

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGÂR ENERJİSİ KAYNAKLI ELEKTRİK
ÜRETİMİNİN TEKNİK / EKONOMİK ANALİZİ ve
YÖRESEL UYGULAMASI**

Makina Mühendisi Volkan HAMAMCIOĞLU

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet DAĞDAŞ

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTIMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ.....	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi	1
1.2 Mevcut Durum ve Gelecekteki Görünüm.....	2
1.2.1 Avrupa’da rüzgâr enerjisi	3
1.2.1.1 Avrupa’da rüzgâr enerjisi kapasitesi	3
1.2.2 Dünyada rüzgâr enerjisi	8
1.2.2.1 Rüzgâr piyasası liderleri	9
1.2.2.2 Kıtasal Dağılım.....	10
1.2.2.3 Küresel kriz ve rüzgâr.....	11
1.2.2.4 Dünya genelinde gelecek üzerine tahminler.....	12
1.2.3 Ülkemizdeki durum	12
2. RÜZGÂR ÖLÇÜMLERİ ve TÜRBLNERİ	14
2.1 Rüzgâr Ölçümleri.....	14
2.1.1 Beaufort rüzgâr ölçeği	15
2.1.2 Rüzgâr gözlem istasyonları.....	16
2.2 Rüzgâr Türbinleri.....	16
2.2.1 Rüzgâr türbini çeşitleri	17
2.2.1.1 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri	17
2.2.1.2 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri.....	19
2.2.2 Rüzgâr türbini temel elemanları	20
3. RÜZGÂR ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ	21
3.1 Hız ve Güç İlişkileri.....	21
3.2 Rotorun Süpürdüğü Alan	22
3.3 Atmosferik Şartların Rüzgâr Gücü Üzerindeki Etkileri	22
3.3.1 Sıcaklığın hava yoğunluğuna etkisi	22
3.3.2 Kule yüksekliğinin etkisi	23
3.4 Rüzgârdan Elde Edilen Güç	25
3.5 Rüzgâr Hızının İstatistiksel Değerlendirmesi	28

3.5.1	Ortalama rüzgâr gücü	28
3.5.2	Rüzgâr hızı olasılık dağılım fonksiyonları	29
3.5.2.1	Weibull olasılık dağılımı	30
4.	RÜZGÂR ENERJİSİ VE ÇEVRE	33
4.1	Rüzgâr Enerjisinin Çevreye Faydaları	33
4.2	Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)	35
4.2.1	Net enerji analizi (NEA)	37
4.2.2	Yaşam döngüsü emisyonu (LCE)	39
4.3	Rüzgâr Enerjisinin Çevresel Problemleri	41
4.3.1	Kuş zayıatı	41
4.3.1.1	AB ülkelerinde kuş zayıatı	41
4.3.2	Gürültü kirliliği	42
5.	NÜMERİK ÇALIŞMA	43
5.1	WASP (Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Programı)	43
5.1.1	Data analizi	44
5.1.1.1	Rüzgâr ölçüm verilerinin değerlendirilmesi	44
5.1.1.2	Yakın çevresel engel bilgileri	44
5.1.1.3	Arazi yüzey pürüzlülük bilgileri	45
5.1.1.4	Topoğrafya bilgisi	48
5.1.2	Santral sahası için rüzgâr atlasının oluşturulması	48
5.1.3	Rüzgâr türbinleri ve enerji üretim miktarlarının belirlenmesi	48
5.2	Uygulama	49
5.2.1	Yıldız Kampüsü'nün yıllık enerji ihtiyacı	50
5.2.2	Gözlemlenen rüzgâr verilerinin analizi	50
5.2.2.1	Ölçüm istasyonunun kurulumu	50
5.2.2.2	Rüzgâr gözlemlerinin eklenmesi	51
5.2.2.3	Arazinin tanımlanması	54
5.2.3	Rüzgâr atlasının hesaplanması	59
5.2.4	Türbinin konumlandırılması	60
5.2.5	Birinci senaryo	61
5.2.6	İkinci senaryo	64
6.	EKONOMİK ÇALIŞMA	67
6.1	Rüzgâr Enerjisi Ekonomisi	67
6.1.1	Rüzgâr enerji ekonomisine etki eden faktörler	68
6.1.1.1	Sahaya özgü faktörler	69
6.1.1.2	Makine değişkenleri	70
6.1.1.3	Enerji pazarı	71
6.1.1.4	Teşvik ve muafiyet	72
6.1.2	Şimdiki değer yaklaşımı	73
6.1.3	Rüzgâr enerjisi maliyeti	75
6.1.3.1	İlk yatırım	77
6.1.3.2	İşletme ve bakım maliyeti	77
6.1.3.3	Yıllık maliyetin şimdiki değeri	79
6.1.3.4	Harici masraflar	81
6.1.3.5	Harici gelirler	82
6.1.4	Rüzgâr enerjisinden elde edilen fayda	83
6.1.5	Ekonomik değer kriterleri	84
6.1.5.1	Net şimdiki değer (NPV)	84

6.1.5.2	Fayda masraf oranı (<i>BCR</i>).....	85
6.1.5.3	Geri ödeme süresi (<i>PBP</i>).....	85
6.1.5.4	İç verimlilik oranı (<i>IRR</i>).....	86
6.2	Yıldız Kampüsü İçin Ekonomik Analiz	87
6.2.1	Birinci senaryo.....	89
6.2.2	İkinci senaryo.....	91
6.2.3	Duyarlılık analizi	93
7.	SONUÇLAR.....	96
KAYNAKLAR.....		97
ÖZGEÇMİŞ.....		99

SİMGE LİSTESİ

A	Rotor alanı [m^2]
B_A	Projeden elde edilecek yıllık fayda miktarı [€/yıl]
BCR	Fayda masraf oranı
c	Skala parametresi [m/s]
$c_{alış}$	Devletten elektrik alış fiyatı [€/kWh]
c_c	Harici gelirler [€/kWh]
c_e	Harici giderler [€/kWh]
$c_{satış}$	Devlete elektrik satış fiyatı [€/kWh]
c_w	Rüzgâr türbininden elde edilen elektriğin birim maliyeti [€/kWh]
C_A	Yıllık maliyet [€/yıl]
C_a	Birim alan başına düşen maliyet [\$/ m^2]
C_E	kWh başına düşen maliyet [€/kWh]
C_p	Rotor verimi
C_{PR}	kW başına düşen maliyet [\$/kW]
C_T	Türbin maliyeti [€]
D	Rotor çapı [m]
D_e	Engelin derinliği [m]
e	Eskalasyon oranı
e_a	Görünür eskalasyon oranı
E	Güç yoğunluğu [W/m^2]
E_{CL}	Sistemin ömrü boyunca tükettiği enerji miktarı [kWh]
E_l	Yıllık enerji üretim miktarı [kWh/yıl]
E_p	Toplam enerji üretim miktarı [kWh]
EPP	Enerji geri dönme süresi [yıl]
EPR	Enerji geri dönme oranı
f	Frekans
F_C	Yıllık sabit maliyet [€/yıl]
H	Yükseklik [m]
G	Engelin tahmini geçirgenliği
I	Reel iskonto oranı

IRR	İç verim oranı
i	Faiz oranı
κ	Şekil parametresi
m	Kütle [kg]
\dot{m}	Kütlesel debi [kg/s]
n	Rüzgâr türbin ömrü [yıl]
MA	Gazın moleküler ağırlığı [g/mol]
NPV	Net şimdiki değer
Π	Pi sayısı
P	Hava basıncı [atm]
PBP	Geri ödeme süresi [yıl]
P_k	Rotordan elde edilen mekanik rüzgâr gücü [watt]
P_w	Havanın mekanik gücü [watt]
P_R	Türbin tasarım gücü [kW]
ppmv	Birim hacimsel hal için milyonda kısım 1 m ³ havadaki cm ³ olarak kirletici veya bileşen miktarı
R	Gaz sabiti [m ³ .atm/K.mol]
R_r	Rotor yarıçapı [m]
R_1	Engelin ilk köşesinin RGI'ye olan uzaklığı [m]
R_2	Engelin ikinci köşesinin RGI'ye olan uzaklığı [m]
r	Enflasyon oranı
T	Mutlak sıcaklık
V	Hacim [m ³]
V_C	Yıllık değişken maliyet [€/yıl]
v	Rüzgâr hızı [m/s]
v_i	Rotor kanatlarının girişindeki rüzgâr hızı [m/s]
v_k	Rotor kanatları düzlemindeki rüzgâr hızı [m/s]
v_o	Rotor kanatlarının çıkışındaki rüzgâr hızı [m/s]
W_{KE}	Havanın kinetik enerjisi [J]
ω_m	Kanat açısal hızı [Rd/s]
z_0	Pürüzlülük uzunluğu [m]
α	Sürtünme katsayısı

β	Engelin köşesinin kuzey doğrultuyla yaptığı açı [°]
ρ	Yoğunluk [kg/m ³]
ρ_0	Havanın deniz seviyesindeki yoğunluğu [kg/m ³]

KISALTMA LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BM	Birleşmiş Milletler
DEWI	German Wind Energy Institute
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
EWEA	European Wind Energy Association
EWG	Energy Watch Group
IEC	Iowa Energy Center
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
KEI	Kampüsün Enerji İhtiyacı
KHO	Kanat-ucu Hız Oranı
M.Ö.	Milattan Önce
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NMVOC	Non-methane Volatile Organic Compounds
RES	Rüzgâr Enerji Santrali
RGİ	Rüzgâr Gözlem İstasyonu
SRTM	Space Radar Topography Mission
TCMB	Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası
TMMOB	Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
UTM	Universal Transverse Mercator
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
WWEA	World Wind Energy Association

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 AB 1995 yılı enerji kaynaklarının toplam kurulu güçteki payları (EWEA, 2009)	6
Şekil 1.2 AB 2008 yılı enerji kaynaklarının toplam kurulu güçteki payları (EWEA, 2009)	6
Şekil 1.3 AB 1995 – 2009 yılları arası rüzgâr enerjisi kurulumu (EWEA, 2010).....	7
Şekil 1.4 AB 1995 – 2009 yılları arası kümülatif rüzgâr enerjisi kurulumu (EWEA, 2010).....	7
Şekil 1.5 Global kümülatif RES kurulu güç artışı (Durak, 2010)	8
Şekil 1.6 Global yıllık kurulan RES kapasitesi (Durak, 2010).....	9
Şekil 1.7 Rüzgâr enerjisinde kurulu güç kapasitesi bakımından ilk on ülke.....	10
Şekil 1.8 Yıllara göre dünyadaki rüzgâr enerjisi istihdam değerleri (WWEA, 2009).....	11
Şekil 2.1 Kupalı anemometre (Küçükçalı, 2008)	15
Şekil 2.2 Yatay eksenli rüzgâr türbini (Küçükçalı, 2008)	18
Şekil 2.3 Düşey eksenli rüzgâr türbini (Patel, 2006).....	19
Şekil 3.1 1 atm basınç altında hava yoğunluğunun hava sıcaklığı ile değişimi [2].....	23
Şekil 3.2 α değerine bağlı olarak farklı yükseklikler için rüzgâr hız ve güç oranları arasındaki ilişki [2].....	25
Şekil 3.3 Bir rüzgâr türbininin maruz kaldığı rüzgâr kanalı boyunca oluşan rüzgâr hızları [6]25	
Şekil 3.4 v_o / v oranına göre rotor verimliliği (Patel, 2006).....	27
Şekil 3.5 KHO'nun türbin verimliliğine etkisi [7].	28
Şekil 3.6 Rüzgâr hızları ve esme sıklıkları [7].	29
Şekil 3.7 Rüzgâr hızına ait olasılık yoğunluk fonksiyonu [7].	30
Şekil 3.8 Weibull olasılık dağılım fonksiyonu (Patel, 2006).	31
Şekil 3.9 Skala faktörü c'nin Rayleigh dağılımı üzerindeki etkisi [7].	32
Şekil 4.1 Kömür santrallerinde ortaya çıkan atmosferik emisyonlar (Mathew, 2006).....	33
Şekil 4.2 Rüzgâr türbini yaşam döngüsünün çeşitli basamakları (Mathew, 2006).	36
Şekil 4.3 LCA'nın çeşitli basamakları.....	37
Şekil 4.4 Çeşitli enerji kaynaklarının yaşam döngüsü emisyonları (Mathew, 2006).....	40
Şekil 4.5 AB ülkelerinde kuş ölümleri (Durak ve Özer, 2008)	41
Şekil 5.1 Pürüzlülük sınıfı 0 olan arazi örneği (WAsP 9)	46
Şekil 5.2 Pürüzlülük sınıfı 1 olan arazi örneği (WAsP 9)	46
Şekil 5.3 Pürüzlülük sınıfı 2 olan arazi örneği (WAsP 9)	47
Şekil 5.4 Pürüzlülük sınıfı 3 olan arazi örneği (WAsP 9)	47
Şekil 5.5 ENKA binası üzerindeki anemometre.....	50
Şekil 5.6 İstanbul izohips haritası.....	51
Şekil 5.7 Anemometrenin ondalık derece cinsinden koordinatları.....	51

Şekil 5.8 Rüzgâr hız ve yön değerlerinin programa yüklenmesi.....	52
Şekil 5.9 Rüzgâr yön histogramı	52
Şekil 5.10 Hâkim rüzgâr yönü rüzgâr hız dağılım frekans (%) değerleri.....	52
Şekil 5.12 Rüzgâr gözlem istasyonu ve 5 km’lik çevresinin kuş bakışı görünümü	58
Şekil 5.13 Rüzgâr gözlem istasyonu sektör ve pürüzlülük bilgileri	58
Şekil 5.14 Anemometre konumundan bir fotoğraf.....	59
Şekil 5.15 Hümayun Bahçesi’nin konumu	60
Şekil 5.16 Vestas V 80 rüzgâr türbini için rüzgâr kırıcılar.....	62
Şekil 5.17 Vestas V 80 rüzgâr türbini için güç eğrisi.....	62
Şekil 5.18 Birinci senaryo için enerji yoğunluk analizi.....	63
Şekil 5.19 Birinci senaryo için yıllık enerji potansiyeli analizi.....	64
Şekil 5.20 SWT 3,6 - 107 rüzgâr türbini için güç eğrisi.....	65
Şekil 5.21 İkinci senaryo için enerji yoğunluk analizi	66
Şekil 5.22 İkinci senaryo için yıllık enerji potansiyeli analizi	66
Şekil 6.1 Rüzgâr enerjisi maliyetinin tarihsel seyri (Mathew, 2006)	68
Şekil 6.2 Rüzgâr şiddetinin rüzgâr ile üretilen elektrik maliyetine etkisi (Mathew, 2006).....	69
Şekil 6.3 Orantılı büyüme yoluyla maliyetin azalması (Mathew, 2006).....	70
Şekil 6.4 Para akış diyagramı.	74
Şekil 6.5 Rüzgâr enerji projeleri için ana para yatırımı. (Mathew, 2006).....	77
Şekil 6.6 Genel bakımın türbin ömrüne etkisi. (Durak ve Özer, 2008).....	79
Şekil 6.7 Rüzgâr enerji projesinin maliyeti.	79
Şekil 6.8 Kapasite faktörünün enerji maliyetine etkisi (Mathew, 2006).....	81
Şekil 6.9 Bir rüzgâr enerji projesinde nakit akış diyagramı.	84
Şekil 6.10 Maliyet ve faydanın kümülatif şimdiki değeri. (Mathew, 2006)	86
Şekil 6.11 Maliyet ve faydaların farklı faiz oranlarındaki kümülatif şimdiki değeri. (Mathew, 2006)	87
Şekil 6.12 Geri ödeme süresinin faiz oranı ile değişimi.....	94
Şekil 6.13 Geri ödeme süresinin ilk yatırım maliyetinin birim fiyatı ile değişimi.....	94
Şekil 6.14 Geri ödeme süresinin devlete elektrik satış fiyatı ile değişimi.....	95

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.2 AB ülkelerinde 2009 yılı itibariyle rüzgâr enerjisi kurulu gücü (EWEA, 2010)	5
Çizelge 2.1 Beaufort rüzgâr ölççeği (Küçükçalı, 2008).....	15
Çizelge 3.1 Farklı yeryüzü topolojileri için sürtünme katsayıları [2].....	24
Çizelge 4.1 600 kW gücündeki bir rüzgâr türbini için gerekli materyaller (Mathew, 2006)...	36
Çizelge 4.2 600 kW gücündeki bir rüzgâr türbininde kullanılan materyaller için enerji eşdeğeri (Mathew, 2006).	38
Çizelge 4.3 600 kW gücündeki bir rüzgâr türbinin saldığı emisyonlar (Mathew, 2006).	39
Çizelge 4.4 Çeşitli gürültü kaynaklarının gürültü seviyeleri (Durak ve Özer, 2008).....	42
Çizelge 5.1 Örnek engel tanımlama formu. [1].....	45
Çizelge 5.2 Weibull parametreleri.....	53
Çizelge 5.3 Frekans cetveli.....	54
Çizelge 5.4 Engel tanımlama formu	55
Çizelge 5.5 Pürüzlülük tanımlama formu (WAsP 9).....	56
Çizelge 5.6 Rüzgâr gözlem istasyonu için pürüzlülük değerleri	57
Çizelge 5.7 Rüzgâr atlası özet değerleri	59
Çizelge 5.8 Rüzgâr türbini konumu için pürüzlülük değerleri	61
Çizelge 6.1 Enerji Üretim Maliyetleri (Gökçınar ve Uyumaz, 2008).	68
Çizelge 6.2 İç ve harici maliyetler (Gökçınar ve Uyumaz, 2008).	81
Çizelge 6.3 Almanya için rüzgâr enerjisi ile üretilen elektriğin harici masraf değerleri. (Ruiz, 2003).....	82
Çizelge 6.4 Senaryo 1 ve 2 için ekonomik kriterlerin kıyaslaması	93

ÖNSÖZ

Rüzgâr enerjisi kaynaklı elektrik üretiminin incelendiği ve Yıldız Teknik Üniversitesi Yıldız Kampüsü için teknik ve ekonomik açıdan uygulamasının analizinin yapıldığı yüksek lisans tez çalışmasında bilgi birikimiyle bana yol gösteren, yazım aşamasında karşılaşılan her türlü zorluğa eşsiz yardımlarıyla ışık tutan danışmanım Sayın Doç. Dr. Ahmet DAĞDAŞ'a ve tecrübelerini benimle paylaşan, çalışmama destek veren, zaman ayıran değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Sahip oldukları sınırlı zaman zarfında benden yardımlarını esirgemeyen, çalışmama katkıda bulunan Sayın Arş. Gör. Şaban PUSAT'a ve çalışmalarım için vakit ayırarak fedakârca benimle birlikte konunun ayrıntılarına inen, daha iyiye ulaşmak için emek sarf eden değerli arkadaşım Makine Yüksek Mühendisi Hasan Ali Taha ÖZTÜRK'e, önemli noktalarda yaptıkları yardımlarla çalışmamın şekillenmesine yardımcı olan değerli arkadaşlarım Elektrik Yüksek Mühendisi Ebubekir FIRTIN'a ve Makine Mühendisi Doğukan KAHRAMAN'a teşekkürü borç bilirim.

Meslek yaşamıma devam ederken öğrenim hayatıma devam etmeme imkân tanıyan Sarmakina AŞ Müdürü Sayın Sadık SAZAN'a, çalışma hayatının inceliklerine ışık tutan, bana bir müdürden çok bir öğretmen gibi yaklaşan, benden desteğini esirgemeyen Sayın M. Attila OFLAZ'a, tez çalışmalarım ile devamlı ilgi ve alaka içerisinde olan Sayın Ercan AFŞAR'a ve Sayın Raşit ÖZLEM'e, çalışmalarımı sürdürürken fabrikadan uzak kaldığım anlarda gönül rahatlığı ile sorumluluğumu emanet ettiğim Sayın Mustafa BALCIOĞLU'na ve tüm çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Hayattaki bazı sıkıntılı ve zor anlarda omuzlarımı her zaman yanında hissettiğim ve hakkını asla ödeyemeyeceğim anneme, öğrenim hayatımda yoluma devam etmem için beni teşvik eden, maddi manevi yardımlarını esirgemeyen babama ve söz konusu ben olunca hiçbir fedakârlıktan kaçınmayacak olan yegâne insan ablama şükran duygularımı sunmayı onurlu bir görev addediyorum.

Tez çalışmasının tamamlanması esnasında sıkıntılarımı paylaşan, bana sürekli destek olan, salt varlığının bile benim için çok değerli olduğu özel insan Aybike Öznumcu'ya, teşekkürlerimi sunuyorum.

Mayıs 2010

Volkan HAMAMCIOĞLU

ÖZET

Saygın bilim adamları ve ekonomi uzmanlarından oluşan EWG'ye göre (Enerji İzleme Grubu) 2037 yılı itibariyle yenilenebilir olmayan enerji kaynakları ile enerji üretimi yapılamayacaktır. Fosil enerji kaynakları tarafından atmosfere verilen gazların sera etkisi yaratması sonucunda, dünya atmosferi ve okyanuslarının ortalama sıcaklıklarında belirgin bir miktarda artış vardır.

Artan dünya nüfusu ve teknolojinin gelişimi enerjiye olan bağımlılığı ve ihtiyacı son yıllarda daha belirgin bir biçimde artırmış, bu duruma bağlı olarak enerji temini ve çevre kirliliği önemli sorunlar haline gelmiştir. Sera gazı salımını engellemeye yönelik önlemlerin başında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gelmektedir. Dünyanın sahip olduğu yenilenebilir enerji potansiyeli yeryüzündeki ülkelerin enerji ihtiyaçlarının toplamını karşılayacak kapasitededir.

Çalışmamda bir bölgenin elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgâr enerjisi ile karşılanması konusunda genel prensipler araştırılmış ve rüzgâr enerjisinin önemi anlatılmıştır. Dünya var olduğu sürece atmosferik şartlardan dolayı oluşmaya devam edecek olan rüzgâr enerjisi, son 23 yılda maliyetteki % 84 oranındaki azalmanın da etkisiyle son zamanlarda dünyanın en hızlı büyüyen enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisi yararlanılabilecek güçlü, temiz enerjilerden bir tanesidir, hava kirliliğine sebep olmaz, asit yağmurlarının oluşması gibi çevreye zararlı etkileri de yoktur.

Bu çalışmada Yıldız Teknik Üniversitesi Yıldız Kampüsü'ne 860 m mesafede kurulu ölçüm istasyonunda yapılan ölçümlerden elde edilen veriler değerlendirilerek, bölgenin rüzgâr enerji potansiyeli belirlenmiştir. Daha sonra seçilen iki farklı kapasitedeki rüzgâr türbininin üreteceği yıllık enerji miktarı WAsP programı yardımıyla hesaplatılmış, rüzgârdan elde edilen elektriğin birim maliyeti, geri ödeme süresi, iç verim oranı gibi kıyaslama yapmak için gerekli ekonomik kriterler iki farklı senaryo için hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Rüzgâr enerjisi, elektrik üretimi, rüzgâr enerjisi ve çevre, WAsP, Yıldız Teknik Üniversitesi, ekonomik analiz

ABSTRACT

According to EWG (Energy Watch Group), which is formed by valuable scientists and economy specialists, starting from 2037 non-renewable energy resources will not be used for energy production. The gases formed from fossil energy resources cause greenhouse effect and as a result of this; there has been a rise in the temperatures of the atmosphere and oceans.

Increasing world population and technological developments have increased the need for energy and as a result of this; energy production and environmental pollution have become serious problems. The usage of renewable resources is one of the important solutions in avoiding the emission of greenhouse gases. World renewable energy resources are enough to supply the whole energy need of the countries in the world.

In my work, general principals about supplying the energy need of a region with wind energy has been searched and the importance of the wind energy has been explained. Wind energy that will always exist as a result of atmospheric conditions, is the fastest growing energy resource due to 84% decrease of the costs in the previous 23 years. Wind energy is one of the strong and clean energy resources; it avoids air pollution and does not have harmful effects like formation of acid rains.

In this work, by using the wind measurements that has been made in 860 m distance from Yıldız Technical University Yıldız Campus, the wind energy potential of the region has been evaluated. Then two wind turbines with different capacities were chosen to calculate the annual energy production with WAsP Program and calculate economic criteria like unit cost of electricity, pay back period and internal rate of return were calculated for both cases in order to make a comparison.

Keywords: Wind energy, electric generation, wind energy and environment, WAsP, Yıldız Technical University, economic analysis

1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusu, modern hayatın getirdiği yenilikler ve teknolojinin gelişimi enerjiye olan bağımlılığı ve ihtiyacı son yıllarda daha belirgin bir biçimde artırmış ve enerji en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. Bu sorun mevcut enerji kaynaklarının iyi kullanılması ve yeni enerji kaynaklarının bulunması ile aşılmaya çalışılmaktadır. Dünyada halen kullanılmakta olan enerji kaynakları “Fosil Enerji Kaynakları”, “Nükleer Enerji Kaynakları” ve “Yenilenebilir Enerji Kaynakları” olmak üzere üç ana başlık altında incelenmektedir.

Dünyamızın sahip olduğu yenilenebilir enerji potansiyeli yeryüzündeki ülkelerin enerji ihtiyaçlarının toplamını karşılayacak kapasitededir. Örneğin, günlük rüzgâr enerjisi girdisinin % 1'inin kullanımıyla dünya enerjisinin tamamını karşılamak mümkündür (Durak ve Özer, 2008).

Günümüzde rüzgâr enerjisi, enerji açığını kapatabilecek miktarlarda üretilmese bile, kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bunun temel nedenleri arasında, işletme giderlerinin düşük miktarda olması ve hammadde gerektirmemesi yatmaktadır (Durak ve Özer, 2008).

1.1 Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi

İnsanoğlunun, rüzgârın gücünü keşfedip onun gücünden yararlanmaya başlaması çok eski dönemlere dayanır. Rüzgâr gücünden ilk yararlanma şekli olarak yelkenli gemilerin hareket ettirilmesi ve yel değirmenlerinin çalıştırılması gösterilebilir.

Mekanik güç olarak ilk kez kullanılan rüzgârın soyunun nereden geldiğiyle ilgili iki farklı görüş mevcuttur. İlk görüş bu düşüncenin eski Babil İmparatorluğu zamanında olduğu yönündedir. Bu anlayışa göre İmparator Hammurabi rüzgâr gücünü M.Ö. on yedinci yüzyılda sulama amacıyla kullanmayı planlamıştır. Diğer görüş ise yel değirmeninin Hindistan'da doğduğunu iddia etmektedir. M.Ö. dördüncü yüzyılda Kautiliya tarafından Sanskritçe olarak yazılan Arthasastra'da su taşıma düzeneklerinde rüzgârdan bahsedilmiştir. Fakat bu yaklaşımları kanıtlayan herhangi bir kanıt mevcut değildir (Mathew, 2006).

Rüzgâr türbinleri hakkında ilk yazılı bilgiler, M.Ö. 200 – 300 yıllarında yatay eksenli yel değirmenleri ile ilgili olarak yazılmıştır. Ayrıca M.Ö. 700 yıllarında İranlıların da düşey eksenli yel değirmenleri kullandığı somut kanıtlardan bilinmektedir. Rüzgâr gücü kullanım olarak Asya'dan Avrupa'ya 10. yüzyıl civarında geçmiştir. Alman Haçlıları yel değirmenlerini 1190'lı yıllarda Suriye'den ülkelerine götürmüşlerdir. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi Danimarka'da başlamıştır (Durak ve Özer, 2008).

1.2 Mevcut Durum ve Gelecekteki Görünüm

Sera gazı emisyonlarını azaltmak ve sürekli gelişen dünyanın elektrik enerji ihtiyacını yeterli seviyede karşılayabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Birçok ülke, gelecekteki enerji senaryolarında önemli bir şekilde rol almayı garantilemek adına şimdiden politik taslaklarını hazırlamış durumdadır. Rüzgâr da gerek ekonomik gerek ticari açıdan yenilenebilir enerji kaynakları arasında giderek daha da önemli hale gelmektedir.

