzgar türbininin hücum açısı ve kaldırma ve sürüklenme katsayılarının değişim karakteristiği (Stiesdal, 1999).

Rüzgar hızı arttığında, hücum açısı, kaldırma katsayısı ve türbin çıkış gücü önemli oranda artar. Rüzgar hızı belli bir değerden sonra artmaya devam ederse, 15° üzerindeki hücum açılarında kanat aerodinamik biçiminden dolayı sürüklenme katsayısı artarken, kaldırma katsayısı düşer, ve güç çıkışı nominal oranda tutulur. Bu pasif kontrol şekline “stall” kontrol denir. Kanat arka kenarında hava akımı kanat biçiminden dolayı düzgün olarak akmaz, kanadın arka kenarına kayıp hava akımları güçlü bir türbülans yaratır, ve yüksek rüzgar hızlarında güç çıkışını sınırlar (Stiesdal, 1999).



Şekil 3.8. Stall kontrol yönteminde kanat yüzeyindeki hava etkileşimi (Stiesdal, 1999).

Türbin kanatlarının hücum açısı, rotora verilen uç hız oranlarında maksimum güç dağıtabilmek için tasarlanmalıdır. Bu tasarım, aerodinamik (pitch) kontrol ve kanadın uzunluğu boyunca sabit burkulma ile yapılır. Dönüş hızı, değişken aerodinamik (pitch) kontrollü kanatlar ile kontrol edilir (Cassadey, 2000).

3.3. İletim Kayıpları ve Generatör Verimleri

Rüzgar türbininin rüzgardan elde edeceği güç katsayısı, “ C_p ” sembolü ile gösterilir. Rüzgar türbinlerinde mil gücü normal olarak doğrudan yüke bağlanmaz, dişli kutusu ile yüke bağlanır. Rüzgar türbin sisteminin “ P_w ”, rüzgar gücü ile türbin kanatlarını tahrik ettikten sonra, “ W_m ” türbin açısız hızında, “ P_m ” mekanik güce dönüşür (Johnson, 2001).

$$P_m = C_p \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \right) = C_p \cdot P_w \quad (W) \quad (3.1)$$

İletim kayıpları, dönen dişli ve milin akışkan yağı içerisinde sürtünmesinden oluşur. İletim kaybı, iletimin kalitesi ile değişir. Türbin çıkış gücü “ P_m ” ve iletim verimi “ η_m ” çarpımı ile belirlenir.

$$P_t = \eta_m \cdot P_m \quad (\text{W}) \quad (3.2)$$



Şekil 3.9. Rüzgar türbini mekanik sistem verimleri (Johnson, 2001).

Generatör kayıpları ise, üç grupta göz önüne alınır, çalışma gerilimi ve frekansı ile değişen histeresiz ve eddy akım kayıpları, dönüş hızı ile değişen sürtünme ve rüzgar kayıpları ve yük akımının karesi ile değişen bakır kayıplarıdır. Benzer olarak, generatör çıkış gücü “ P_e ”, iletim çıkış gücü “ P_t ” ve generatör verimi “ η_g ” çarpımı ile belirlenir:

$$P_e = \eta_g \cdot P_t \quad (\text{W}) \quad (3.3)$$

Eşitlikler 3.1, 3.2, 3.3 ile elektriksel çıkış gücü hesaplanır (Johnson, 2001).

$$P_e = C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot P_w \quad (\text{W}) \quad (3.4)$$

3.4. Güç Kontrolü

Bir rüzgar türbini, rotor kanatları üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin etkisi ile, rüzgar akımındaki kinetik enerjiyi dönen mekanik enerjiye çevirir. Rotor kanatları uçaklarda kullanılan pervanelere benzeyen aerodinamik bir kesittedir. Aerodinamik kuvvetler yardımıyla mekanik enerjinin üretilmesini sağlamaktadır.

Rüzgar türbinlerinin enerji aktarma sistemleri içerisinde, mekanik ve elektrik olarak aşırı zorlanmalardan, aşırı yüklerden korumak gerekir. Modern rüzgar türbinlerinde, generatörün nominal gücünü korumak ve üretilen güç miktarını

sınırlamak amacıyla iki farklı aerodinamik kontrol prensibi bulunmaktadır. Aktif olanı aerodinamik (pitch) kontrol, pasif olanı durdurarak (stall) kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Fakat günümüzde rüzgar türbinlerinin işletme şartlarının iyileşmesi yönünden aerodinamik (pitch) kontrol sistemi daha fazla tercih edilmeye başlamıştır (Çakan, 2000).

3.4.1. Aerodinamik (Pitch) kontrol

Aerodinamik (pitch) kontrol, çalışma esnasında generatör gücünden alınan giriş sinyaline gerek duyan aktif kontrol sistemidir. Rüzgar hızının artması ile, generatör nominal çıkış gücünün üzerine çıktığında, rotor kanatları boyuna eksenine etrafında dönecektir. Bir başka deyişle, gelen hava akımının hücum açısını arttırmak için kanatların pitch açısı değiştirilerek, bu sayede kaldırma kuvveti azalırken sürüklenme kuvveti artacağından türbinin güç kontrolü optimum noktaya ayarlanacaktır. Değişik rüzgar hızları ve yük durumuna göre optimum güç çıkışı için, uygun hücum açısı seçilmelidir. Aerodinamik kontrol sistemlerinin avantajları şunlardır:

- Tüm rüzgar hızlarında aktif gücün kontrol edilmesini sağlamaktadır.
- Düşük rüzgar hızlarında dahi çıkış gücüne ulaşılmaktadır.
- Aynı şartlar altında diğer kontrol yöntemine göre enerji üretimi yüksek olmaktadır.
- Acil olarak rotorun durdurulması halinde kuvvetli fren gereksinimlerine gerek yoktur.
- Çok yüksek rüzgar hızlarında düşük yükler için, rotor kanatları kılıçlama pozisyonuna getirilmektedir.
- Bu avantajlarından dolayı verimin artması, rotor kanatları ve türbin boyutlarının küçülmesine olanak sağlamaktadır (Çakan, 2000).

3.4.2. Maksimum güçte çalışma

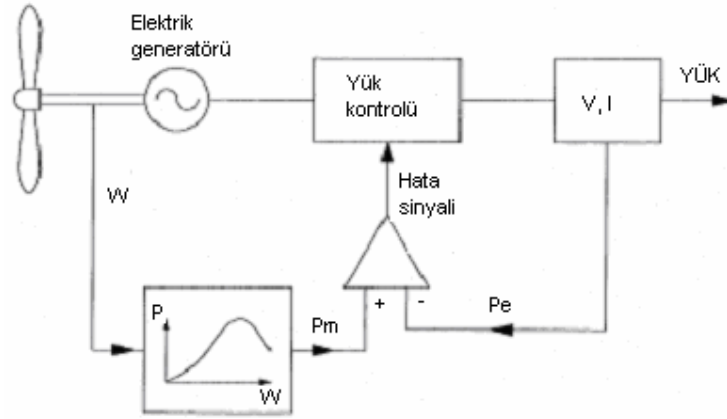
Tüm zamanlarda maksimum güç noktasına karşılık gelen noktada rüzgar türbinlerinin çalıştırılması ile bir yılda %20, %30 oranında daha fazla elektrik enerjisi üretilebilir. Bununla birlikte, sistemi değişken hızlı çalıştırabilmek için bir kontrol sistemi gereklidir. Değişken hızlı maksimum güç kontrollerinde, rotor uç-hız kontrolü veya güç kontrolü kullanılır. Rotor uç-hız kontrolü yönteminde, rotor maksimum güç üreten referans uç-hız oranında çalıştırılmalıdır. Özellikle büyük rüzgar çiftliklerinde gölgeleme etkilerinin çok olması ve referans uç-hız oranının sürekli değişmesi önemli hatalara sebep vermektedir. Bundan dolayı güç kontrolü kullanarak maksimum güçte çalışma, en uygun kontrol yöntemidir (Patel, 1999).

3.4.2.1. Maksimum güç izleme projesi

Güç hız değişim eğrisi tek bir maksimum noktaya sahiptir. Rüzgar türbinini maksimum güç noktasında çalıştırabilmek için, gerekli şart eşitlik (3.5) ile tanımlanır.

$$\frac{dP}{dW} = 0 \quad (3.5)$$

Bu prensip kontrol projesinde kullanılır (Şekil 3.10). Hız artarken veya azalırken, güç sürekli olarak ölçülür. dP/dW sürekli olarak değerlendirilir. Oran pozitifse, hız artışı ile daha çok güç elde edeceğimiz anlamıyla hız daha da arttırılır. Diğer taraftan, oran negatifse, güç üretimi azalacaktır. Rotorun açısal hızı, dP/dW 'nin 0'a yakın olduğu bölgede korunmalıdır. Bu metot, bölgesel rüzgar hızı ölçümleri ve aynı zamanda rüzgar türbin tasarımındaki hatalardan etkilenmez. Böylece, tercih edilen kontrol yöntemidir. Birçok rüzgar türbinli rüzgar çiftliğinde, her bir türbinin çalışma ve güvenlik fonksiyonları içeren kapalı çevrim kontrol sistemi ile kontrol edilmelidir (Patel, 1999).



Şekil 3.10. Güç kontrol projesi kullanarak maksimum güçte çalışma (Patel, 1999).

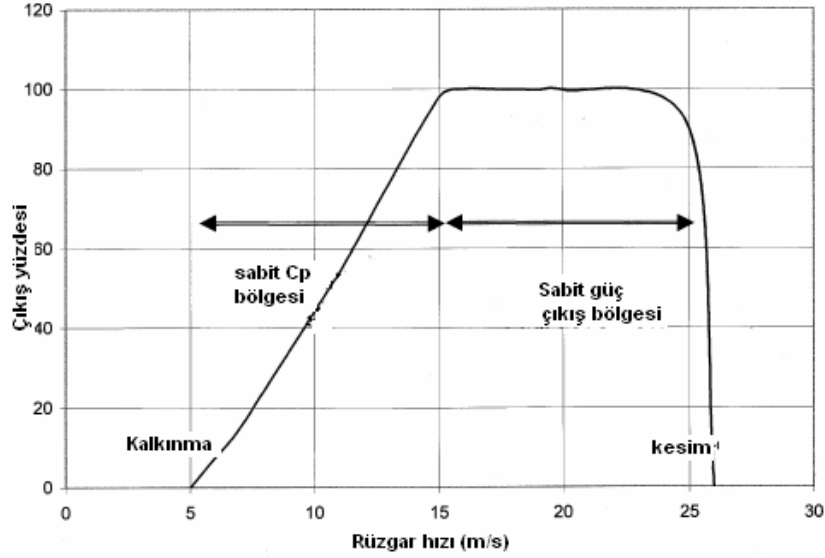
3.5. Hız Kontrolü

Rotor hızı aşağıdaki üç koşul için kontrol edilmelidir:

- Türbini en verimli noktada çalıştırarak, daha fazla enerji üretebilmek.
- Aşırı rüzgarda yüklenmeden dolayı, rotoru, generatörü ve güç elektroniği ekipmanlarını korumak.
- Yük kayıpları veya programlı bir durum için; generatör yük akımının ani olarak azaldığında, rotor hızının tehlikeli bir şekilde artışı önlemek.

Rotorun hız kontrolü için şekil 3.11’de dört ayrı bölge gösterilmiştir;

1. Türbinin güç üretmeye başladığı kalkınma hızı. Bu hızın altında rotor kalkınmaz.
2. Rüzgar hızı artışı ile artan rotor hızındaki sabit maksimum “ C_p ” bölgesi.
3. Sürekli aşırı rüzgar hızlarında, örneğin fırtına sırasında, rüzgar türbini aşırı yüklendiğinden generatör ve güç elektronik sistemini korumak için, generatör sabit güçte çalıştırılır. Rotor hızı aerodinamik (pitch) kontrol ile düşürülür. Hız elektrik yükünün artışıyla azaltılırsa, generatör gereksiz olarak aşırı yüklenecektir.



Şekil 3.11. Türbin hız kontrolündeki beş bölge (Patel, 1999).

4. Kesim hız bölgesinde, rüzgar nominal hızın üzerindedir. Kanatları, elektrik generatörü, ve diğer sistem elemanlarını korumak için rotordaki güç üretimi kesilmelidir (Patel, 1999).

3.6. Rüzgar Türbinleri Sistem Kontrolü

Anahtar ve güvenlik sistemli kontrol panosu, kulenin alt kısmına veya üst gövdeye yerleştirilebilir. Rüzgar türbinleri mikro elektronik kontrol teknolojisi donanımlıdır. Kontrol sisteminin merkezi elemanı MPU (Microprocessor Unit) mikro işlemci birimi, yön sapma (yaw) kontrolü ve aerodinamik (pitch) kontrolü gibi çevresel kontrol elemanları ile sürekli temas halindedir. Kontrol sistemi tüm şartlarda en verimli şekilde çalışmayı sağlar.

Rüzgar türbinleri uzaktan bilgi transferi için modem hattına (IP, Tel, GSM) bağlıdır. Uygun bir SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) yazılımı, windows kurulumlu herhangi bir bilgisayara kurulduktan sonra modem bağlantısı ile uzaktan kontrol sistemi yapılabilir. Kontrolör tüm çalışma parametreleri ve çevresel şartlar (parça sıcaklıkları, hidrolik basınç, şebeke bağlantısı, enerji üretimi, rüzgar hızı ve yönü, çevre sıcaklığı v.b.) kaydeder. Çalışma için gerekli nominal değerlere kontrolör vasıtasıyla gerçekleştirilir. Arıza durumunda, servis merkezi SCADA

uzaktan izleme sistemi ile bilgilendirilir, ve rüzgar türbinlerine en yakın servis takımı bakım için görevlendirilir.

Kalkınma hızından düşük rüzgar hızlarında türbin durgun haldedir, sadece bilgisayar çalışır ve bilgi toplar. Tüm sistem kapalıdır ve herhangi bir güce ihtiyaç yoktur. Rüzgar kalkınma hızına ulaştığında, türbin çalışmaya hazır duruma geçer. Tüm sistemler test edilir ve gövde rüzgar yönü ile aynı hizaya getirilir. Eğer rüzgar hızı artarsa, rotor hızlanır. İstenen hıza ulaştığında, generatör şebekeye anahtarlanır ve türbin elektrik enerjisi üretmeye başlar. Çalışma sırasında gövde rüzgar yönünü izler. Kesim rüzgar hızı aşıldığında kanat uçları yaklaşık 90° döndürülür, ve rotor yavaşlar. Daha sonra tehlikesiz şartlar oluştuğunda, tekrar çalışması sağlanır (Anonim a, 2005). Bazı kontrol olayları aşağıdaki şekildedir;

- Kontrolör, rüzgar sensöründen ölçülen bilgiyi değerlendirir, ve gövdeyi rüzgar yönüne doğru çevirir.
- Rotor kanatlarında maksimum verim sağlamak ve rüzgar türbinin yükünü azaltmak için, kontrolör aerodinamik (pitch) kontrol yapar.
- Elektrik şebekesinin arızalanması durumunda, yedek güç kaynağı aerodinamik (pitch) kontrol mekanizmasını frenlemek için güç sağlar.
- Kule ve generatör titreşimleri sensörler aracılığı ile kontrol ekranından izlenir.
- Stator ve rotor arasındaki sıcaklık sensörleri generatörün güvenli çalışmasını sağlar.
- Yüksek rüzgar hızlarında türbin gücünü azaltan fırtına kontrol sistemi vardır. Kesik kesik fırtınalar yüzünden türbinin durdurulması önemli miktarda enerji kaybına sebep olur. Özel fırtına kontrol yazılımı gereksiz türbin durdurmalarını önler. Rüzgar hızı fırtına rüzgar hızının üzerinde ise, dönüş hızının azaltılması ile güç çıkışı azaltılır. Rüzgar hızı kritik sınıra geldiğinde türbin durdurulur. Rüzgar hızı tekrar nominal seviyeye ulaştığında, türbin tam güçte çalıştırılır (Anonim 1, 2005).

4. RÜZGAR SANTRALİ

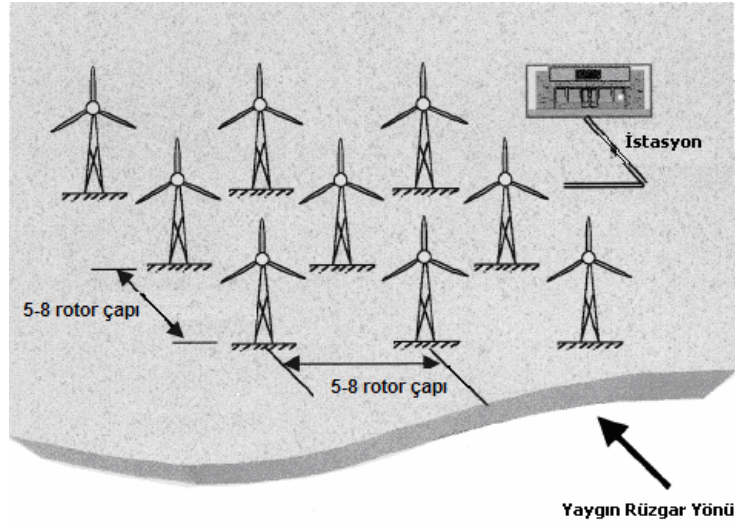
Büyük rüzgar elektrik türbinleri gruplarının ekonomik uygulamasına rüzgar güç santralleri veya rüzgar çiftlikleri denir. Rüzgar santralleri birkaç MW ile birkaç yüz MW kapasite boyutlarında değişir. Gelişen enerji talebiyle rüzgar santraline türbinler ilave edilebilir. Günümüzde, 50 MW rüzgar çiftliği 18 ay ile 24 ay içinde tamamlanabilir, ve zamanın çoğu rüzgar hız ölçümleri için gereklidir (Anonim b, 2004).

4.1. Yerleşim Planı

Rüzgar kaynağı değerlendirilmeleri iki temel alana ayrılır; bölgesel değerlendirme ve yerleşim. Bölgesel değerlendirme büyük bir alan üzerinde rüzgarın ortalama güç yoğunluğunun tahminidir. Yerleşim rüzgar çiftliğinin yıllık enerji çıkışını maksimum yapabilmek için arazi üzerinde bir veya birçok rüzgar türbinlerinin pozisyonudur.

Son on yıl içersinde, gelişmiş hesaplama metotları rüzgar enerji potansiyeli ve yerleşimini tahmin etmek için geliştirilmiştir. İstenen bölgede rüzgar hızının doğru tahmini bölgesel rüzgar enerji kaynaklarının belirlenmesi için esastır. Aerodinamik sebeplerden dolayı, rüzgar türbininin çıkış gücü rüzgar hızının üçüncü kuvveti ile orantılıdır. Özellikle karışık arazilerde, rüzgar hızı ve sonuç olarak rüzgar enerji potansiyeli ağaçlar, binalar gibi engellerle çevrelenen arazinin pürüzlülük yüzeyinden etkilenir, ve rüzgar enerji yoğunluğu bir bölgeden başka bir bölgeye önemli olarak değişebilir (Ozerdem ve Turkeli, 2004).

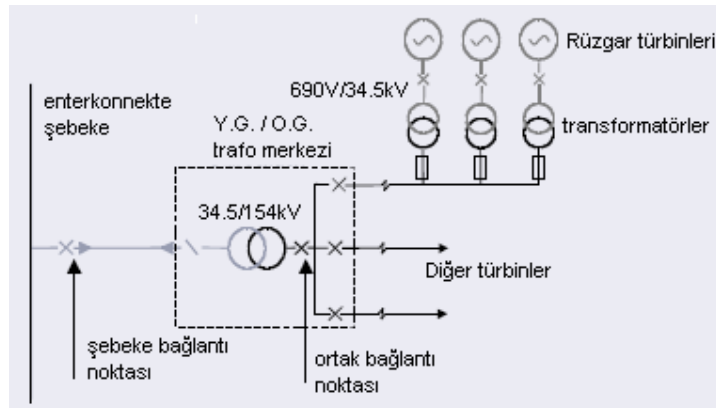
Bu topografya etkilerinin dışında, türbinler arası mesafe yaygın rüzgar yönünde, 5 rotor çapından az ise, büyük kuyruk etkisi kayıpları türbülanslı bir hava akımı ile enerji kayıplarını artırır (Gardner vd., 2003).