1990'lı yılların başından itibaren yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili bütün dünyada ileri düzeyde bir hareketlenme başlamıştır. Özellikle AB ülkeleri bu konuda başı çekmektedirler. 2005 yılından sonra başta ABD olmak üzere Çin ve Hindistan'da rüzgâr enerji santrali projeleri artmıştır. Ülkemizde 1995'li yıllardan sonra rüzgâr enerji santrali projelerine ilgi başlamış olup 2005 yılında yenilenebilir enerji kanununun çıkmasıyla birlikte en üst seviyeye ulaşmıştır (Durak, 2010).

Yenilenebilir enerjinin kullanımının artması ve rüzgâr kaynaklı elektrik üretiminin maliyetinin azalmasıyla rüzgâr enerjisi önümüzdeki yıllarda da büyümeye devam edecektir. Avrupa Rüzgâr Enerji Birliği'ne göre 2010 yılında dünya enerji talebinin % 12'si olan 230000 MW kurulu kapasiteye ulaşılması bekleniyor. Bu da piyasa değerinin 25 milyar € olacağını göstermektedir. 2020 yılı itibariyle kurulu gücün 1,2 milyon MW'a ulaşacağı düşünülmektedir (Mathew, 2006).

Rüzgâr enerjisi teknolojisi de büyüyen sanayi ile birlikte değişmektedir. Bu değişimin göstergelerinden biri de deniz üstü santrallerdir. Örneğin, Birleşik Krallık'ta 2006 yılı için toplam kapasitesi 1400 MW olan 20 deniz üstü rüzgâr santrali projesi planlanırken, Almanya'da 60000 MW değerindeki 30 deniz üstü proje uygulamaya konulmuş durumda ve farklı farklı basamaklarda ilerlemektedir. ABD'de aynı şekilde aynı tür projeler yoğunluk kazanmış durumdadır. Bu konudaki bir diğer eğilim de daha büyük makineler için yapılan çalışmalardır. Kapasitif açıdan büyük türbinler birim kW başına daha ucuz olmaktadır. Sektör MW'tan çoklu MW'lara doğru ilerlemektedir. 2 MW ve daha büyük kapasiteli türbinler hızla gelişmeye devam etmektedir. Türbin üretici birkaç firma 5 MW kapasiteli türbin için çalışmalar yapmaktadır. Bu modelde 125 m'lik rotorun her bir kanadının ağırlığı 19 ton civarındadır. Çalışmalar aynı zamanda toplam ağırlığı azaltmaya yönelik olarak yürütülmektedir. Toplam ağırlığın azalması sistem dinamiğine pozitif bir etki yapmaktadır. Akıllı bir mühendislik tasarımı ile NEG Micon 4,2 MW'lık modelinde toplam ağırlığı 214 tonda sınırlayarak dikkat çekici bir başarıya imza attı (Mathew, 2006).

1.2.1 Avrupa’da rüzgâr enerjisi

1.2.1.1 Avrupa’da rüzgâr enerjisi kapasitesi

AB ülkeleri, rüzgâr enerjisi başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranlarının artırılmasına yönelik hedeflere odaklanmıştır. 2009 yılında Avrupa’da toplamda 10526 MW’lık yeni rüzgâr güç kapasitesi kurulmuştur. Bu değer 10163 MW’lık kısmı AB üyesi ülkelere aittir. 2009 yılı içerisindeki güç kapasitesi artışlarına bakıldığında Almanya ve İspanya’nın lider konumda oldukları görülmektedir (EWEA, 2010).

EWEA Başkanı, Christian Kjaer de konuyla ilgili şu şekilde bir açıklama yapmıştır. “Rakamlar; temiz, doğal, yenilenebilir enerjiye doğru gitme gayreti içindeki Avrupa’nın tartışmasız bir numaralı seçeneğinin rüzgâr enerjisi olduğunu gösteriyor. Rüzgâr enerjisi akıllı bir yatırım örneğidir, AB vatandaşları paralarını yakıt ihracatı yapan ülkelere nakledeceklerine kendi ekonomilerine yatırmış olurlar. Rüzgâr enerji yatırımı, teknolojik öncülüğü desteklemek, havayı korumak, enerji bağımsızlığı, ticari fırsatlar ve iş potansiyeli anlamına gelmektedir.” (EWEA, 2009).

Avrupa’da 2008’in her iş gününde ortalama olarak 20 rüzgâr türbini inşa edilmiştir. Yıl sonunda, toplam 160000 işçi AB’deki 11 milyar €’luk yatırımın içinde dolaylı veya dolaysız yoldan bu sektörde çalışmış oldu. 2008’de kurulmuş olan rüzgâr gücü kapasitesi, normal bir rüzgâr yılında, 142 TWh elektrik üretme potansiyeline sahiptir. Bu da AB’nin elektrik talebinin % 4,2’sine eşittir ve yılda 108 milyon ton CO₂ emisyonunu da önlemiş olur. Bu değer 50 milyondan fazla otomobilin Avrupa’daki yollardan uzaklaştırılmasına eşdeğerdir (EWEA, 2009).

Ayrıca 2009’da deniz üstü rüzgâr enerji santrallerinin kurulu gücü de 2061 MW’a ulaşmıştır. Böylece deniz üstü santraller Avrupa’daki toplam kurulu güç olan 76152 MW içerisinde % 2,7 orana sahip olmuştur, deniz üstü rüzgâr enerji santrali projelerinin önümüzdeki yıllarda artacağı tahmin edilmektedir.

Çizelge 1.1’de AB dışında kalan Avrupa ülkelerinin güç kapasitelerinin 2009 yılı gelişimi, Çizelge 1.2’de ise AB ülkelerinde 2009 yılı itibariyle rüzgâr enerjisi kurulu güç kapasiteleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 Avrupa'daki kurulu güç kapasitelerinin 2009 yılı gelişimi (EWEA, 2010)

	2008 Yılı Eklenen Güç (MW)	2008 Sonu Kurulu Güç (MW)	2009 Yılı Eklenen Güç (MW)	2009 Sonu Kurulu Güç (MW)
Aday Ülkeler				
Hırvatistan	1	18	10	28
Türkiye	311	458	345	803
Toplam	312	476	355	831
Avrupa Serbest Ticaret Birliği				
İzlanda	0	0	0	0
Lihtenştayn	0	0	0	0
Norveç	103	429	2	431
İsviçre	2	14	4	18
Toplam	105	443	6	449
Diğer				
Faroe Adaları	0	4	0	4
Ukrayna	1	90	4	94
Rusya	0	9	0	9
Toplam	1	103	4	107

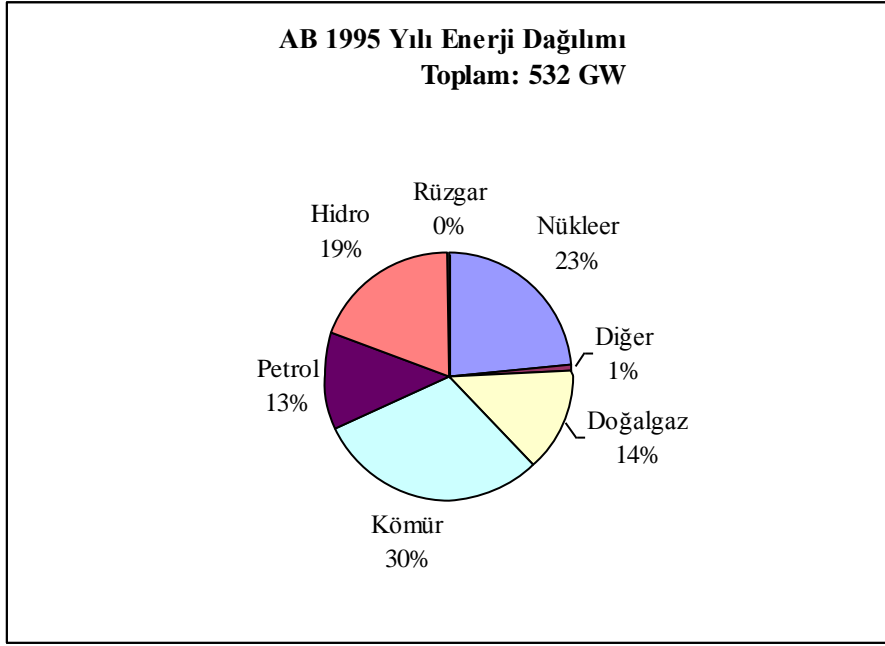
2009 sonu itibariyle AB ülkeleri kapasite toplamı 74767 MW'a, aday ülkeler 831 MW'a, Avrupa Serbest Ticaret Birliği ülkeleri 449 MW'a diğer ülkeler ise 107 MW'a ulaşmıştır. Böylece Avrupa 2009 yılını 75152 MW kurulu güç kapasitesiyle noktalamıştır.

Çizelge 1.2 AB ülkelerinde 2009 yılı itibariyle rüzgâr enerjisi kurulu gücü (EWEA, 2010)

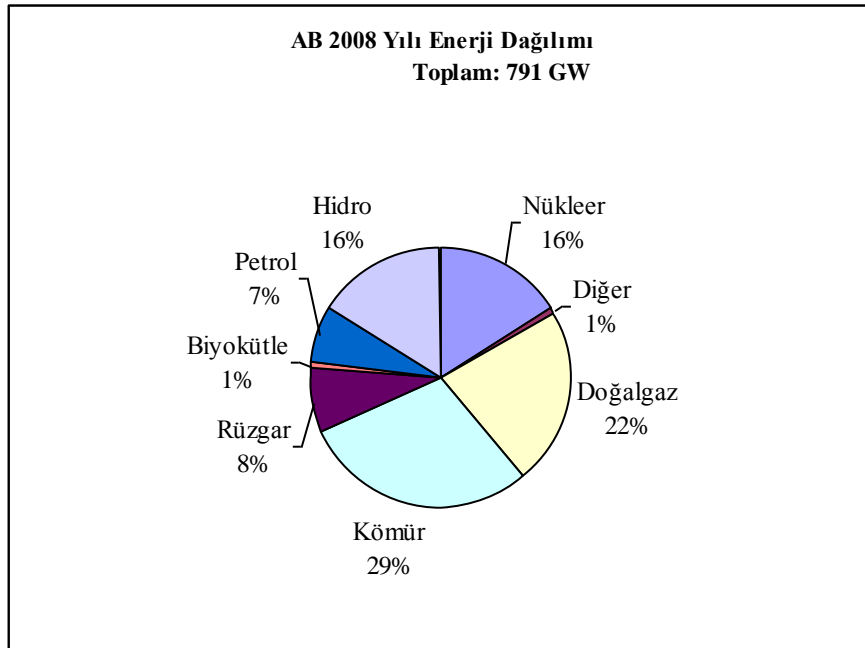
Ülkeler	2008 Yılı Eklenen Güç (MW)	2008 Sonu Kurulu Güç (MW)	2009 Yılı Eklenen Güç (MW)	2009 Sonu Kurulu Güç (MW)
Avusturya	14	995	0	995
Belçika	135	415	149	563
Bulgaristan	63	120	57	177
Kıbrıs	0	0	0	0
Çek Cumhuriyeti	34	150	44	192
Danimarka	60	3.163	334	3.465
Estonya	19	78	64	142
Finlandiya	33	143	4	146
Fransa	950	3.404	1.088	4.492
Almanya	1.665	23.903	1.917	25.777
Yunanistan	114	985	102	1.087
Macaristan	62	127	74	201
İrlanda	237	1.027	233	1.260
İtalya	1.010	3.736	1.114	4.850
Litvanya	0	27	2	28
Letonya	3	54	37	91
Lüksemburg	0	35	0	35
Malta	0	0	0	0
Hollanda	500	2.225	39	2.229
Polonya	268	544	181	725
Portekiz	712	2.862	673	3.535
Romanya	3	11	3	14
Slovakya	0	3	0	3
Slovenya	0	0	0	0
İspanya	1.558	16.689	2.459	19.149
İsveç	262	1.048	512	1.560
İngiltere	569	2.974	1.077	4.051
Toplam	8.268	64.719	10.163	74.767
Deniz üstü kısmı	374	1.479	582	2.061

Şekil 1.1’de AB ülkelerinin 1995 yılı enerji kaynaklarının toplam kurulu güçteki payları, Şekil 1.2’de ise 2008 yılı dağılımları görülmektedir. Görüldüğü gibi kurulu güç bakımından nükleer enerji, petrol ve kömür gibi fosil yakıtla çalışan santrallerin oranı düşerken hidroelektrik, rüzgâr ve biyokütlede artış görülmektedir. 2008 yılında toplam kapasitenin % 8’ine sahip rüzgâr enerjisi, 2009 yılında bu oranı % 9,1’e çıkarmıştır.

Şekil 1.3’te AB ülkelerinin 1995 – 2009 yılları arası yıllık rüzgâr enerjisi kurulum miktarları, Şekil 1.4’te ise yıllara göre kümülatif kapasiteler gösterilmektedir.

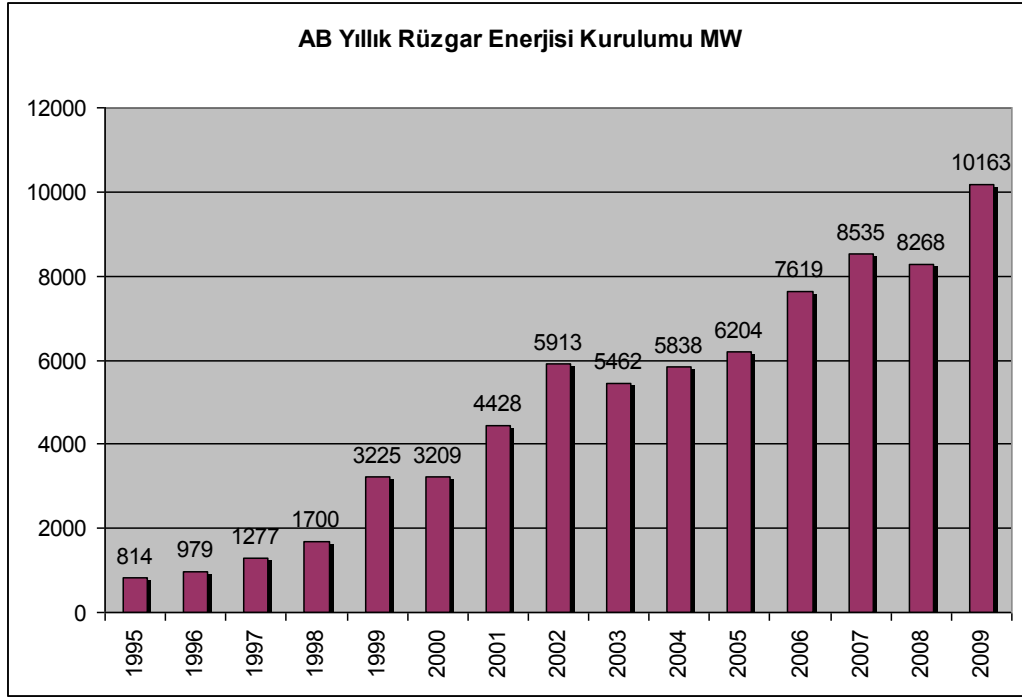


Şekil 1.1 AB 1995 yılı enerji kaynaklarının toplam kurulu güçteki payları (EWEA, 2009)

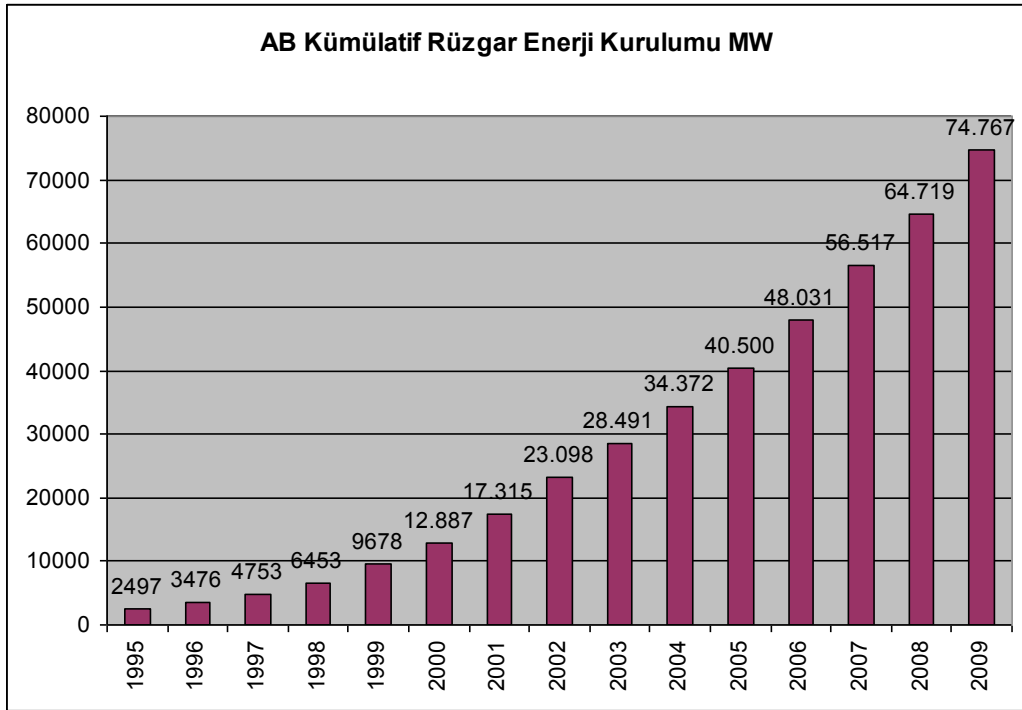


Şekil 1.2 AB 2008 yılı enerji kaynaklarının toplam kurulu güçteki payları (EWEA, 2009)¹

¹ Diğer: Jeotermal, turba ve çöp



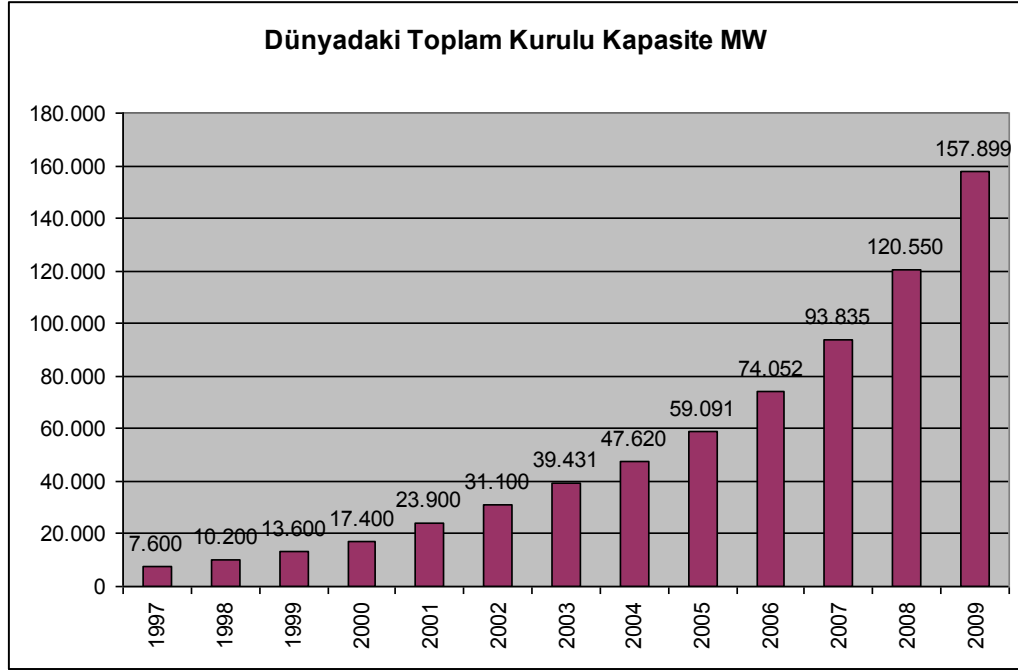
Şekil 1.3 AB 1995 – 2009 yılları arası rüzgâr enerjisi kurulumu (EWEA, 2010)



Şekil 1.4 AB 1995 – 2009 yılları arası kümülatif rüzgâr enerjisi kurulumu (EWEA, 2010)

1.2.2 Dünyada rüzgâr enerjisi

Avrupa’da olduğu gibi bütün dünyada rüzgâr enerjisi en hızlı yayılan enerji kaynağı olmuştur. Global olarak 1997 – 2009 yılları arasındaki yıllık kümülatif artış Şekil 1.5’te görülmektedir. Özellikle 2005 yılından sonra ciddi bir artış gözlemlenmiş ve. Avrupa ülkelerinin yanında Amerika ve Çin’de oldukça büyük yatırımlar yapmışlardır.



Şekil 1.5 Global kümülatif RES kurulu güç artışı (Durak, 2010)

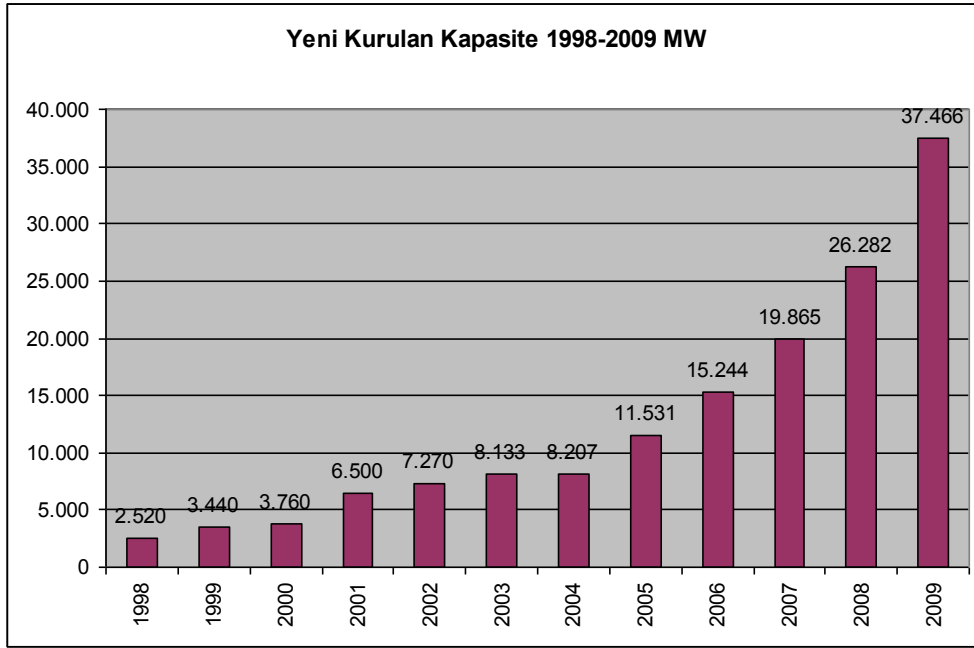
1996 – 2009 yılları arasındaki yıllık global rüzgâr enerjisi kurulu gücünün artışı Şekil 1.6’da görülmektedir. 2009 yılında Asya kıtası Çin ve Hindistan’daki gelişmelerin etkisiyle ciddi şekilde artış göstermiştir.

2009 yılında eklenen en yüksek kurulu güç, 13000 MW ile Çin’de olmuş ve onu ABD 9922 MW ile izlemiştir. İspanya 2459 MW ile üçüncü, Almanya 1917 MW ile dördüncü ve Hindistan 1271 MW ile beşinci olmuştur.

2009 yılı itibariyle dünyada toplam 157889 MW toplam kurulu güç bulunmakta ve Avrupa 76152 MW ile rüzgâr enerjisinde liderliğini korumaktadır. Toplam dünya kurulu rüzgâr gücünün % 48’ine sahip Avrupa, 2009 yılında % 14 büyüyerek toplam kurulu elektrik kapasitesinin % 9’unu rüzgâr enerjisinden karşılar hale gelmiştir.

Rüzgâr enerjisi 2008 yılında büyümesine % 29’luk bir oranla devam etti. 2008 yılı itibariyle kurulan rüzgâr türbinlerinden yıllık 260 TWh’lik enerji üretildi, bu da dünyadaki elektrik

tüketiminin % 1,5'inden daha fazlasına eşittir (Durak, 2010).



Şekil 1.6 Global yıllık kurulan RES kapasitesi (Durak, 2010)

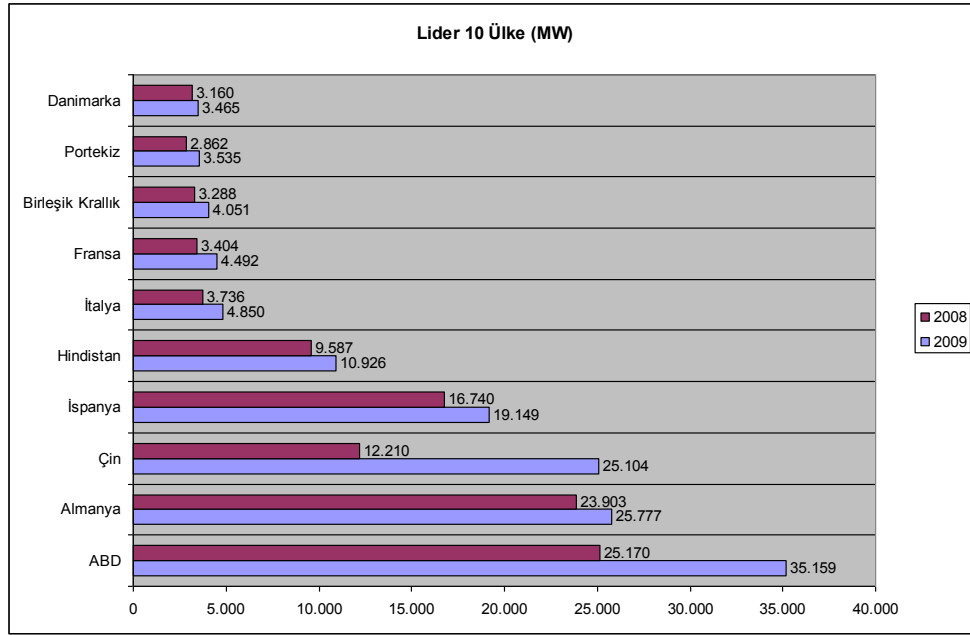
Rüzgâr sektörü global bir iş alanı haline geldi ve dünya genelinde 440.000 kişiye iş, 2008 yılında 40 milyar €'luk bir iş hacmi oluşturdu. 2008 yılında on yıldan fazla bir süredir ilk kez ABD, toplam kurulu güç bakımından Almanya'dan öne geçerek bir numara oldu. Çin rüzgâr piyasasındaki en dinamik market olma özelliğini 2008 yılında da, santral kurulumunu ardı ardına katlayarak artırıp bugünkü kurulu rüzgâr gücünü 25 GW'ın üzerine çıkararak, sürdürdü. Hızlanan gelişime ve daha da iyileştirilmiş politikalara dayanarak küresel kapasitenin 2020 yılında 1500000 MW'tan fazla olabileceği mümkündür (WWEA, 2009).

1.2.2.1 Rüzgâr piyasası liderleri

2008'de ABD küresel bazda Almanya'dan; Çin ise Asya'da Hindistan'dan birinciliği aldı ve böylece Çin ilk kez Asya'da lider konuma geçti. Öncü ülke Danimarka toplam kapasite bakımından 5 yıl önce 4. sırada yer almasına karşın geçen yıllarda 10. sıraya geriledi. Buna rağmen 2008 itibariyle elektrik ihtiyacının % 20'sini rüzgâr gücü ile sağlamaktadır ve halen bu alanda liderliğini korumaktadır. Şekil 1.7'de kurulu güç bakımından lider 10 ülke görülmektedir.

2007'de yıl 13 ülke 1000 MW barajını aşabilmişken 2008'de 16 ülke 1000 MW'tan fazla kurulu güce sahiptir. 4 yıl önce 24 ülkenin 100 MW'tan fazla kurulu gücü 2008'de 32 ülkenin kurulu gücü 100 MW'tan fazladır. Bugün ticari anlamda 76 ülke rüzgâr enerjisini

kullanmaktadır. Listeye son giren iki ülke Asya'dan Pakistan ve Moğolistan oldu.