Şekil 4.1. Düz bir arazideki rüzgar çiftliği için verimli kule mesafeleri (Patel, 1999).

4.2. Rüzgar Santrali Elektrik Sistemi

Rüzgar santrali elektrik sisteminin tek hat şeması Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Dairelerle gösterilen rüzgar türbin generatörlerinin, elektrik çıkışı gücü 600 kW- 2 MW oranında olabilir. Generatör olarak, genelde basit yapısı, düşük maliyeti ve güvenilirliğinden dolayı 690 V hat-hat gerilimli indüksiyon generatörü veya çıkıntılı çok kutuplu senkron generatör kullanılabilir (Gardner vd., 2003).



Şekil 4.2. Rüzgar santrali elektrik sisteminin tek hat şeması (Gardner vd., 2003).

Her bir generatör, yer altı kabloları ile düşük gerilim devre kesicisine bağlanır. Devre kesicisi elektriksel olarak çalışır, bu yüzden generatör yeterli rüzgar olduğunda şebekeye bağlanır ve düşük rüzgarlarda otomatik olarak kesime geçirilir.

Devre kesici anahtarlama elemanından sonra rüzgar çiftliğinde üretilen enerjiyi verimli bir gerilim seviyesinde iletmek için, yükseltici bir transformatör ile orta gerilim seviyesine yükseltilir. Ortak yükseltici bir transformatör ile orta gerilim, yüksek gerilim seviyesine yükseltilir, ve enterkonnekte şebekeye bağlanır (Gardner vd., 2003).

4.3. Rüzgar Türbinlerinin Enterkonnekte Şebekeye Bağlantısı

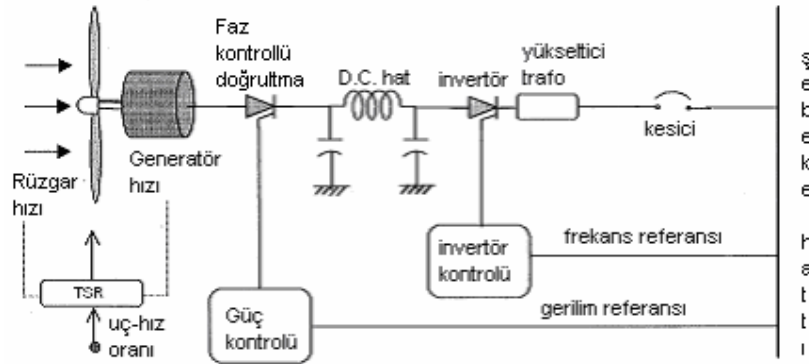
Mevcut üretim ve tüketim merkezlerini birbirlerine bağlayan sistem bütünlüğüne enterkonnekte şebeke denir. Alıcılara çok büyük arızalar dışında, kesintisiz enerji sağlayan güvenli bir sistemdir. Enterkonnekte şebekede, ülkedeki tüm santraller birbiriyle bağlı olduğundan santrallerden bir veya birkaçının arıza, bakım v.b. nedenlerle devre dışı kalması durumunda tüketici merkezlerinin enerji ihtiyacını diğer santraller karşılar. Birbirine bağlanacak santrallerin çeşidi veya gerilimleri, sisteme bağlanmalarında herhangi bir engel teşkil etmez. Çünkü transformatörler yardımıyla, santrallerin ürettiği gerilimler yükseltilmektedir. Sistemde bulunan üretim merkezleri, güçleri oranında tüketim merkezlerine enerji dağıtırlar (Kılınç, 2000).

Otoprodüktör rüzgar santralleri, kendinin ve ortaklarının enerji ihtiyacını karşıladıktan sonra kalan fazla enerjiyi elektrik dağıtım şirketine satarlar, rüzgar santralının güç üretmediği zamanlarda endüstri elektrik dağıtım şirketinden beslenir ve güvenilirlik artırılır. Ayrıca, elektrik enerjisini iletim ve dağıtım hatlarını kullanarak nakleden otoprodüktörler, sistem kullanım bedeli öderler. Sistem kullanım bedeli, nakledilen enerji miktarı ile orantılıdır. Enerji akışı, iki elektrik sayacı ile belirlenir. Bir sayaç, rüzgar santralının elektrik şebekesine dağıttığı enerjiyi, diğer sayaç tüketici merkezinin çektiği enerjiyi kaydeder. Bu iki sayaç için

enerji fiyatları genellikle farklıdır. Ay sonunda elektrik dağıtım şirketi ve otoprodüktör santral firmaları, mahsuplaşılır (Kocaman, 2003).

4.3.1. Elektrik dağıtım şebekesine bağlı rüzgar güç sistemi

Yenilebilir enerji sistemlerinde, güç kalitesi ve güvenilirlik zayıf noktalarıdır. Değişken hızlı rüzgar türbin generatörleri, sabit hızlı türbin güç generatörlerine göre daha fazla güç üretirler. Fakat, değişken hızlı rüzgar türbinlerinin çıkışı değişken gerimli ve frekanslıdır. Uygun bir kontrol sistemi ile güç kalitesi artırılabilir. Sistemin dinamik performansına bağlı, en iyi kontrol tasarlanır. Yaygın olarak kullanılan kanat aerodinamik (pitch) kontrolü ve faz kontrollü doğrultma/invertör kontrolü elektrik enerjisinin kalitesini artırır. Kanat kontrol hareketi, hidrolik veya elektrik mekanizması ile yapılır. Kanat pitch kontrolü, ölçülen parametrelere bağlı gerekli güç çıkışını üretebilmek için kanat pitch açısını sürekli olarak ayarlar. Gerekli pitch açısı için kontrol sinyali, gerçek ve istenen güç arasındaki hataya göre üretilir. Kanat pitch açısı ayarı ile sabit güç üretilir (Sharma vd., 2004).



Şekil 4.3. Şebekeye-bağlı değişken hız rüzgar güç sisteminin elektrik şeması (Patel, 1999).

Böyle bir sistemin güç şeması Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Değişken hız generatörünün çıkışı ilk önce güç elektroniği faz kontrollü doğrultma devresi ile D.C. gerilimi doğrultulur, ve daha sonra invertör devresi ile sabit frekanslı A.C. gerilime dönüştürülür. A.C. gerilimi dönüştürmeden önce, D.C. çıkış harmonikleri

bobin ve kondansatörler ile filtrelenir. İnvörtörün tetiklemesi için frekans referansı ve doğrultma faz açısı kontrolü için gerilim referansı şebeke hattından alınır. Uç-hız oranının optimum referans değeri hafızadadır ve sürekli olarak ölçülen rüzgar hızı ve rotor hızlarından hesaplanan değer ile hata sinyali üretilir. Bu sinyal ile pitch açısı ayarlanır, ve türbin hızı tüm zamanlarda maksimum güç üretebilmek için kontrol edilir (Patel, 1999).

4.3.2. Ara yüz Gereksinimi

Şebekeye-bağlı rüzgar sistemlerinde invertör çıkışı ve senkron kesici çıkış terminalleri arası, şebekenin ara yüzüdür. Şebeke ile ara yüz için santral geriliminin temel gereksinimleri aşağıdaki şekildedir:

- Gerilimin değeri ve faz, elektrik şebekesine uyumlu olmalıdır. Gerilim, transformatörün dönüştürme oranı ve kapalı çevrim kontrol sisteminde konvertör / invertör tetikleme açısı ile kontrol edilebilir.
- Frekans şebeke frekansına tam eşit olmalıdır, aksi takdirde sistem düzenli çalışmayacaktır. Gerekli tam frekans karşılamak için, tek yöntem invertörün anahtarlama frekansını için referans olarak şebeke frekansını kullanmaktır.

Rüzgar sisteminde elektrik generatörü ve türbinin büyük atalet momentinden dinamik sorunlara maruz kaldığı için ara yüz ve kontrol gereksinimi daha fazla gereklidir (Patel, 1999).

4.4. Çevresel Etkiler

Rüzgar çiftliği planı yapılırken, çevresel sorunlar ortaya çıkar. Bu sorunlar; gürültü kirliliği, ışık kirliliği ve kuş ölümleridir. Diğer bazı sorunlar, kanat ve buz fırlatmalarını kapsar. Kanat fırlamaları ilk yıllardaki rüzgar güç sistemlerinde yaygındı, fakat şimdi ileri rüzgar türbin tasarımı ve mühendisliği ile bu tip sorunlar ortadan kalkmıştır (Chamberlain vd., 2002).

4.4.1. Görsel etki

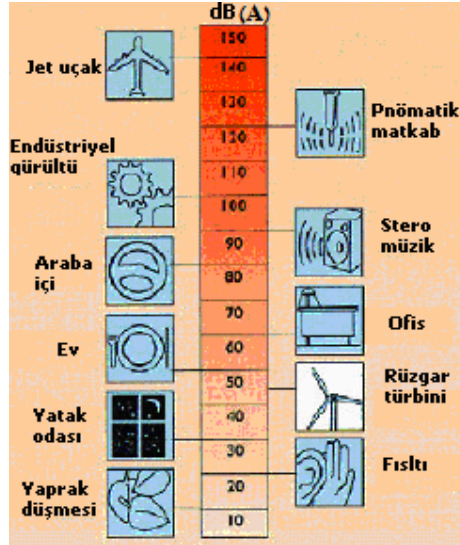
Rüzgar türbinleri 20 ve 50 metre arası yükseklikte olduklarından, açık bir arazide fazla türbin sayısının görüntü etkisi kaçınılmazdır; fakat rüzgar çiftliğinin görüntü etkisi görecedir ve kişiden kişiye göre görüşler değişebilir. Araştırmalar rüzgar türbinlerinin yükseklikleri ve aralıklarının aynı ölçülerde olması estetik görüntüsünü arttırdığını göstermiş diğer yandan rüzgar santralının çalışma sürekliliğini sağlayan temel ünitelerin dışında, ikaz direği, telefon direği gibi ek ünitelerin ilave edilmesi estetik görünümü bozduğu önerilmektedir (Rosen, 1998).

Ayrıca, projeye başlamadan önce, sözleşme yapan rüzgar türbini üretici şirket önerilen arazide rüzgar türbinlerinin nasıl görünebileceğini görsel bir simülasyonla sunar. Bu simülasyonlar farklı yerler için yapılır ve rüzgar çiftliğinin nasıl görülebileceği ilgilenenlere gösterilir. Toplumun şikayetleri dinlenir ve özenli şekilde tedbirler alınır (Chamberlain vd., 2002).

4.4.2. Gürültü

Rüzgar türbinleri gibi her hareket eden parça, bazı gürültüler çıkartır. İyi tasarlanmış bir rüzgar türbini, karayolu trafiği, tren, uçak, ve iş makinelerinin gürültü yayınımları ile karşılaştırıldığında oldukça sessiz çalışırlar.

Enterkonnekte şebekeye elektrik enerjisi üreten tüm rüzgar türbinleri, 25-50 m arasında yüksekliktedirler. Türbin, kulenin üzerine monte edilmiş dişli kutusu ve generatör içeren gövde, ve gövdeden çıkıntılı yatay bir eksenle dönebilen 3 kanattan meydana gelir. Kanatlardaki gürültü, kanatların üretim ve tasarımına dikkat edilmesi ile azaltılabilir. Dişli kutusu ve generatördeki gürültüyü azaltmak için, gövde içersinde ses izolasyonu ve yalıtım malzemeleri kullanılır. Kanatlar, dişli kutusu ve generatördeki işitilebilir sesler türbinden uzaklaştıkça azalmaktadır (Anonim d, 2000).



Şekil 4.4. 250 m mesafede diğer yaygın gürültü aktiviteleri ile rüzgar türbinlerindeki gürültü seviyesinin karşılaştırılması (Chamberlain vd., 2002).

Gürültü, (dB) olarak ölçülür. Desibel havadaki basınç değişimleri gibi, ses basınç seviyesini ölçer. Çevresel gürültü ölçümleri, insan kulağının hassasiyeti referans alınarak yapılır. Rüzgar türbinlerinde meydana gelen gürültü, ses güç seviyesi olarak ifade edilir ve dB (A) olarak ölçülür. Tek bir rüzgar türbinindeki ses güç seviyesi, 90-100 dB (A) arasındadır. Türbinden 40 m mesafede sohbet seviyesi ile aynı 50-60 dB (A) ses güç seviyesi yaratır. 500 m mesafede 10 tane rüzgar türbini 35-45 dB (A) ses seviyesi yaratır.

Rüzgar çiftliği kurulmadan bölgede var olan gürültü ile karşılaştırılmalı ve yerleşim bölgesinin işitebileceği gürültü dikkatlice göz önüne alınmalıdır. Ayrıca rüzgar türbin çeşitlerinin farklı tasarımlarından dolayı gürültü yayınımları farklılık gösterebilir (Anonin e, 2000).

Aerodinamik biçimli gövde ve kule, ses geçirmez gövde gibi diğer bir çok özgün tasarımların gelişmesi ile gürültü seviyesi azaltılmaktadır (Chamberlain vd., 2002).

4.4.3. Doğal yaşama etkisi

Rüzgar türbinleriyle ilişkili kuş ölümleri sorunu, 1990 yıllarında rüzgar güç projeleri yeni ortaya çıktığında ciddi bir sorundu. Kuş ölümlerinde az etkisi olan, yavaş dönen türbinlerin yerini hızlı dönen türbinlerin alması kuş ölümlerinin sayısını arttırmıştır. Türbinlerin kurulacağı arazi özellikle, yapımdan önce kuş göç yollarını kapsayıp kapsamadığı izlenmeli, sonra uygun ise kurulmalıdır. Amerika Rüzgar Enerjisi Birliğine göre, her türbin yılda bir veya iki kuş ölümüne sebep olmaktadır. Bu oran diğer ortak kuş ölümleriyle karşılaştırıldığında önemsiz kalmaktadır. Örneğin, ev kedileri her yıl yaklaşık 100 milyon kuş öldürmektedir (Chamberlain vd., 2002).

4.4.4. Elektromanyetik etki

Modern rüzgar türbinlerinde metal olmayan plastik, ağaç gibi malzemelerin kullanımı elektromanyetik sinyallere etkiyi azaltmaktadır. Büyük rüzgar türbinleri alıcı ve sinyal kaynağı arasında kalıyorsa, radyo veya T.V sinyallerini etkileyebilir. Fakat, bu problem genellikle alıcı antenin geliştirilmesi, uydu veya kablo T.V kullanımı ile kolaylıkla giderilir. Ayrıca, rüzgar türbin kanatları radar sistemlerinde yankılar yaratarak hataya neden olabilir. Bu yüzden rüzgar çiftliklerinin bulunduğu bölgelerde hava güvenliğinin sağlanması için bazı özel şartlarla radar sistemlerinde değişiklik yapılması gerekir. Eğer rüzgar projesi havaalanı veya askeri havaalanı yakınında düşünülüyorsa, elektromanyetik etkiyi giderebilmek için ileri teknik araştırmalar gerekecektir (Anonim b, 2004).

4.5. Rüzgar Enerji Sistemlerinin Çevreye Yararları

Rüzgar enerji sistemleri havaya veya suya emisyon yaymaz ve tehlikeli atıklar üretmez. Kömür, petrol, gaz gibi doğal kaynakları tüketmediğinden, kaynak çıkartılması, nakliye işlemleri ve çalışma sırasında su ihtiyacı yoktur. Rüzgardan elektrik enerjisi üretimi, fosil yakıtlı enerji üretiminin neden olduğu çevresel zararların azaltılmasına yardımcı olur. 1997 yılında, Amerika'daki güç santralleri %70 SO₂, %34 CO₂, %33 NO₂, %28 partikül madde ve %23 zehirli ağır metalleri çevreye yaymışlardır.

SO₂ ve NO_x asit yağmurlarına neden olur. Asit yağmurları ormanlara doğal çevreye zarar verir. Asit yağmurları köprü, bina gibi yapıları aşındırarak ekonomik alt yapıya zarar verir. NO_x kirli, sisli havanın temel unsurudur.

CO₂ sera gazı, sera içindeki dünyamızın yüzeyinden çıkan güneş ışınımını tutarak atmosferdeki küresel ısınmayı artırır. Sera gazlarının artışı sadece ortalama sıcaklığın yavaşça artmasına değil, aynı zamanda hava modellerinde artan değişimlere neden olur, daha sık ve şiddetli kuraklık ve seller oluşur. Dünya Meteoroloji Organizasyonu iklim değişiklikleri yüzünden aşırı hava olaylarının oluşabileceğini ikaz etmiştir.

Partikül maddeler sağlığa etkilerinden dolayı gelişen bir kaygıdır. Endüstriyel ve gelişmekte olan ülkelerde özellikle astım gibi çocuk hastalıklarının hızlı bir şekilde artmasının nedeni hava kirliliğidir, ve aynı zamanda kan kanseriyle bağlantılıdır. Benzer olarak, düşük, erken doğum ve bebek ölümleri kentteki kirli hava kütlesiyle bağlantılıdır.

Zehirli ağır metaller çevrede birikirler ve biyolojik yiyecek zincirine katılırlar. Örneğin cıva maddesini göldeki balığın yemesi, daha sonra bu balığı insanların yemesi beslenme zincirine cıva maddesini ekler (Anonim b, 2004).

Çizelge 4.1. Yenilenebilir enerji kaynak kullanımı ile emisyon azalma oranları (Patel, 1999).

1 milyon (kWh) alternatif enerji üretimi ile emisyondaki azalma oranları
750-1000 ton CO ₂
7,5-10 ton SO ₂
3-5 ton NO _x

Çizelge 4.2’de her on yılda enerji tüketiminin %17 arttığını, ve karbon dioksit emisyonundaki artışında %16 olduğunu göstermektedir. Yenilenebilir enerjinin kullanımı ile karbon dioksit emisyonu azalarak sera etkisi ve küresel ısınmanın azaltılmasında önemli bir adım olmaktadır (Keedwell, 2002).

Çizelge 4.2. Farklı bölgelerin geçmiş ve gelecekteki dünya enerji tüketimi ve karbon dioksit emisyon miktarları (Keedwell, 2002).

Bölge	Enerji Tüketimi (katrilyon BTU)				Karbon dioksit emisyonları (milyon ton Karbon)			
	1990	1999	2010	2020	1990	1999	2010	2020
Endüstriyel Ülkeler	182,7	209,7	246,6	277,8	2 849	3 129	3 692	4 169
Doğu Avrupa/eski SSCB	76,3	50,4	61,8	73,4	1 337	810	978	1 139
Gelişen Ülkeler	87,2	121,8	184,1	260,3	1 641	2 158	3 241	4 542
Asya	51,0	70,9	113,9	162,2	1 053	1 361	2 139	3 017
Orta Doğu	13,1	19,3	26,3	34,8	231	330	439	566
Afrika	9,3	11,8	15,7	20,3	179	218	287	365
Orta ve Güney Amerika	13,7	19,8	28,3	43,1	179	249	377	595
Toplam Dünya	346,2	381,9	492,6	611,5	5827	6097	7910	9850

5. MATERYAL ve YÖNTEM

5.1. Rüzgar Santrali Tasarımı

Rüzgar santrali tasarlanırken santralin hangi amaçla kullanılacağı önemlidir. Bağımsız çalışacak rüzgar güç sistemi ile şebekeye bağlı çalışan rüzgar güç sistemi tasarımında aynı kriterler göz önüne alınmaz. Amaçlar farklı olduğu için göz önüne alınacak özelliklerde farklıdır.

Bağımsız çalışan rüzgar güç sistemlerinde genelde tek veya birkaç türbin kullanılır. Türbinlerin kurulacağı yer enerjinin tüketileceği yer olacaktır. Yer seçimi ancak dar bir alanda en uygun yerin belirlenmesiyle sınırlı kalır. Türbin güçleri ise mevcut tesisin ihtiyacına göre belirlenir.

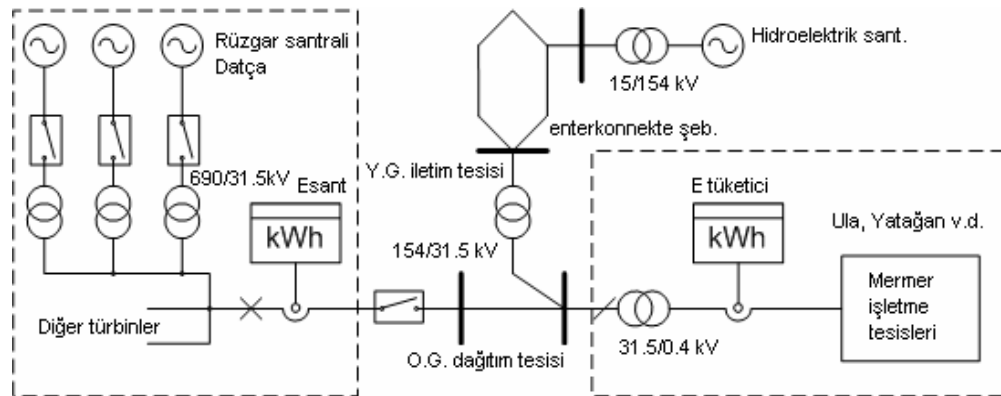
Şebekeye bağlı santralde, en önemli ölçü üretilecek enerjinin miktarıdır. Elde edilecek enerji rüzgar hızının küpüyle orantılı olduğu için, rüzgar hızının yüksek olduğu alanlara kurulan santralde daha fazla enerji üretilecektir. Bu nedenle uygun alanların belirlenmesi gerekir. Bu alanların belirlenmesi amacıyla rüzgar verileri elde etmeye yönelik rüzgar ölçümleri yapılmalıdır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar çok olumlu olsa bile seçilen bölgenin, topografya yapısı, elektrik bağlantıları rüzgar santrali kurmak için elverişli olmayabilir. Bu nedenle yatırımcı santral kurmayı düşündüğü alana 1/25 000 ölçekli haritalarla giderek araziyi incelemeli ve aşağıdaki kriterlerin değerlendirilmesini yapmalıdır.

1. Yöre halkıyla görüşerek yeterli ve sürekli rüzgar olup olmadığını,
2. Rüzgar santrali kurmaya elverişli yeterli genişlikte arazi olup olmadığını,
3. Arazinin mülkiyet durumu, doğal park, milli park veya sit alanı olup olmadığı,
4. Arazinin hakim rüzgar yönüne göre durumu,
5. Arazinin yerleşin yerlerine ve ulaşım yollarına uzaklığı,
6. Enerji nakil hatlarına uzaklığı,

7. Televizyon verici ve yansıtıcılarına, radar sistemlerine uzaklığı.
8. Değerlendirme sonunda olumlu düşünce çıkmışsa, arazi büyüklüğüne ve topografyasına göre bir veya birkaç noktaya rüzgar gözlem direği kurulur (Toklu, 2002).

5.2. Rüzgar Santralinin Enterkonnekte Şebekeye Bağlantısı

Rüzgar türbinlerinin çıkış gücü rüzgar hızı ile değişir; evimizdeki ve endüstrideki enerji tüketimi, günlük enerji ihtiyacına göre zamanla değişmektedir. Enerji ihtiyacına göre, rüzgar sistemi fazla veya eksik enerji üretebilir. Yani rüzgarsız zamanlar, rüzgar sisteminin bakım zamanları, puant güç zamanlarında enerji sürekliliğini sağlamak, güvenilirliği arttırmak için bağlı olduğu elektrik şebekesinden tüketici merkezlerinin enerji ihtiyacı sağlanır. Fazla enerji üretilirse, elektrik enerji şirketine enerji satılır. Otoprodüktör rüzgar santrali ve toptan elektrik şirketi arasında yapılan ikili antlaşmalarda belirtilen enerji fiyatına göre, enerji mahsuplaşması yapılır (Gipe, 1999).



Şekil 5.1. Enterkonnekte şebekeye bağlı rüzgar santralinin tek hat şeması.

Rüzgar enerjisi santralleri, puant yüke destek veren enerji santralleridir. Rüzgar hızının yüksek olduğu zamanlarda enerji ihtiyacı yüksek olmaktadır. Bu

sayede kömür, doğal gaz, petrol, nükleer kaynaklı temel yük santrallerine büyük destek vermektedir (Anonim i, 2005).

5.3. Kapasite Faktörü

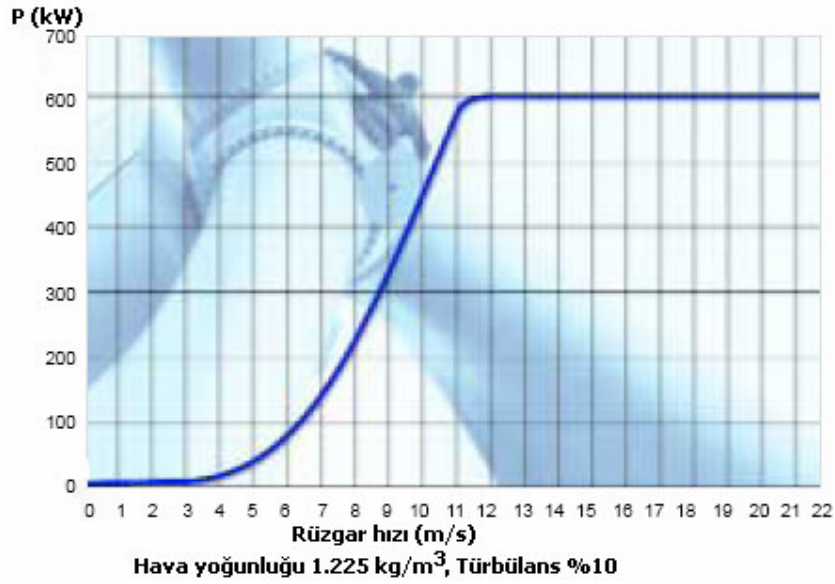
Yıllık enerji verimi, bir yılda rüzgar çiftliği veya rüzgar türbininin ürettiği enerjiyi gösterir. Rüzgar türbininden üretilen yıllık enerji çıkışı ifadesinin diğer yolu, kapasite faktörünü göz önüne almaktır.

Kapasite faktörü teorik olarak %0'dan %100'e değişebilmesine rağmen, uygulamada genellikle 20%'den %70'e değişir ve çoğunlukla 25-40% civarındadır. Bu katsayının değeri; rüzgar hızının değişimi, rüzgar türbini kullanımı, türbin verimi, yerleşim düzeni ve enerji iletimi gibi enerji kayıplarından etkilenir. Yıllık kapasite faktörü türbinden türbine ve yıldan yıla değişiklik gösterir (Abderrazzaq, 2004).

Kapasite faktörü F_c ; belirli bir zaman dilimi üzerinden santralin ürettiği net enerji ile, santralin aynı zaman diliminde tam kapasite ile üretebileceği nominal enerji miktarını karşılaştırır (Anonim b, 2004).

$$F_c = E_g / E_r \quad (5.2)$$

“ E_g ”, türbinin bir yılda ürettiği net enerjidir. “ E_r ”, rüzgar türbininin bir yıllık çalışma zamanında ürettiği nominal enerji kapasitesidir.



Şekil 5.2. Dewind D4 serisi, rotor çapı 46 m, 600 kW rüzgar türbininin güç eğrisi (Anonim a, 2005).

Rüzgar türbini, iletim hızı “ V_{ci} ” altında veya kesim hızı “ V_{co} ” üstünde güç üretmez. Şekil 5.2 rüzgar türbin güç eğrisinde görüldüğü üzere, rüzgar türbini iletim hızı ve kesim hızları arasında güç üretecektir. Türbinde üretilen güç, iletim ve kesim rüzgar hızları arasındaki rüzgar hızı “ V_i ” karşılık gelen güçtür (Marafia ve Ashour, 2003).

$$E_g = \sum_i P_i \cdot T_i \quad (5.3)$$

$$E_r = P_r \cdot 8760 \quad (5.4)$$

Yakıtlı güç santrallerinde fosil yakıt kullanılır, bu yüzden bakım veya donanım problemleri olmadıkça, zamanın çoğunda tam kapasite çalışabilirler. Kapasite faktörleri %40 ile %80 arasında değişir.

Rüzgar santralleri rüzgar ile beslenir. Rüzgar sürekli bir kararlılıkta esmediği için, modern rüzgar türbinleri zamanın %65 ile %80 arasında çalışır, ve genellikle kapasitelerinden daha düşük bir oranda çalışırlar. Rüzgarlı haftalar veya aylarda kapasite faktörü yüksek olmasına rağmen, kapasite faktörü %25 ile %40 arasında

yayıdır. Aynı bölge ve aynı generatör gücündeki rüzgar türbinlerinde farklı kanat yarıçapları kullanılırsa, kapasite faktörlerinin karşılaştırılmasında çelişki yaratır. Büyük yarıçaplı türbinin kapasite faktörü, küçük yarıçaplıya göre daha büyüktür.

Yakıtlı güç santralleri için kapasite faktörü güvenilir karşılaştırma olmasına rağmen, rüzgar santralleri için güvenilir değildir. Rüzgar santralleri için, kapasite faktörü genellikle ekonomik türbin tasarımının bir göstergesidir (Anonim b, 2004).

5.4. Yıllık Enerji Verimi

Rüzgar çiftliği yıllık enerjinin “E” (kWh/yıl) değerlendirilmesi için aşağıdaki adımların tanımlanması gerekir (Pantaleo vd., 2004).

5.4.1. Brüt enerjinin değerlendirilmesi

Her bir rüzgar türbininden üretilen brüt enerji “E_G” (kWh/yıl) türbin göbek yüksekliğinde rüzgar hızı, rüzgar türbini güç eğrisi, ve paket program araçları kullanılarak hesaplanır. Brüt enerjinin hesaplanmasında izlenen yöntem, meteorolojik rüzgar şartlarının rüzgar türbini generatörleri güç eğrilerine kübik interpolasyon eşitliğinin uygulanması ile hesaplanır (Pantaleo vd., 2004).

Veri noktaları arasındaki ara değerleri tahmin etmemiz için en yaygın kullanılan yöntem polinom interpolasyon yöntemidir. Polinom interpolasyonu, (n+1) noktadan geçen n. dereceden polinomun belirlenmesini içermektedir. Bu polinom, daha sonra ara değerleri hesaplamak için bir formül verir. Bu uygulama için, dört noktayı birleştiren üçüncü dereceden kübik polinom eşitliği ile ara değerler hesaplanır:

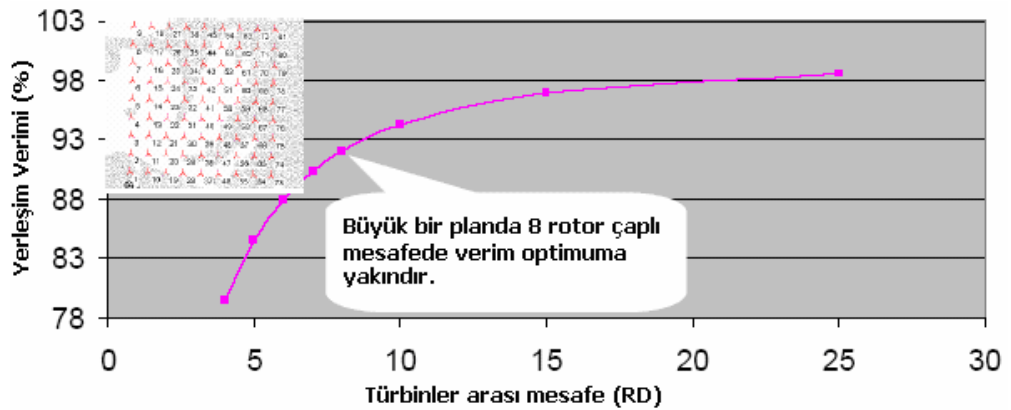
$$p_{(v)} = b_0 + b_1 \cdot (v - v_0) + b_2 \cdot (v - v_0) \cdot (v - v_1) + b_3 \cdot (v - v_0) \cdot (v - v_1) \cdot (v - v_2) \quad (5.5)$$

Yukarıdaki üçüncü dereceden polinom eşitliğindeki “b₀, b₁, b₂, b₃” katsayıları birinci, ikinci, üçüncü sonlu bölünmüş fark eşitlikleri ve v=1/100 adımlarla ara değerler “p_(v)” hesaplanır (Heperkan ve Kesgin, 2003).

5.4.2. Rüzgar türbinlerinin yerleşim verimi

Rüzgar türbinlerinin birbirlerine olan etkilerine kuyruk etkileri denir ve hesaplanması gerekir. Rüzgar türbini başka bir türbinin arkasında çalışıyorsa, türbin ön sıradaki serbest rüzgar akımından daha az bir rüzgar akımına maruz kalır. Rüzgar çiftliği tasarımında bu etkilerin dikkatlice hesaplanması gerekir. Bu kayıpları tahmin eden modellere “wake” modelleri denir. Farklı wake modelleri rüzgar çiftliği tasarım araçlarında kullanılır. Fakat karışık arazilerde sıkışık rüzgar çiftliklerinde çok iyi çalışmaz.

Büyük bir rüzgar santrali projesinde en önemli faktör rüzgar türbinleri arasındaki boşluklardır. Şekil 5.3’de pürüzlülük sınıfı “0” ve “0,5” olan rüzgar çiftliği projesindeki, yerleşim verimi değişim eğrisi görülmektedir (Nielsen, 2003).



Şekil 5.3. Kare bir rüzgar çiftliği projesinde farklı mesafeler için yerleşim verimi (Nielsen, 2003).

5.4.3. Rüzgar çiftliği elektrik sistemi verimi

Elektriksel bağlantı sisteminde kablo arıza oranlarının azaltılması enerji üretimini arttıracığından ilave elektrik sistem maliyetlerini dengeler. Aynı zamanda türbinin elektriksel bağlantı maliyeti yerleşim verimi “ η_L ” etkileyen türbinler arası mesafelerden etkilenir. Günümüzde modern rüzgar çiftlikleri ortak A.C. baraya bağlanır. Rüzgar çiftliklerinde optimum gerilim seviyesi; kablo, anahtar maliyetleri

ve elektriksel kayıplar yüzünden 30 kV orta gerilim seviyesindedir. Bu gerilimin üzerinde ise anahtarlama maliyetleri artmaktadır.

Önerilen rüzgar çiftliği fizibilite çalışmasında, elektriksel iletim kayıp katsayısı “ η_E ”, aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$\eta_E = 0.98 - \frac{l}{600} \quad (5.6)$$

l (km), rüzgar çiftliğinden en yakın elektrik dağıtım şebekesine olan uzaktır (Pantaleo vd., 2004).

5.4.4. Rüzgar çiftliği kullanım verimi

Rüzgar çiftliğinin kullanımı “ η_A ”, santral operatörünün kontrolü dışında (düşük veya yüksek rüzgar hızları, gerekli durdurular, programlı bakım) santralin elektrik enerjisi ürettiği zamanın yüzdesidir. Son çalışmalara göre, rüzgar çiftliği elektriksel sistem maliyeti toplam maliyetin önemli bir parçası olmasına rağmen, santralin kullanımından üretilen enerji maliyetine az bir etkisi vardır. Böylece, rüzgar çiftliği yüksek kaliteli elemanlar ve çevresel etkilere karşı korumalar kullanılarak tasarlanmalıdır.

Rüzgar türbininin kullanım verimi, generatörün tipine, çalışma ve bakım stratejisine, bölgenin iklimine ve ulaşımına bağlıdır. Özellikle düzenli bakım planı rüzgar türbininin arızalanmasını azaltır ve kötü hava şartları türbinlerin arızalanma oranını arttıracığından, ideal bakım zamanı olarak değerlendirilmesi daha uygundur.

Çoğunlukla, rüzgar çiftliği kullanımı toplam zamanın %94-97 oranındadır. Yukarıdaki varsayımlara göre, yıllık üretilen net enerji “ E ” (kWh/yıl) eşitlik (5.7) ile tanımlanır (Pantaleo vd., 2004).

$$E = E_G \cdot \eta_L \cdot \eta_E \cdot \eta_A \quad (5.7)$$

5.5. Rüzgar Çiftliği için Gerekli Arazi

Rüzgar türbinleri ve bölgenin topografyasından dolayı meydana gelen gölgeleme ve türbülans etkilerini azaltmak için rüzgar türbinlerinin yerleşim projesi

önemlidir. Sıra “r” ve sütun “c” ile oluşturulan dikdörtgen planlı rüzgar çiftliğinde rüzgar türbini sayısı “N” aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$N = r.c \quad (5.8)$$

Rüzgar çiftliği için gerekli alan “S” (m²) aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$S = (r.d_r)(c.d_c) \quad (5.9)$$

“d_r” ve “d_c” sırasıyla satır ve sütun arasındaki aralıkları tanımlar.

Eşitlik (5.8) ve (5.9) kullanılarak, rüzgar çiftliğinde kullanılan rüzgar türbini sayısı aşağıdaki eşitlikle kullanılan alanın fonksiyonu olarak ifade edilir (Pantaleo vd., 2004).

$$S = N.d_r.d_c \quad (5.10)$$

Rüzgar santralleri tarımsal alanlara kurulabilir. Rüzgar türbini temeli için 10*10 m alan gerekmektedir Arazi sahibi hem arazisini kiralamakta hem de kalan arazide tarımla uğraşmaktadır. Ayrıca türbin başına ödenen kira tarımdan elde edilen gelire çok büyük katkı sağlamaktadır (Anonim i, 2005).

5.6. Ekonomik Analiz

Yakıt çeşidine bakılmaksızın üretilen elektrik enerjisinin maliyeti; yatırım maliyeti, yakıt, çalışma ve bakım maliyeti, finans maliyeti, santralin üretimi ve santralin ömrü gibi faktörlere bağlıdır. Rüzgar gibi yenilenebilir enerji üretim kaynaklarında yakıt maliyetinin olmaması önemli avantajdır. Sonuç olarak, santral inşa edildiğinde, enerji maliyetleri büyük ölçüde sabitlenir ve sadece az bir oranda enflasyondan etkilenir. Fakat üretim büyük ölçüde rüzgar hızına bağlı olarak rüzgar çiftliği bölgesine göre değişir, bu nedenle enerji maliyeti küresel olarak tanımlanmaz.

Fosil yakıtla elektrik enerjisi üretiminde, bu yöntemlerle doğrudan ilişkisi olmayan maliyet öğeleri içerir. Böyle maliyetlere harici maliyetler denir. Örneğin yakıt maliyetine ilave olarak altyapı, araştırma geliştirme ve çevre kirliliği kontrolü gibi maliyetleri içerir.

$$B = Y.R_y / h + f + m \quad (5.11)$$

“B” birim enerji maliyeti (ECU/kWh), “Y” ilk yatırım maliyeti (ECU/kW), “R_y” yatırım dönüşüm katsayısı, “h” işletme süresi (kWh/kW/yıl), “f” birim enerji çıkışı yakıt maliyeti (ECU/kWh), ve “m” birim enerji çıkışı çalışma ve bakım maliyeti (ECU/kWh).

Yatırım dönüşüm katsayısı “R_y”, santral ömrü “z” yıl, ve yıllık faiz oranı “r”, göre değişir.

$$R_y = r / [1 - (1 + r)^{-z}] \quad (5.12)$$

Belirli bir kaynaktan elektrik üretiminin maliyeti genellikle tüm bu değişkenlerin birleşimine bağlıdır.

Rüzgar güç üretiminin maliyeti aşağıdaki maddelerle sınıflandırılır:

1. Yatırım maliyeti: güç santralının inşası ve elektrik şebekesine bağlantısı.
2. Çalışma maliyeti: çalışma, yakıt, ve santral bakımı.
3. Finansal maliyet: yatırımcı ve bankaya geri ödeme. (Marafia ve Ashour, 2003)

Ekonomik analiz değerleri aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

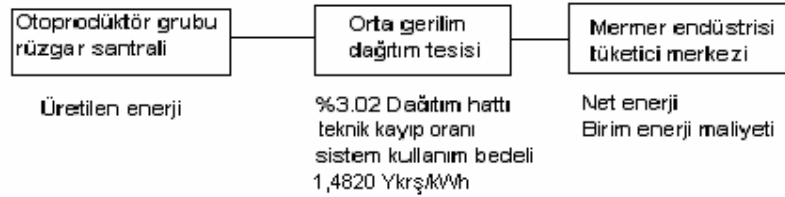
- Rüzgar türbin maliyeti= 600-900 ECU/kW
- Projenin hazırlanması ve kurulum= 200-250 ECU/kW
- Toplam yatırım maliyeti= 800 ECU/kW
- Çalışma maliyeti (arazi kirası, bakım, sigorta primi)= 0,01 ECU/kWh.