Şekil 1.7 Rüzgâr enerjisinde kurulu güç kapasitesi bakımından ilk on ülke

Bir önceki yılın kurulu kapasitesi ile büyüme oranını arasındaki ilişki rüzgâr pazarındaki canlılığın en önemli göstergesidir. Büyüme oranı 2004 yılından beri istikrarlı bir şekilde artmaktadır. 2009'da % 30,9, 2008'de % 29,0, 2007'de % 26,6, 2006'da % 25,6 ve 2005'de % 23,8.

1.2.2.2 Kıtasal Dağılım

2009 yılı sonuna doğru Avustralya 1712 MW kurulu rüzgâr gücüne ulaşmıştır. Eyalet merkezli teşvik sistemi sayesinde bu büyüme devam etmektedir. Afrika'nın yanında, Mısır (430 MW), Fas (253 MW) ve İran (91 MW) da kayda değer bir büyüme gerçekleştirmişlerdir.

Dünyada Çin kapasite artışı bakımından dünyada ilk sırayı almaktadır. 2010 yılındaki gelişmeler bu birinciliğin devam edeceğini göstermektedir. Asya ülkeleri içinde Çin'in dışında Hindistan da bu alanda dikkat çekmektedir.

Bölgesel olarak kurulu güçlerden özellikle ABD 2009 yılı içinde 9922 MW ekleyerek, toplamda 35159 MW kurulu güce ulaşarak 2008'de dünya liderliğini aldığı Almanya ile arayı açmaya devam etmektedir. Latin Amerika ülkeleri içinde ise Brezilya 606 MW'lık gücü ile dikkati çekmektedir.

2009 yılı sonu itibariyle dünyadaki toplam kurulu güç 157899 MW olup, % 31'lik bir büyüme

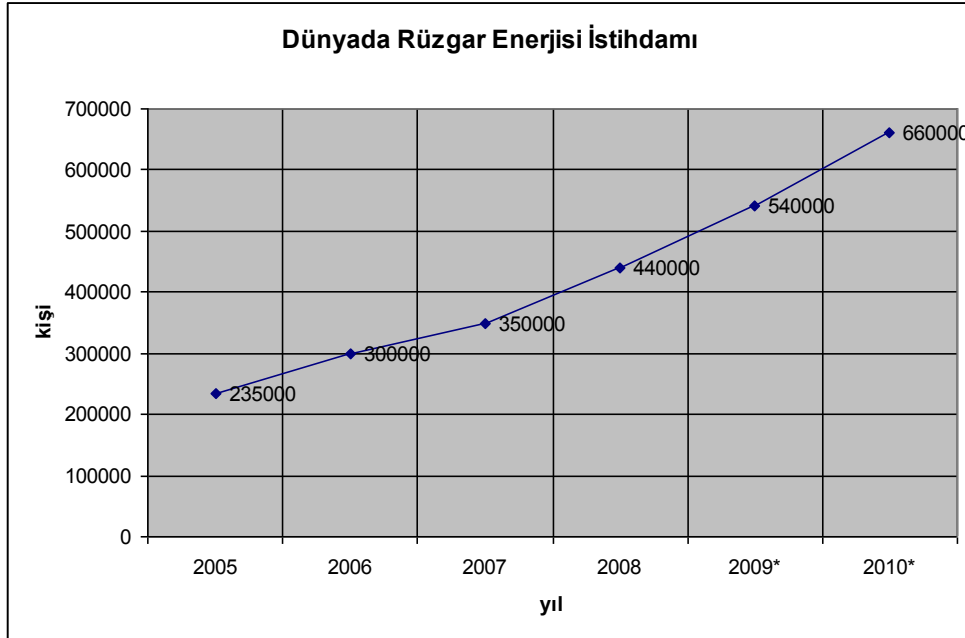
söz konusudur (Durak, 2010).

1.2.2.3 Küresel kriz ve rüzgâr

Şu sıralar insanoğlu üç tane küresel krizle karşı karşıya gelmiş durumda – enerji krizi, ekonomik kriz ve de çevresel/iklim krizi. Rüzgâr enerjisi; yerel, güvenilir ve temiz enerji desteği sağlayarak bütün bu sorunlara karşı çözüm üretebilir hale gelmektedir.

Düşük riskli bir karaktere sahip ve toplumsal ve ekonomik yararları nedeniyle orta vadede rüzgâr enerjisi yatırımlarının güçleneceği açıktır. Bugün; bir rüzgâr türbini yatırımı, elektrik üretim maliyetinin rüzgâr türbininin ömrüne göre yayılıp sabitlenmesi anlamına gelmektedir. Rüzgâr enerjisinin toplam yatırımıyla ilgili olarak yakıta dair hiçbir harcaması yoktur, işletme ve bakım maliyetleri değeri genelde oldukça düşük, iyi tahmin edilebilir.

Rüzgâr enerjisi kullanımı, yenilenemeyen enerji kaynaklarına göre çok daha fazla iş imkânı yaratır. Rüzgâr sektörü dünya genelinde temel istihdam kaynağı olmuştur: Sadece üç yıl içinde, dünya çapında neredeyse iki katına çıkmıştır. 2005 yılında 235000 olan çalışan sayısı 2008 yılında 440000 olmuştur. Bu 440000 çalışanın çoğu teknik bilgisi çok iyi olan ve üretilen 260 TWh'lık elektrikte katkısı bulunan insanlardır (WWEA, 2009).



Şekil 1.8 Yıllara göre dünyadaki rüzgâr enerjisi istihdam değerleri (WWEA, 2009)².

² 2009 – 2010 yılları tahmini değerleri göstermektedir.

1.2.2.4 Dünya genelinde gelecek üzerine tahminler

Geçmiş yıllardaki büyüme oranları ve tecrübeler ışığında WWEA rüzgâr enerjisinin gelecek yıllarda da dinamik gelişimini sürdüreceğini tahmin etmektedir. Ekonomik krizin güncel etkileri kısa dönem tahminlerini oldukça zorlaştırmasına rağmen, rüzgâr enerjisinin, birçok yatırımcıyı az riskli karakterinden ve temiz ve yenilenebilir enerjiye olan ihtiyaçtan dolayı kendine çekmesi beklenmektedir. Birçok hükümet, rüzgâr enerjisinin yararlarını anlamış ve faydalı politikalar bağımsız güç üreticileri küçük ve orta büyüklükteki girişimler ve proje bazlı topluluklar tarafından merkezden dışa yapılmış yatırım teşviklerine önem vermiştir.

Yapılan hesaplamalara göre 2020 yılında küresel elektrik tüketiminin en az % 12'sini rüzgâr enerjisi karşılayacaktır. 2020 yılı itibariyle 1500000 MW kurulu güç olacağı tahmin edilmektedir.

Saygın bilim adamları ve ekonomi uzmanlarından oluşan Enerji İzleme Grubu dört farklı senaryodan bahsetmektedir. 2025 yılı itibariyle dünyada 7500000 MW kapasiteye ulaşılacak ve 16400 TWh üretim yapılacaktır. Bütün bu yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik dünyadaki elektriğin % 50'sini karşılayacaktır. Sonuçta rüzgâr enerjisi güneşle birlikte 2019 yılında kurulu güç santralleri pazar payının % 50'sini elinde bulundurmuş olacaktır. Küresel yenilenebilir olmayan güç üretimi 2018 itibariyle erimeye başlayacak ve 2037 itibariyle tamamen hayatımızdan çıkacaktır. (WWEA, 2009)

Ocak 2009'da kurulan Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı yenilenebilir enerji oranını hızlandırmaya yönelik çalışmalar yapmaktadır. BM iklim değişikliği müzakereleri gibi uluslararası karar mekanizmasını dengeleyen 76 üye ülke lobi oluşturmaktadır.

1.2.3 Ülkemizdeki durum

Ülkemizde rüzgâr enerjisinden elektrik elde etme çalışmaları 1990'lı yılların başında başlamasına rağmen, bu çalışmalar 1996 yılı başlarına kadar teorik düzeyde kalmıştır. 1996 yılı başlarında birçok özel sektör firması konu ile ilgili yatırımlara başlamış ve ülkemizin tamamına yakınında ölçümler yapmıştır. İlk rüzgâr elektrik santrali 1997 yılında devreye girmiştir.

14.02.2010 tarihi itibariyle işletmede olan rüzgâr elektrik santralleri Çizelge 1.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 1.3 İşletmede olan rüzgâr elektrik santralleri (Durak, 2010)

Mevkii	Şirket	Kurulu Güç [MW]
İzmir-Çeşme	Alize Enerji Elektrik Üretim AŞ	1,50
Çanakkale-İntepe	Anemon Enerji Elektrik Üretim AŞ	30,40
Manisa-Akhisar	Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	10,80
Çanakkale-Gelibolu	Doğal Enerji Elektrik Üretim AŞ	14,90
Manisa-Sayalar	Doğal Enerji Elektrik Üretim AŞ	34,20
İstanbul-Çatalca	Ertürk Elektrik Üretim AŞ	60,00
İzmir-Aliğa	İnnores Elektrik Üretim AŞ	42,50
İstanbul-Gaziosmanpaşa	Lodos Elektrik Üretim AŞ	24,00
İzmir-Çeşme	Mare Manastır RES San. ve Tic. AŞ	39,20
İstanbul-Hadımköy	Sunjüt Sunni Jüt San. ve Tic. AŞ	1,20
İstanbul-Silivri	Teperes Elektrik Üretim AŞ	0,85
Balıkesir-Bandırma	Yapısan Elektrik Üretim AŞ	30,00
Balıkesir-Şamlı	Baki Elektrik Üretim Ltd. Şti.	90,00
Muğla-Datça	Dares Datça RES San. ve Tic. AŞ	29,60
Hatay-Samandağ	Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	20,00
Aydın-Didim	Ayen Enerji AŞ	31,50
Çanakkale-Ezine	Alize Enerji Elektrik Üretim AŞ	20,80
Balıkesir-Susurluk	Alize Enerji Elektrik Üretim AŞ	18,90
Osmaniye-Bahçe	Rotor Elektrik Üretim AŞ	77,50
İzmir-Bergama	Ütopya Elektrik Üretim San. ve Tic. AŞ	15,00
İzmir-Çeşme	Mazi-3 RES Elektrik Üretim AŞ	22,50
Balıkesir-Bandırma	Akenerji Elektrik Üretim AŞ	15,00
Balıkesir-Bandırma	Borasco Enerji ve Kimya San. ve Tic. AŞ	45,00
Manisa-Soma	Soma Enerji Elektrik Üretim AŞ	52,00
Hatay-Belen	Belen Elektrik Üretim AŞ	15,00
Tekirdağ-Şarköy	Alize Enerji Elektrik Üretim AŞ	28,80
İzmir-Urla	Kores Kocadağ RES Üretim AŞ	15,00
İzmir-Çeşme	Ares Alaçatı RES San. ve Tic. AŞ	7,20
Çanakkale-Bozcaada	Bores Bozcaada RES Üretim AŞ	10,20
Kapasite Toplamı		803,55

Dünyada rüzgâr enerjisi kullanımı gittikçe artmaktadır ve ülkemizde de buna paralel bir gelişim yaşanmaktadır. Rüzgâr enerjisindeki bu ivmelenmenin yine de arzu edilen seviyede olmadığını söylemek mümkündür. Ülkemizin rüzgâr enerjisi kullanımında geri kalmasının birçok nedeni vardır. Bu nedenler arasında; iletim hatlarının iyileştirilememesi, bürokratik koordinasyonsuzluk, yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili yasal düzenlemenin istenen seviyede yapılamaması ve projelere finansman imkânının kısıtlı olması sayılabilir (Durak, 2010).

2. RÜZGÂR ÖLÇÜMLERİ ve TÜRBİNLERİ

2.1 Rüzgâr Ölçümleri

Rüzgâr elektrik santralleri kurulumunun ilk aşaması olan rüzgâr ölçümü, projenin başlangıç kısmıdır ve çok önemlidir. Rüzgâr, yatay veya yataya yakın yönde yer değiştiren, iki nokta arasındaki basınç farklılığından kaynaklanan hava kütlesi hareketidir. Bu hareket, bir vektör boyunca belli bir kuvvettir. (Durak ve Özer, 2008).

Rüzgâr hızı ölçümleri genellikle kupalı tip anemometreler ile yapılır (Şekil 2.1). Kupalı anemometreler dikey eksenslidir ve üç adet kupası vardır. Kupanın dakikadaki dönme sayısı elektronik olarak kaydedilir. Rüzgâr hızı ölçümü için lazerli anemometreler de mevcuttur. Bunlar hava moleküllerinin hareketlerine ve hızlarına göre çalışırlar. Sıcak telli anemometreler ise telin rüzgâr ile soğuması ilkesine dayalı olarak çalışırlar fakat kullanımı yaygın ve pratik değildir. Anemograflar, rüzgâr hızlarını çizimsel olarak kaydeden aygıtlardır.

Kurulması planlanan rüzgâr enerji santrali için rüzgâr hızı ve yönü ölçümleri yapmanın en doğru yolu, öngörülen türbin göbeği yüksekliğinde ölçüm yapılmasıdır. Bu yöntem farklı yüksekliklerde rüzgâr hızı hesaplama belirsizliklerini ortadan kaldırır. Anemometre direğin en üstüne kurulursa, direktten kaynaklanan akım bozulmalarından etkilenmez. Eğer anemometre direğin yanına kurulmak zorunda kalınırsa, baskın rüzgâr yönüne açık olacak şekilde kurulmalıdır. Yani kulenin rüzgâra yapacağı gölgeleme etkisi en aza indirilmelidir. Anemometrelerden ve yön sezgicinden alınan bilgiler bilgisayarda toplanır. Eğer ölçüm soğuk ve buzlanmanın olduğu ortamlarda yapılacak ise, ısıtmalı anemometreler kullanılır. (Küçükçalı, 2008)

Rüzgâr hızı ölçümleri genellikle 10 dakika ile 60 dakikalık ortalama aralıklarda yapılır. Böylece birçok standart değerlendirme programıyla konfigürasyon kolaylıkla sağlanır. Dünya Meteoroloji Örgütü'nün belirlediği standart ölçüm yüksekliği 10 metredir.

Rüzgâr, hız ve yön olmak üzere iki değişkenle ölçülür. Hızdaki ani dalgalanma veya değişiklikler, hamle olarak adlandırılır. Cihazlarla ölçüm yapmanın olanaksız olduğu durumlarda rüzgâr ölçümü, Beaufort ölçeği kullanılarak yapılır ve değerlendirilir.



Şekil 2.1 Kupalı anemometre (Küçükçalı, 2008)

2.1.1 Beaufort rüzgâr ölçęi

Beaufort rüzgâr ölçęi, gözlemlere dayanarak rüzgâr kuvvetini ölçmede kullanılır (Çizelge 2.1). Meteoroloji uzmanları, hava tahminleri yapmak için gerekli olan verileri, meteoroloji istasyonları ve hava alanlarından toplarlar. Rüzgâr hızı ve yönü bilgileri, rüzgâr enerjisi santrali yapılması düşünölen yerlerdeki rüzgâr koşullarını genel olarak değerlendirmek için kullanılır. Yapılan meteorolojik ölçümler yerel şartlara göre değerlendirilmelidir. Bazı durumlarda meteorolojik verilerin doğrudan kullanımını, gerçek rüzgâr potansiyelinin altında tahmin yapılmasına yol açar (Küçükçalı, 2008).

Çizelge 2.1 Beaufort rüzgâr ölçęi (Küçükçalı, 2008)

No	Rüzgar Hızı (m/s)	Tanım	Açıklama
0	0-0,2	Sakin	Duman dikey olarak yükselir
1	0,3-1,5	Esinti	Duman hafif esinti ile yükselir. Rüzgar yönü belirsizdir.
2	1,6-3,3	Hafif rüzgar	Yapraklar kıpırdar. Esinti insan yüzünde hissedilir. Rüzgar yönü yoktur.
3	3,4-5,4	Tatlı rüzgar	Yapraklar ve ince dallar hareket eder.
4	5,5-7,9	Orta rüzgar	İnce dallar hareket eder, kağıt ve tozlar yükselir.
5	8,0-10,7	Sert rüzgar	Ağaçlar sallanmaya başlar.
6	10,8-13,8	Şiddetli rüzgar	Büyük ağaç dalları hareket eder.
7	13,9-17,1	Çok şiddetli rüzgar	Büyük ağaçlar sallanır,yürüme zorluğu farkedilir.
8	17,2-20,7	Fırtına	Ağaçlardaki ince dal ve çöpler kırılır, rüzgarda yürümek iyice zorlanır.
9	20,8-24,4	Şiddetli fırtına	Binalarda hafif hasar oluşur, çatı kiremitleri sökülmeye başlar.
10	24,5-28,4	Tam fırtına	Binalar hasas görür, büyük ağaçlar kökünden sökülür.
11	28,5-32,6	Çok şiddetli fırtına	Geniş ölçekli hasarlar olur.
12	>32,7	Tayfun	Aşırı derecede hasarlar olur.

2.1.2 Rüzgâr gözlem istasyonları

Rüzgâr enerji santrallerinin projelendirilmesi ve fizibilitesi, seçilen santral sahasından üretebilecek enerji miktarına bağlı olmaktadır. Bu enerji miktarının tespiti için, seçilen proje sahasına ait arazinin topoğrafik yapısı da göz önüne alınarak uygun nokta ve noktalara rüzgâr gözlem istasyonu kurulmalıdır. Rüzgâr gözlem istasyonlarındaki bir ölçüm direği üzerine yerleştirilmiş ölçüm aletleri ile standartlara uygun olarak yapılan rüzgâr hızı, rüzgâr yönü gibi ölçümler, rüzgâr enerji santrali projesinin daha sonraki aşamaları olan, verilerin değerlendirilmesi, enerji üretim miktarının belirlenmesi ve rüzgâr türbini seçiminde yol gösterici olacaktır (Küçükçalı, 2008).

2.2 Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri, hareket halindeki havanın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren sistemlerdir. Rüzgâr akımlarının taşıdığı kinetik enerjinin, kanatlı bir türbini mekanik olarak döndürmesi ile türbine bağlı olan bir jeneratör grubunda elektrik üretilir.

Rüzgâr türbinleri genellikle iki ya da üç rotor kanatlıdır ve rüzgârın bu kanatlara uyguladığı basınç ile dairesel bir dönme hareketi oluşur. Rüzgâr türbinlerinin projelendirilmesi ile ilgili bir çok hesap, rotor kanatlarının taradığı dairesel alanının çapı ile ifade edilir. Buna göre tipik olarak bir rüzgâr türbininin projelendirilmesinde direk ve rotor kanat uzunlukları, rotor kanatlarının bulunduğu merkez noktasının yerden yüksekliğinin söz konusu çap değerinin 0,9 – 1,2 katı arasında olacak şekilde tasarlanır (Küçükçalı, 2008).

Rüzgâr enerjisi dönüştürme sistemleri, 50 W ile 5 MW arasında mekanik veya elektrik gücü sağlayabilmektedir. Günümüzde rüzgâr santrallerinde kullanılan türbin rotor çapları 100 m'ye ulaşmıştır.

Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgârdan sağlanacak enerji, rüzgâr hızına bağlıdır. Rüzgâr hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgârın sağlayacağı enerji, gücüne ve esme sıklığına bağlıdır. Özgül rüzgâr gücü, hava debisine dik, birim yüzeye düşen güçtür. Topoğrafik koşullara göre yerden 50 m yükseklikte hız 3,5 m/s'den az olduğunda özgül güç 50 W/m²'den az olabileceği gibi, hız 11,5 m/s'den büyük iken özgül güç 1800 W/m²'den büyük olabilir. Ortalama rüzgâr hızı yıldan yıla değişebilir. Rüzgâr hızının değişkenliğinden dolayı, rüzgâr enerjisi potansiyelinden elde edilebilecek enerji, yıllık ortalama hız değeriyle hesaplanan enerjiden daha fazla olmaktadır. Bu yüzden belli bir bölgede rüzgâr türbinleri ile üretebilecek elektrik enerjisi üretim miktarının hesabında, yıllık

ortalama rüzgâr hızından çok, gözlemlenen veya Weibull dağılımı ile hesap edilen rüzgâr hızı sıklık dağılımı kullanılmaktadır. Türbin tarafından üretilen enerjinin miktarı, rüzgâr hızı dağılımına bağlıdır. Aynı ortalama rüzgâr hızına sahip farklı yerlerde rüzgâr hızlarının frekans dağılımına bağlı olarak iki kata varabilecek güç yoğunluğu farklılıkları olabilir (Küçükçalı, 2008).

Rüzgâr, rotoru kanatlar vasıtasıyla döndürür. Rotorun düşük devir sayısı dişli kutusu ile oransal olarak artırılarak yüksek hız miline aktarılır. Yüksek hız mili jeneratörü döndürür. Jeneratörün ürettiği elektriği türbin denetleme mekanizmaları, frenler ve trafolar tarafından orta gerilimli olması sağlanır. Kablo sistemi, fren sistemi ve kontrol sistemiyle trafolar elektrik dağıtılır. Trafolar voltajı şebeke gerilimi düzeyine yükseltir. Şebeke sistemi, elektriği kullanım için mahallelere dağıtır. Ara istasyon trafoları elektrik voltajını düşürür. Düşük yerel gerilim ağları elektriği kullanım alanlarına taşır.

2.2.1 Rüzgâr türbini çeşitleri

Türbin dizaynında iki farklı biçim mevcut, yatay eksenli (Şekil 2.2) ve düşey eksenli (Şekil 2.3) rüzgâr türbinleri. Yatay eksenli makine rüzgâr teknolojisinin kullanılmaya başlamasıyla birlikte, ilk kez Danimarka'da kullanıldı. Bu yüzden Danish Rüzgâr Türbini diye adlandırıldı. Düşey eksenli makinenin şekli yumurta çırpıcısına benzer ve mucidi Darrieus'un ismiyle anılır. Belirli yapısal özelliklerinden dolayı geçmişten beri kullanılır. Bununla birlikte en modern rüzgâr türbinleri yatay eksenli rüzgâr türbinleridir. Rotor haricinde birçok diğer bileşenlerin dışında ufak küçük farklılıklar dışında aynıdır.

2.2.1.1 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Bu türbinlerde; dönme ekseni rüzgâr yönüne paralel, kanatlar rüzgâr yönüne diktir. Bu türbinlerde kanatların sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Verimleri yaklaşık % 40'tır (Patel, 2006).

Önceleri tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin daha ekonomik bir çözüm olabileceği düşünülmüştür. Tek kanatlı olduğundan diğer 3 kanatlı rüzgâr türbinlerinden daha ucuz olacağı zannedilmiştir. Sanılanın aksine tek kanatlı rüzgâr türbinleri ticari bir çözüm halini alamamıştır. 2 kanatlı rüzgâr türbinlerinde anlatılan problemler tek kanatlı rüzgâr türbinlerinde de görülmüştür. Yüksek rotasyonel hıza ek olarak yüksek gürültü ile çalışmaktadır. Ayrıca kanadı dengelemek için karşı tarafa da bir ağırlık konulması gerekmektedir. Bu gibi sebeplerden dolayı tek kanatlı rüzgâr türbinleri istenen gelişmeyi

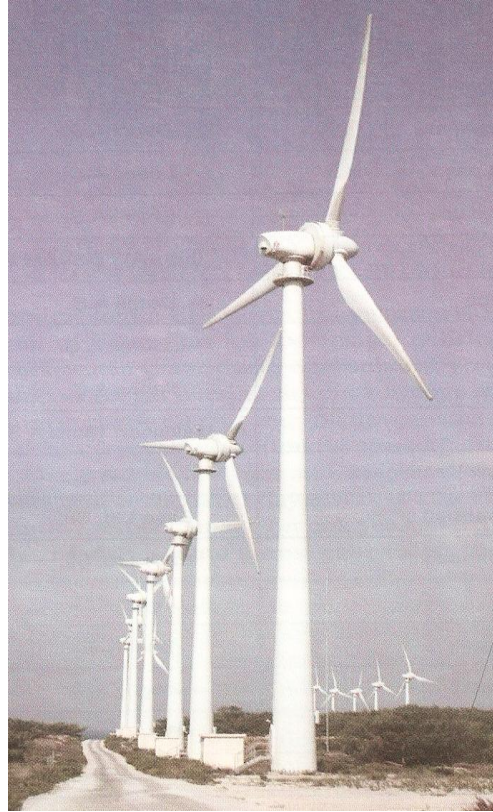
gösterememiştir (Durak ve Özer, 2008).

Çift kanatlı rüzgâr türbinlerinde kanat sayısının düşük olması sebebiyle ve daha hafif olacağı düşünülürken istenilen ilerlemeyi sağlayamamıştır. Fakat 2 kanatlı rüzgâr türbinleri de tek kanatlı rüzgâr türbinleri gibi yüksek rotasyonel hızda çalışmaktadır. Görüntü ve yüksek gürültü seviyesi ile çalışması da istenmez. Çift veya tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin tasarımı da 3 kanatlı rüzgâr türbinlerine göre daha zordur. Kuzey enlemlerde yer alan ülkelerde görülebilmektedir (Durak ve Özer, 2008).

Günümüzde kullanılan modern rüzgâr türbinleri 3 kanatlı olarak tasarlanmaktadır. Üç kanat kullanımının asıl sebebi dönme momentinin daha düzgün olmasıdır. Pervane rüzgârın geldiği yönde durmaktadır.

Yatay eksenli rotorların avantajları:

- Rotor süpürme alanına oranla toplam kanat kütlesi daha küçüktür. Bu kW başına maliyeti düşürür.
- Rotor süpürme alanı yerden yüksektedir. Bu rüzgâr hız profiline daha düzgün olmasını dolayısıyla aynı konumda aynı süpürme alanıyla daha çok elektrik üretimini sağlar.



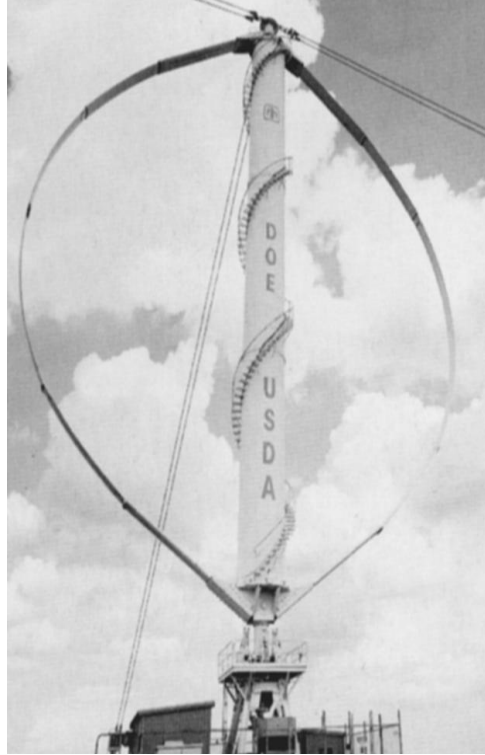
Şekil 2.2 Yatay eksenli rüzgâr türbini (Küçükçalı, 2008)

2.2.1.2 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri

Dönme eksenleri rüzgâr yönüne dik olan bu türbinlerin kanatları da dikeydir. Rüzgârı her yönden alabilme özelliğine sahiptirler. Kanatların yere yakınlığı sonucu düşük rüzgâr hızına maruz kalırlar, bu ise enerji üretimini azaltır. Bu türbinlerin verimi yaklaşık % 35'tir. Jeneratör ve dişli kutuları toprak seviyesinde kurulabildiğinden kuleye gerek duymazlar. Kanat sayısının artması malzeme ağırlığını artırdığından, yüksek rüzgâr hızlarında verimsiz çalışır. Dönel aerodinamik yükler genellikle alüminyumdan yapılan kanatlarda yorulmaya sebep olur (Küçükçalı, 2008).