5.6.1. Elektrik piyasasına göre ekonomik analiz

Elektrik piyasası kanunu; elektrik üretimi, iletimi, dağıtımı, toptan satışı, perakende satışı, perakende satış hizmeti, ithalat ve ihracatı ile bu faaliyetlerle ilişkili tüm gerçek ve tüzel kişilerin hak ve yükümlülüklerini kapsar.

Elektrik santrallerinde üretilen elektrik enerjisi iletim ve dağıtım enerji nakil hatları üzerinden nakledilir. 36 kV'un altı dağıtım hattı, 36 kV'un üzeri iletim hattıdır (T.C. Resmi gazete a, 2001). Esas olarak ortaklarının elektrik enerji ihtiyacını karşılamak üzere üretim yapan otoprodüktör grubu, iletim ve dağıtım sistemlerini kullanıyorsa sistem kullanım bedeli ödemek zorundadır. Ocak 2006 tarihinden itibaren sanayi için, dağıtım tarifesi 1,4820 Ykr/kWh ve iletim tarifesi 0,4040 Ykr/kWh'dir (Anonim 1, 2006). Enerji mahsuplaşmasında enerji nakil hatlarında enerji kayıp oranı göz önüne alınır. Teknik kayıp oranları iletim hattı için %3, dağıtım hattı için %3,02'dir (T.C. Resmi Gazete e, 2003).

Sadece orta gerilim dağıtım tesisi üzerinden enerji nakli yapılıyorsa, iletim hattı teknik kayıp oranı ve sistem kullanım bedeli göz önüne alınmaz.



Şekil 5.4. 2006 elektrik piyasası tarifelerine O.G. dağıtım tesisi için enerji maliyeti.

TETAŞ dışında, EPDK'nın elektrik enerjisi toptan satış lisansı verdiği şirketler toptan elektrik enerjisi alışı satışı yapabilirler. 2005 yılı ortalama TETAŞ toptan elektrik satış tarifesi 8,69 Ykr/kWh'dir (T.C. Resmi Gazete c, 2005). Yılda 6 milyon kWh ve üzeri elektrik enerjisi tüketen işletmeler serbest tüketici olarak enerjilerini toptan elektrik ticareti yapan şirketlerden alabilirler (T.C. Resmi Gazete f, 2006).

YEK kanununa göre, perakende satış lisansı sahibi tüzel kişiler bir önceki yıl satışa sundukları elektrik enerjisi miktarının sattıkları toplam enerji miktarına oranı kadar YEK belgeli elektrik enerjisini Türkiye ortalama toptan elektrik satış

fiyatından almak zorundadırlar. Bu oranı Bakanlar Kurulu her yılın başı %20 arttırmaya yetkilidir (T.C. Resmi Gazete d, 2005).

YEK belgesiz bir santralin, TETAŞ'a yük atma fiyatı, 1 Nisan 2006 tarihinden itibaren her üç uzlaştırma dönemi için, 2,8 Ykr/kWh'dir. YEK kanununa göre, YEK belgeli elektrik santralinde üretilen enerji yaklaşık 3 kat daha fazlaya satılmaktadır (T.C. Resmi Gazete g, 2006).

5.7. Rüzgar Çiftliği Proje Tasarım

5.7.1. Rüzgar çiftliği projesine giriş

Rüzgar çiftliği kurulacak bölge seçilip, yatırım kararı alındığında, rüzgar çiftliği tasarım işlemine başlanır. İlk işlem gelişim sorunlarını tanımlamaktır:

Güç anlaşmasına uygun şebeke bağlantısını sağlayan maksimum kurulu kapasite.

- Rüzgar çiftliği bölge sınırları.
- Yol, mesken, iletim hatları, mülkiyet sınırları v.b. aksilikler.
- Çevresel sorunlar.
- Herhangi yerleşim merkezine olan gürültü hassasiyeti.
- Herhangi bir görüş noktasına göre, görsel hassasiyet.
- Türbin üreticilerinin tanımladığı optimum türbin mesafeleri.
- Mikrodalga hat koridorları gibi, iletişim sinyalleri sorunları.

Muhtemel sorunlar bilindiğinde, rüzgar çiftliği tasarımına giriş yapılmış olunur. Ayrıca başlangıç projesinin tanımlanmasındaki amaç, farklı ticari türbin çeşitlerinde önemli olarak değişebilen kurulu kapasiteye uygun yaklaşık türbin boyutlarını ve sayısını belirlemektir. Bölgenin rüzgar kaynağı ekonomik görünümü belirlemede en önemli parametredir (Gardner vd., 2002).

5.7.2. Ayrıntılı rüzgar çiftliği tasarımı

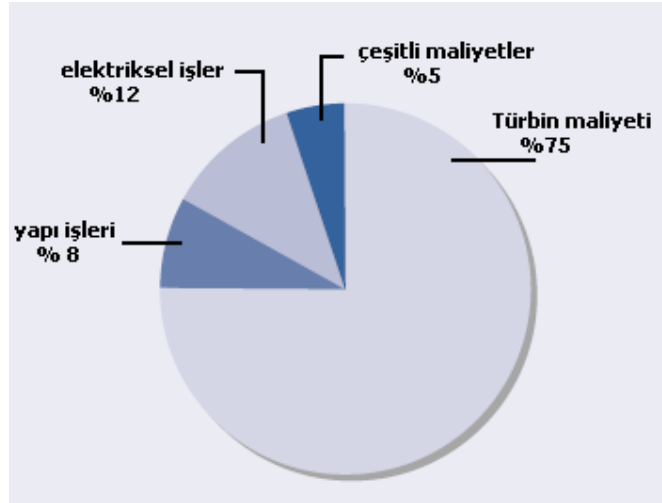
Proje tasarımında en önemli unsur, optimum türbin boşluğu kullanmaktır. Türbinler için uygun boşluk, büyük ölçüde arazinin yapısına ve rüzgar yönlerine bağlıdır. Türbinler arası mesafe yaygın rüzgar yönünde, 5 rotor çapından az ise, istenmeyen büyük kuyruk etkisi kayıplarını meydana getirir.

Rüzgar çiftliği sorunları tanımlanması ile, rüzgar çiftliği en iyi şekilde tasarlanır. Bu işleme rüzgar çiftliği yerleşimi denir. Böyle işlemlerin amacı yapım ve çalışma maliyetlerini azaltırken, enerji üretimini maksimum yapmaktır. Birçok proje ekonomileri, altyapı maliyet değişimlerinden büyük ölçüde etkilenir.

Ayrıntılı rüzgar çiftliği tasarımı rüzgar çiftliği tasarım araçlarının kullanımı ile kolaylaşır. Büyük rüzgar çiftlikleri için, üretim projesini paket program kullanmadan türetmek oldukça zordur. Böyle projelerde rüzgar çiftliği tasarım araçları kullanarak en iyi yerleşim projesi göz önüne alınır, ve daha fazla enerji üretimi sağlanır. Rüzgar çiftlik tasarım araçları ile; türbin çeşidi, göbek yüksekliği, rüzgar çiftliği boyutuna göre, değişik projelerin verimleri hızlı bir şekilde analiz edilir, ve böylece en iyi proje sonuçları ortaya çıkar. Bazı rüzgar çiftliği tasarım araçlarında gürültü ve görüntü sonuçları analizi yapılır (Gardner vd., 2002).

5.7.3. Rüzgar çiftliği alt yapısı

Rüzgar çiftliğinin enerji çıkışını belirlemek en önemli kriterdir. Yeterli rüzgar kaynağı olmazsa, rüzgar çiftliği ekonomik olmaz. Bölgenin rüzgar rejimine uygun, güvenilir ve ekonomik rüzgar türbini kullanmak temel prensiptir. Bunlara ilaveten, türbinleri desteklemesi gereken alt yapı, elektrik şebekesi ile bağlantı, enerji analizi dikkate alınması gereken diğer alt prensiplerdir. Kara rüzgar çiftlikleri için, türbinlerin maliyeti rüzgar çiftliğinin toplam maliyetinin % 75'dir. Santralin alt yapısı için üç temel unsur vardır. Bunlar sırasıyla kurulum, elektrik şebekesi, ve kontrol merkezi ile tüm türbinler arasında iletişimi sağlayan, denetleyen, kontrol eden, veri aktaran SCADA sistemidir. Rüzgar çiftliğinin beyin merkezi olarak görev yapar. Genel maliyet analizi şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Rüzgar çiftliği için genel maliyet analizi (Gardner vd., 2002).

5.8. Santralin Kurulmasında Resmi Prosedür

5.8.1. Otoprodüktör modeli

Otoprodüktör statüde, üreticinin asıl amacı enerji üretip satmak değildir. Elektrik enerjisi tüketimi fazla olan kurum ve kuruluşlar öncelikle kendi tükettikleri enerjiyi üretmek amacıyla santral kurarlar (Toklu, 2002).

5.8.2. Otoprodüktör santral kurulması için yapılan işlemler

1.) İstekli şirket ETKB'na bir dilekçe ile başvurur. Dilekçeye 15 nüsha olarak hazırlanmış fizibilite raporu eklenir. Bu raporda bulunması gereken bilgi ve belgeler şunlardır:

- Kurulmak istenen santralin gücü ve yıllık toplam enerji üretim kapasitesi,
- 1 / 25 000 ölçekli harita üzerinde santralin kurulacağı yer,
- Otoprodüktör şirketin veya grubun kurulu gücü ve yıllık enerji tüketimi,
- Şirketin 10 yıl boyunca TEAŞ / TEDAŞ'dan talep edeceği enerji miktarı,
- Ortakların tam listesi ve adresleri, yetkili kişilerin imza sirküleri,

- Santralde uygulanacak teknoloji ve özellikleri,
- Yatırımın tutarı ve tahmini gerçekleşme tarihi,
- Tesisin bağlı olduğu elektrik şebekesinin basitleştirilmiş tek hat şeması,
- Tesisin ekonomik ömrü,
- Şirkete ait ticaret kaydını gösteren Ticaret Sicili gazetesi,
- Başka bir otoprodüktör santrale ortak olmadığına ilişkin taahhütname,
- Elektrik enerjisi fonu katkı payının yatırıldığına ait dekont,
- Fizibilite raporu, ETKB tarafından incelenir.

2.) Fizibilite raporunun uygun olduğuna ilişkin bakanlık ve ilgili kuruluşların görüşleri tamamlandıktan sonra, bakanlık şirketten teyit ister.

3.) ETKB ile şirket arasında “ Otoprodüktör Statüsünde Üretim Tesisi Kurulması, işletilmesi ve Enerji fazlasının satışına izin verilmesine ilişkin sözleşme” imzalanır.

4.) Sözleşme onaylandıktan sonra 6 ay içinde santrale ilgili projeler hazırlanır ve bakanlığa teslim edilir. Bakanlık projeleri 3 ay içerisinde inceler ve onaylar. Aynı süre içerisinde “ Enerji Satış Antlaşması” imzalanır.

5.) Santral, bakanlık tarafından geçici kabulünün yapılmasından sonra ticari üretime başlar (Toklu, 2002).

6. ARAŞTIRMA BULGULAR

6.1. Datça Bölgesi'nde Rüzgar Çiftliği Tasarımı

Datça yarımadası 235 km sahil şeridi, 52 koyu, zengin bitki örtüsü ile önemli bir turizm merkezidir. Datça yarımadasında rüzgar çiftliği kurulması tasarlanan bölge, E.İ.E.'nin ölçüm direklerinin bulunduğu Reşadiye mevkisidir. Rüzgar çiftliği tasarlanacak arazinin özelliği; kıyıya yakın, %20 eğimli, 100 m yükseklikte, hafif engebeli, çalılık ve bodur bitki örtüsü ile kaplı bir arazidir. Üç tarafı denizlerle çevrilmiş yarımada ve özellikle Reşadiye bölgesinde yaz kış sürekli rüzgar esmektedir. Bölgede rüzgarın istikrarlı ve düzgün esmesi rüzgar kalitesini artırmaktadır (Anonim k, 2003; Anonim m, 2006).



Şekil 6.1. Datça-Reşadiye bölgesi E.İ.E.'nin rüzgar ölçüm direği.



Şekil 6.2. Datça Rüzgar İstasyonunun harita üzerindeki yeri.

Günümüzde, WAsP ve WindPro (Wind Project) gibi çeşitli rüzgar çiftliği tasarım araçları vardır. Bu gelişmiş rüzgar çiftliği tasarım araçları istenen bölgenin; rüzgar iklimi, rüzgar güç potansiyeli, farklı seçeneklerde rüzgar çiftliği tahminleri ve gürültü hassasiyeti, gibi çeşitli analizler yapmaktadır. Bu çalışmada MATLAB yazılım programında yazılan rüzgar çiftliği tasarım aracı çok gelişmiş olmamasına rağmen; rüzgar iklimi, rüzgar güç potansiyeli, farklı seçeneklerde rüzgar çiftliği tahmini, emisyon tasarrufları ve ekonomik analiz yapabildiği için kullanışlı bir rüzgar çiftliği tasarım aracıdır.

Muğla mermer işletme tesislerine en verimli rüzgar çiftliğini tasarlamak için, sekiz farklı türbin çeşidi ve dört farklı türbin mesafelerine göre toplam 32 farklı rüzgar çiftliği sonucuna göre karşılaştırma yapılmaktadır. Ayrıca bölgenin rüzgar iklimi ve rüzgar güç potansiyeli analiz sonuçları değerlendirilmektedir.

Rüzgar çiftliği tasarımın aracında kullanılan sekiz farklı türbin çeşidi ve dört farklı türbin mesafeleri Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de gösterilmiştir. Rüzgar türbinlerinin karakteristik güç eğrilerinde hava yoğunluğu $1,225 \text{ kg/m}^3$, türbülans %10 alınmıştır.

Çizelge 6.1. Rüzgar çiftliği tasarım aracında kullanılan rüzgar türbin çeşitleri (Anonim n, 2005; Anonim o, 2005; Anonim ö, 2005; Anonim p, 2005; Anonim r, 2005; Anonim s, 2005; Anonim ş, 2005).

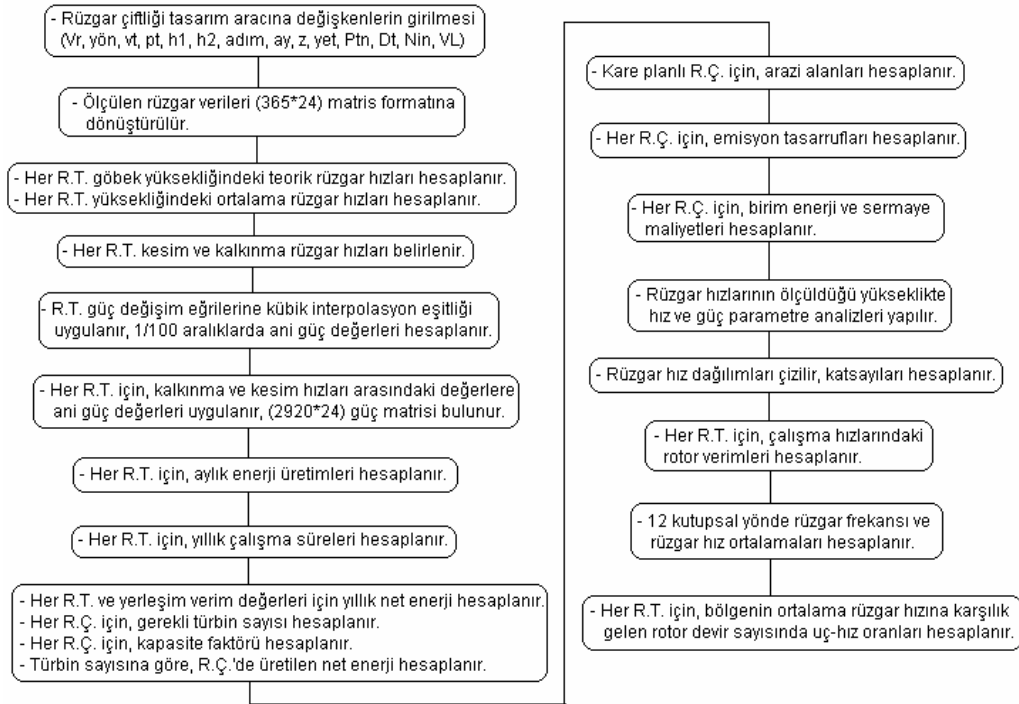
Türbin no	R.T. üretici şirket adı	R.T. çapı (m)	R.T. gücü (kW)	R.T. göbek yüksekliği (m)	Dişli kutusu	Güç kontrolü	Generatör	R.T. iletim - kesim hızı (m/s)
1	DeWind	46	600	60	1:45.5	pitch	İndüksiyon	3-23
2	Enercon	48	800	65	direkt	pitch	Senkron	3-26
3	DeWind	62	1000	68.5	1:53.5	Pitch	İndüksiyon	3-24
4	DeWind	64	1250	68	1:53.1	Pitch	İndüksiyon	3-24
5	Nordex	60	1300	60	1:78.3	Stall	İndüksiyon	4-26
6	Nordex	77	1500	61.5	1:104	Pitch	İndüksiyon	4-21
7	Enercon	82	2000	78	direkt	Pitch	Senkron	3-26
8	Nordex	90	2300	80	1:77.44	Pitch	İndüksiyon	4-26

Çizelge 6.2. Rüzgar çiftliği tasarım aracında kullanılan türbin mesafeleri ve yerleşim verimleri (Nielsen, 2003).

Türbinler arası boşluklar [rotor çapı (m)]	Yerleşim Verimi “ η_L ”
5	0,84
6	0,88
7	0,9
8	0,92

6.2. Rüzgar Çiftliği Tasarım Aracı Algoritması

Bu çalışmada MATLAB yazılım programı ile yazılan, rüzgar çiftliği tasarım aracının algoritma akış şeması Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Rüzgar çiftliği tasarım aracının algoritma akış şeması.

6.3. Muğla Mermer İşletme Tesislerinin Güç Kapasiteleri

Kullanım yerindeki kurulu makine, motor, cihaz ve elektrikli aletler ile bu yerlerin aydınlatılmasında kullanılan toplam elektriksel güce, kurulu güç denir. Bağlantı gücü ise, kullanım yerinin elektrik projesinde belirtilen kurulu gücün (0,6) kullanma faktörü ile çarpılması sonucunda hesaplanan güç miktarıdır.

Aboneler, çekeceği, reaktif enerjiyi ölçmek üzere gerekli ölçü aletlerini tesis etmek zorundadır, ve güç faktörünü 0,95-1 arasında tutmaya özen göstermelidir (T.C. Resmi Gazete b, 2001). Muğla mermer işletme tesislerinin fabrika ve mermer ocağı kurulu güçleri Çizelge 6.3.'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Muğla mermer işletmelerinin kurulu güç değerleri.

Mermer İşletme Tesisinin Adı	Fabrika (kVA)	Mermer Ocağı (kVA)
Akmersan	400	–
Alpay mermer	1000	300
Karabayır mermer	250	–
İsmer	525	160
Ayhan mermer	800	380
Merve mermer	400	225
Muğla Ak mermer	300	–
Özerler mermer	350	250
Özçakım mermer	300	200
Uzay mermer	200	–
Sinoplu kardeşler mermer	200	–
Suar mermer	225	–
Çobanlar mermer	600	250
Ege Özmersan	650	300
Tekmar mermer	1800	700
Almerpa	600	250
Örnek mermer	350	150
Çayboru mermer	400	200
Fazilet mermer	400	125
Koç mermer	350	100
Ermaş mermer	1600	700
Toplam	11,500	4,250

Çizelge 6.1.'deki kurulu güçlerin toplamı, 15 750 kVA'dir.

Bağlantı gücü;

$$S=0,6.15\ 750 \quad S=9\ 450\ \text{kVA}$$

Güç katsayısı, $\cos\theta=0,95$ kabul edilirse, mermer işletme tesislerinin toplam aktif gücü;

$$P=S.\cos\theta \quad (6.1)$$

$$P=9\ 450.0,95 \quad P=8\ 977,5 \text{ kW}$$

$$E_{\text{tük}}=8\ 977,5.8760 \quad E_{\text{tük}}=78\ 642\ 900 \text{ kWh/yıl}$$

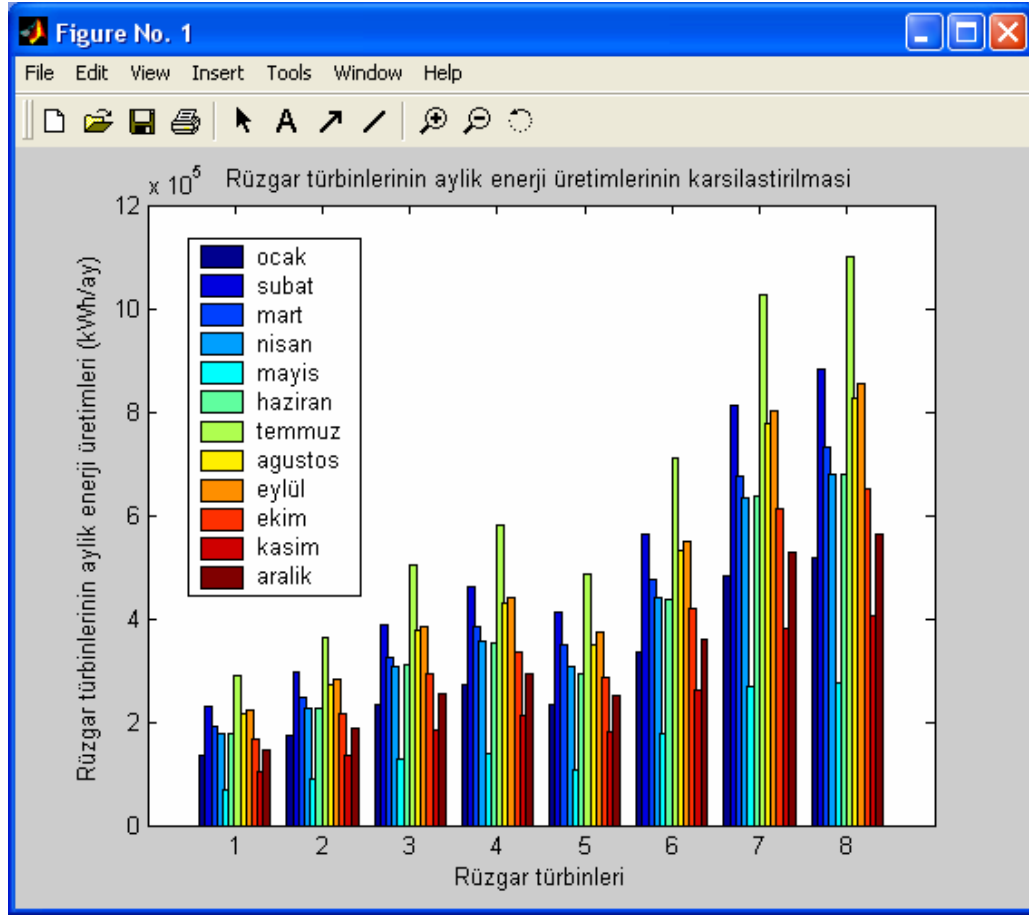
Mermer endüstrisi için gerekli yıllık elektrik enerjisi miktarı hesaplanır, ve rüzgar çiftliği tasarımı mermer endüstrisinin yıllık enerji talebine göre yapılır.

6.4. Rüzgar Çiftliği Tasarım Aracı Analiz Sonuçları

Rüzgar çiftliği tasarım aracı ile, çeşitli rüzgar çiftliği tasarım tablo analizleri yapılmış ve bu tablo değerleri grafiklere aktarılmıştır. R.Ç.T. tablo analizleri çok yer kapladığından bilgisayar ekranındadır, bu bölümde sadece grafiklerle karşılaştırma yapılmıştır.

6.4.1. Rüzgar türbinlerinin aylık enerji üretimleri

Rüzgar çiftliği tasarlanacak arazinin sürtünme katsayısı Çizelge 2.1'e göre, $\alpha=0,1$ alınmıştır. Datça-Reşadiye bölgesi için E.İ.E.'den 2003 yılı 10 m yükseklikteki rüzgar hız verileri satın alınmıştır. Rüzgar hız verileri eşitlik (2.32)'deki güç yasası ile RTA'da kullanılarak sekiz farklı türbinin göbek yüksekliğindeki teorik rüzgar hızları hesaplanır. RTA'da rüzgar türbini güç eğrilerine, eşitlik (5.5)'deki kübik interpolasyon yöntemi uygulanarak 1/100 aralıklarda ara güç değerleri hesaplanır. Şekil 6.2'de teorik rüzgar hızlarına karşılık gelen güç değerleri ile, her türbinin ürettiği aylık enerji değerleri gösterilmiştir.

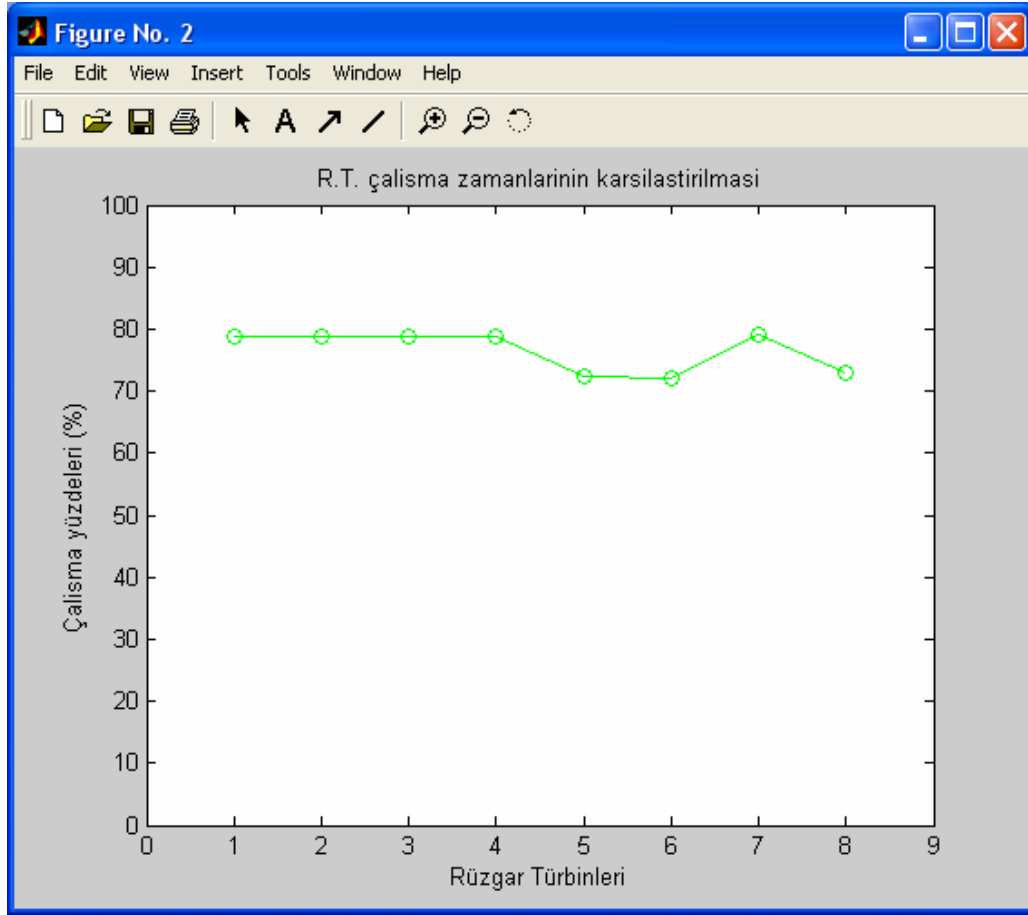


Şekil 6.4. Rüzgar türbinleri aylık enerji değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 6.2 ve R.Ç.T. Tablo.1'e göre, N90-2300 kW'lık 8 nolu rüzgar türbini temmuz ayında 1 101 383,67 kWh/ay ile en fazla enerjiyi üretmektedir.

6.4.2. Rüzgar türbinlerinin çalışma zamanları

Rüzgar türbinleri iletim ve kesim rüzgar hızları arasında çalışabilirler. Şekil 6.3 ve R.Ç.T. Tablo.2'e göre, E82-2000 kW'lık rüzgar türbini 6931 h ile %79,12 çalışma yüzdesine sahiptir.



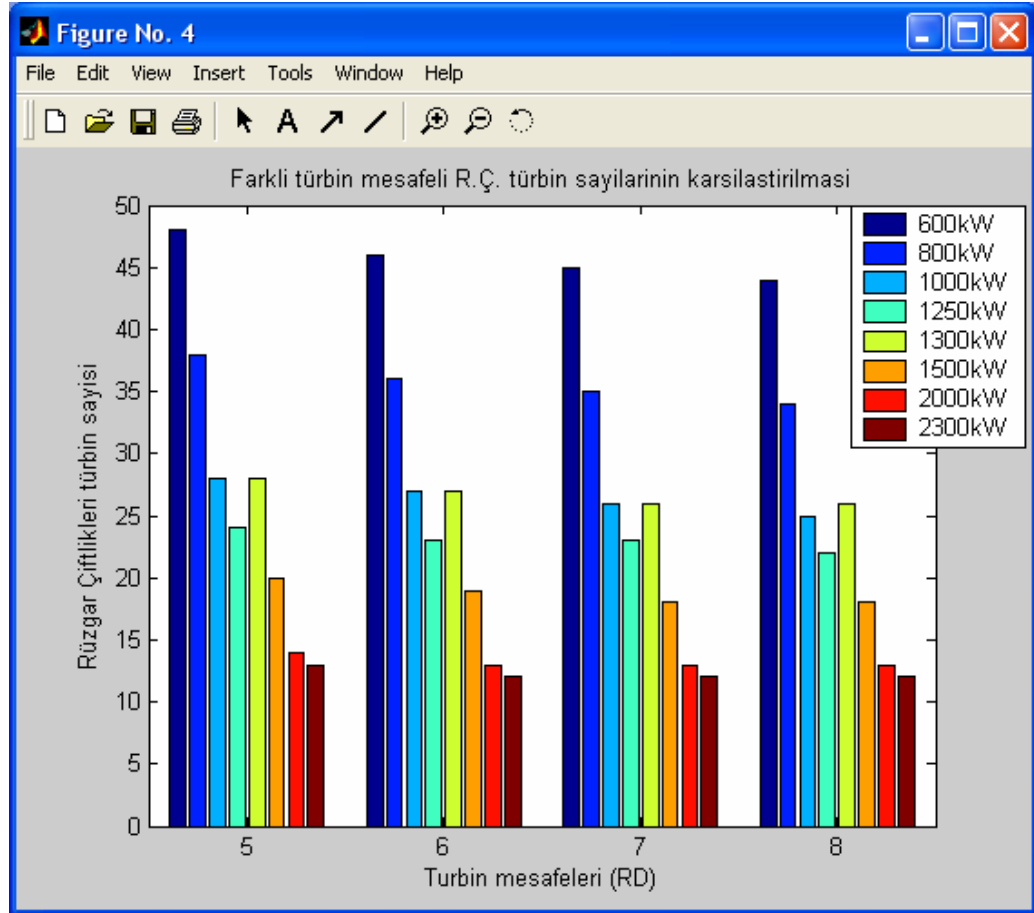
Şekil 6.5. Rüzgar türbinleri çalışma zamanlarının karşılaştırılması.

6.4.3. Rüzgar çiftliklerinin türbin sayıları

Bu çalışmada rüzgar çiftliği tasarlanacak bölgenin orta gerilim enerji dağıtım hattına uzaklığı yaklaşık 1 km'dir. Rüzgar çiftliği elektrik sistemi verimi eşitlik (5.6)'a göre, $\eta_E=0,9783$ hesaplanmıştır, ve kullanım oranı $\eta_A= 0,95$ alınmıştır. Bu çalışmada aynı pürüzlülük sınıfına sahip Şekil 5.3'deki yerleşim verim değerleri " η_L " kullanılmıştır. Kullanılan bu değerler, Çizelge 6.2'de gösterilmiştir.

RTA'da daha önceden hesaplanan sekiz farklı türbinin bir yılda ürettiği brüt enerji, eşitlik (5.7)'ye göre bu verim değerleri ile çarpılırsa, $(8*4)$ 32 farklı net enerji değeri hesaplanır.

Mermer işletme tesislerinin yıllık enerji kapasitelerinin, 32 farklı net enerjiye oranı, 32 farklı seçenekte rüzgar çiftliği için gerekli türbin sayısı hesaplanır.



Şekil 6.6. Rüzgar çiftlikleri türbin sayılarının karşılaştırılması.

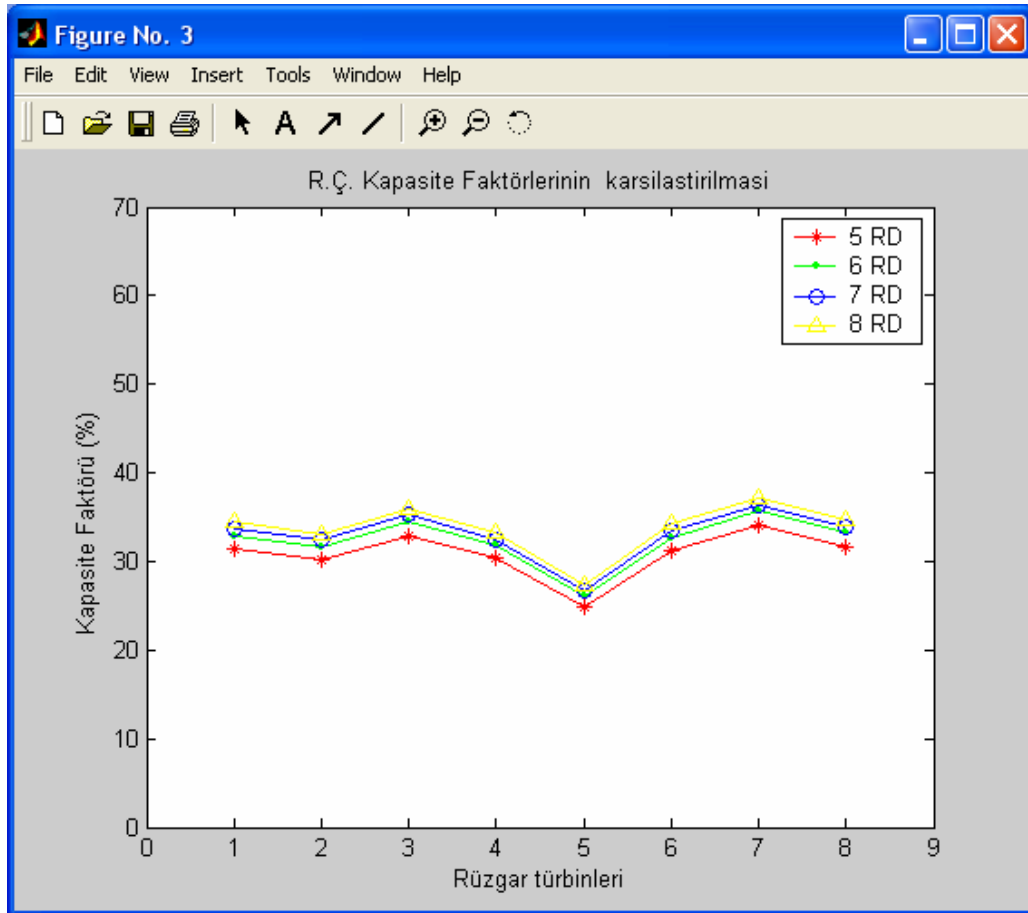
Mermer işletme tesislerinin enerji ihtiyacını karşılamak için Şekil 6.4 ve R.Ç.T. Tablo.2'e göre, en fazla türbin sayısı D46-600 kW-5 RD rüzgar çiftliği projesi için 48 adet türbin gerekirken, en az türbin sayısı N90-2300 kW-6 RD, 7RD, 8 RD türbin mesafeli rüzgar çiftliği projeleri için 12 adet türbin gerekmektedir.

6.4.4. Rüzgar çiftliği kapasite faktörleri

Rüzgar çiftliği kapasite faktörü, rüzgar çiftliği kurulu gücünden hangi oranda faydalandığını gösterir. Kapasite faktörü, rüzgar çiftliğinde üretilen enerjinin tüm

zamanlarda üretilen nominal enerjiye oranı olarak tanımlanır. Kapasite faktörü yaygın olarak %25-%40 arasındadır.

Bu çalışmada en iyi kapasite faktörü Şekil 6.5 ve R.Ç.T. Tablo.2'e göre, E82-2000 kW-8 RD türbin mesafeli rüzgar çiftliği projesidir, ve kapasite faktörü %37,24'dir. Kapasite kullanımı ne kadar yüksekse, proje o kadar ekonomik olur.

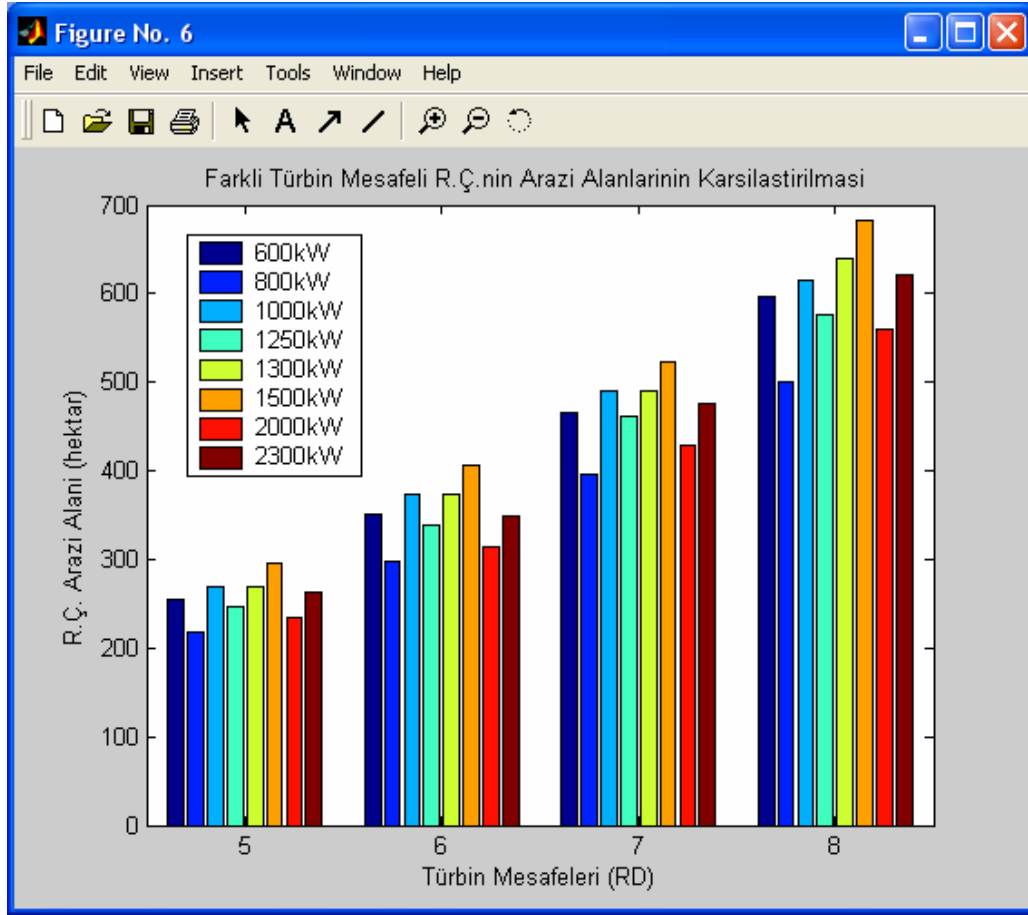


Şekil 6.7. Rüzgar çiftliği kapasite faktörlerinin karşılaştırılması.