Düşey eksenli rotorların avantajları:

- Rotor doğrultusunun rüzgâra göre ayarlanması gerekmez.
- Kanatlar boydan boya aynı profilde yapılırlar. Uçlarından bağlı oldukları için yüksek dayanımlara sahip olmaları gerekmez. Alüminyum vb. malzemelerden üretilebilirler. Üretimleri basit dolayısıyla maliyetleri daha düşüktür.
- Sistemin büyük bölümü (dişli kutusu, jeneratör, fren) yere yakın sabit kısa bir kule üzerine konabilir.



Şekil 2.3 Düşey eksenli rüzgâr türbini (Patel, 2006).

Bu karşılaştırmadaki en önemli parametre yatay eksenli türbininin rotor süpürme alanı yerden

yüksekte olduğu için rotorun, rüzgâr hız profiline düz olduğu yere denk gelmesidir. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin daha fazla avantajı var gibi görünse de yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin tercih edilmesindeki esas neden budur.

2.2.2 Rüzgâr türbini temel elemanları

Gövde, rüzgâr türbininin dişli kutusu ve elektrik jeneratörü dâhil temel parçaları içerir. Gövdeye türbin kulesinden ulaşılabilir. Gövdenin uç kısmında, rotor olarak adlandırılan kanatlar ve göbek bulunur. Kanatlar, rüzgârı yakalar ve rüzgârın döndürme kuvvetini mil vasıtası ile gövdeye aktarır. Göbek, kanatların bağlı olduğu göbek parçası, düşük hız miline kanatlarda elde edilen döndürme kuvvetini aktarır. Düşük hız mili, türbin göbeğini dişli kutusuna bağlar.

Dişli kutusu, düşük hız milinden yüksek hız miline döndürme kuvvetinin aktarılmasını sağlar. Yüksek hız mili düşük hız milinden yaklaşık 50 kat daha hızlı döner. Mekanik frenli yüksek hız mili, dakikada yaklaşık 1500 devir hızı ile döner ve elektrik jeneratörünü çalıştırır. Mil üzerinde bir acil durum mekanik freni vardır. Mekanik fren aerodinamik frenlerin çalışmaması durumunda veya türbin bakımdayken kullanılır.

Elektrik jeneratörleri, senkron veya asenkron motora sahip olabilirler. Modern bir rüzgâr türbininde azami elektrik gücü, genelde 2.000 – 3.000 kW arasındadır. Elektrik kontrol ünitesi, rüzgâr türbininin durumunu sürekli izleyen ve yön mekanizmasını kontrol eden bir bilgisayar içerir. Arıza durumunda rüzgâr türbinini otomatik olarak durdurur ve operatöre uyarı verir.

Hidrolik sistem, rüzgâr türbininin aerodinamik frenlerini içerir. Soğutma ünitesi, elektrik jeneratörünü ve dişli kutusundaki yağı soğutmak için kullanılan soğutma cihazlarını içerir (Küçükçalı, 2008).

Kule, gövde ve rotoru taşır. Rüzgâr türbini kurulu gücüne, yüksekliğine göre bazı değişimler göstermektedir. Bilindiği gibi kule boyu ne kadar yüksek olursa enerji üretimi de o oranda artmaktadır. Kuleler, dairesel veya kafes biçiminde olabilir (Durak ve Özer, 2008).

3. RÜZGÂR ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ

Rüzgâr türbini, rüzgârın kinetik enerjisini elektrik jeneratörüyle bağlı olan, iki veya daha fazla kanat içeren rotorla yakalar. Türbin, enerji yakalamak için yüksek bir kuleye yerleştirilir. Birçok rüzgâr türbini arzu edilen güç kapasitesine ulaşmak için rüzgâr santrali oluşturacak şekilde kurulur.

3.1 Hız ve Güç İlişkileri

m kütleli, v hızıyla hareket eden havanın kinetik enerjisi aşağıdaki bağıntıyla verilir.

$$W_{KE} = \frac{1}{2}mv^2 \text{ [Joule]} \quad (3.1)$$

Hareket eden havanın gücü ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$P_w = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \text{ [Watt]} \quad (3.2)$$

$$\dot{m} = \rho Av \text{ [kg/s]} \quad (3.3)$$

$$P_w = \frac{1}{2}(\rho Av)v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (3.4)$$

- \dot{m} : kütleli debi [kg/s]
- P_w : hareket halindeki havanın mekanik gücü [Watt]
- v : havanın hızı [m/s]
- ρ : havanın yoğunluğu (deniz seviyesi ve 15°C sıcaklık için 1,225 kg/m³)
- A : rotor kanatlarının süpürdüğü alan [m²]

İki bölgenin rüzgâr potansiyeli, özgül rüzgâr güçleri ile karşılaştırılır ve dönen kanatların süpürdüğü alan cinsinden W/m² olarak verilir. Bu güç, rüzgâr hızının küpü ile orantılı olarak değiştiğinden, örneğin rüzgâr hızının iki katına çıkması gücün 8 kat artması anlamına gelir. Yani rüzgâr türbinin 1 saatte 8,8 m/s rüzgâr hızında yakaladığı enerji, 4,4 m/s hızında 8 saatte elde edilebilir. m² başına karşılık gelen güç formülü Denklem (3.5)'te gösterilmiştir. Bu eşitlik bir bölgenin spesifik gücünü verir [2].

$$\frac{P_w}{A} = \frac{1}{2}\rho v^3 \text{ [W / m}^2\text{]} \quad (3.5)$$

3.2 Rotorun Süpürdüğü Alan

Önceki güç eşitliğinde görüldüğü gibi rüzgâr türbininin çıkış gücü rotorun taradığı alanla doğru orantılı olarak değişmektedir. Yatay eksenli türbinler için D rotor çapı olmak üzere rotorun süpürdüğü alan Denklem (3.6)'da gösterilmiştir.

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3.6)$$

Görüldüğü gibi A alanı yatay eksenli türbinlerde kanat çapının karesi ile orantılıdır. Dolayısıyla rüzgârdan elde edilen güç D^2 ile orantılı olur. Yani kanat çapı 2 katına çıkarıldığı takdirde, rüzgâr gücü 4 katına çıkar. Bu basit inceleme daha büyük rüzgâr türbinleri ile çalışma durumundaki maliyetler hakkında bize karşılaştırma imkânı verir. Bir rüzgâr türbininin maliyeti, yaklaşık kanat çapı ile orantılı olarak artar. Hâlbuki güç, kanat çapının karesi ile orantılıdır [2].

3.3 Atmosferik Şartların Rüzgâr Gücü Üzerindeki Etkileri

3.3.1 Sıcaklığın hava yoğunluğuna etkisi

Rüzgâr gücü kanatların süpürdüğü havanın yoğunluğu ile doğru orantılı olarak değişir. Farklı hava şartları için hava yoğunluğu ideal gaz kanundan elde edilebilir.

$$PV = nRT \quad (3.7)$$

- P : Basınç [atm]
- V : Hacim [m^3]
- n : Mol Sayısı [mol]
- T : Mutlak sıcaklık [K]
- R : İdeal gaz sabiti [$m^3 \cdot atm / K \cdot mol$]

Denklem (3.8)'den n çekilip Denklem (3.7)'de yerine yazılırsa Denklem (3.9) elde edilir.

$$\rho = \frac{n \times MA \times 10^{-3}}{V} \quad (3.8)$$

- MA : Gazın moleküler ağırlığı [g/mol]

$$\rho = \frac{P \times MA \times 10^{-3}}{R \times T} \quad (3.9)$$

1 atm basınçta (deniz seviyesi) ve $15^\circ C$ sıcaklıkta havanın yoğunluğu $1,225 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Bu

değer referans alınarak ρ , belirli yerlerdeki sıcaklık ve basınç değerlerine göre düzenlenebilir. Sıcaklık ve basınç yükseklikle değişir. Deniz seviyesinden altı bin metre yüksekliğe kadar yoğunluk formülü aşağıdaki gibidir (Patel, 2006).

$$\rho = \rho_0 e^{-\left\{\frac{0,297H}{3048}\right\}} \quad (3.10)$$

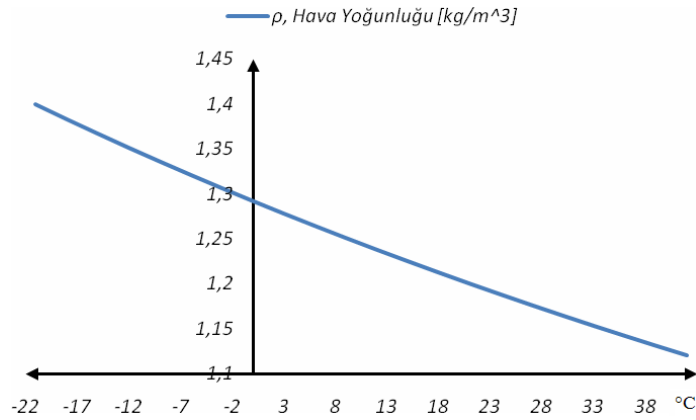
Burada H yerden yükseklik mesafesi, ρ_0 ise havanın deniz seviyesindeki yoğunluk değeridir.

Yüksek rakımlarda havanın yoğunluğu hesabının düzeltilmesi önemlidir. Örneğin 2000 metrede havanın yoğunluğu deniz seviyesindeki $1,225 \text{ kg/m}^3$ değerinden yüzde yirmi daha düşük olan $0,986 \text{ kg/m}^3$ değerindedir.

Sıcaklık yükselti ile aşağıdaki gibi değişir (Patel, 2006).

$$T = 15,5 - \frac{19,83H}{3048} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.11)$$

Şekil 3.1'de 1 atm basınç altında hava yoğunluğunun hava sıcaklığı ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.1 1 atm basınç altında hava yoğunluğunun hava sıcaklığı ile değişimi [2].

3.3.2 Kule yüksekliğinin etkisi

Rüzgâr gücü, rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı olduğundan, rüzgâr hızındaki ufak bir artış bile ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Türbini yüksek hızlı rüzgârlara maruz bırakmanın bir yolu da, türbinleri daha uzun kulelere monte etmektir. Yer seviyesinin ilk birkaç yüz metre yüksekliklerinde, rüzgâr hızı yeryüzü ile olan sürtünme ve etkileşimden dolayı oldukça fazla etkilenir. Pürüzsüz yüzeyler, örneğin; durgun deniz yüzeyi, rüzgâra karşı oldukça düşük bir

direnç gösterir. Rüzgâr hızındaki değişim oranı yüksekliğin artmasıyla birlikte daha düşük seviyelerde kalacaktır. Diğer yandan, yüzey rüzgârları engebeli arazilerde, orman ve bina alanlarında oldukça düşük olacaktır [2].

Özetle rüzgâr hızı, yükseklik arttıkça arazi pürüzlülüğüne (α sürtünme katsayısı) bağlı olarak logaritmik şekilde artmaktadır. Belirli bir yükseklikte (10 m, 30 m vb.) ölçülmüş rüzgâr hızları kullanılarak, istenilen herhangi bir yükseklikteki (göbek yüksekliği vb.) rüzgâr hızları aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (3.12)$$

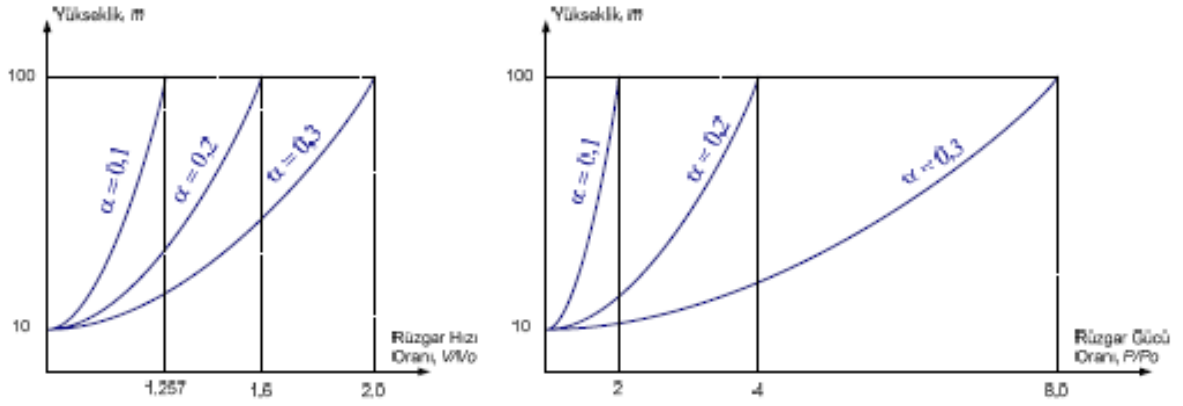
Burada v , H yüksekliğindeki rüzgâr hızı iken v_0 ise H_0 referans yükseklikteki rüzgâr hızıdır. α sürtünme katsayısı, rüzgâra maruz kalan yer yüzeyinin topolojisine bağlı bir katsayıdır. Çizelge 3.1’de farklı yeryüzü topolojileri için α katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3.1 Farklı yeryüzü topolojileri için sürtünme katsayıları [2]

Yeryüzü Karakteristiği	Sürtünme Katsayısı, α
Pürüzsüz sert toprak, durgun su	0,10
Toprak seviyesinde uzun çimenli bölge	0,15
Toprak seviyesinin üzerinde daha uzun mahsul	0,20
Kırsal orman alanları, birçok ağaç	0,25
Ağaçlık ufak kasabalar	0,30
Uzun binalarla dolu büyük şehirler	0,40

Denklem (3.12) rüzgâr hızının yükseklikle değişimini tahmin eden bir yaklaşımdır. Gerçekte en güzel yaklaşım, arazide ölçüm yapmaktır. α sürtünme katsayısı değeri ne kadar fazlaysa hız profilineki değişimi de o oranda fazla olacaktır. Hız profilineki değişim, ancak türbin göbek yüksekliğinin artırılması ile azalmakta ve bu durum da maliyeti artırıcı unsur olmaktadır.

Şekil 3.2’de α değerine bağlı olarak farklı yükseklikler için rüzgâr hız ve güç oranları arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 3.2 α değerine bağlı olarak farklı yükseklikler için rüzgâr hız ve güç oranları arasındaki ilişki [2]

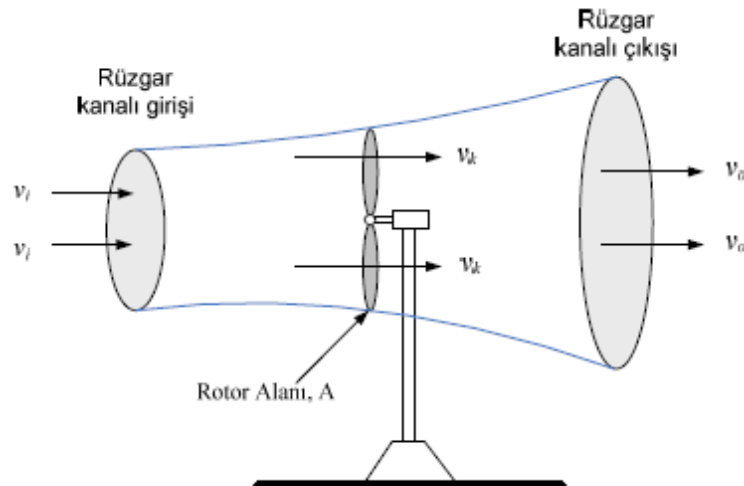
3.4 Rüzgârdan Elde Edilen Güç

Kanatları kesen rüzgârın tamamı rotorda mekanik güce dönüşmez. Rüzgârın kinetik enerjisinden elde edilen mekanik güç ifadesi için rotor verimi hesaplanmalıdır.

Rotor kanatları tarafından yakalanan gerçek güç miktarı, rüzgâr kanalı girişi ile rüzgâr kanalı çıkışı hava akışları arasındaki kinetik enerjilerin farkıdır.

Şekil 3.3'te bir rüzgâr türbininin maruz kaldığı rüzgâr kanalı boyunca oluşan rüzgâr hızları gösterilmiştir.

$$P_k = \frac{1}{2} \dot{m} \{v_i^2 - v_o^2\} \quad (3.13)$$



Şekil 3.3 Bir rüzgâr türbininin maruz kaldığı rüzgâr kanalı boyunca oluşan rüzgâr hızları [6]

Burada,

- P_k : rotordan elde edilen mekanik rüzgâr gücü [Watt]
- v_i : rotor kanatlarının girişindeki rüzgâr hızı [m/s]
- v_o : rotor kanatlarının çıkışındaki rüzgâr hızı [m/s]
- v_k : rotor kanatları düzlemindeki rüzgâr hızı [m/s]

$$v_k = \frac{v_i + v_o}{2} \quad (3.14)$$

Görüldüğü gibi rüzgâr kanalı boyunca (rüzgâr hızı v_i ' den v_o ' ya) hareket ederken sürekli sabit formda değildir. Dolayısıyla dönen kanatlar boyunca hareket eden havanın birim zamanda akan kütle miktarı, ortalama hız ile hava yoğunluğunun çarpımından elde edilebilir.

$$\dot{m} = \rho A \frac{v_i + v_o}{2} \quad (3.15)$$

Elektrik jeneratörünü çalıştıran rotordan elde edilen mekanik güç aşağıdaki gibi olur.

$$P_k = \frac{1}{2} \left[\rho A \frac{(v_i + v_o)}{2} \right] (v_i^2 - v_o^2) \quad (3.16)$$

Önceki ifade matematiksel olarak yeniden düzenlenirse aşağıdaki gibi olur.

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_i^3 \frac{\left(1 + \frac{v_o}{v_i}\right) \left[1 - \left(\frac{v_o}{v_i}\right)^2\right]}{2} \quad (3.17)$$

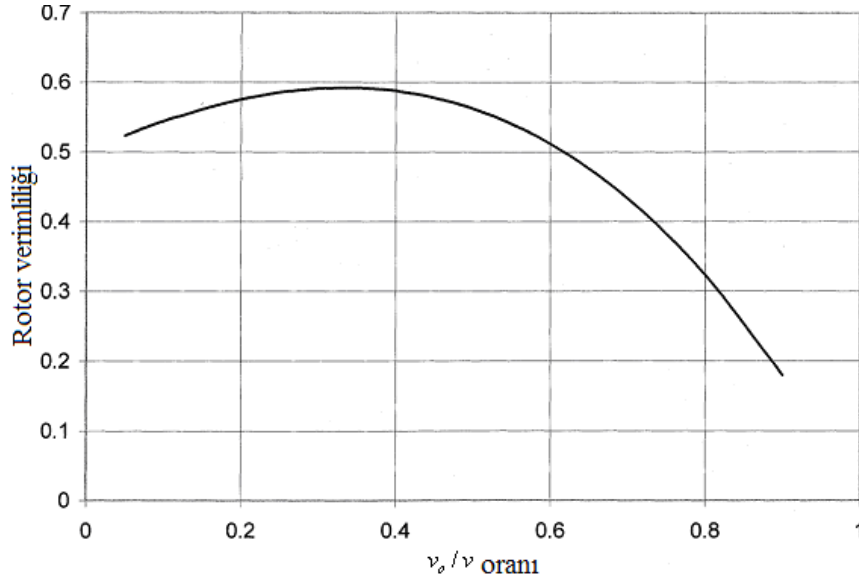
$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_i^3 C_p \quad (3.18)$$

Burada; $v_i = v$ ve $\lambda = \frac{v_o}{v}$ olarak tanımlanırsa C_p aşağıdaki gibi bulunur.

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + \lambda) (1 - \lambda^2) \quad (3.19)$$

Burada C_p rotor verimi olarak bilinir. Maksimum rotor verimini bulmak için C_p 'nin λ 'ya göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse $C_{p_{\max}} = 0,5926 = \% 59,26$ bulunur.

Şekil 3.4'te v_o/v oranına göre rotor verimliliği eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.4 v_o / v oranına göre rotor verimliliği (Patel, 2006).

Bu durumda maksimum teorik verim % 59,26'dır. Bu verime Betz verimi veya Betz kanunu denir. Bu değer pratikte 0,5' in altında kalır.

Verilen bir rüzgâr hızı için, rotor verimi rotor dönüş oranının bir fonksiyonudur. Eğer rotor çok yavaş dönüyor ise verim düşer, çünkü kanatları etkilemeden geçen rüzgâr miktarı daha fazladır.

Eğer rotor çok hızlı dönüyorsa rotor verimi yine düşer, çünkü bir kanatın neden olduğu türbülans gittikçe artan bir oranla takip eden diğer kanadı etkiler. Genel bir yöntem olarak rotor verimi kanat uçlarındaki hız oranının bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Rüzgâr türbinleri için KHO, kanat ucu dönüş hızının gerçek rüzgâr hızına oranıdır.

$$\text{KHO} = \text{kanatların en uç noktalarındaki lineer hız} / \text{giriş rüzgâr hızı} = \frac{v_{\text{kanat-ucu}}}{v} = \frac{\omega_m \times R_r}{v} \quad (3.20)$$

$$\omega_m = 2\pi f \quad (3.21)$$

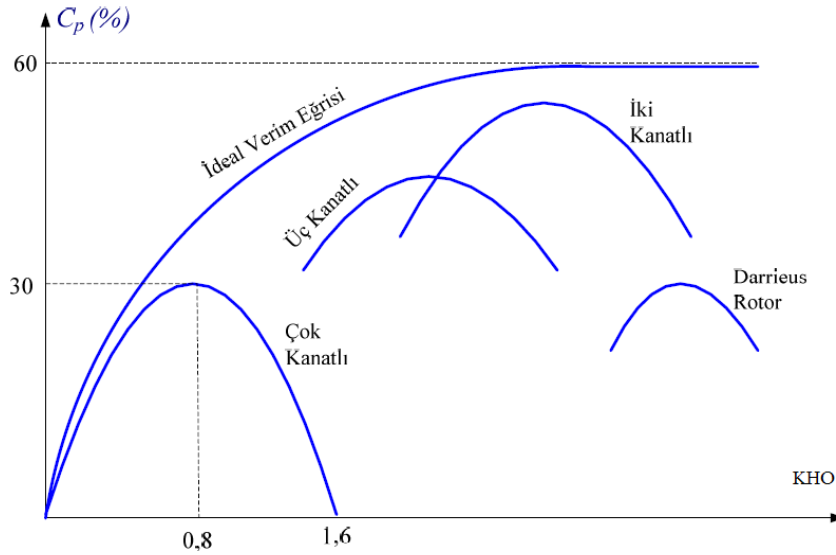
- R_r : rotor yarıçapı [m]
- ω_m : mekanik (kanat) açısal hız [Rd/s]
- v : rüzgâr hızı [m/s]
- $v_{\text{kanat-ucu}}$: kanatların en uç noktalarındaki lineer rüzgâr hızı [m/s]
- f : dönüş frekansı [Hz]

Değişken hızda rüzgâr türbinin optimum işletimi için KHO değeri kullanılır. KHO maksimum

gücü elde edecek işletim noktasını belirler. C_p 'nin hangi KHO değerinde maksimum olacağını türbinin aerodinamik yapısı belirler. Yüksek rüzgâr hızında yüksek hızı yakalayabilmek için, rotor da yüksek hızda dönmelidir. Böylece optimum bir seviyede KHO sabit tutulmuş olur.

Özetle rotor verimi C_p , kanat-ucu hız oranı KHO'nun bir fonksiyonudur. Modern rüzgâr türbinlerinin verimli işletimleri, KHO değerleri 4 – 6 civarında olduğu zaman oluşur. Yani kanat uç hızı rüzgâr hızının 4 – 6 katı civarında bu tür türbinlerin verimli oldukları söylenebilir [7].

Şekil 3.5'te KHO'nun türbin verimliliğine etkisi gözükmektedir.



Şekil 3.5 KHO'nun türbin verimliliğine etkisi [7].

3.5 Rüzgâr Hızının İstatistiksel Değerlendirmesi

3.5.1 Ortalama rüzgâr gücü

Rüzgâr türbini sistemine ilişkin bileşenleri ve güç eşitliklerini tanımladıktan sonra, farklı rüzgâr rejimlerindeki rüzgâr türbininin üreteceği enerji miktarı belirlenmelidir.

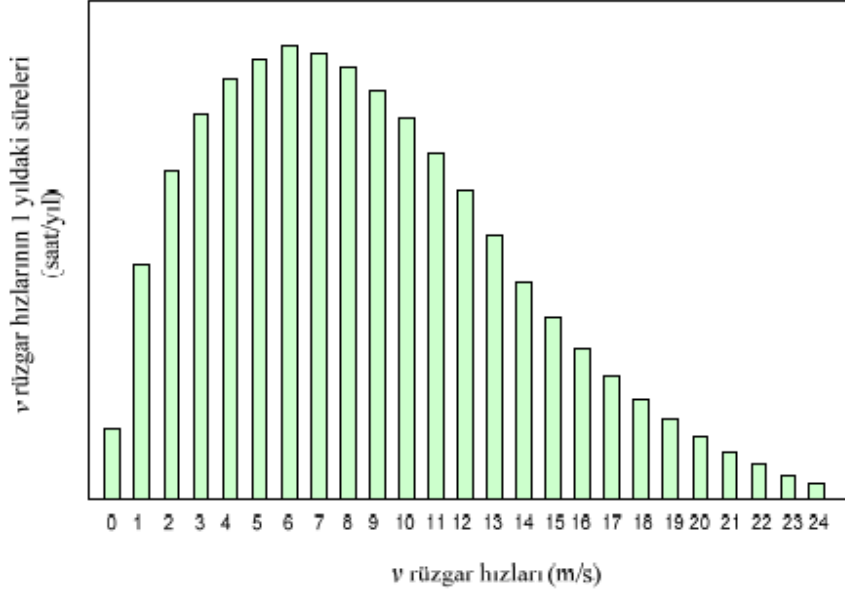
Rüzgâr gücü ile rüzgâr hızı arasındaki kübik ilişkiden dolayı ortalama güç, doğrudan v yerine v_{ort} yazılarak elde edilemez [7].

$$P_{ort} = \frac{1}{2}(\rho A v^3)_{ort} = \frac{1}{2} \rho A (v^3)_{ort} \quad (3.22)$$

$$(v_{ort})^3 \neq (v^3)_{ort} \quad (3.23)$$

3.5.2 Rüzgâr hızı olasılık dağılım fonksiyonları

Şekil 3.6'da örnek bir çubuk histogram diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Rüzgâr hızları ve esme sıklıkları [7].

Bu ayrık formdaki eğri sürekli fonksiyon şeklinde gösterilirse, bu fonksiyon olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak adlandırılır.

Olasılık yoğunluk fonksiyonunun altındaki toplam alan 1'e eşittir ve herhangi iki nokta arasındaki alan, rüzgâr hızının o iki değer arasında olma olasılığını verir.

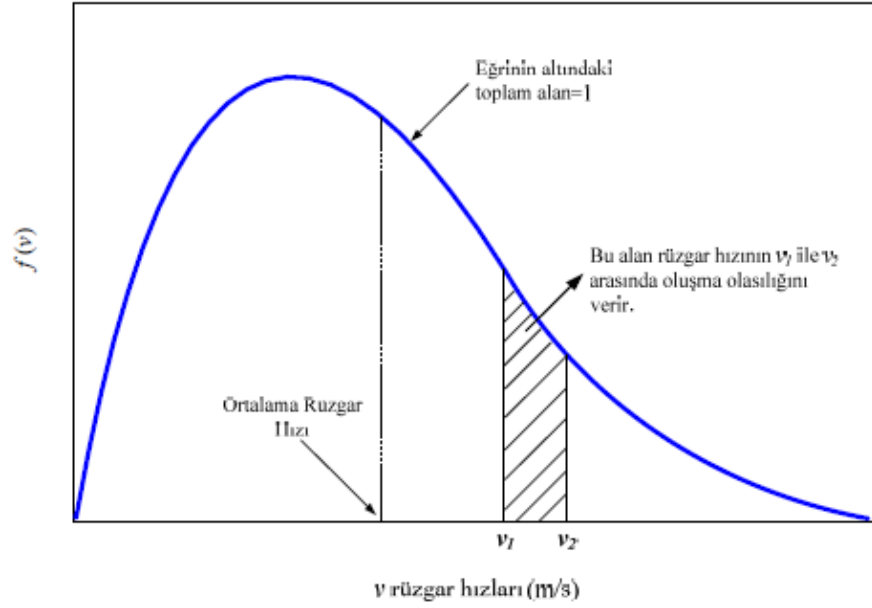
$f(v)$: Rüzgâr hızı olasılık yoğunluk fonksiyonu olmak üzere;

$$P(v_1 \leq v \leq v_2) = \int_{v_1}^{v_2} f(v)dv \quad (3.24)$$

$$P(0 \leq v \leq \infty) = \int_0^{\infty} f(v)dv = 1 \quad (3.25)$$

$$(v^3)_{ort} = \int_0^{\infty} v^3 f(v)dv \quad (3.26)$$

Şekil 3.7'de rüzgâr hızına ait olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği verilmiştir.



Şekil 3.7 Rüzgâr hızına ait olasılık yoğunluk fonksiyonu [7].

Bir bölgedeki rüzgâr hızı kesinlikle sürekli ve sabit hızlı değildir. Rüzgâr hızı dakika, saat, gün, ay ve yıllar bazında değişiklik gösterir. Bu sebeple ortalama rüzgâr hızı en az 10 yıllık süreçte dikkate alınmalıdır. Bu şekildeki bir uzun dönem ortalaması ile sağlıklı olarak belirli bir bölgeye ilişkin enerji yakalama potansiyeli hakkında bilgi edinilir. Bununla birlikte uzun döneme yayılmış ölçümler çoğu zaman ekonomik sebeplerden ötürü tercih edilmezler. Çoğu proje de bu kadar süre bekletilemeyebilir. Bu tür durumlarda 1 yıl gibi kısa dönem rüzgâr verileri uzun dönem veriye sahip yakın bölgelerin verileri ile karşılaştırılmak sureti ile o bölgeye ilişkin uzun dönem yıllık hızları tahmin edilir.

Belirlenen bir periyot boyunca rüzgâr hızı değişimleri, olasılık yoğunluk fonksiyonları (olasılık dağılımları) ile temsil edilir.

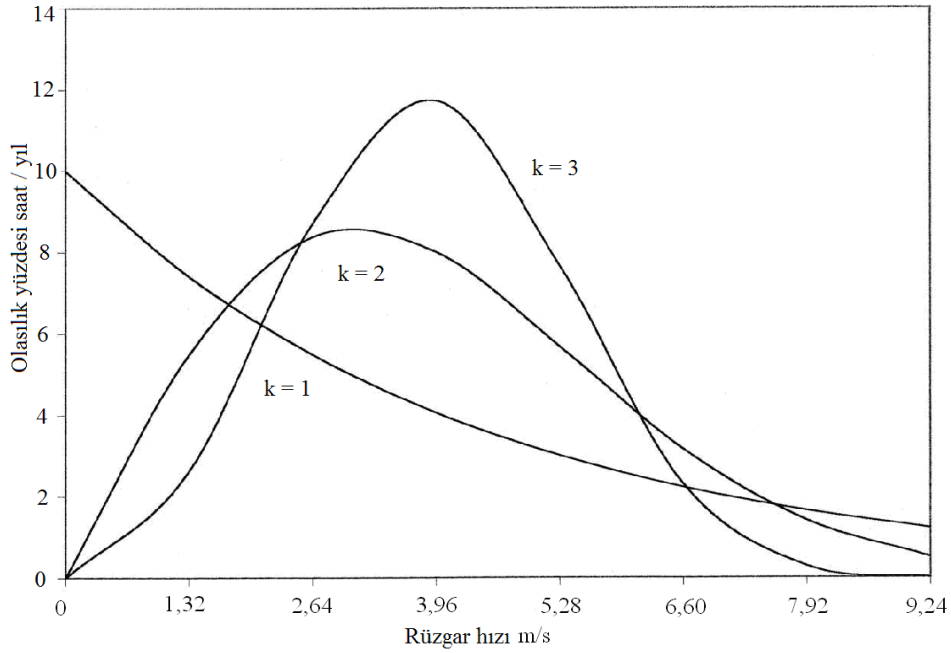
3.5.2.1 Weibull olasılık dağılımı

Rüzgâr hızlarının istatistiksel verileri yaygın bir kullanım olarak Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile karakterize edilebilir.

$f(v)$ Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu, iki parametrelidir.

- k : şekil parametresi (fonksiyonun görünümünü etkiler),
- c : skala parametresidir.

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad 0 < v < \infty \quad (3.27)$$



Şekil 3.8 Weibull olasılık dağılım fonksiyonu (Patel, 2006).

Şekil 3.8’de k ’nin üç durumu ve $c = 4,4$ m/s için $f(v)$ fonksiyonu seçilmiştir. Sol taraftaki $k=1$ eğrisinde sola doğru keskin bir eğim gözükmemektedir, burada çoğu gün rüzgârsızdır ($v=0$). Sağ taraftaki $k=3$ eğrisi daha normal dağılım eğimine sahiptir ki burada şiddetli ve hafif rüzgârlı günlerin sayısı eşittir. Ortadaki $k=2$ eğrisi çoğu yerde görülen tipik rüzgâr hızı dağılımıdır. Bu dağılımda, çoğu gündeki rüzgâr hızı ortalamanın altındayken daha az günde şiddetli rüzgâr vardır. k değeri eğrinin biçimini belirlediği için “*şekil faktörü*” adını alır.

Genellikle güvenilirlik çalışmalarında kullanılan $k=1$ durumundaki Weibull dağılımı üstel dağılım olarak adlandırılır. $k > 3$ durumu daha çok çan eğrisine veya Gauss dağılıma yaklaşır.

Skala faktörlerinin daha büyük değerleri için, eğriler daha büyük rüzgâr hızlarına doğru sağa kayar. Yani skala faktörleri ne kadar büyükse rüzgâr hızının yüksek olduğu gün sayısı o kadar fazladır. Bu, daha yüksek bir hız skalasında saatlerin dağılımını değiştirir. c de “*skala faktörü*” denir.

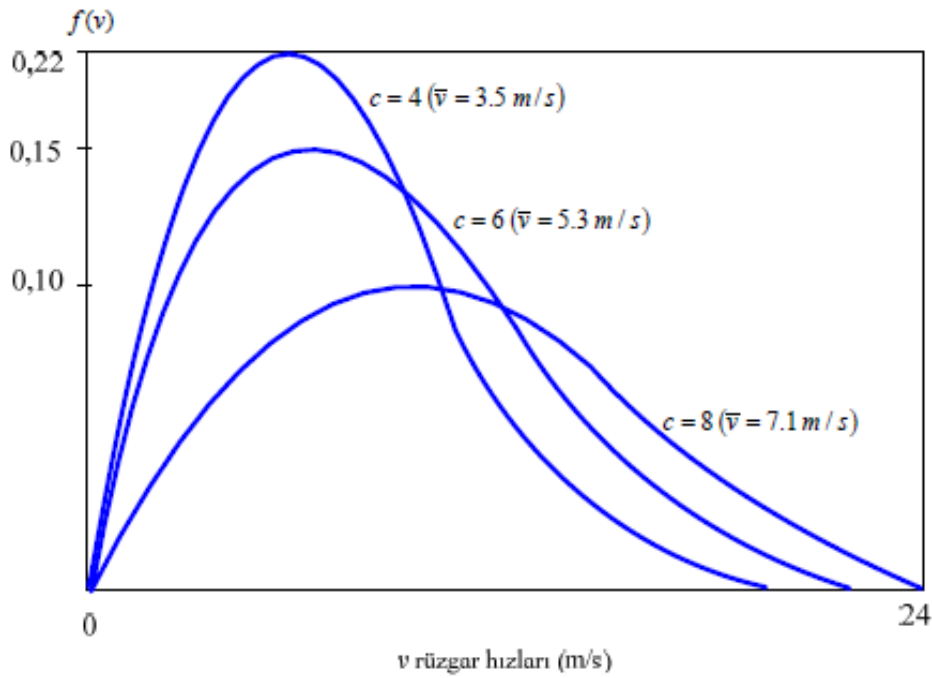
$k=2$ olan Weibull dağılımını içeren rüzgâr hızı, birçok yerde Rayleigh dağılımı olarak bilinir. Rayleigh dağılımı, sadece bir parametre (skala faktörü c) ile, rüzgâr hızının yeterince doğru bir açıklamasını yapabilir. Çünkü çoğu rüzgârlı alan, yaklaşık 5’ten 10 m/s’ye kadar değişen

skala faktörüne ve 1,5'ten 2,5'e kadar değişen şekil faktörüne sahiptir.

Weibull olasılık dağılım fonksiyonunun özelliklerinin özeti,

- $k=1$; Weibull olasılık dağılımını $\lambda=1/c$ olduğunda $f(v)=\lambda e^{-\lambda v}$ 'yi üstel dağılım yapar.
- $k=2$; Weibull olasılık dağılımını Rayleigh dağılımı yapar, $f(v)=2\lambda^2 v e^{-(\lambda v)^2}$, ve
- $k>3$; Weibull olasılık dağılımını normal çan şekilli dağılım yaklaşımı yapar.

Skala faktörü c 'nin Rayleigh dağılımı üzerindeki etkisi Şekil 3.9'da gösterilmiştir. c büyüdükçe eğri daha büyük rüzgâr hızlarına ötelenmektedir.



Şekil 3.9 Skala faktörü c 'nin Rayleigh dağılımı üzerindeki etkisi [7].

Yani ortalama rüzgâr hızı \bar{v} büyümektedir. \bar{v} ve c arasındaki ilişki matematiksel olarak

$$(\bar{v})_{ort} = \int_0^{\infty} v \times f(v) dv \quad (3.28)$$

$$\bar{v} = (\bar{v})_{ort} = \int_0^{\infty} \frac{2v^2}{c^2} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} dv = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \cong 0,886c \quad (3.29)$$

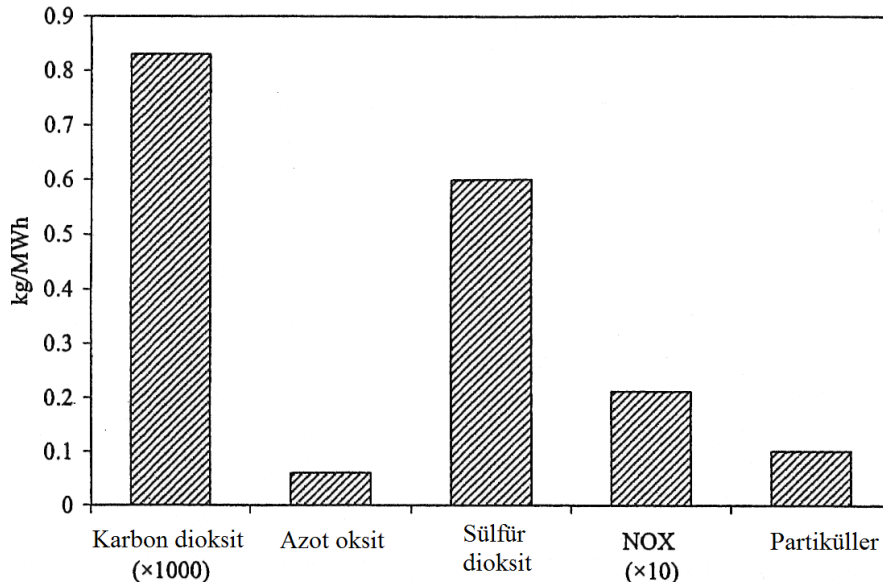
$\bar{v} = 0,886c$ şeklinde gösterilebilir.

4. RÜZGÂR ENERJİSİ VE ÇEVRE

4.1 Rüzgâr Enerjisinin Çevreye Faydaları

Rüzgâr enerjisinin en önemli çevresel avantajı atmosferi zehirli gazlarla doldurmamasıdır. Fosil yakıt kullanan geleneksel güç santralleri sülfür dioksit, karbon dioksit, nitrojen oksit gibi gazları enerji dönüşümü sırasında salmaktadır. Aynı şekilde geleneksel santrallerin emisyon salımı sırasında partiküller ve zehirleyici ağır metaller çevreyi ciddi olarak etkilemektedir.

Kömürle çalışan güç santrallerindeki emisyon değerleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Burada kullanılan yakıt katranlı kömürdür ve baca gazları kireç taşı kullanılarak kükürt giderme işlemi yapılmaktadır. Burada belirtilmesi gereken nokta bu işlem sırasında sülfür dioksitin yüzde doksanı uzaklaştırılmış olmasına rağmen emisyon değerinin kabul edilebilir limitin üzerinde olduğudur.



Şekil 4.1 Kömür santrallerinde ortaya çıkan atmosferik emisyonlar (Mathew, 2006)

Fosil yakıtı dayalı üretimden kaynaklanan emisyon; enerji dönüşüm teknolojisine, kullanılan yakıtın tipine ve kalitesine bağlıdır. Örneğin doğalgaz çevrimli modern bir güç santralinde SO_x emisyonu nispeten düşüktür. Burada esas problem NO ve NO_x emisyonlarıdır. Bu şekildeki santrallerde CO_2 konsantrasyonu yaklaşık 10 ppmv ile N_2O seviyeleri 1 ppmv civarında olabilir. IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle - Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrim) gibi ileri teknolojilerde bile CO_2 oranı 794 kg/MWh kadar yüksek olabilir.

Fosil yakıtın yakımı sırasında ortaya çıkan sülfür dioksit ve nitrojen oksitler asit yağmurlarına

yol açar. SO_2 ve NO_x atmosferde suyla birleştğinde sülfirik ve nitrik asitin bir karışımı oluşur. Bu asitler yağmurla atmosferden çıkarak orman, göl ve akarsulara ulaşır. Asit yağmuru kirliliğin en tehlikeli formlarından biridir. Bir bölgede asit yağmurunun varlığı senelerce fark edilmeyebilir. Göl ve akarsuların asitleşmesi balıkları öldürür. Sonuç olarak göller ve akarsular yavaş yavaş ölü hale gelir. Bu da sırayla sucul organizmalarla beslenen kuşlar ve memelilere zararlı olacaktır. ABD'deki birçok göl bu şekilde kirlenme nedeniyle biyolojik olarak ölü hale gelmiştir.

Asit yağmurları ayrıca topraktaki ana besinlere de zarar vererek topraktaki zehirleyici maddelerin yoğunluğunu artırır. Bu olay ağaçların yapraklarına da zarar vererek ağaçların büyümelerini geciktirir. Polonya ve Çek Cumhuriyeti'ndeki birçok orman % 40'a varan oranlarda asit yağmurlarından zarar görmüştür. İnsanların akciğerleri ve savunma sistemleri astım ve bronşit gibi hastalıkların temel sebeplerinden olan bu gazlardan etkilenmektedir. İçme suları da bu kirlilikten ötürü zarar görmektedir. Asit yağmurları ayrıca binalara da zarar vermektedir (Mathew, 2006).

CO_2 'nin küresel emisyonunun dörtte üçü fosil yakıtların yanmasına bağlıdır. Atmosferde CO_2 birikimi sera etkisi dolayısıyla küresel ısınmaya sebep olur. Sera gazları güneş ışınlarının atmosfere girmesine izin verir. Fakat yansıyan kızıl ötesi ışınları tutar. Bu da atmosferin ısınmasına sebep olmaktadır. Global ısınma da iklim türünün değişimine, deniz seviyelerinin yükselmesine ve toprak kullanım düzeninin değişimine yol açar.

Enerji üretimine bağlı fosil yakıt kullanımının sonucunda duman ve sis karışımı meydana gelmektedir. Duman ve sis karışımı burnu etkileyerek öksürük ve nefes alamama gibi ciddi solunum problemlerine yol açar. Kanada'nın Ontario eyaletinde her yıl 1800'ün üzerinde insanın sisten etkilendiği bildirilmektedir. Bu bölgedeki sise bağlı tarımsal kaybın da 70 milyon dolar olduğu tahmin edilmektedir. Aynı şekilde atmosferdeki partikül ve ağır metaller akciğer kanseri ve astıma neden olabilmektedir (Mathew, 2006).

Termodinamik çevrim sırasında fosil yakıtla çalışan santraller çok su tüketir. Kömür ve petrolle çalışan santrallerde buharlaşma kayıpları yüksektir (yaklaşık 1,9 l/kWh ve 1,6 l/kWh). Kömür yakıtlı santrallerde önemli miktarda su tüketimi yakıt temizleme sırasında yaşanır. Suyun kıt olduğu bölgelerde bu durum ciddi bir probleme sebep olmaktadır. Rüzgâr enerji santrallerinde ise su ihtiyacı oldukça azdır. Suya yalnızca kanatların periyodik temizliği sırasında ihtiyaç olmaktadır.

Bazı otoriteler tarafından geleceğin enerjisi olarak gösterilen nükleer enerji de çevresel açıdan

risksiz değildir. 1986'da Çernobil santralinde gerçekleşen talihsiz kaza sonucu İskoçya gibi uzak bölgelerde bile (kaza noktasından yaklaşık 2300 km uzakta) radyasyon oranı normalin 10000 katıydı. Bu felaketin sonucu olarak binlerce insan kanser ve başka hastalıklar sebebiyle ölmüştür (Mathew, 2006).

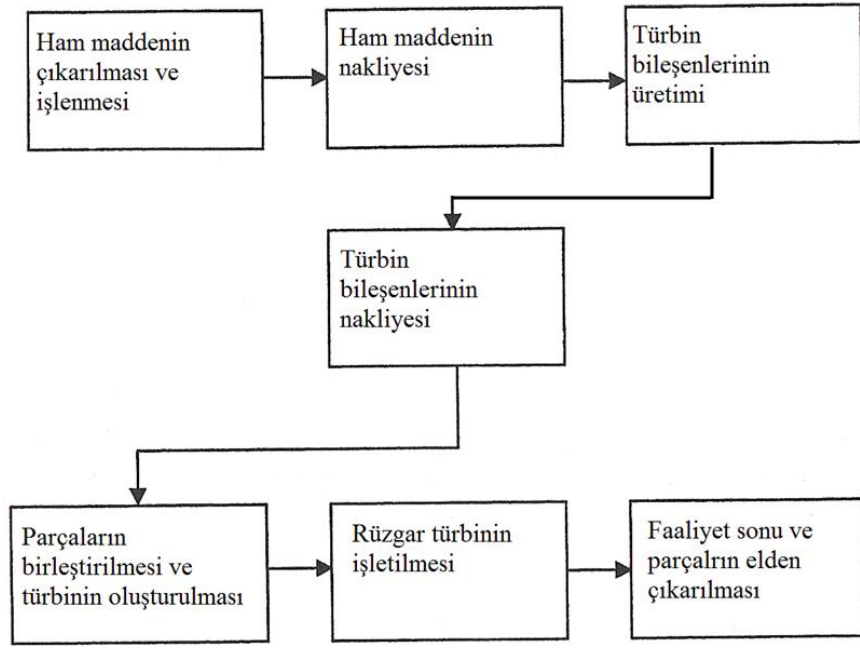
Burada enerji ihtiyacını sürekli ve çevre dostu olacak bir şekilde sağlayabilecek şekilde olan rüzgâr enerjisinin önemi ortaya çıkmaktadır. Rüzgâr enerjisi sistemleri ne kirletici gaz üretir ne de çevrede zararlı partikül birikimlerine sebep olur. Bu teknoloji ayrıca radyasyon ve atık yönetimi gibi problemler de ortaya çıkarmaz.

Şekil 4.1'den de görüldüğü rüzgâr santrali ile üretilen her MWh enerji için kömür santraline göre 830 kg CO₂, 2,1 kg NO_x, 0,6 kg SO₂, 0,1 kg partikül ve 0,06 kg azot oksit salımı yapılmamaktadır.

4.2 Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)

Yukarıda rüzgâr enerjisinin atmosferik emisyonları azalttığı görülmektedir. Fakat, türbinlerin yapımı ve santralin kurulumunda esnasında enerji gerekmektedir. Yapım ve kurulum aşamalarındaki ortaya çıkan emisyonlar da çevresel analizlerde dikkate alınmalıdır. Ömrünü tamamladıktan sonra santralin ortadan kaldırılması için gereken enerji de hesaba katılmalıdır.

Bu faktörler hesaba katılarak rüzgârdan elde edilen enerjinin emisyonlardan tamamen uzak olduğunu söylenemez. Projenin bütün ömrünü kapsayacak şekilde yapılan analiz "*yaşam döngüsü analizi*" olarak adlandırılır. Yaşam döngüsü analizinde bir sistemin bütününe bakılır, enerji kullanımındaki ve üretim – tüketim – imha dâhilindeki bütün aşamalarda emisyonlar ölçülür. Ham maddelerin çıkarılması, başka bir maddeye dönüşümü, sistemin yapım, işletim, yönetimi ve son olarak da imha ve geri dönüşümü incelenmelidir. Şekil 4.2'de bir rüzgâr türbininin yaşam döngüsü gösterilmiştir. Sistem incelenirse proje ömrü boyunca bütün aşamalarda enerji akışı ve emisyon potansiyelini ölçmek mantıklıdır. Türbinin yapım aşamasında enerjinin çeşitli formları tüketilmiş ve böylece sistemin, çevre üzerine negatif bir etkisi olmuştur. Rüzgâr enerjisinden faydalanmaya başlanıldığında ise herhangi bir kirliliğe sebep olmaksızın enerji üretilmektedir.



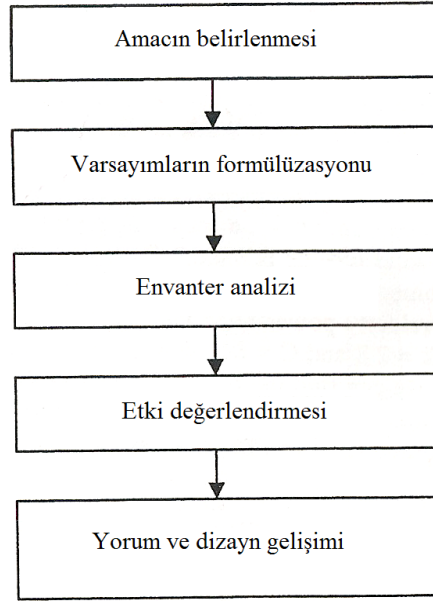
Şekil 4.2 Rüzgâr türbini yaşam döngüsünün çeşitli basamakları (Mathew, 2006).

LCA yaklaşımı projede beşikten mezara bütün aşamaları göz önüne alır. LCA değişik enerji kaynaklarını ve teknolojilerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için kullanılan çok yönlü bir yaklaşımdır.

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere LCA beş aşamadan oluşmaktadır. Bir rüzgâr türbininin yaşam döngüsü analizinde ilk adım sistem için gerekli olan materyalleri incelemektir. Bir santral için gerekli olan materyallerin tipi, sayısı, boyut ve tasarım özellikleri saha koşulları bakımından farklılık gösterir. Tipik 600 kW'lık bir rüzgâr türbini için gerekli olan materyaller Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 600 kW gücündeki bir rüzgâr türbini için gerekli materyaller (Mathew, 2006).

Materyal Çeşitleri	kg
Çelik	63.460
Alüminyum	1.780
Bakır	740
Kum	2.520
Cam	1.320
Polyester ve epoksi	2.400
Petrol ürünleri	120
Güçlendirilmiş demir (kurulum)	14.400
Beton	339.000
Diğer	840



Şekil 4.3 LCA'nın çeşitli basamakları

LCA'nın güvenilirliği çoğunlukla sistem için kullanılan malzemelerin miktarlarının doğru tahminine bağlıdır. LCA yaklaşımı altında çevresel analiz yapabilmek için iki yol bulunmaktadır. Bunlar net enerji analizi ve yaşam döngüsü emisyon analizidir (LCE).

4.2.1 Net enerji analizi (NEA)

Net enerji analizinde sistem tarafından üretilen toplam enerji miktarı (E_p) ile sistemin yaşam döngüsü boyunca tükettiği enerji (E_{CL}) karşılaştırılır. Üretilen enerji ile tüketilen enerji arasındaki oran “enerji geri dönme oranı” (EPR) olarak adlandırılır.

$$EPR = \frac{E_p}{E_{CL}} = \frac{E_I \times n}{E_{CL}} \quad (4.1)$$

E_I yıllık enerji üretimi iken, n yaşam süresidir. Teknolojinin üretim, yönetim ve imhası sırasında harcanan bütün enerji E_{CL} olarak adlandırılmaktadır. Diğer önemli bir nokta olan enerjinin geri kazanılması için gereken zamana “enerji geri dönme süresi” (EPP) denir.

$$EPP = \frac{E_{CL}}{E_I} \quad (4.2)$$

Bir alandaki türbinden elde edilen enerji temel olarak kapasite faktörünün bir fonksiyonudur. Türbin tipi ve boyutu dışında kalan türbinin konumlandırıldığı alanın özellikleri de EPR ve EPP 'yi etkiler. Ortalama bir kapasite faktörü ile bir rüzgâr santrali projesi yaşam süreci

boyunca harcadığı enerjinin tümünü genellikle bir yıl içinde geri kazandırır. Modern rüzgâr türbinleri daha verimlidir ve üretiminde daha az malzeme kullanılır. Bu nedenle bu türbinlerle kurulan santrallerde harcanan enerji daha çabuk geri kazanılır.

EPR ve *EPP* hesaplamalarında türbinin değişik parçalarının üretimi için gerekli olan enerjinin miktarına da ihtiyaç vardır. Türbin parçaları için gerekli malzemeler belirlenirse bu malzemeler için gerekli enerji, malzemelerin ağırlığı ve üretimleri için gerekli olan birim enerjinin çarpımıyla hesaplanır. Türbinin parçaları üretilirken farklı kaynaklardan elde edilen enerji kullanılır. Örneğin 1 kg'lık çelik üretimi için 1,6 MJ kok kömürü, 17,4 MJ kömür, 6,6 MJ petrol ve 0,1 MJ doğal gaz enerjisine ihtiyaç vardır. Böylece çelik için gerekli enerji 25,7 MJ/kg'dır.

600 kW'lık bir rüzgâr türbini için enerji gereksinim potansiyeli Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Bu malzemelerin nakliyesi için harcanan enerji de hesaplamalara dâhil edilmiştir. Hesaplamalar Danimarka koşulları için yapılmıştır. Malzemelerin üretimi için gerekli olan enerji, bu enerjinin kullanılışı da bölgeden bölgeye farklılık gösterir.

Çizelge 4.2 600 kW gücündeki bir rüzgâr türbininde kullanılan materyaller için enerji eşdeğeri (Mathew, 2006).

Materyaller	Enerji, MJ
Çelik	1630922
Alüminyum	69776
Bakır	57868
Kum	9274
Cam	12276
Polyester ve epoksi	109680
Güçlendirilmiş demir (kurulum)	522720
Beton (kurulum)	1247520
Diğer	39228
Toplam	3699264

Çizelge 4.2'de de görüldüğü üzere bir rüzgâr türbininin kurulumunda gerekli malzemelerin temini için gerekli enerji 3699 GJ'dir. Rüzgâr türbinleri yaşam süreleri boyunca enerji harcamaktadır. Fakat ömürlerinin sonunda sistemin ortadan kaldırılması sırasında demonte, imha ve geri dönüşüm için enerjiye ihtiyaç vardır. Bu durum için gerekli birim enerji 0,1 – 0,4 MJ/kg olarak düşünülebilir. Bu nedenle, 600 kW'lık bir rüzgâr türbininin ortadan kaldırılması için gerekli enerji 106,6 GJ'dir. Böylece bir rüzgâr türbininin yapımından sökülmesine kadarki süreçte gerekli enerji ~3806,2 GJ'dir.

Çeşitli enerji kaynaklarının enerji geri dönme oranı ve enerji geri dönme süresi değerleri

karşılaştırıldığında rüzgâr enerjisinin en yüksek enerji geri dönme oranına ve en düşük enerji geri dönme süresine sahip olduğu ortaya çıkmıştır (Mathew, 2006).