6.4.5. Rüzgar çiftliği için gerekli arazi

Rüzgar çiftliği için gerekli arazi yerleşim verimini etkileyen türbin mesafelerine göre değişir. Bu çalışmada dört farklı türbin mesafesi ve sekiz farklı rüzgar türbin çeşidi, eşitlik (5.10)'da kullanılarak 32 farklı arazi hesabı yapılmıştır.

Şekil 6.6 ve R.Ç.T. Tablo.3'e göre, en az arazi alanı 218.88 hektar ile E48-800 kW-5 RD rüzgar projesi iken, en fazla arazi alanı 683.02 hektar ile S77-1500 kW-8 RD rüzgar projesidir. Bu analiz sonuçlarından rüzgar çiftliği kurulacak araziye göre uygun arazi alanı seçimi yapılabilir.



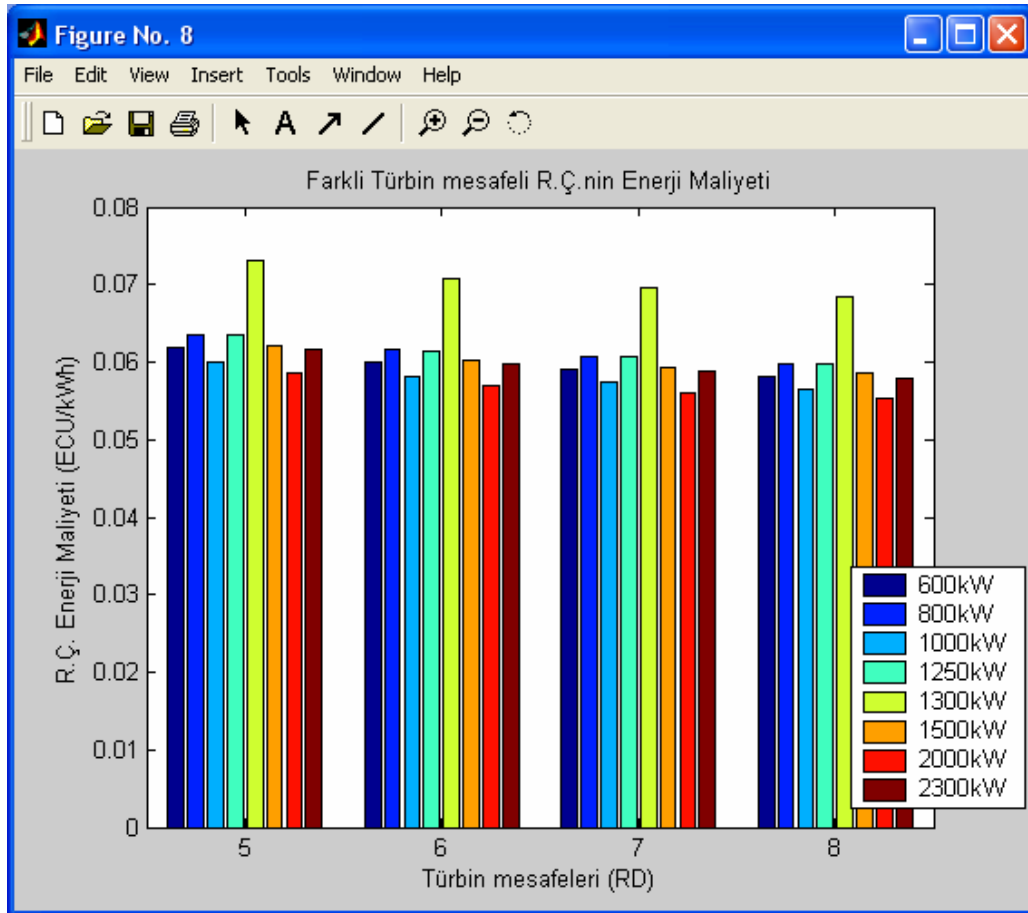
Şekil 6.8. Rüzgar çiftliği arazi alanlarının karşılaştırılması.

6.4.6. Rüzgar çiftliği birim enerji ve yatırım maliyetleri

Bu çalışmada, rüzgar türbin maliyeti 600 ECU/kW ve proje hazırlanması kurulum maliyeti 200 ECU/kWh olmak üzere yatırım maliyeti toplam $Y=800$ ECU/kWh, çalışma maliyeti (arazi kirası, bakım, sigorta primi) $m=0,01$ ECU/kWh, santralin ömrü $z=20$ yıl, faiz oranı $r=\%13$ alınmıştır.

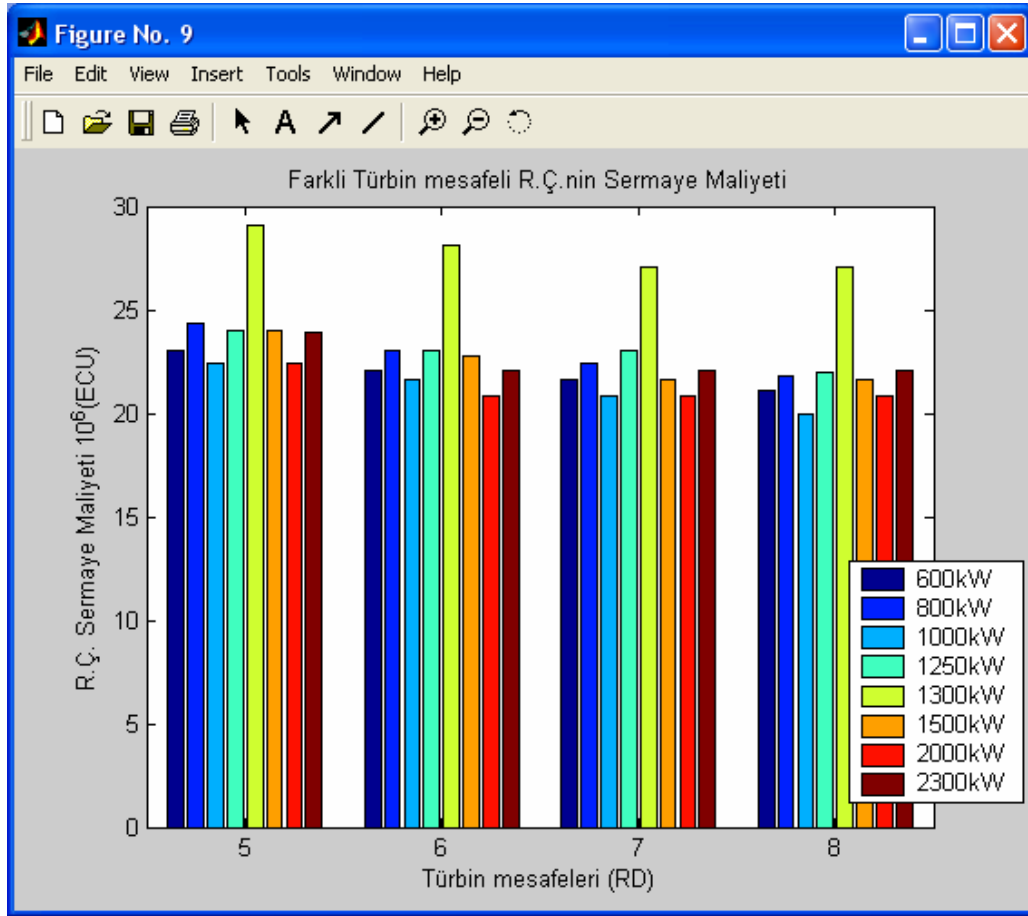
Elektrik piyasasına göre, orta gerilim dağıtım hattı sistem kullanım bedeli 1,482 Ykr/kWh ve dağıtım hattı teknik kayıp oranı % 3,02 enerjinin birim maliyetinde göz önüne alınmıştır.

Alınan bu değerler ve eşitlik (5.11), (5.12) ile RTA'da uygulanarak, 32 farklı rüzgar çiftliği birim enerji maliyetleri hesaplanmıştır. Şekil 6.7 ve R.Ç.T. Tablo.5'e göre, en ucuz birim enerji maliyeti, 0,0553 ECU/kWh ile E82-200kW-8 RD rüzgar çiftliği projesidir. En pahalı birim enerji maliyeti ise, 0,0732 ECU/kWh ile N62-1300kW-5 RD rüzgar çiftliği projesidir.



Şekil 6.9. Rüzgar çiftliği birim enerji maliyetlerinin karşılaştırılması.

Şekil 6.8 ve R.Ç.T. Tablo.5'e göre, en ucuz rüzgar çiftliği yatırım maliyeti 20 milyon ECU ile, N62-1000 kW- 8 RD rüzgar çiftliği projesidir. En ucuz birim enerji maliyetli E82-2000kW-8 RD rüzgar projesi 20,8 milyon ECU'dur.

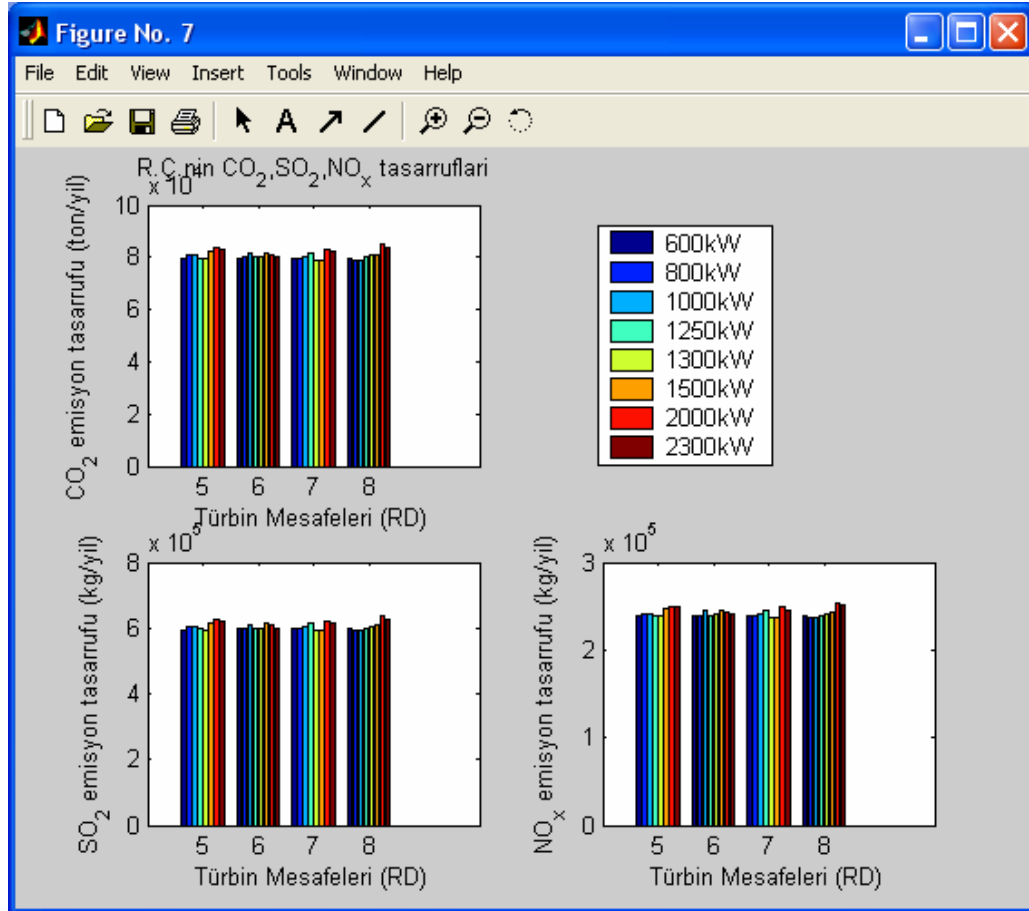


Şekil 6.10. Rüzgar çiftlikleri yatırım maliyetlerinin karşılaştırılması.

6.4.7. Rüzgar çiftlikleri emisyon tasarrufları

Rüzgar çiftliklerinde üretilen elektrik enerjisi fosil bir yakıtla üretilseydi, çevreye zararlı maddeler yayacaktı. Rüzgar çiftliklerinden üretilen elektrik enerjisi ile bu zararlı maddelerin yayılımlarından tasarruf etmiş olacağız. Bu çalışmada, Çizelge 4.1'e göre emisyon tasarruf değerleri $CO_2=1*10^{-3}$ ton/kWh, $SO_2=7,5*10^{-3}$ kg/kWh, $NO_x=3*10^{-3}$ kg/kWh alınmıştır. 32 farklı rüzgar çiftliklerinden bir yılda üretilen enerjilerin, emisyon tasarruf değerlerine oranı ile 32

farklı CO₂, SO₂, NO_x emisyon tasarruf değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.9 ve R.Ç.T. Tablo.4'e göre, CO₂=84807,35 ton/yıl, SO₂=636055,16 kg/yıl, NO_x=254422,06 kg/yıl ile en fazla emisyon tasarrufu E82-2000 kW-8 RD rüzgar çiftliği projesidir.



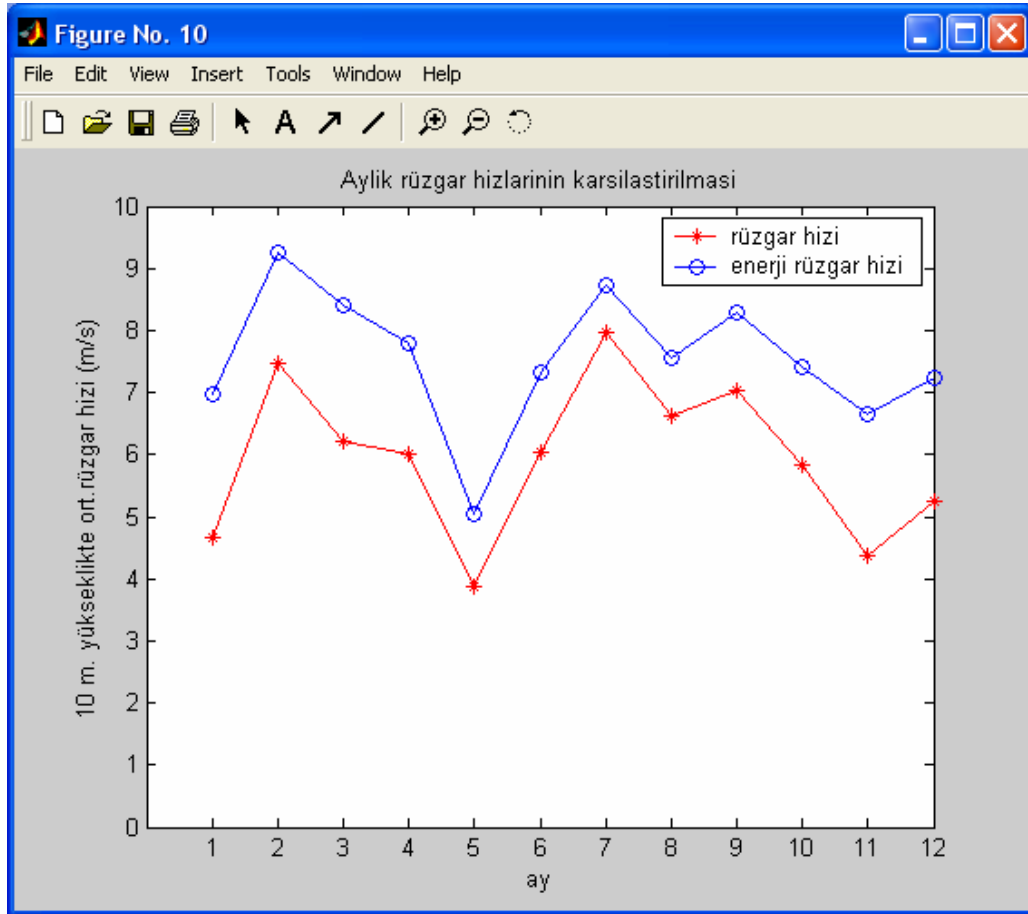
Şekil 6.11. Rüzgar çiftlikleri emisyon tasarruf değerlerinin karşılaştırılması.

6.4.8. Datça bölgesi rüzgar iklimi analizleri

6.4.8.1. Rüzgar hızı ve rüzgar güç potansiyeli analizleri

E.İ.E.'den Datça bölgesi 2003 yılı 10 m yükseklikteki rüzgar hız verileri, eşitlik (2.30), (2.31) ile RTA'da uygulanarak bölgenin aylık ortalama rüzgar hızları ve aylık ortalama enerji hızları hesaplanmıştır. Şekil 6.10 ve R.Ç.T. Tablo.6'ya göre,

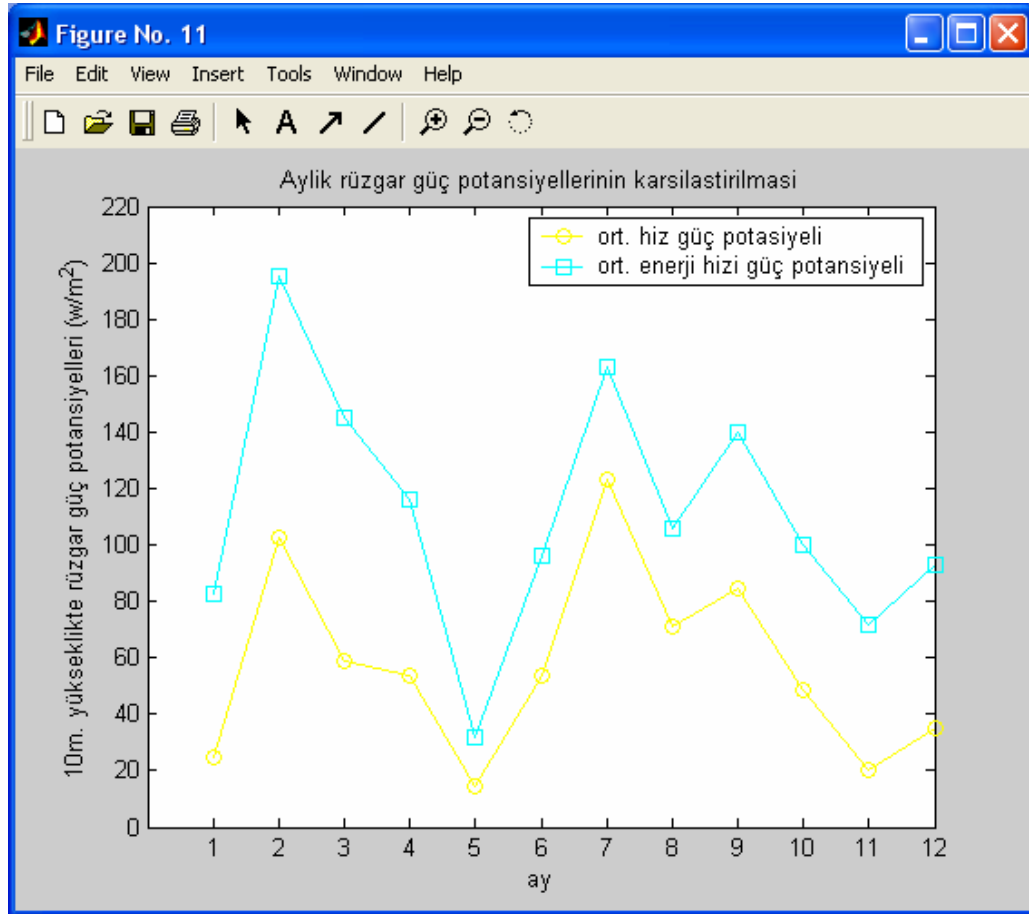
en fazla rüzgar hız ortalaması 7,95 m/s ile temmuz ayı, en fazla enerji hız ortalaması, 9,27 m/s ile şubat ayıdır.



Şekil 6.12. Datça bölgesi 2003 yılı aylık ortalama rüzgar hızları.

Rüzgar aylık güç potansiyelleri analizinde rotor güç katsayısı $C_p=0,4$ havanın yoğunluğu $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ alınmıştır. Daha önceden hesaplanan aylık rüzgar hız ortalamaları, aylık rüzgar enerji hızı ortalamaları, eşitlik (2.21) ile RTA'da kullanılarak, ortalama rüzgar hızı güç potansiyeli ve ortalama enerji hızı güç potansiyelleri hesaplanmıştır. Şekil 6.11 ve R.Ç.T. Tablo.6'ya göre, ortalama hız güç potansiyeli ile ortalama enerji hızı güç potansiyeli karşılaştırıldığında, büyük bir fark olduğu görülmektedir. Doğru analiz yapabilmek için, ortalama enerji hızına göre güç

potansiyelinin hesaplanması gerekir. Ortalama enerji rüzgar hızına göre en fazla rüzgar güç potansiyeli, $195,01 \text{ W/m}^2$ ile şubat ayıdır.