4.2.2 Yaşam döngüsü emisyonu (LCE)

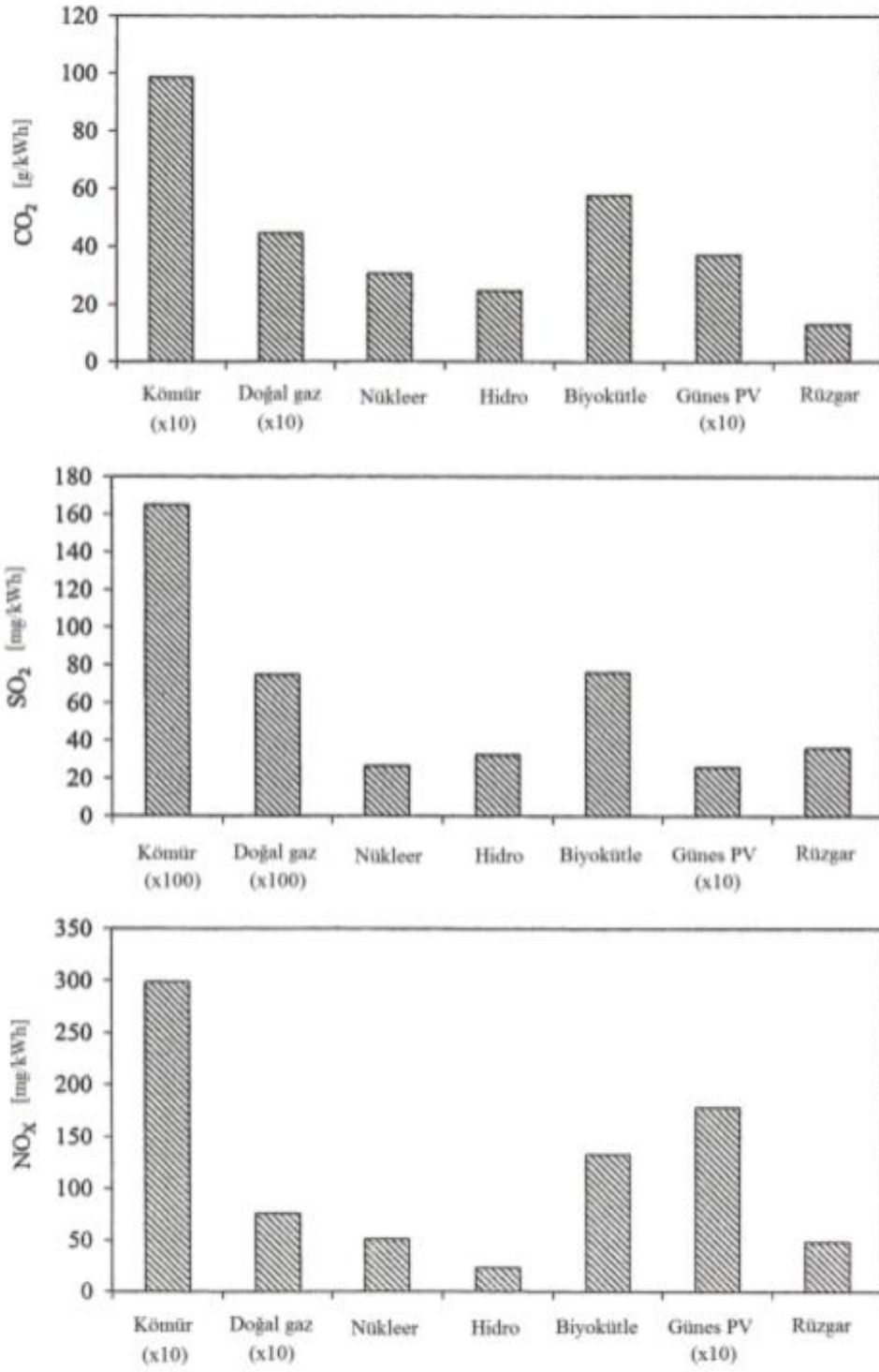
Rüzgâr enerjisi kaynaklı enerji üretimi sırasında emisyon tehdidi ortaya çıkmamaktadır. Fakat kurulum, işletmeye alma, devreden çıkarma evrelerinde enerjinin değişik formları tüketilmektedir. Yaşam döngüsü emisyon analizinde, türbinin ömrü boyunca yaydığı emisyonlar hesaplanır. Çizelge 4.3'te 600 kW'lık bir rüzgâr türbininin saldığı emisyon çeşitleri ve miktarları gözükmektedir.

Çizelge 4.3 600 kW gücündeki bir rüzgâr türbinin saldığı emisyonlar (Mathew, 2006)³.

Kirletici madde	g/kWh
SO ₂	0,03592
NO _x	0,04760
CO ₂	13,22731
N ₂ O	0,00020
CH ₄	0,00013
NM VOC	0,00043
CO	0,01054

Şekil 4.4'te çeşitli enerji kaynaklarının yaşam döngüsü emisyonları karşılaştırılmıştır. Enerji kaynaklarının beşikten mezara yaydıkları emisyonlar karşılaştırıldığında rüzgâr enerjisi günümüz şartlarında en temiz enerji kaynaklarından biridir.

³ NMVOC: Metan dışı uçucu organik bileşikler.



Şekil 4.4 Çeşitli enerji kaynaklarının yaşam döngüsü emisyonları (Mathew, 2006)

4.3 Rüzgâr Enerjisinin Çevresel Problemleri

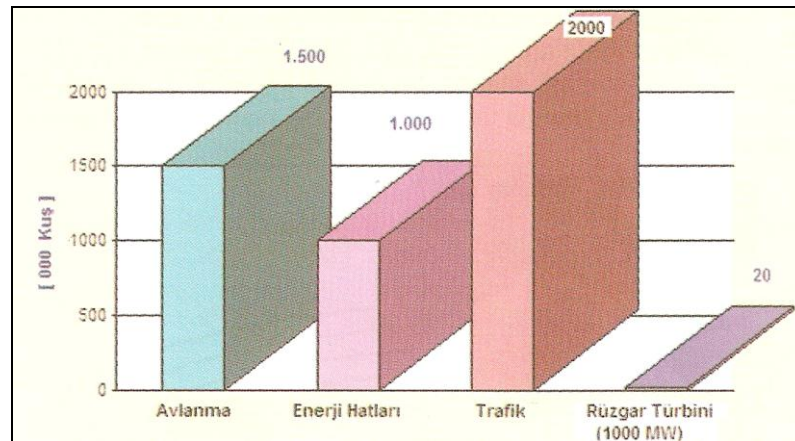
Rüzgâr enerjisi en temiz enerji kaynaklarından biri olmasına rağmen çeşitli çevresel problemlere de sebep olmaktadır. Bu temel problemler kuş türlerine olan zararlar ve gürültü kirliliğidir.

4.3.1 Kuş zayıtı

Kuşlar ve yarasalar rotalarındaki her yapıya olduğu gibi rüzgâr türbinlerine de çarpabilirler. 1980'lerin sonunda rüzgâr türbinlerinin kuşlar üzerine etkisi önemli bir sorun haline gelmiştir. Büyük bir rüzgâr araştırma alanı olan Kaliforniya'daki Altamont geçişinde yapılan çalışmalar rüzgâr türbinlerinde çarpmaya bağlı olarak yüksek oranda kuş ölümlerinin gerçekleştiğini göstermektedir. Daha sonraki deneyimler bu çalışma sonrasında ortaya çıkan rakamların abartılmış olduğunu göstermektedir. Bird Life isimli kuruluşun 2003 yılında yaptığı bir araştırmaya göre rüzgâr türbinlerine 600 m kala civardaki kuşların sayısında bir azalma meydana geldiğini göstermektedir (Durak ve Özer, 2008).

4.3.1.1 AB ülkelerinde kuş zayıtı

Çevre bilincinin oldukça yüksek olduğu AB ülkelerinde kuş ölümleriyle ilgili hassasiyet yüksektir. İspanya La Tarifa'daki rüzgâr santralinde akbaba ölümleri görülmüştür. Bu saha kuşların göç yolu üzerinde bulunmaktadır. Bu örnek aslında rüzgâr türbinlerinin kötü yerleşimi ve çevre planlamasındaki hataları göstermektedir. Almanya ve Danimarka'daki rüzgâr santralleri için doğru planlama yapılmış ve fazla kuş ölümü görülmemiştir.



Şekil 4.5 AB ülkelerinde kuş ölümleri (Durak ve Özer, 2008)

Şekil 4.5'te de görüldüğü gibi rüzgâr türbinlerinde meydana gelen kuş ölümleri trafik ve

avlanma sebebi ile meydana gelen kuş ölümleri ile kıyaslanamayacak derecededir.

4.3.2 Gürültü kirliliği

Rüzgâr türbinleri farklı aerodinamik ve mekanik sebeplerden dolayı gürültü çıkarır. Gürültü, istenmeyen ses olarak tanımlanmaktadır. Birçok rüzgâr santrali yerleşim bölgelerine uzak yerlere kurulurken, Avrupa'daki bazı rüzgâr santralleri yerleşim bölgelerine çok yakın alanlara kurulmuştur. Bu tip rüzgâr santrallerinde gürültü duyulabilir. Bununla beraber son yıllarda rüzgâr santrallerinde gürültü problemi ile ilgili yapılan çalışmalarda mesafe kat edilmiştir.

Rüzgâr türbinlerinden meydana gelen gürültünün aerodinamik ve mekanik olmak üzere temelde iki kaynağı bulunmaktadır. Mekanik gürültünün temel kaynakları dişli kutusu ve jeneratör iken; aerodinamik gürültü kaynağı ise hava akışı ve kanatlar arası etkileşimdir.

Rüzgâr türbini tarafından yayılan gürültü seviyesinin daha iyi anlaşılabilmesi için Çizelge 4.4'te çeşitli rüzgâr kaynaklarından yayılan gürültü seviyeleri kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.4 Çeşitli gürültü kaynaklarının gürültü seviyeleri (Durak ve Özer, 2008).

Gürültü Kaynağı	Kaynaktan Olan Mesafe [m]	Gürültü Seviyesi [dB]	Çevresel Kıyaslama	Etki
Sivil savunma sireni	140			Çok güçlü gürültü
Jet kalkışı	61	120		Çok güçlü gürültü
Cankurtaran sireni	31	90	Rock konseri	Fazla gürültü
Nakliye treni	15	80	Baskı makinası	Gürültülü
Pnömatik matkap	15	80	Baskı makinası	Gürültülü
Otoyol trafiği	31	70		Gürültülü
Vakum temizleyici	31	60	Kalabalık ofis	Daha az gürültülü
Hafif trafik	31	50	Küçük ofis	Daha az gürültülü
Rüzgar türbini < 1 MW	200	49		Hafif gürültü
Rüzgar türbini > 1 MW	300	45		Hafif gürültü
Büyük trafo	61	40		Hafif gürültü
Fısıldama	2	30		Hafif gürültü

5. NÜMERİK ÇALIŞMA

5.1 WAsP (Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Programı)

Çeşitli ülkelerde hazırlanıp kullanıma sunulan ve bir alandaki rüzgâr ölçüm parametrelerini kullanarak rüzgâr atlası hazırlamaya ve dolayısıyla rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesine yardımcı olan bilgisayar programları mevcuttur. Bu bilgisayar programların başında Danimarka RISØ Ulusal Laboratuvarında geliştirilmiş olan WAsP (Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Programı) programı gelmektedir. (Su Ş., İlbaş M., 2003)

WAsP paket programı farklı pürüzlülük şartlarının etkilerini, yakın bina ve diğer engellerin etkilerini, tepeler ve kompleks arazi tarafından bozulan rüzgârın değişimlerini göz önüne alır. Böylelikle rüzgâr türbinlerinin yerleşimini detayları ile ortaya koymak için meteorolojik verileri düzelterek bu verilerin kullanılmasına olanak sağlar. Rüzgâr atlası, herhangi bir lokal yer ve yükseklikte, rüzgâr hız dağılımının değerlendirilmesi için ayrıntıları ile ortaya konan işlemlerle birlikte temel yüzey istatistiklerini göstermektedir. Programın amaçları dört başlık altında sıralanabilir. Ham verinin analizi, rüzgâr atlasının oluşturulması, rüzgâr iklim değerlendirilmesi, rüzgâr güç potansiyelinin değerlendirilmesi.

Mühendislik verisiyle, verilen rüzgâr hızları ile ne kadarlık bir güç üretebileceği hesaplanır. Eğer plan, türbini tam olarak ölçümün yapıldığı yere dikmekse planlanan gücün bulunması basit bir iş olurdu. Ancak, genellikle haritaya bakıldığında türbinin yerleştirileceği konumla ölçüm istasyonunun farklı yerlerde olduğu görülür. Anemometrenin ve türbinin bulunduğu yerlerdeki rüzgâr davranışları farklı olabildiği gibi anemometre yüksekliği ile rüzgâr türbininin göbek çapı büyük ihtimalle farklı olacaktır. Burada gerekli olan şey, anemometrenin olduğu yerdeki kaydedilen verilerin kullanılarak türbinin konumundaki rüzgâr hareketliliğinin tahmininin yapılmasıdır. WAsP programı tam olarak bunu yapmaktadır.

WAsP, rüzgâr hız ve yön bilgileri ile rüzgâr gözlem istasyonu çevresindeki engellerden, arazi yüzey pürüzlülüğü ve arazinin topoğrafik özelliklerinden yola çıkarak bölgesel rüzgâr atlas istatistiklerinin ve enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan bir bilgisayar programıdır. WAsP yazılımı ile bir bölgenin rüzgâr enerji potansiyelini belirleyebilmek için aşağıda sıralanan işlem basamakları takip edilir.

5.1.1 Data analizi

5.1.1.1 Rüzgâr ölçüm verilerinin değerlendirilmesi

Bu özellik herhangi bir zaman serisindeki rüzgâr ölçümlerine dayanarak analiz yapmayı sağlar. Rüzgâr enerji gözlem istasyonlarından belirli bir yükseklikten alınan en az bir yıllık rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü ölçüm kayıtlarının bilgisayar ortamında düzenlenmiş hali ve bu istasyonlara ait 1/25.000 ölçekli harita üzerindeki UTM (Universal Transverse Mercator) ile metre cinsinden belirlenmiş koordinatları WASP ortamına aktarılıp değerlendirilir⁴. İlk etapta ölçüm yüksekliğine ait frekans dağılım tablosu ve grafiği elde edilir. Frekans dağılım tablosundaki bilgiler kullanılarak frekans histogramı (rüzgâr hızları - esme sıklıkları) ve yön histogramı (rüzgâr esme yönü - esme sıklığı) da elde edilebilir. Rüzgâr türbinleri seçilirken frekans histogramından, araziye konumlandırılırken ise yön histogramından yararlanır.

Rüzgâr ölçüm verilerinin incelenmesi sonucu, ölçüm yapılan noktanın türbülans yoğunluğu da ayrıca belirlenmelidir. Türbülans yoğunluğu seviyesinin yüksek olması enerji üretim miktarını düşürür, rüzgâr türbini üzerine etkiyen kuvvetlerin şiddetini ve malzeme yorulmasının hızını artırır. Bu durum rüzgâr enerji santrallerinin ekonomik ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Türbülans yoğunluğunun belirlenmesi için öncelikle rüzgâr hız ölçüm serilerinin ortalama hızı ve standart sapması belirlenmelidir. Standart sapma, önemli bir kavram olup rüzgâr hızlarındaki dalgalanmaları tanımlamak için kullanılır. Rüzgâr hız verilerinin standart sapması 0 ile 3 m/s, rüzgâr yön verilerinin standart sapması ise 3° ile 75° arasında olmalıdır. Herhangi bir alandaki standart sapmanın küçük olması demek o alandaki rüzgâr rejiminin son derece düzenli olması anlamına gelmektedir. Rüzgâr hız verilerinin standart sapma miktarının bu verilere ait ortalama hız değerine oranı ise “türbülans yoğunluğu” olarak adlandırılmaktadır. Hesaplanan türbülans yoğunluğu 0,0 – 0,10 değerleri arasında ise düşük yoğunluklu, 0,10 – 0,25 değeri arasında ise orta yoğunluklu ve 0,25 değerinden büyükse yüksek yoğunluklu olarak sınıflandırılır. Türbülans yoğunluğunun yüksek olduğu alanlara rüzgâr enerji santrali kurmaktan kaçınılmalıdır [1].

5.1.1.2 Yakın çevresel engel bilgileri

Rüzgâr gözlem istasyonlarının etrafındaki çevresel engeller, ölçülen rüzgâr hız ve yön değerlerini etkilemektedir. Bir nesnenin ölçüm direğine olan uzaklığı, yüksekliğinin 10 katı

⁴ UTM projeksiyonu, kürenin kendisine ekvatorda teğet olan silindire izdüşümüdür.

kadar mesafe içinde ise bu nesne yakın çevresel engel olarak tanımlanır. Daha uzak mesafedeki nesnelere engel sınıfına girmez ve arazi pürüzlülüğü olarak değerlendirilir.

Rüzgâr hızındaki azalma engelin geçirgenliğine bağlıdır. Geçirgenlik engelin açık alanının toplam alanına oranı şeklinde tanımlanmakta olup tamamen katı sayılabilen bir bina için 0, yapraklarını dökmüş bir ağaç grubu için 0,5 olarak alınabilir. Rüzgâr gözlem istasyonları civarındaki mevcut yakın çevresel engelleri tanımlayabilmek için ilgili parametreler belirlenerek WAsP formatına uygun “Engel Tanımlama Formu” düzenlenmelidir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 Örnek engel tanımlama formu. [1]

NO	β_1	R_1	β_2	R_2	H	D_e	G
1	35	76	43	78	8	6	0.0
2	96	400	120	400	10	200	0.4
3	120	150	136	150	10	230	0.8
4	203	98	225	104	15	13	0.0
5	230	100	264	175	10	25	0.4
6	286	161	289	158	7	20	0.2
7	290	156	297	148	7	9	0.2

Burada;

- β_1 : Engelin ilk köşesinin kuzey doğrultuyla yaptığı açı [derece].
- R_1 : Engelin ilk köşesinin RGİ'ye olan uzaklığı [m].
- β_2 : Engelin ikinci köşesinin kuzey doğrultuyla yaptığı açı [derece].
- R_2 : Engelin ikinci köşesinin RGİ'ye olan uzaklığı [m].
- H: Engelin yüksekliği [m].
- D_e : Engelin derinliği [m].
- G: Engelin tahmini geçirgenliğidir.

Engel tespiti yapılırken β_1 ve β_2 açılarının kuzey doğrultudan (0°) başlayarak saat ibresi yönünü izlemesine dikkat edilmelidir. Rüzgâr türbinlerinden üretilebilecek enerji miktarını doğruya yakın bir şekilde hesap edebilmek için engeller net olarak belirlenmelidir. Ayrıca arazi üzerine türbinler yerleştirilirken, mevcut engellerden mümkün olduğunca uzak yerler tercih edilmelidir.

5.1.1.3 Arazi yüzey pürüzlülük bilgileri

Bir alanın yüzey pürüzlülüğü, bu alan üzerindeki pürüzlülük elemanlarının boyutları ve alan

içindeki dağılımına bağlıdır. Karasal alanlar için bitki örtüleri, göller, yerleşim yerleri, doğal arazi yapıları tipik pürüzlülük elemanlarıdır. Bu pürüzlülük elemanları, rüzgâr enerjisi potansiyel belirleme çalışmalarında 4 değişik pürüzlülük sınıfıyla tanımlanır. Bunlar;

- Pürüzlülük sınıfı 0 olan araziler ($z_0=0,0002$ m): Bu sınıf; su alanları, deniz ve gölleri kapsar. Pürüzlülük sınıfı 0 olan arazi örneği Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



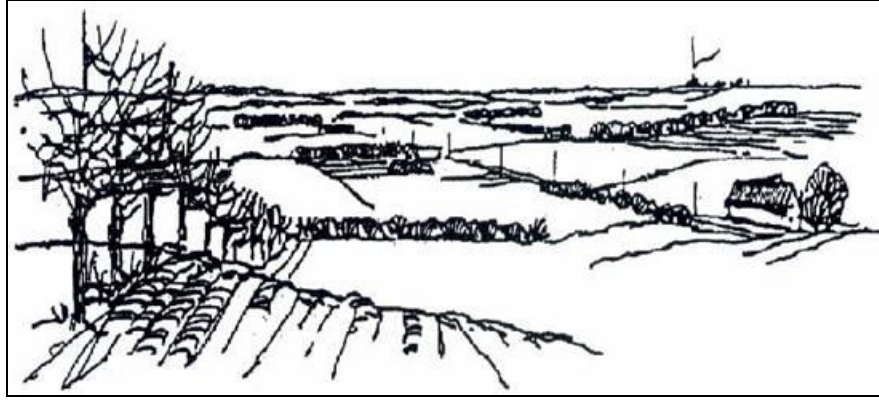
Şekil 5.1 Pürüzlülük sınıfı 0 olan arazi örneği (WAsP 9)

- Pürüzlülük sınıfı 1 olan araziler ($z_0=0,03$ m): Açık alanlar içinde birkaç rüzgâr kırıcı engeli kapsayan bu sınıf açıklık, düz alanları veya yumuşak engebeleri kapsar. Basit şekiller ağaç ve çalılıklar bulunabilir. Pürüzlülük sınıfı 1 olan arazi örneği Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



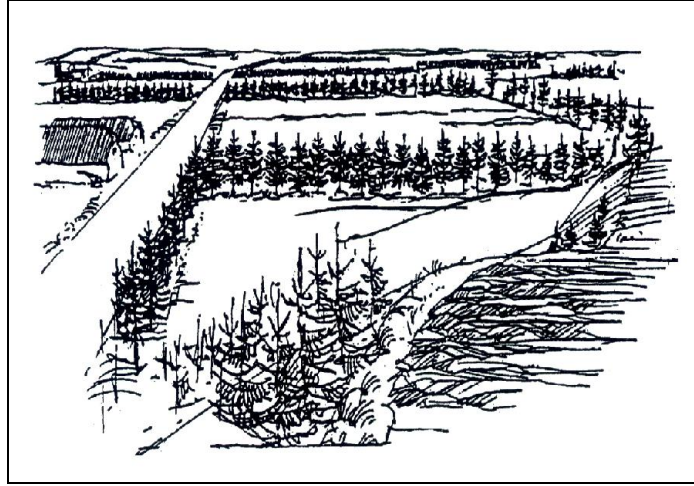
Şekil 5.2 Pürüzlülük sınıfı 1 olan arazi örneği (WAsP 9)

- Pürüzlülük sınıfı 2 olan araziler ($z_0=0,10$ m): Bu tip araziler rüzgâr kırıcılardan oluşmuş arazilerdir. Burada kırıcılar birbirinden ortalama 1000 m’den fazla uzaklıkta olup mevcut binalar dağınık haldedirler. Bu sınıfta rüzgâr kırıcılar arasında araziye açık görünüş veren geniş alanlar bulunabilir. Pürüzlülük sınıfı 2 olan arazi örneği Şekil 5.3’te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Pürüzlülük sınıfı 2 olan arazi örneği (WAsP 9)

- Pürüzlülük sınıfı 3 olan araziler ($z_0=0,40$ m): Şehir alanları, ormanlar ve ortalama birkaç yüz metre aralıklarla çok sayıda rüzgâr kırıcısı olan çiftlikler, ormanlar ve yerleşim alanları bu sınıfa dâhil olup Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Pürüzlülük sınıfı 3 olan arazi örneği (WAsP 9)

WAsP bilgisayar programı, pürüzlülüğü modellemek için her bir sektöre ait pürüzlülük değişimini dikkate alır. Genelde 12 sektör kullanılır ve merkezi RGİ (rüzgâr gözlem istasyonu) olmak üzere $345^\circ - 15^\circ$ arası 0° N (north), $15^\circ - 45^\circ$ arası 30° NNE (north north east) olacak şekilde düzenlenir. Pürüzlülük değerlerinin kullanılabilmesi için 1/25000 ölçekli harita üzerinde WAsP formatına uygun toplam 12 sektör için ayrı ayrı pürüzlülük uzunlukları belirlenmeli veya WAsP 6.0 ve üstü versiyonlardaki bilgisayar programlarında, sayısal harita üzerine arazi pürüzlülük bilgileri işlenebilmektedir. Bu çalışmanın sadece 1/25000 ölçekli harita üzerinde yapılması uygun değildir. İlgili santral sahasına bizzat gidilip arazi yapısı yerinde incelenerek sözü edilen işlem yapılmalıdır [1].

5.1.1.4 Topoğrafya bilgisi

Rüzgâr enerji santrali kurulması düşünülen alanın WAsP bilgisayar programı ile modellenebilmesi için santral sahasını temsil eden en az 80 km²'lik (5 km yarıçapında) alanı gösterebilen paftaların 1/25000 ölçekli sayısal haritaları hazırlanmalıdır.

5.1.2 Santral sahası için rüzgâr atlasının oluşturulması

Bu bölümde, belirli bir ölçüm yüksekliğine ait yeterli sayıda rüzgâr hız ve yön verilerinden elde edilen frekans dağılım tablosu, yakın çevresel engel ve pürüzlülük bilgileri ile santral alanının topoğrafyasını temsil eden 1/25000 ölçekli sayısallaştırılmış harita kullanılarak santral alanına ait rüzgâr atlas istatistikleri çıkarılır. Rüzgâr atlası, yer seviyesinden belirli bir yükseklikte ölçülmüş rüzgâr verilerinin, yakın çevresel engeller, arazi pürüzlülüğü ve arazinin topoğrafik yapısı ile birlikte değerlendirilmesi sonucu istenilen bir yükseklik için elde edilen istatistiksel sonuçlardır.

Rüzgâr atlas istatistiklerinin elde edilmesi ile istenilen herhangi bir yükseklikteki ortalama rüzgâr hızı, sektörlere göre rüzgâr esme sıklığı, hâkim rüzgâr yönü, ortalama enerji yoğunluğu, enerji yoğunluğunun hâkim olduğu sektör gibi parametreler ile yakın çevresel engeller ve arazi pürüzlülüğünün etkileri belirlenmiş olur.

Rüzgâr türbinlerinin santral sahasına konumlandırılması planlanırken rüzgâr atlasından yararlanılmaktadır. Sayısal harita üzerinde enerji üretim miktarının yüksek olacağı konumlar renk dağılımından elde edilebilir. Her bir rüzgâr türbininin optimum yeri; arazi yapısı, ulaşım imkanları, hakim rüzgâr yönü gibi unsurlar da dikkate alınarak bahsedilen renk dağılımları yardımıyla belirlenebilir. Bu işlemler sonucunda elde edilen haritada kırmızı boyalı yerler enerji üretiminin yüksek, sarı boyalı yerler ise enerji üretiminin düşük olacağı yerleri göstermektedir [1]

5.1.3 Rüzgâr türbinleri ve enerji üretim miktarlarının belirlenmesi

Yeni kurulacak olan rüzgâr enerji santralinden üretilecek enerjinin mevcut enerji nakil sistemine entegrasyonunun sağlanması gereklidir. Bu entegrasyonun yapılacağı hat kapasitesi, kısa devre gücü, gerilim oynamaları, reaktif güç vb. gibi bir takım kriterler dikkate alınarak kurulması düşünülen rüzgâr enerji santralının kurulu güç kapasitesi belirlenmelidir.

Kaç adet rüzgâr türbininin kurulacağı, türbinlerin birim gücünün ne olacağı ve arazi üzerine nasıl konumlandırılacağı gibi sorulara cevap bulunmalıdır. Piyasada çeşitli model ve

büyükükte rüzgâr türbinleri bulunmaktadır. Yatırımcı, amacını da göz önünde bulundurarak, fiyat, teknik özellikler, bölgeye ait frekans dağılım tablosu, verim, garanti, hazırda bulunma ve türbin referansları gibi kriterleri dikkate alarak en uygun rüzgâr türbinini seçmelidir. Yatırımcı, rüzgâr türbini seçimini yaptıktan ve arazi üzerindeki konumlandırmayı frekans dağılım tablosu, ilgili renk dağılımları ve rüzgâr türbinine ait teknik kriterleri göz önüne alarak planlandıktan sonra, her bir rüzgâr türbini yerine ait 1/25000 ölçekli harita üzerinde UTM koordinatlarını tespit etmelidir. Bu aşamaya kadar elde edilen rüzgâr atlas istatistik bilgileri, rüzgâr türbinine ait karakteristik değerler ve rüzgâr türbinlerinin UTM koordinatlarına ilişkin veriler birlikte kullanılarak rüzgâr türbinlerinin tek tek veya bir arada üretebilecekleri yıllık enerji miktarları WAsP bilgisayar programı ile hesaplanır [1].

5.2 Uygulama

Bu bölümde Yıldız Teknik Üniversitesi Yıldız Kampüsü'ne konumlandırılacak iki farklı rüzgâr türbini ile rüzgâr türbinlerinin enerji potansiyelleri, güç yoğunlukları ve kampüsün enerji ihtiyacının hangi oranda karşılanabileceği hesaplanacak, türbinlerin kapasite faktör değerleri bulunacaktır.

Çalışmada Yıldız Kampüsü'ne kuşbakışı olarak 860 m uzaklıkta bulunan Balmumcu ENKA binası çatısında kurulu Davis marka (Şekil 5.5), kupalı tipteki anemometre ile yapılan ölçümlerden elde edilen veriler, WAsP programı ile değerlendirilerek, kampüsteki rüzgâr enerjisi potansiyeli belirlenmiştir. 7,5 dakikada bir yapılan ölçümler 2009 yılının tamamını kapsamakta olup, yerden 21 m yükseklikteki ortalama rüzgâr hız ve yön değerlerini içermektedir. Rüzgâr yön değerlerinin, ölçme yerinin güç ve enerji değerlerine doğrudan etkisi olmayıp, sadece türbinlerin yerleştirilmesinde önemi vardır. Bir yıllık süre zarfında toplam 70080 veri olması gerekirken, veri sayısı 65746 olup, veri kaybı yaklaşık % 6'dır. Ölçüm standartları için kabul edilen veri kaybı üst sınır değeri % 10'dur. (Köse ve Özgören, 2005). Daha sonra kampüsün enerji ihtiyacını göz önünde bulundurarak iki farklı senaryo için uygun türbin seçimi yapılmıştır.



Şekil 5.5 ENKA binası üzerindeki anemometre

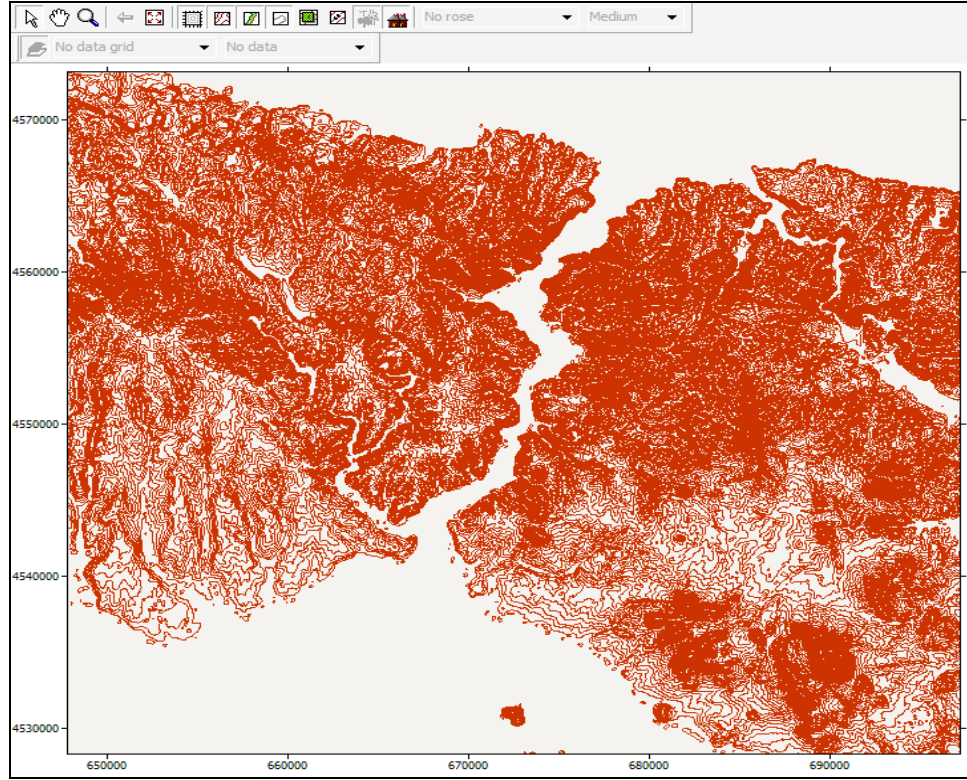
5.2.1 Yıldız Kampüsü'nün yıllık enerji ihtiyacı

Yıldız Teknik Üniversitesi'nden alınan verilere göre Yıldız Kampüsü'nün 2008 yılı enerji tüketimi 4858444,32 kWh olarak gerçekleşmiştir. Yapılacak hesaplamalar için okulun yıllık enerji ihtiyacı 2008 verisi referans alınarak 4,858 GWh değeri kullanılacaktır.

5.2.2 Gözlemlenen rüzgâr verilerinin analizi

5.2.2.1 Ölçüm istasyonunun kurulumu

Bu işlemden önce, Şekil 5.6'daki İstanbul izohips haritası WAsP programına aktarılır. Bu çalışmada kullanılan harita Space Radar Topography Mission (SRTM) Amerikan NASA kurumu tarafından yaklaşık 60° kuzey ve güney enlemleri arasında kalan tüm kara parçalarının sürekli ve yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelini elde etmek amacıyla gerçekleştirilmiş olan projenin bir parçasıdır. Bu amaçla geliştirilen uzay mekiği, 2000 yılı Şubat ayında fırlatılmış ve 11 gün boyunca veri toplamıştır. Bu yöntemde, yeryüzüne mikrodalga sinyaller gönderilerek güneşin konumundan, hava koşullarından ve yüzey kontrastından etkilenmeden veri toplamak mümkün olmaktadır. Bu çalışma, NASA tarafından internet üzerinden tüm kullanıcılara ücretsiz olarak sunulmuştur (Bildirici, vd., 2007).



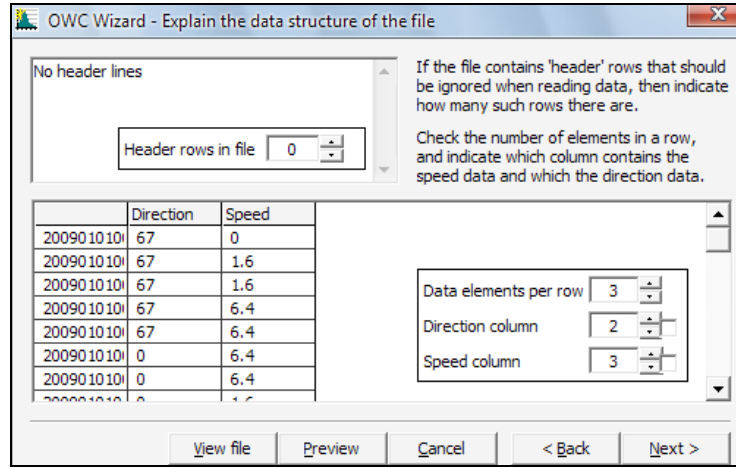
Şekil 5.6 İstanbul izohips haritası

Daha sonra anemometrenin yeri, enlem, boylam ve yükseklik bilgileri girilerek Şekil 5.7'de gösterildiği gibi harita üzerinde işaretlenir.

Şekil 5.7 Anemometrenin ondalık derece cinsinden koordinatları

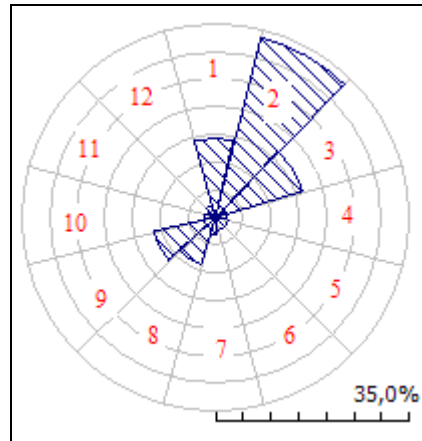
5.2.2.2 Rüzgâr gözlemlerinin eklenmesi

Anemometre ile ölçülen rüzgâr hız ve yön değerleri Şekil 5.8'de gösterildiği şekilde programa yüklenir.

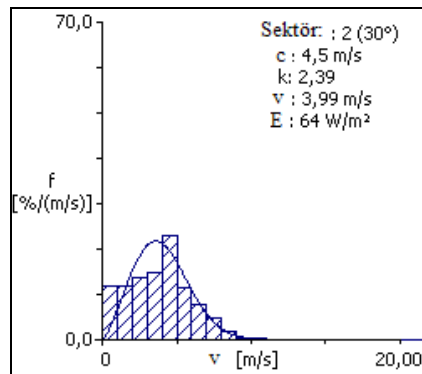


Şekil 5.8 Rüzgâr hız ve yön değerlerinin programa yüklenmesi.

Elde edilen rüzgâr verileri yardımıyla WASP programıyla belirlenen rüzgâr yön histogramı, Şekil 5.9'da, hâkim rüzgâr yönü rüzgâr hız dağılım grafiği ise Şekil 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.9 Rüzgâr yön histogramı



Şekil 5.10 Hâkim rüzgâr yönü rüzgâr hız dağılım frekans (%) değerleri

Rüzgâr yön histogramında rüzgâr potansiyeli en yüksek sektörün ikincisi olduğu görülmektedir. Şekil 5.10'da kuzey kuzey doğu yönünün hız dağılım frekansında ortalama rüzgâr hızının 3,99 m/s olduğu görülmektedir. Fakat RGİ arazi tanımlaması yapılarak engel ve pürüzlülük değerleri de sisteme girildiğinde bu değer yükselecektir.

Çizelge 5.2'de sektörler göre Weibull parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Weibull parametreleri

	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	Tümü
c	4,4	4,5	2,8	0,9	0,9	1,0	0,9	1,3	1,8	1,0	1,0	1,6	3,0
k	1,89	2,39	1,51	1,06	1,12	1,14	0,87	1,26	1,46	0,93	1,01	0,92	1,39
v	3,90	3,99	2,53	0,89	0,88	0,91	0,97	1,23	1,62	1,03	1,03	1,72	2,73
E	74	64	27	2	2	2	5	4	7	5	4	23	38
f	14,2	33,5	16,4	2,0	2,2	2,3	3,0	9,0	11,3	1,8	1,8	2,5	100

Burada;

- c : skala parametresi
- k : şekil parametresi
- v : rüzgâr hızı [m/s]
- E : güç yoğunluğu [W/m^2]
- f : frekans [%]

Frekans cetveli Çizelge 5.3'te gösterilmektedir. Frekans cetvelinde rüzgâr hızlarının yönler göre esme sıklıkları ifade edilmektedir. Çizelgeye bakıldığında 0° için rüzgâr hızının 1 m/s olma olasılığının binde 158 olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.3 Frekans cetveli

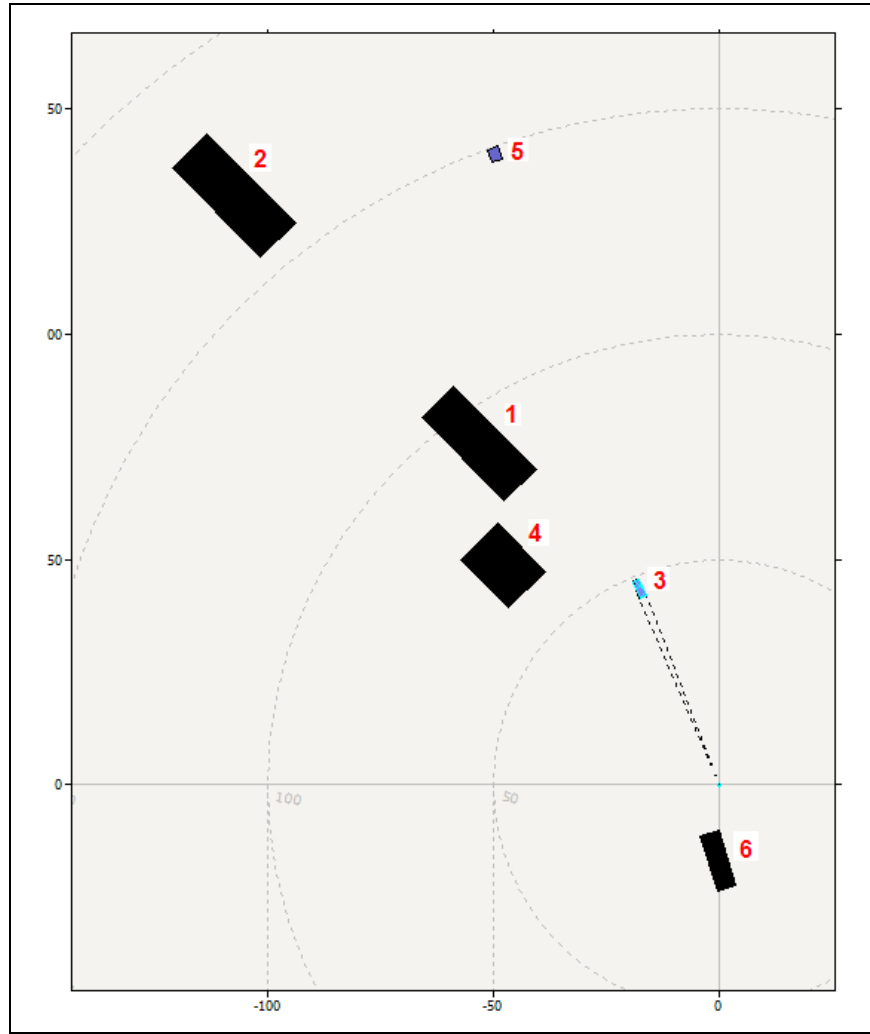
V[m/s]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	Tümü
1,0	158	116	255	684	689	661	675	535	400	663	635	498	296
2,0	123	119	219	223	225	246	186	275	285	142	207	206	182
3,0	138	134	185	58	63	66	75	129	190	111	85	161	142
4,0	135	145	129	27	16	21	27	43	83	45	54	58	107
5,0	190	227	120	9	7	6	26	15	33	36	15	51	131
6,0	96	113	48	0	0	0	8	3	5	2	2	7	61
7,0	70	78	27	0	0	0	2	0	2	0	1	2	41
8,0	44	48	14	0	0	0	1	0	0	0	0	2	25
9,0	30	19	3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	11
10,0	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
11,0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1
12,0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
13,0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
14,0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
15,0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
17,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.2.2.3 Arazinin tanımlanması

Arazi tanımlanmasında, rüzgâr gözlem istasyonunun bulunduğu konumun çevresindeki engeller ve pürüzlülük değerleri programa girilir. Gözlem istasyonu çevresindeki rüzgâr kesicilerin engel sayılabilmesi için, aşağıdaki şartları sağlaması gerekmektedir.

- Anemometre engele, engel yüksekliğinin 50 katından daha yakın olmalıdır.
- Anemometre yüksekliği, engel boyunun 3 katından daha kısa olmalıdır.
- Engelin ölçüm direğine olan uzaklığı, yüksekliğinin 10 katı kadar mesafe içinde olmalıdır. Daha uzak mesafedeki nesnelere engel sınıfına girmez ve arazi pürüzlülüğü olarak değerlendirilir. [1]

Bu çalışmada, anemometre yüksekliği 21 m olduğu için, anemometre merkezli 210 m çaplı bir daire içerisinde kalan ve yukarıdaki koşulları sağlayan engeller dikkate alınmıştır. Anemometrenin etrafında bulunan engeller Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 Anemometre çevresindeki rüzgâr kırıcılar

Yukarıdaki şekilde koordinatların kesiştiği nokta anemometreyi göstermekte olup, numaralarla belirtilen engellerin özellikleri Çizelge 5.4'te sıralanmıştır.

Çizelge 5.4 Engel tanımlama formu

engel	β_1	R_1	β_2	R_2	H	D	G
1 (bina)	323	79	330	81	21	26	0,00
2 (bina)	319	155	323	156	21	28	0,00
3 (ağaç)	337	45	339	45	10	4	0,50
4 (bina)	310	61	321	61	9	15	0,00
5 (ağaç)	340	147	341	147	7	3	0,40
6 (bina)	180	10	200	12	9	13	0,00

Sağlıklı bir rüzgâr potansiyeli hesaplaması için, rüzgâr gözlem istasyonunun çevresindeki alanın yüzey pürüzlülüğü, bu alan üzerindeki pürüzlülük elemanlarının boyutları ve alan içindeki dağılımı belirlenmelidir. Pürüzlülük değerleri, rüzgâr gözlem istasyonuna en az 5

km'lik mesafedeki yüzeylerin bilgilerini içermelidir (WAsP 9). Çizelge 5.5'te arazi yüzey karakteristiklerinin pürüzlülük uzunluğu değerleri gösterilmiştir. Bir arazinin pürüzlülüğü pürüzlülük uzunluğu parametresi ile belirtilir. Pürüzlülük uzunluğu yüksek olan arazi yüzey karakteristikleri etkisi en yüksek olan rüzgâr kesicilerdir.

Çizelge 5.5 Pürüzlülük tanımlama formu (WAsP 9)

Pürüzlülük Uzunluğu z_0 (m)	Arazi Yüzey Karakteristikleri	Pürüzlülük Sınıfı
1,00	Şehir	3 (0,40 m)
0,80	orman	
0,50	şehir civarı	
0,40		
0,30	rüzgâr kırıcılar	
0,20	çok sayıda ağaç ve/veya çalılık	
0,10	kapalı görünümlü tarım alanı	2 (0,10 m)
0,05	açık görünümlü tarım alanı	1 (0,03 m)
0,03	çok az sayıda ağacın/evin bulunduğu tarım alanı	
0,02	ağaçların ve binaların bulunduğu hava alanı	
0,01	hava alanı	
0,008	biçilmiş çim	
0,005	çıplak toprak (pürüzsüz)	
0,001	karlı alan (pürüzsüz)	
0,0003	kumlu alan (pürüzsüz)	0 (0,0002 m)
0,0002		
0,0001	su bölgeleri (göl,deniz)	

Pürüzlülük bilgilerinin doğru ve titiz bir şekilde programa girilmesi oldukça önemlidir. Anemometrenin konumu itibarıyla maruz kaldığı engeller ve arazi yüzey şartlarına göre yaptığı ölçümlerin değerlendirilip rüzgâr türbininin konumlandırılacağı alana taşınabilmesi için bu işlem uygulanır.

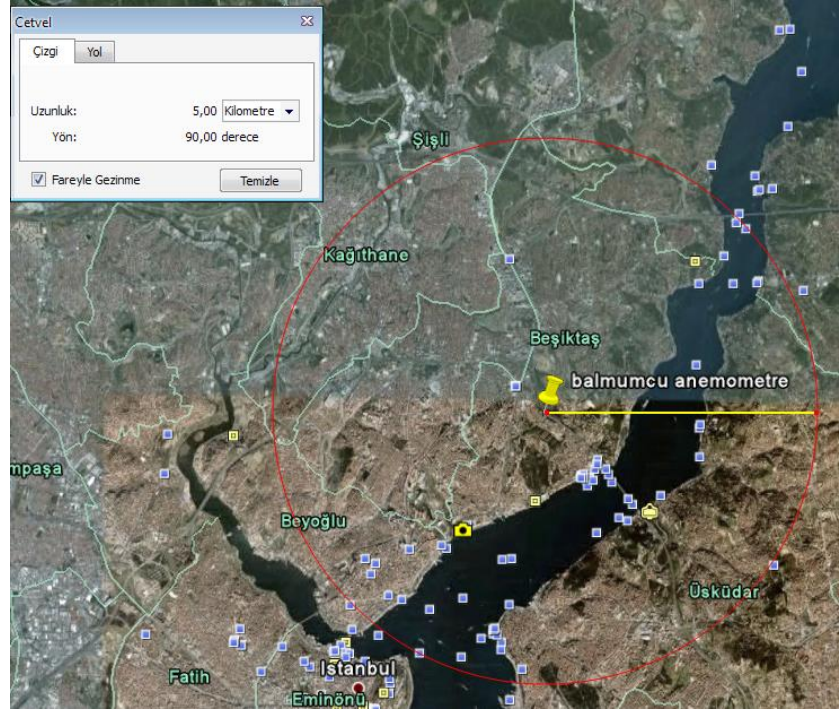
Yani rüzgâr gözlemlerinin bir konumdan diğerine taşınabilmesi için ilk önce ölçüm yapılan konum şartlarından arındırılması, daha sonra rüzgâr karakteristiğinin inceleneceği noktada yeniden rüzgârın maruz kalacağı engel ve pürüzlülük bilgilerinin sisteme tanıtılması gerekmektedir.

Çizelge 5.6'da rüzgâr gözlem istasyonu için pürüzlülük değerleri gösterilmiştir.

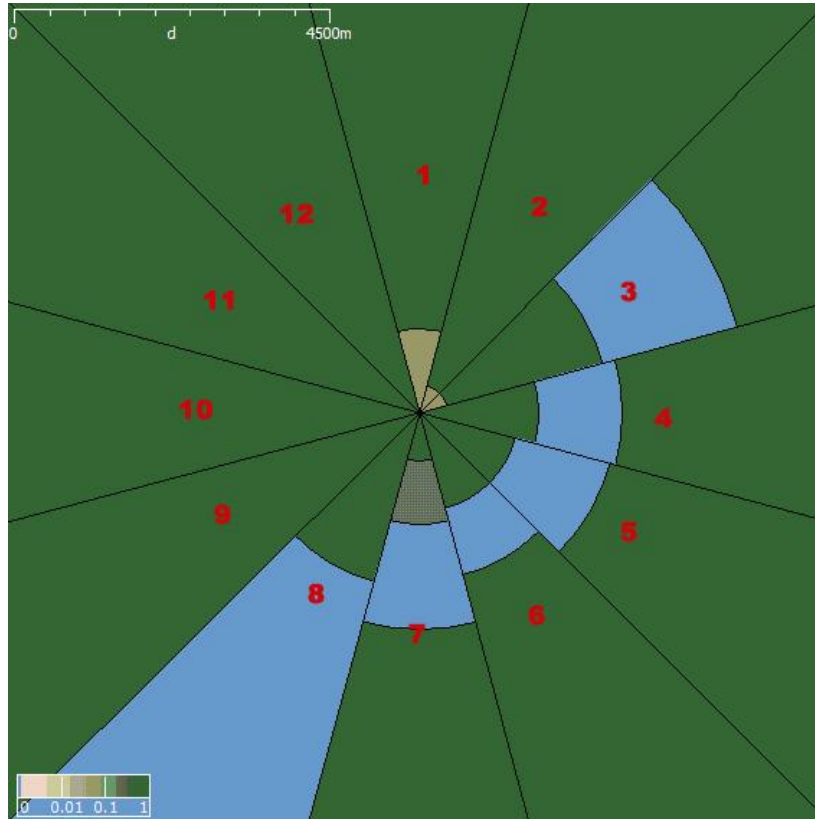
Çizelge 5.6 Rüzgâr gözlem istasyonu için pürüzlülük değerleri

Sektör	Mesafe (m)	Pürüzlülük Bilgileri	Pürüzlülük uzunluğu (m)
1 (0°)	0 - 1200	birkaç ağaç ve ev	0,055
	1200 - 5000	şehir	1
2 (30°)	0 - 400	birkaç ağaç ve ev	0,055
	400 - 5000	şehir	1
3 (60°)	0 - 400	birkaç ağaç ve ev	0,055
	400 - 2700	şehir	1
	2700 - 4700	deniz	0
	4700 - 5000	şehir	1
4 (90°)	0 - 1700	şehir	1
	1700 - 2900	deniz	0
	2900 - 5000	şehir	1
5 (120°)	0 - 1400	şehir	1
	1400 - 2800	deniz	0
	2800 - 5000	şehir	1
6 (150°)	0 - 1400	şehir	1
	1400 - 2400	deniz	0
	2400 - 5000	şehir	1
7 (180°)	0 - 700	şehir	1
	700 - 1600	çok sayıda ağaç	0,2
	1600 - 3100	deniz	0
	3100 - 5000	şehir	1
8 (210°)	0 - 2500	şehir	1
	2500 - 5000	deniz	0
9 (240°)	0 - 5000	şehir	1
10 (270°)	0 - 5000	şehir	1
11 (300°)	0 - 5000	şehir	1
12 (330°)	0 - 5000	şehir	1

Şekil 5.12’de RGİ merkez olmak üzere kuş bakışı olarak 5 km çapındaki dairenin içinde kalan arazi yüzey karakteristikleri gözükmemektedir. Şekil 5.13’te pürüzlülük değerlerinin WASP’taki temsili gösterimi görülmektedir. Bu şekil Çizelge 5.6’nın görsel halidir. Örneğin Sektör 6 için pürüzlülük bilgileri sırasıyla şehir, deniz, şehir şeklindedir. Şekil 5.13’te ise şehir pürüzlülük bilgisini temsilen yeşil, deniz pürüzlülük bilgisini temsilen mavi renk yer almaktadır. Şekil 5.14’te ise anemometre konumundan bir fotoğraf yer almaktadır.