Şekil 6.13. Datça bölgesi 2003 yılı aylık rüzgar güç potansiyelleri.

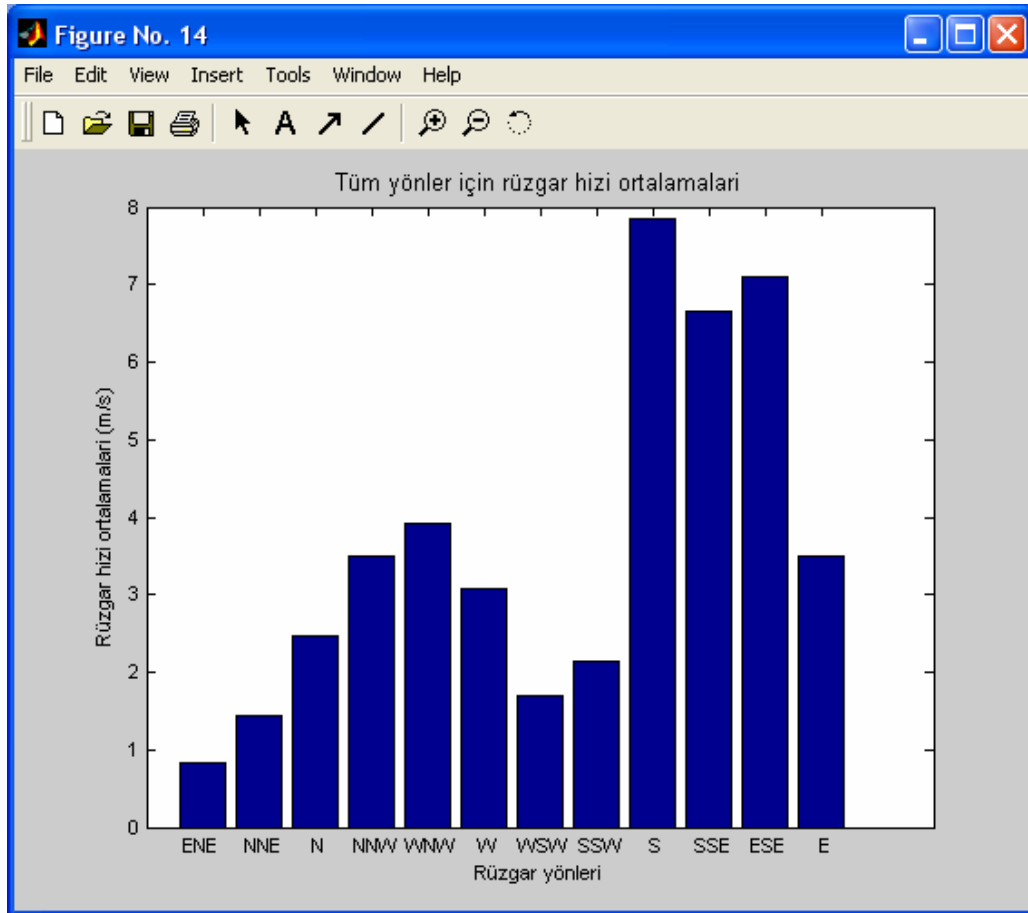
6.4.8.2. Tüm yönlerde rüzgar hız ortalamaları ve frekansları

Bölüm 2 rüzgar hız dağılımlarında bahsedildiğine göre, yönler 30° aralıklarla 12 yöne bölünmüştür.

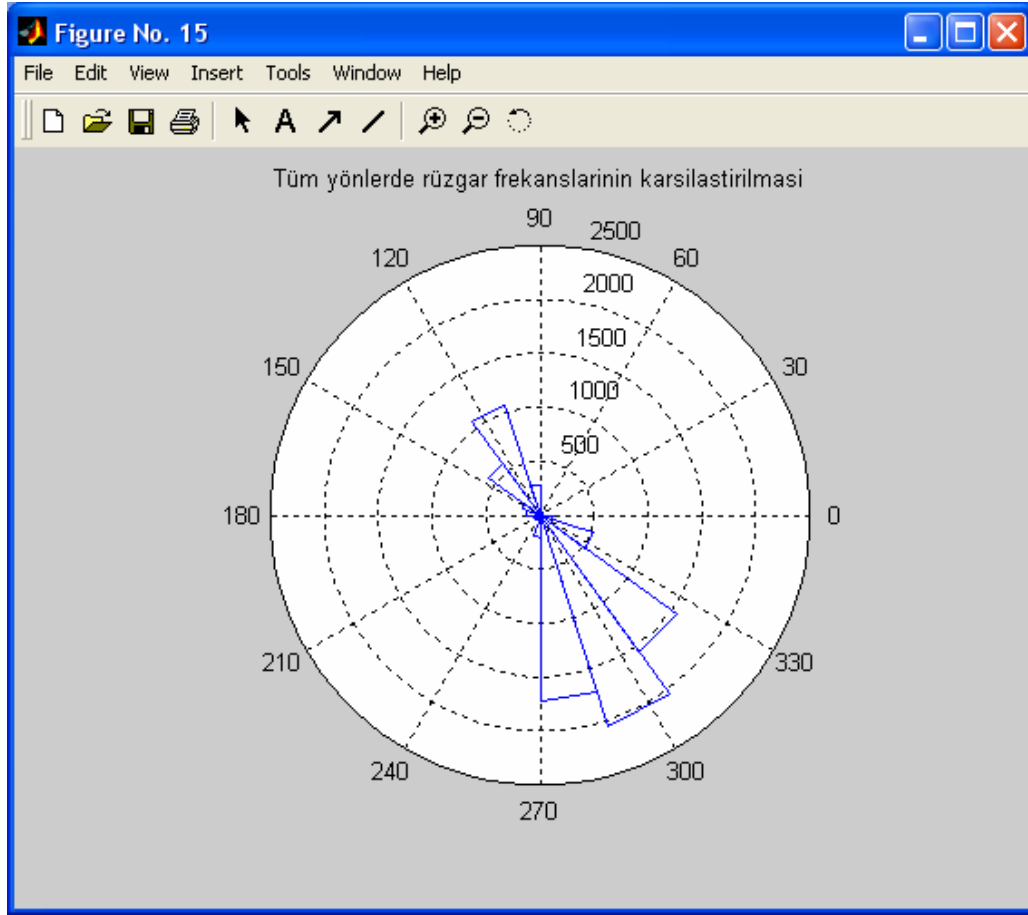
- $345^\circ-15^\circ$, “E” (doğu)
- $15^\circ-45^\circ$, “ENE” (doğu-kuzeydoğu)
- $255^\circ-285^\circ$, “S” (güney)

- 285°-315° , “SSE” (güney-güneydoğu) v.b.

RTA’da 10 m yükseklikteki rüzgar hızları ve yönlerine göre, her yön için rüzgar hız ortalamaları ve esme sıklıkları hesaplanmıştır. Şekil 6.12 ve R.Ç.T. Tablo.7’ye göre, en yüksek rüzgar hızı ortalaması 7,86 m/s ile “S” (güney) yönündedir ve 1766 kez esmiştir. Şekil 6.13 ve R.Ç.T. Tablo.7’ye göre, en sık esme yönü ise, 3109 kez ile “SSE” (güney-güneydoğu) yönündedir ve rüzgar hızı ortalaması 6,65 m/s’dir.



Şekil 6.14. Tüm yönler için rüzgar hız ortalamaları.



Şekil 6.15. Tüm yönlerde rüzgar frekanslarının karşılaştırılması.

6.4.8.3. Rüzgar hız dağılımları

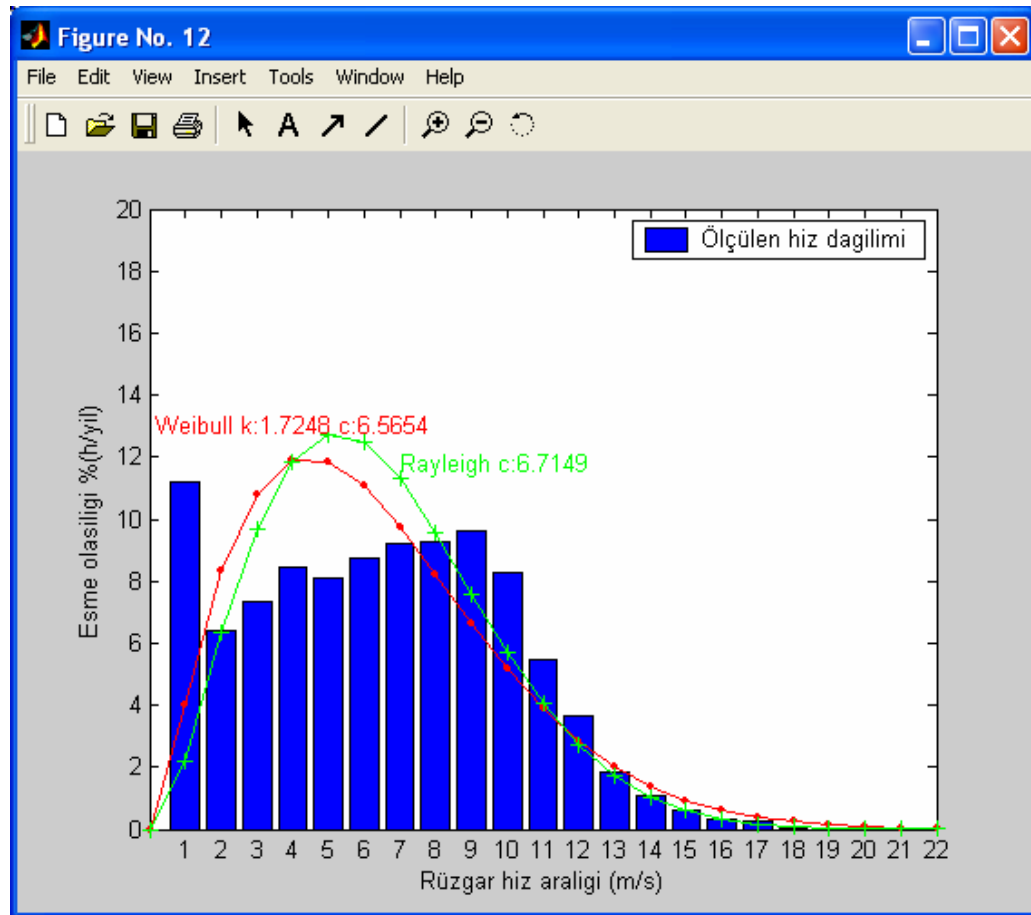
RTA'da eşitlik (2.29)'dan bölgenin Weibull dağılımı için şekil katsayısı "k", ölçek katsayısı "c" hesaplanır. Rayleigh dağılımı için $k=2$ olduğu için, ölçek katsayısı "c" hesaplanır. Ölçülen değerler ile hesaplanan Weibull ve Rayleigh dağılımları arasında karşılaştırma yapılır. Şekil 6.14'e göre; Weibull dağılımı için $k=1,7248$ ve $c=6,5654$, Rayleigh dağılımı için $c=6,7149$ hesaplanmıştır.

Minitab paket programı kullanılarak, ölçüm değerleri ile Weibull ve Rayleigh rüzgar hızı değerleri eşlenerek t-testi uygulanmıştır. Hipotezin doğru olması için, t-hesap değerinin t- tablo dağılım değerlerinin arasında kalması gerekir. Aksi halde, hipotez reddedilir. Bu çalışmada her iki dağılım fonksiyonu için bulunan değerler;

Weibull dağılım fonksiyonu için; $t_{\text{tablo}}=\pm 2.074$, $t_{\text{hesap}}= - 0.003$.

Rayleigh dağılım fonksiyonu için; $t_{\text{tablo}}=\pm 2.074$, $t_{\text{hesap}}= - 0.001$.

Her iki fonksiyon dağılımı için; t_{hesap} değeri, t_{tablo} değerleri arasında kaldığından hipotez kabul edilir. Buna göre; rüzgar hız değerlerinin yüzde esme saati, Weibull ve Rayleigh dağılımlarının yüzde esme saatleri ile uyum göstermektedir.

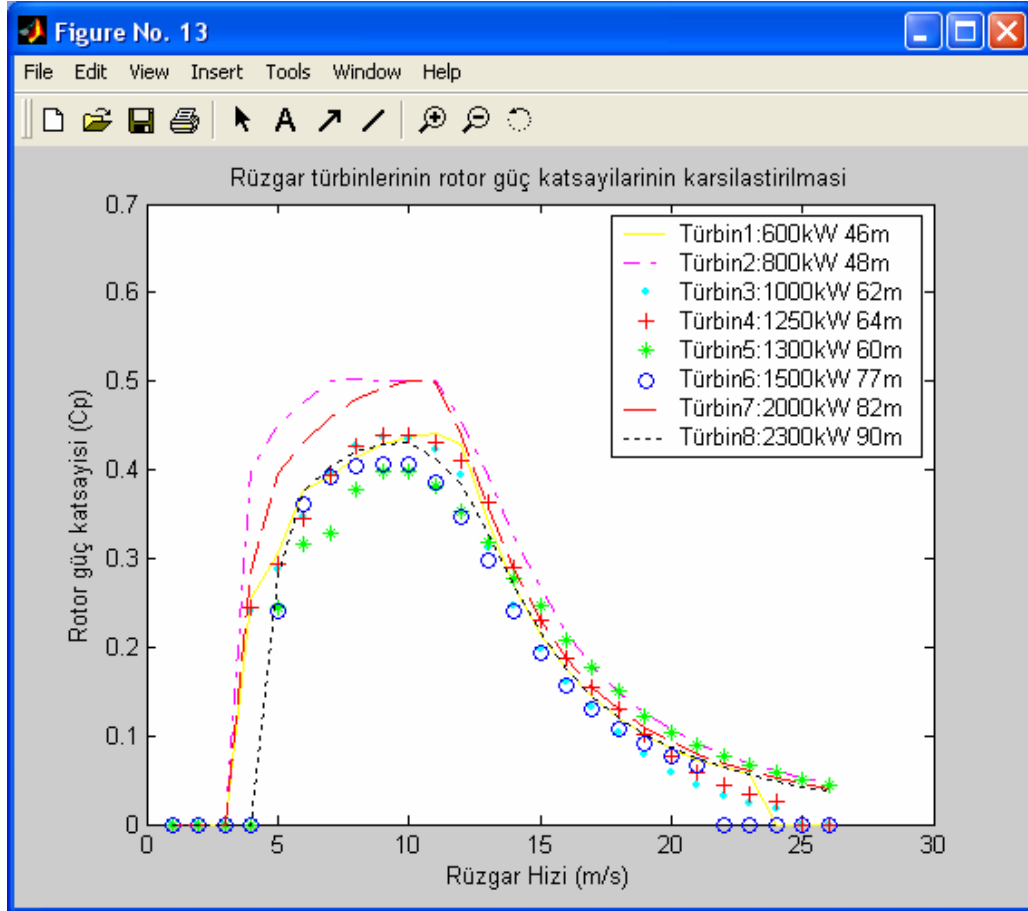


Şekil 6.16. Rüzgar hız dağılımlarının karşılaştırılması.

6.4.9. Rüzgar türbinlerinin rotor güç katsayıları

Bu çalışmada kullanılan rüzgar türbinlerinin rotor güç katsayıları eşitlik (2.14) ile RTA'da kullanılarak, çalışma hızlarındaki rotor güç katsayıları

hesaplanmıştır. Şekil 6.15 ve R.Ç.T. Tablo.7'ye göre, en iyi rotor güç katsayısı 6-7-8-9-10 m/s rüzgar hızlarında $C_p=0.5$ ile E48-800 kW rüzgar türbinidir.

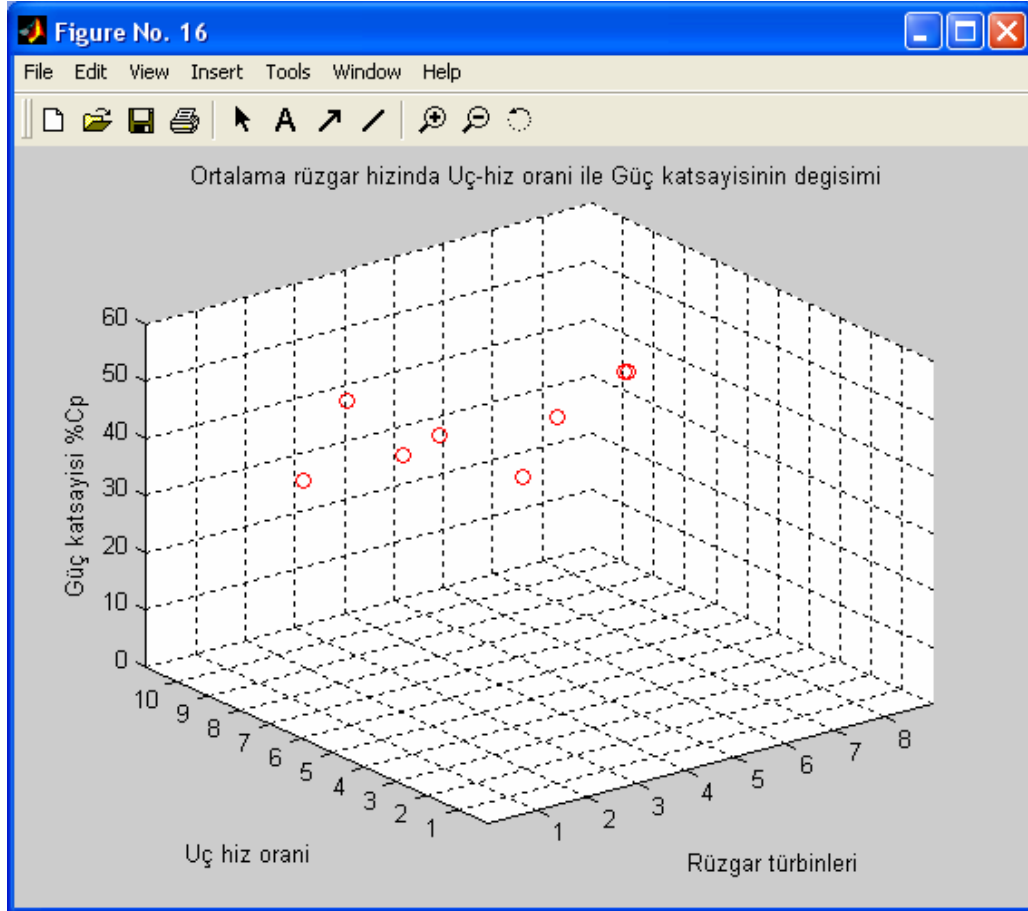


Şekil 6.17. Rüzgar türbinleri rotor güç katsayılarının karşılaştırılması.

6.4.10. Nominal rüzgar hızında türbinlerin güç katsayıları ve uç-hız oranları

RTA'da bölgenin ortalama rüzgar hızına göre, her rüzgar türbininin göbek yüksekliğindeki teorik rüzgar hızları ve bu rüzgar hızlarına karşılık gelen rotor devir sayıları hesaplanır. Eşitlik (2.14), (2.25) ile, bölgenin ortalama rüzgar hızında her türbin için uç-hız oranları ve bu rüzgar hızlarında rotor güç katsayıları hesaplanır. Yüksek verimli 3 kanatlı türbinlerde verimli uç-hız oranları 6-7 oranındadır. Şekil 6.16 ve R.Ç.T. Tablo.9'a göre, ortalama rüzgar hızında en iyi güç katsayısı $C_p=0,5$,

uç-hız oranı $\lambda=7,74$ ile E-48-800 kW rüzgar türbinidir. İkincisi $C_p=0,46$, $\lambda=6,78$ ile E-82-2000 kW rüzgar türbinidir.



Şekil 6.18. Ortalama rüzgar hızında her türbin için uç-hız oranları " λ " ve güç katsayılarının " C_p " karşılaştırılması.

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Datça Bölgesi'nin rüzgar iklim analizine göre; bölgenin yıllık ortalama rüzgar hızı $V_0=5,93$ m/s, ortalama yıllık enerji rüzgar hızı $V_e=7,68$ m/s'dir. Enerji hızına göre yıllık güç potansiyeli $P_{ort}=111,09$ W/m²'dir.

Hakim rüzgar yönü, 255°-285° aralığında 7,86 m/s ortalama ile güney yönündedir. Esmeye sıklığı en fazla, 285°-315° aralığında 3109 kez ile güney-güneydoğu yönündedir. Rüzgar çiftliğindeki türbinlerin yönü, rüzgar hız ortalamasının yüksek olduğu hakim rüzgar yönü güneye doğru konumlandırılmalıdır.

Rüzgar hız dağılım fonksiyonlarının katsayıları; Weibull dağılımı için şekil katsayısı $k=1,7248$ ve ölçek katsayısı $c=6,5654$, Rayleigh dağılımı ölçek katsayısı $c=6,7149$ hesaplanmıştır. Her iki fonksiyon dağılımı için yapılan t- testine göre; t_{hesap} değeri, t_{tablo} değerleri arasında kaldığından hipotez kabul edilmiştir. Buna göre; bölgenin rüzgar hız değerlerinin yüzde esme saati ile Weibull ve Rayleigh dağılımlarının yüzde esme saatleri ile uyumludur.

Muğla mermer işletme tesislerinin yıllık 78 642 900 kWh/yıl elektrik enerji talebini karşılamak için 32 farklı rüzgar çiftliği projesi tasarlanmıştır. Bu projeler arası karşılaştırma yapıldığında, en verimli rüzgar çiftliği projesi en az birim enerji maliyeti $B=0,0553$ ECU/kWh, ile E82-2000 kW-8 RD rüzgar çiftliği projesidir. Bu rüzgar çiftliği için 13 adet türbin gerekmektedir ve yatırım maliyeti $Y=20,8$ milyon ECU'dur. Avrupa'da rüzgar enerjisinin birim maliyeti 0,05-0,08 ECU/kWh aralığında olduğuna göre, bu çalışmada bulunan birim enerji maliyeti oldukça ucuzdur.

Bu rüzgar çiftliği için gerekli arazi alanı, 559,44 hektar'dır ve bu proje için rüzgar çiftliği kurulacak bölgenin arazi alanı yeterlidir.

Rüzgar çiftliğinin bir yılda ürettiği elektrik enerjisi 84 807 354,27 kWh/yıl'dır. Rüzgar çiftliğinin kapasite faktörü, %37,24 ile yüksek bir değerdedir. Almanya'da %20 kapasite faktörü bile kabul görmektedir.

Bu rüzgar çiftliğinin yıllık emisyon tasarrufları ise; $CO_2=84 807,35$ ton/yıl, $SO_2=636 055,16$ kg/yıl, $NO_x=254 422,06$ kg/yıl 'dır. Enerji üretimi yapılırken çevre ve insan sağlığına yapılan tahribatın ekonomik değeri, toplam yatırım maliyetine eklenmelidir. Örneğin Amerika'da kömürlü termik santralin elektrik üretimdeki

toplumsal maliyeti 4 cent/kWh'dir. Bu vergilerden elde edilen gelir ile, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yatırımlar desteklenebilir.

Bu rüzgar çiftliği projesinde kullanılan rüzgar türbinlerinin bölgenin ortalama rüzgar hızındaki, güç katsayıları $C_p=0,46$ ve uç-hız oranları $\lambda=6,78$ ile verimli bir değerdedir.

Gürültü hassasiyeti bakımından, 10 tane rüzgar türbini 500 m mesafede 35-40 dB(A) gürültü seviyesi yaratır. Rüzgar çiftliği kurulacak bölgenin Reşadiye yerleşim bölgesine uzaklığı yaklaşık 1,5 km olduğu için, herhangi bir gürültü söz konusu değildir.

Avrupa'da rüzgar santralleri kendini 5-6 yılda amorti etmesine rağmen, bu çalışmada, kapasite faktörünün yüksek olması ve enerji YEK kanununa göre toptan elektrik satış fiyatı üzerinden satıldığı için kendini 4,51 yılda amorti etmektedir. Elektrik toptan satış ortalaması 8,69 Ykr/kWh ve ECU 1,6 YTL alınmıştır. 20 yıl türbin ömrü üzerinden, 15,49 yıl sürekli kar edilmektedir. Bu bölgede rüzgar çiftliğinin kurulması ticari açıdan karlı bir iş olmaktadır.

Dünya'da kullanılan birçok rüzgar çiftliği tasarım araçları vardır. Bunlardan en gelişmiş WindPRO paket programı, en yaygın olarak kullanılan WASP paket programıdır. WindPRO paket programında; tasarlanacak rüzgar çiftliğinde üretilen enerji, çevresel etki analizleri, ekonomik analiz, rüzgar iklim analizi, rüzgar atlası üretimi, çeşitli rüzgar çiftliği tasarımları, tasarlanacak rüzgar çiftliğinin 3 boyutlu görüntüsü gibi modüllere sahiptir. Tüm modüllerin fiyatı, 25 000 Euro'dur. WASP paket programında ise; rüzgar çiftliğinde üretilen enerji, rüzgar türbinlerinin yerleşimi, rüzgar iklim analizi, rüzgar atlası üretimi modülleri vardır, fiyatı 3 000 Euro'dur. Açıklamalara göre, rüzgar çiftliği tasarım araçları oldukça pahalı paket programlarıdır.

Bu çalışmada tasarlanan RTA'da; farklı seçeneklerde rüzgar çiftliklerinde üretilen enerji, kapasite faktörleri, emisyon tasarrufları, birim enerji ve yatırım maliyetleri, rüzgar iklim analizleri yapılmaktadır. Ayrıca, RTA basit ve esnek bir kullanıma sahiptir. Kullanıcı; türbin çeşitlerini, arazinin özelliğine göre sürtünme katsayısı ve yerleşim verim değerlerini, şebekeye uzaklığına göre elektriksel verim değerini, ülkenin elektrik piyasasına göre sistem kullanım bedelini, enerji hat kayıp

oranını, ülkenin finans değerlerine göre faiz oranını, türbin yatırım maliyetlerini ve elektriğin birim satış fiyatı değiştirilerek kendi şartlarına uygun en verimli rüzgar çiftliği tasarımını yapabilir.

Muğla İli'nin enerji ihtiyacı tarım, madencilik, orman ürünleri, taş ocakları ve turizm sektörlerinde sürekli artmaktadır. Muğla ilinde üretilen mermerin, renk kalite olarak aranan nitelikte olması nedeni ile büyük çapta ihraç edilmektedir. Bu sebeple, son yıllarda mermer ocağı işletmeciliği ve mermer işleme fabrikalarında büyük bir artış görülmektedir.

Muğla ili'nin enerji yapısı ise; Yatağan, Kemerköy, Yeniköy santralleri ile termik santrallere dayanmaktadır. Bu santraller, zengin coğrafya özelliklerine sahip Muğla ili için uygun bir enerji çeşidi değildir. Böyle bir ilin doğasını korumak için, alternatif enerji kaynakları ile enerji üretimine önem verilmesi gerekir. Bunun için, sanayi kuruluşları yenilenebilir enerji kaynaklı otoprodüktör santral kurup kendi enerjilerini kendileri üretmelidir. Bu düşünce hem ticari açıdan hem de Muğla'nın doğal yapısının korunması açısından önemlidir.

Muğla ili'nde, Datça, Yalıkavak ve Göktepe gibi rüzgar potansiyeli yüksek bölgeler olmasına rağmen, henüz kurulu bir rüzgar çiftliği yoktur. Bedava, temiz, çevre maliyeti olmayan ve gelişen teknoloji ile kuruluş maliyeti sürekli düşen böyle bir enerjiden yararlanmamak çok anlamsız olur.

Bu çalışmada Datça bölgesinde otoprodüktör rüzgar santral kuruluşunun faydaları şu şekilde sıralanabilir;

- Elektriği satabileceğimiz birim fiyat yeni YEK kanunu ile oldukça yüksek bir değer olduğu için, yerli rüzgar potansiyeline yatırım yapmak karlı bir iştir. Bu sayede, ithal fosil yakıtlara harcanan döviz tasarruf edilir. Bu ticari avantajlardan dolayı; Avrupa'da bankalar, endüstriyel şirketler ve bireysel kişiler rüzgar enerjisine yatırım yapmaktadırlar.
- Rüzgar endüstrisi, bölgede önemli bir istihdam sağlar. 1 MW rüzgar santrali yaklaşık 22 kişiye iş yaratır. Ayrıca, kırsal alanlarda çiftçilere ödenen kira

bedeli önemli bir ek gelir sağlamaktadır. Türbin temelleri toplam arazinin %1'ni kapsadığı için, geri kalan arazide tarım yapılabilir.

- Rüzgar santralleri yatırımları ile, bölgenin ekolojik dengesi ve doğal yapısı korunur. Fosil kaynaklı enerjiler bölgenin ekolojik zincirini bozar ve insan sağlığına zararlı etkiler yapar.

Ülkemizin şu anki rüzgar santrali kurulu gücü Mayıs 2006'da devreye giren Bandırma rüzgar santrali ile 50,1 MW'a ulaşmıştır. Türkiye'nin 10 000 MW_e 'lik rüzgar güç potansiyeli olduğu tahmin edildiğine göre, bu kurulu güç kapasitesi çok az kalmaktadır. Yeni YEK yasasının teşvikiyle, rüzgar çiftliği proje uygulamaları hızlanmıştır ve sürekli artması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

KİTAP

Chamberlain, R., Forward, S., Genao, Hennessey, P., Krantz, M., McGuinnes, A., Wakefield, M., Wilson, T., 2002. Got Wind? An in-depth analysis of the wind industry and the role it plays in the world today, <http://academic.hws.edu/envstud/GrpSIEReports/Fall02-WindFarms.pdf> , 40p.

Edward, S.C., 2000. Prospects for Sustainable Energy, Cambridge University Press, United Kingdom, 284p.

Gardner, P., Garrad, A., Jamiseson, P., Snodin, H., Nicholls, G., and partners. 2003. Wind Energy – The fact Volume 1 Technology, www.ewea.org/fileadmin/ewea-documents/publications/WETF, 92p.

Gipe, P., 1999. Wind Energy Basics, Chelsa Gren Publishing Company, United States, 122p.

Godfrey, B., 1996. Renewable Energy: power for a sustainable future, Oxford University Press, United Kingdom, 479p.

Heperkan, H., Kesgin, U., 2003. Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 1004p.

Johnson, G.L., 2001. Wind Energy Systems, Electronic Edition, Manhattan KS, 384p.

Cassadey, E.S., 2000. Prospect for Sustainable Energy, Cambridge University Pres, New York, 284p.

Kılınç, E., 2000. Endüstriyel Elektrik, AS Ofset Matbacılık, Kahramanmaraş, 190p.

Kocaman, B. 2003. Elektrik Enerjisi Üretim Santralleri, Birsen Yayınevi Ltd. Şti., 253p.

Nielsen P., 2003. Offshore Wind Energy Projects Feasibility Study Guidelinies, www.emd.dk/Projects/Projekter/Seawind/OTHER%20RELEVANT%20DOCUMENTS/Feasibility%20Study%20Guidelines.pdf, 32p.

Patel, M.R., 1999. Wind and Solar Power Sysytems, CRC Pres LLC, United states of America, 351p.

Sen, P.C., 1987. Principles of Electric Machines and Power Electronics, Queen's University Press, United Kingdom, 479p.

Stiesdal, H., 1999. Bonus Info The Wind Turbine Components and Operation, <http://www.windmission.dk/workshop/BonusTurbine.pdf>, 25p.

Twidell, J.W., Weir, A.D., 1986. Renewable Energy Resources, E & F.N. Spon Ltd., Great Britain, 439.

Watt, F., Wilson, F., 2001. Hava ve İklim, Nurol Matbacılık, Ankara, 48p.

Yerebakan, M., 2001. Rüzgar Enerjisi, Su Matbacılık Ltd Şti., İstanbul, 176p.

MAKALE

Abderrazzag, M.H., 2004. Energy production assesmant of small wind farms, Renewable Energy, 29, : 2261-2272.

Etemoğlu, A.B., İşman, M.K., 2004. Enerji Kullanımının Teknik ve Ekonomik Analizi, Mühendis ve Makine, sayı 529, 1-7.

Hepbaşlı, A., Ozgener, O., 2003. A review on the development of wind energy in Turkey. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 8, : 257-276.

Karsli, V.M., Geçit, C., 2002. An investigation on wind power potential of Nurdağı-Gaziantep, Turkey. Renewable Energy, 28, : 823-830.

Kaya, D., 2004. Renewable energy policies in Turkey. Renewable & Sustainable Energy Reviews, xx, :1-12.

Keedwell, S., 2002. Introducing the Hydrographer to Offshore Wind Farms, The Hydrographic Journal, 105: 1-30.

Marafia, A., Pellerano, A., 2003. Economics of off-shore/on-shore wind energy systems in Qatar, Renewable Energy, 28, : 1953-1963.

Ocak, M., Ocak, Z., Bilgen, S., Keleş, S., Kaygusuz, K., 2003. Energy utilization enviromental pollution and renewable energy sources in Turkey. Energy Conversion & Management, 45, :845-864.

Ozerdem, B., Turkeli, H.M., 2004. Wind energy potential estimation and micrositting on İzmir Institute of Technology Campus Turkey, Renewable Energy, 30, :1623-1633.

Pantaleo, A., Pellerano, A., Ruggiero, F., Trovato, M., 2004. Feasibility study of off-shore wind farms: an application to Puglia region, Solar Energy, xxx, : 1-11.

Sharma, H., Pryor, T., Islam, S., 2004. Effect Of Pitch Control and Power Conditioning On Power Quality Of Variable Speed Wind Turbine Generators, ders notu http://reslab.com.au/publications/Assets/Papers/Sharma_AUPEC_3.pdf, 6p.

BİLDİRİ

Eltez, A., Kara, Ö., Özdamar, A., Özbalta, N., Rüzgar Hızlarının Weibull Dağılım Fonksiyonuna Uyumu Üzerine Bir Araştırma: Bornova Örneği. VI. Türk-Alman Enerji sempozyumu, 21-24 Haziran 2001, İzmir, Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Çevre Korunumu, 493-500.

TEZLER

Çakan, R., İzmit'te Belirlenen Noktada Rüzgar Ölçümü ve Bu Ölçümlere Göre Rüzgar Çiftliğinin Planlanması, Yüksek Lisans, Kocaeli Üniversitesi İzmit, 2000.

Şen, Ç., Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile Karşılanması, Yüksek Lisans, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2003.

Rosen, K., An Assesment Of Potential For Utility Scale Wind Power Generation in Eritrea, Thesis of Master, San Jose State University, 1998.

Toklu, M., Rüzgar Enerjisi ve Elazığ Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı, Yüksek Lisans, Fırat Üniversitesi Elazığ, 2002.

RESMİ GAZETE

T.C. Resmi Gazete a, Elektrik Piyasası Kanunu, 24335, 2001, 44.

T.C. Resmi Gazete b, Elektrik Tarifeleri Yönetmeliği, 22458, 1995, 19.

T.C. Resmi Gazete c, EPDK kurul kararı, 26039, 2005, 2.

T.C. Resmi Gazete d, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, 25819, 2005, 4.

T.C. Resmi Gazete e, EPDK kurul kararı, 248/2, 2003.

T.C. Resmi Gazete f, EPDK kurul kararı, 641, 2006.

T.C. Resmi Gazete g, EPDK kurul kararı, 698, 2006.

ANONİM

Anonim a, Nordex N-43 Tecnical Description, Nordex AG Company, www.nordex-online.com, 2005.

Anonim b, Wind Power Basics, J.P. Saylor & associates Consultants Ltd., www.Windturbinewarehouse.com, 2004.

Anonim c, Where does Wind Energy Come From?, Danish Wind Industry Association, www.windpower.org, 2003.

Anonim d, Noise from Wind Turbines The Facts, The British Wind Energy Association, www.bwea.com/pdf/noise.pdf, 2000.

Anonim e, WindPRO 2.4 User Guide, EMD International A/S, WindPRO 2.4 Help, 2004.

Anonim f, WAsP Help Facility and On-line Documentation, Riso National Laboratory Denmark, 1987-2004.

Anonim g, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Bugünü-Yarını, Türkiye Bilimler Akademisi, http://www.tuba.gov.tr/habergoster.php?haber=bdgorus_13, 2006.

Anonim h, 2006 başında dünya rüzgar santralleri kurulu gücünün kıtalara ve ülkelere dağılımı, Rüzgar Enerjisi ve Su Santralleri İşadamları Derneği, <http://www.ressiad.org.tr/dhie.php?t=istatistikler&ID=30>, 2006.

Anonim ı, 2006 Ocak Dağıtım Sistem Kullanım Bedeli, Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş., http://www.tedas.gov.tr/tarifeler_xls/2006_trf/2006_tedas_tarife.xls, 2006.

Anonim t, Inside the Wind Turbine, U.S. Department of Energy, http://eereweb.ee.doe.gov/windandhydro/wind_how.html, 2005.

Anonim i, Neden Rüzgar Enerjisi?, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, <http://www.ruzgarenerjisibirliigi.org.tr/yayinlar-brosur.htm>, 2005.

Anonim k, Datça, T.C. Muğla Valiliği, <http://www.mugla.gov.tr/3/3203.asp>, 2003.

Anonim l, Enercon E-48 Booklet, ENERCON, http://www.enercon.de/en/_home.htm, 2005.

Anonim m, Datça Muğla, Vikipedi Özgür Ansiklopedi, http://tr.wikipedia.org/wiki/Dat%C3%A7a,_Mu%C4%9Fla, 2006.

Anonim n, D4 Series, DeWind, www.dewind.de/en/downloads/D4-600-100-eng.pdf, 2005.

Anonim o, D6 Series, DeWind, <http://www.eunrg.com/assets/D6-eng.pdf>, 2006.

Anonim ö, S77/1500 kW, Nordex, http://www.nordex-online.com/e/online_service/download/dateien/PB_S70_GB.pdf, 2005.

Anonim p, N60/1300 kW, Nordex, http://www.nordex-online.com/e/online_service/download/dateien/PB_N60_GB.pdf, 2005.

Anonim r, E-48 Tecnicl Data, ENERCON, [http://www.enercon.de/www/en/datenblaetter.nsf/9F24BCD90E70CA81C12570C4004A26F9/\\$FILE/E48_DataSheet_English.pdf](http://www.enercon.de/www/en/datenblaetter.nsf/9F24BCD90E70CA81C12570C4004A26F9/$FILE/E48_DataSheet_English.pdf), 2005.

Anonim s, E-82 Tecnicl Data, ENERCON, [http://www.enercon.de/www/en/datenblaetter.nsf/7AA443BBC9CC7264C12570C4004A26FB/\\$FILE/E82_DataSheet_English.pdf](http://www.enercon.de/www/en/datenblaetter.nsf/7AA443BBC9CC7264C12570C4004A26FB/$FILE/E82_DataSheet_English.pdf), 2005.

Anonim ş, N90/2300 kW, Nordex, http://www.nordex-online.com/e/online_service/download/dateien/PB_N80_GB.pdf, 2005.

Anonim t, Rüzgar Değişikliklerinin Tarifı, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, <http://www.meteor.gov.tr/2005/arastirma/yenienerji/ruzgardegis.pdf>, 2005.

Anonim u, Türkiye Rüzgar Atlası, E.İ.E., http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/ruzgar_ruzgar_atlas.html, 2002.

ÖZGEÇMİŞ

Murat CEYLAN 20.10.1972 tarihinde Denizli’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Denizli’de tamamladı. 1994 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Programından mezun oldu.

1994-2002 yılları arasında sırasıyla; Ağrı Patnos Endüstri Meslek Lisesi, Zonguldak Devrek Çok Programlı Lise, Denizli Yatağan Endüstri Meslek Liselerinde elektrik öğretmeni olarak görev yaptı.

2002 yılında Pamukkale Üniversitesi Denizli Meslek Yüksekokulu Elektrik Programı’nda, öğretim görevlisi olarak göreve başladı. Halen bu kurumda çalışmaya devam etmektedir.