Şekil 5.12 Rüzgâr gözlem istasyonu ve 5 km'lik çevresinin kuş bakışı görünümü



Şekil 5.13 Rüzgâr gözlem istasyonu sektör ve pürüzlülük bilgileri



Şekil 5.14 Anemometre konumundan bir fotoğraf

5.2.3 Rüzgâr atlasının hesaplanması

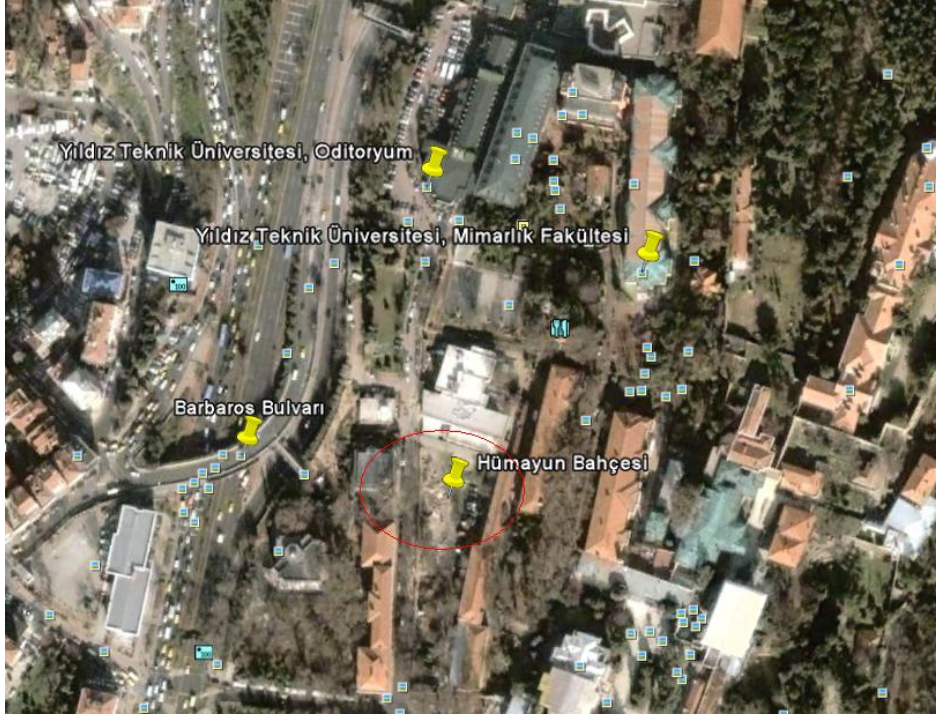
Rüzgâr gözlem istasyonuna ait rüzgâr gözlemleri, rüzgâr gözlem istasyonunun çevresindeki rüzgâr kırıcıların ve engellerin sisteme tanıtılması ile rüzgâr atlası belirlenir. Belirlenen rüzgâr atlası 4 farklı pürüzlülük (0,000 m, 0,030 m, 0,100 m, 0,400 m) ve 5 farklı yükseklik değerini (10 m, 25 m, 50 m, 100 m, 200 m) içermektedir. Çizelge 5.7’de rüzgâr atlası özet değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.7 Rüzgâr atlası özet değerleri

Yükseklik	Parametre	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m
10,0 m	Weibull c [m/s]	6,8	4,7	4,1	3,3
	Weibull k	1,47	1,34	1,35	1,36
	Ortalama şiddet [m/s]	6,16	4,35	3,79	2,98
	Güç yoğunluğu [W/m ²]	400	163	107	51
25,0 m	Weibull c [m/s]	7,4	5,6	5,1	4,3
	Weibull k	1,49	1,39	1,40	1,40
	Ortalama şiddet [m/s]	6,72	5,15	4,64	3,89
	Güç yoğunluğu [W/m ²]	510	255	186	109
50,0 m	Weibull c [m/s]	8,0	6,5	5,9	5,1
	Weibull k	1,52	1,48	1,47	1,46
	Ortalama şiddet [m/s]	7,19	5,87	5,37	4,65
	Güç yoğunluğu [W/m ²]	605	344	266	176
100,0 m	Weibull c [m/s]	8,6	7,6	7,0	6,1
	Weibull k	1,51	1,56	1,57	1,55
	Ortalama şiddet [m/s]	7,73	6,80	6,28	5,53
	Güç yoğunluğu [W/m ²]	764	494	386	268
200,0 m	Weibull c [m/s]	9,3	9,1	8,4	7,3
	Weibull k	1,47	1,55	1,56	1,56
	Ortalama şiddet [m/s]	8,42	8,15	7,52	6,60
	Güç yoğunluğu [W/m ²]	1020	859	671	451

5.2.4 Türbinin konumlandırılması

Türbinin konumlandırılacağı koordinatlar, tıpkı rüzgâr gözlem istasyonunda olduğu gibi programa girilir. Bu çalışmada, kampüs içinde rüzgâr türbini için en uygun yerin Hümayun Bahçesi olduğu düşünülmüştür (Şekil 5.15). Arazi programa tanımlanırken aynen rüzgâr gözlem istasyonunda olduğu gibi türbinin bulunduğu konumun çevresindeki engeller ve pürüzlülük değerleri programa girilir. Çizelge 5.8’de rüzgâr türbini konumu için pürüzlülük değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.15 Hümayun Bahçesi'nin konumu

Pürüzlülük değerlerinin sisteme tanıtımının ardından konumlandırılacak türbini gölgeleyecek engel noktaları da yine anemometredesine benzer şekilde sisteme işlenir. Bir cismin engel olarak mı yoksa pürüzlülük olarak mı değerlendirilmesi gerektiğine ilişkin anemometre için yapılan açıklama türbin için de geçerlidir. Buradaki ayrıntı türbin yüksekliğinin değeri anemometre yüksekliğine göre bir hayli fazla olacağı için engel olarak değerlendirilebilecek rüzgâr kırıcıların da anemometreye nazaran nicel olarak azalacağıdır. Bir rüzgâr kırıcının engel olup olmadığı türbinin yüksekliği ile ilgilidir.

Çizelge 5.8 Rüzgâr türbini konumu için pürüzlülük değerleri

Sektör	Mesafe (m)	Pürüzlülük Bilgileri	Pürüzlülük uzunluğu (m)
1 (0°)	0 - 5000	şehir	1
2 (30°)	0 - 5000	şehir	1
3 (60°)	0 - 2500	şehir	1
	2500 - 4500	deniz	0
	4500 - 5000	şehir	1
4 (90°)	0 - 1700	şehir	1
	1700 - 3500	deniz	0
	3500 - 5000	şehir	1
5 (120°)	0 - 1000	birkaç ağaç ve ev	0,055
	1000 - 2200	deniz	0
	2200 - 2800	birkaç ağaç ve ev	0,055
	2800 - 5000	şehir	1
6 (150°)	0 - 1000	şehir	1
	1000 - 2300	deniz	0
	2300 - 2700	birkaç ağaç ve ev	0,055
	2700 - 5000	şehir	1
7 (180°)	0 - 1100	şehir	1
	1100 - 2900	deniz	0
	2900 - 3700	şehir	1
	3700 - 5000	deniz	0
8 (210°)	0 - 1600	şehir	1
	1600 - 4300	deniz	0
	4300 - 5000	şehir	1
9 (240°)	0 - 4250	şehir	1
	4250 - 4700	deniz	0
	4700 - 5000	şehir	1
10 (270°)	0 - 5000	şehir	1
11 (300°)	0 - 5000	şehir	1
12 (330°)	0 - 5000	şehir	1

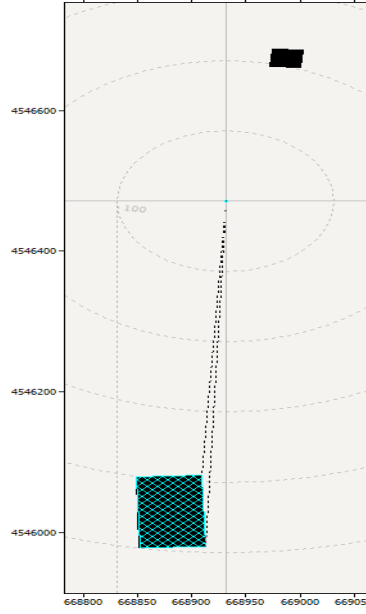
Bu çalışma için güç kapasitesi farklı iki rüzgâr türbininden elde edilecek enerji miktarları incelendiğinden farklı yükseklikteki iki rüzgâr türbini için engeller aynı olmayacaktır.

Türbinin konumlandırılması ile ilgili gerekli verilerin sisteme girilmesiyle birlikte sistem türbinden elde edilebilecek enerjinin hesaplanması için hazır hale gelecektir.

5.2.5 Birinci senaryo

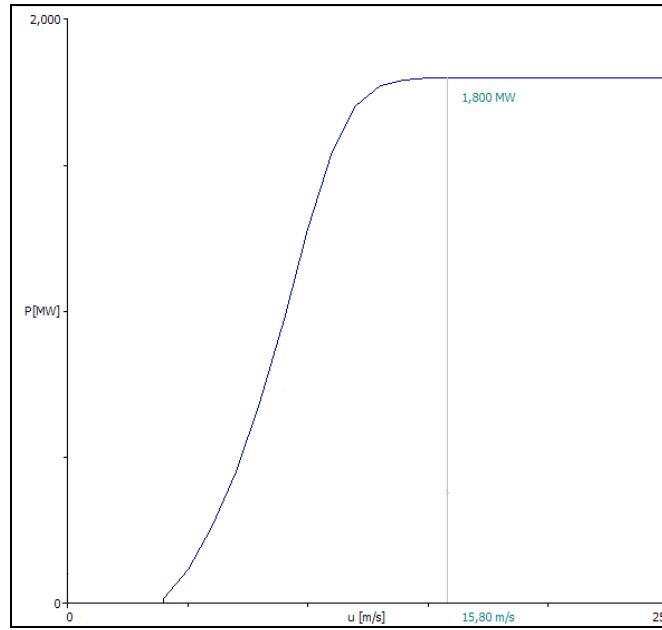
İlk olarak 1,8 MW'lık güce sahip Vestas V 80 modeli için programa engel girişi yapılır. Seçilen bu modelin rotor çapı 80 m, göbek yüksekliği ise 67 m'dir. Bu yükseklik değerine göre Beşiktaş Conrad Oteli ve yerleşke içinde yer alan A Blok Binası türbine gelen rüzgârı önemli derecede engelleyecektir. Şekil 5.16'te rüzgâr türbini için engeller gösterilmiştir. Yeşil

taralı engel Conrad Oteli'ni temsil etmektedir.



Şekil 5.16 Vestas V 80 rüzgâr türbini için rüzgâr kırıcılar

Şekil 5.17'te rüzgâr türbini için güç eğrisi gösterilmiştir. Türbin 4 m/s ile 25 m/s arasındaki rüzgâr hızlarında çalışmak üzere tasarlanmıştır. Şekilden de görüleceği üzere rüzgâr şiddeti 15,80 m/s değerine ulaştığı anda türbin maksimum kapasiteyle çalışmaktadır. Rüzgâr şiddeti 25 m/s değerini aştığı zaman ise türbin güvenlik sebebiyle devreden çıkmaktadır.

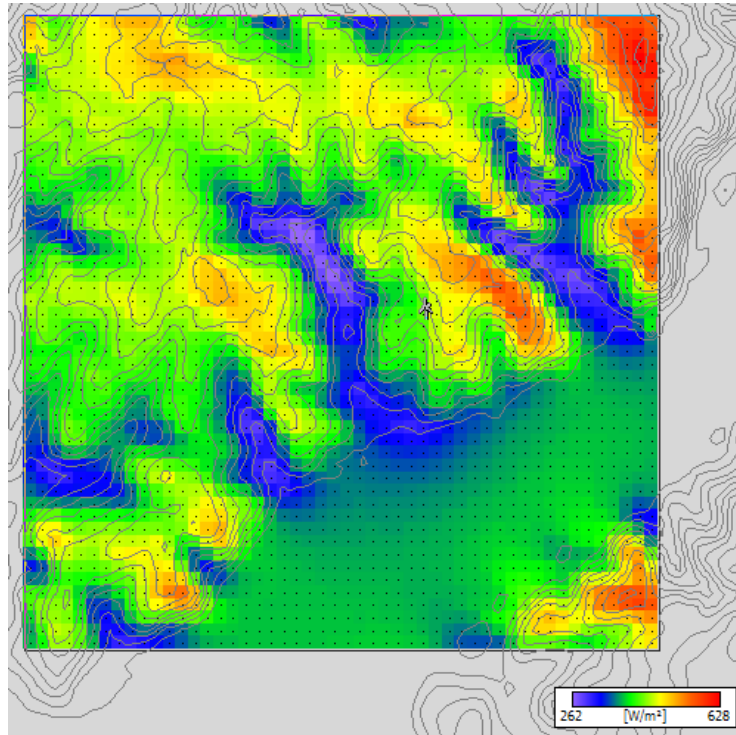


Şekil 5.17 Vestas V 80 rüzgâr türbini için güç eğrisi

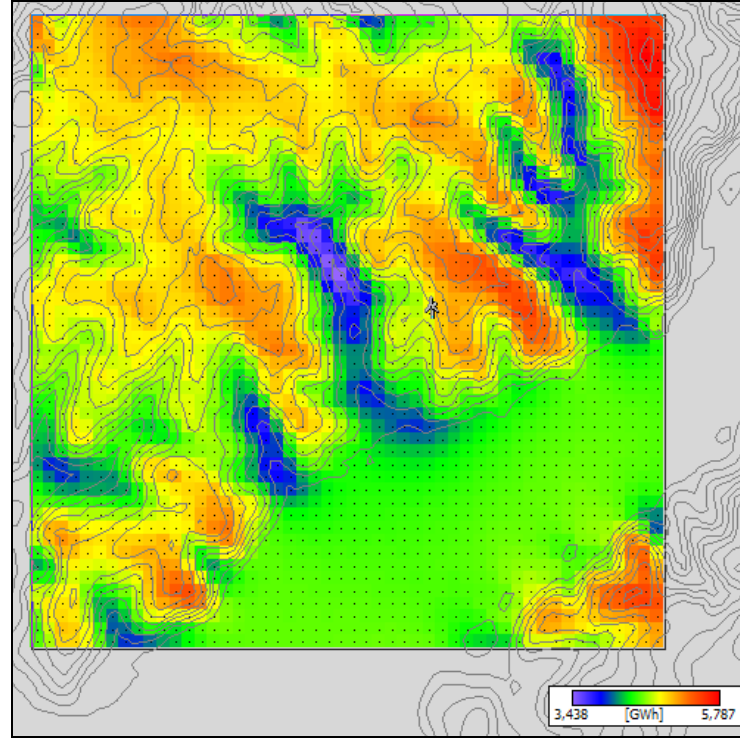
Türbin seçimi yapıldıktan sonra program yıllık enerji üretimini ve enerji yoğunluğunu hesaplar. Şekil 5.18’de birinci senaryo için hesaplatılan enerji yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Türbinin konumlandırılacağı alan için enerji yoğunluğu 447 W/m^2 ’dir. Yıldız Kampüsü için genelde enerji yoğunluğu değerleri aynı iken sağ üst köşede kırmızı ile gösterilen alandaki enerji yoğunluğu 628 W/m^2 ’ye kadar çıkmaktadır. Kırmızı alanın koordinatları Etiler Nispetiye Mahallesi sınırları içinde kalmaktadır. Türbinin hemen sağ tarafında kalan bir diğer küçük kırmızı alan ise Yıldız Parkı sınırları içinde yer almaktadır.

Şekil 5.19’da birinci senaryo için yıllık enerji potansiyeli değerleri gösterilmiştir. Şekilde türbinin konumlandırıldığı yer için yıllık enerji potansiyeli yaklaşık 4,8 GWh olarak gösterilmektedir. Yani türbin çevresindeki engeller ve pürüzlülükler olmasaydı daha açık bir ifade ile türbin bir çölün ya da okyanusun ortasında olsaydı yıllık enerji potansiyeli yaklaşık 4,8 GWh olacaktı. Şekilden de görüleceği üzere yine Nispetiye Mahallesi ve Yıldız Parkı için yıllık enerji üretim değeri Yıldız Kampüsü’ne nazaran daha yüksektir.

Türbinin konumlandırılacağı yer olan Hümayun Bahçesi için engel ve pürüzlülük değerleri de hesaba katıldığında yıllık enerji üretimi 2,923 GWh değerine düşmektedir. Bu durumda birinci senaryo için kapasite faktörü (üretilen enerji / maksimum üretilebilecek enerji) $2,923/(1,8 \times 8760) = 0,0185 \sim \% 19$ ’dur.



Şekil 5.18 Birinci senaryo için enerji yoğunluk analizi

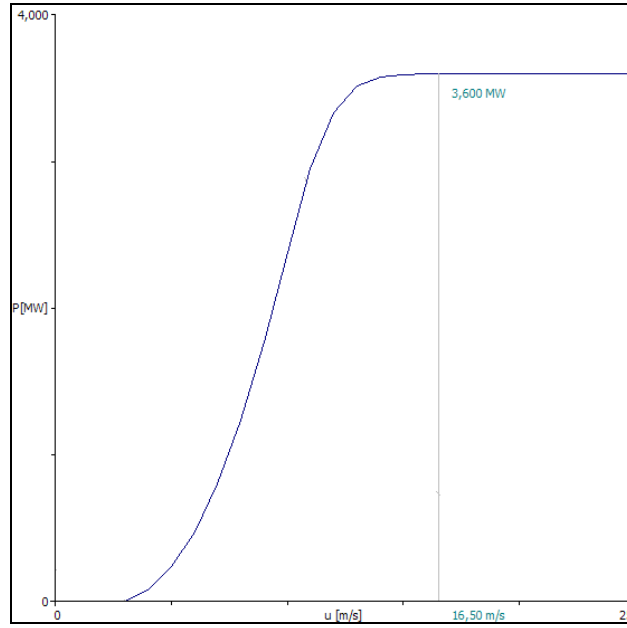


Şekil 5.19 Birinci senaryo için yıllık enerji potansiyeli analizi

5.2.6 İkinci senaryo

3,6 MW değerinde güce sahip SWT 3,6 - 107 modeli için programa engel girişi yapılır. Seçilen bu modelin rotor çapı 107 m, göbek yüksekliği ise 80 m'dir. Bu yükseklik değerine göre yalnızca Beşiktaş Conrad Oteli türbine gelen rüzgârı önemli derecede engelleyecektir.

Şekil 5.20'de seçilen rüzgâr türbininin güç eğrisi gösterilmiştir. Türbin 3 m/s ile 25 m/s arasındaki rüzgâr hızlarında çalışmak üzere tasarlanmıştır. Şekilden de görüleceği üzere rüzgâr şiddeti 16,50 m/s değerine ulaştığı anda türbin maksimum kapasiteyle çalışmaktadır. Rüzgâr şiddeti 25 m/s değerini aştığı zaman ise türbin güvenlik sebebiyle devreden çıkmaktadır.

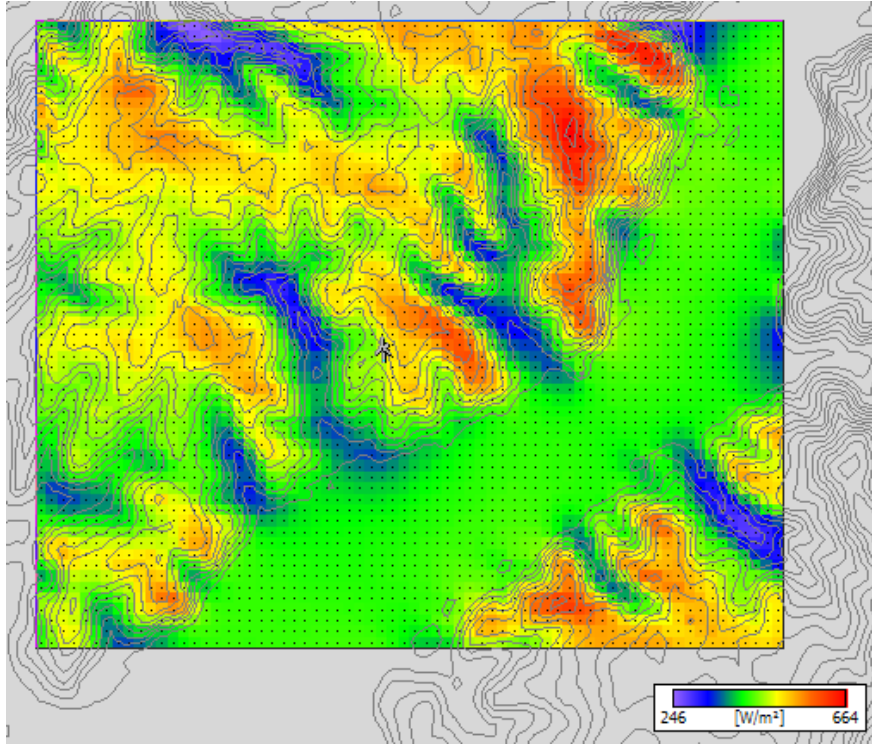


Şekil 5.20 SWT 3,6 - 107 rüzgâr türbini için güç eğrisi

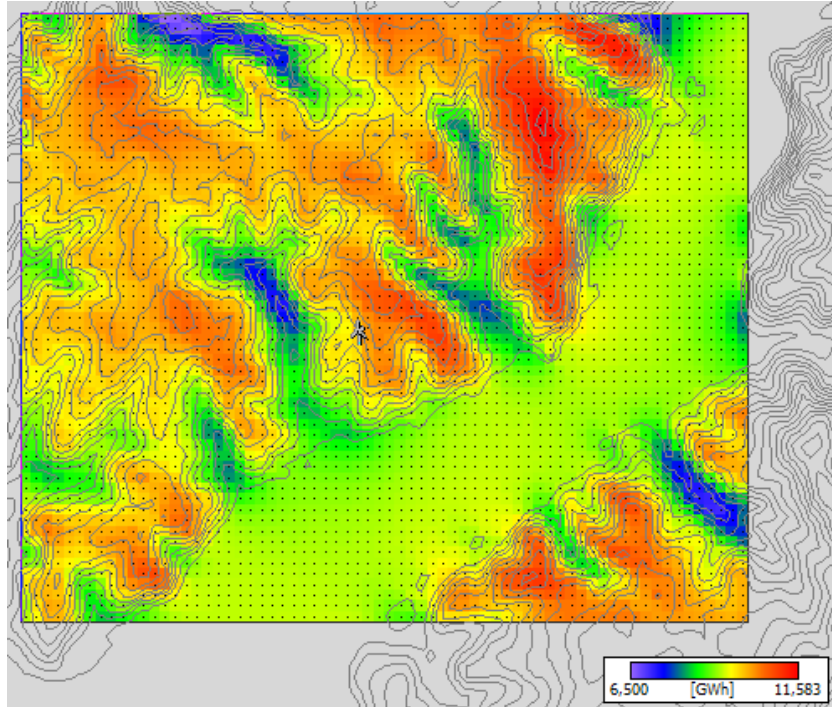
Türbin seçimi yapıldıktan sonra program yıllık enerji üretimini ve enerji yoğunluğunu hesaplar. Şekil 5.21'de ikinci senaryo için hesaplatılan enerji yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Türbinin konumlandırılacağı alan için enerji yoğunluğu 484 W/m^2 'dir.

Şekil 5.22'de ikinci senaryo için yıllık enerji potansiyeli değerleri gösterilmiştir. Şekilde türbinin konumlandırıldığı yer için yıllık enerji potansiyeli yaklaşık 9,9 GWh olarak gösterilmektedir. Yani türbin çevresindeki engeller ve pürüzlülükler olmasaydı daha açık bir ifade ile türbin bir çölün ya da okyanusun ortasında olsaydı yıllık enerji potansiyeli yaklaşık 49,9 GWh olacaktı.

Türbinin konumlandırılacağı yer olan Hümayun Bahçesi için engel ve pürüzlülük değerleri de hesaba katıldığında yıllık enerji üretimi 6,234 GWh değerine düşmektedir. Bu durumda ikinci senaryo için kapasite faktörü (üretilen enerji / maksimum üretilebilecek enerji) $6,234 / (3,6 \times 8760) = 0,0197 \sim \% 20$ 'dir.



Şekil 5.21 İkinci senaryo için enerji yoğunluk analizi



Şekil 5.22 İkinci senaryo için yıllık enerji potansiyeli analizi

6. EKONOMİK ÇALIŞMA

6.1 Rüzgâr Enerjisi Ekonomisi

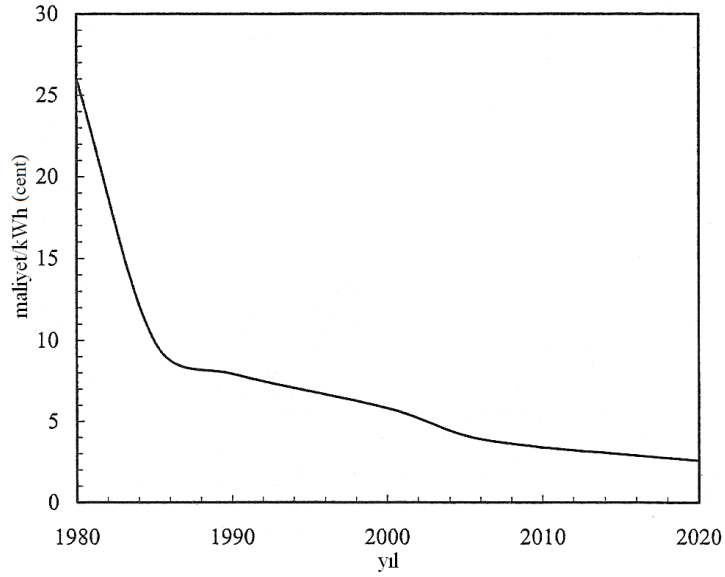
Rüzgâr türbini ile enerji üretiminde optimum sistem seçiminin yanı sıra enerji üretiminin ekonomik yönleri de karar aşamasında önemli rol oynamaktadır. “Sistem ne kadar verimli?”, ‘Ne kadar enerji üretecek?’, ‘Enerji üretiminin maliyeti ne olacak?’ gibi soruların yanıtları enerji kaynağı seçiminde etkili olur. Bunun anlamı, bu projenin kWh maliyetinin optimum değerinde olmasını sağlamaktır.

Rüzgâr enerjisinin yaygınlaşmasını sınırlandıran en önemli faktör, kurulum maliyetinin yüksek olmasıdır. Ancak, bugünün teknolojisi ve kurumsal desteği ile rüzgâr enerjisi, kömür ve doğal gaz gibi geleneksel diğer kaynaklarla ekonomik açıdan rekabet edebilir hale gelmiştir. Ayrıca yapılan araştırmalarda, rüzgâr enerjisi ile elektrik üretim maliyetinin giderek düştüğü görülmektedir (Şekil 6.1). Örneğin, geçen yirmi yıl boyunca, rüzgâr enerjisinin maliyeti yüzde 80’den daha fazla bir oranda azalmış olup, bu eğilimin önümüzdeki yıllarda da sürmesi beklenmektedir (Mathew, 2006).

Rüzgâr enerjisinde ekonomi konusu çok yönlü bir konudur. Bir rüzgâr türbininden üretilen elektriğin birim maliyetini etkileyen birçok faktör vardır. Bu maliyet, ülkeden ülkeye veya bölgeden bölgeye değişiklik gösterebilir. Bir rüzgâr enerjisi santralının ekonomisi çoğunlukla yerel şartlara bağlıdır.

Rüzgâr türbini ile enerji üretiminde yakıt bedavadır fakat ilk yatırım maliyeti yüksektir. Projenin ilk yatırım maliyeti hesaplanırken, rüzgâr türbinin, arazi için yapılacak gerekli ihtiyaçların, transmisyon bağlantılarının ve güç sistemlerinin maliyetleri ayrı ayrı hesaplanmalıdır.

Akıllı bir yatırımın kararını verebilmek için, projenin net finansal dönüşü hesaplanmalıdır. Bunun için, hem üretimi içeren projenin maliyeti, hem de projeden beklenen kâr iyi tahmin edilmelidir. Sabit ve değişken maliyetleri belirleyerek maliyeti hesaplamak oldukça yalın ve kolaydır. Ancak, elektrik üretiminin değeri, yerel enerji sanayine göre birkaç değişik faktöre bağlı olduğu için kâr ı belirlemek biraz daha karmaşık bir işlemdir.



Şekil 6.1 Rüzgâr enerjisi maliyetinin tarihsel seyri (Mathew, 2006)

Ülkemizde de Kyoto Protokolü çerçevesinde, küresel ısınma ve çevre kirliliği göz önüne alındığında, hükümet alım garantisi desteği ile birlikte özel sektörün rüzgâr enerjisi yatırımlarına yönelmesinde yüksek oranda artış gözlemlenmektedir.

Çizelge 6.1’de çeşitli enerji kaynaklarındaki elektrik üretim maliyetleri sunulmaktadır.

Çizelge 6.1 Enerji Üretim Maliyetleri (Gökçınar ve Uyumaz, 2008).

Enerji Kaynağı	Maliyet (c€/kWh)
Kömür	4,8 - 5,5
Gaz	3,9 - 4,4
Su	5,1 - 11,3
Biokütle	5,8 - 11,6
Nükleer	4,2 - 5,3
Rüzgar	4,0 - 6,0

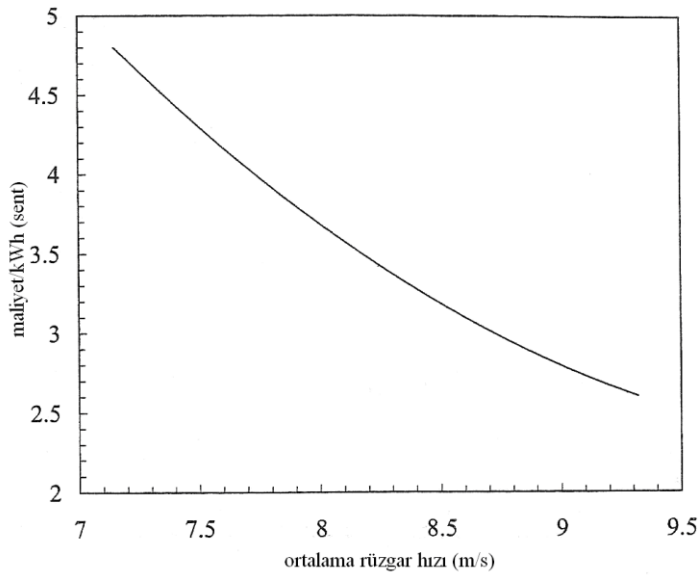
6.1.1 Rüzgâr enerji ekonomisine etki eden faktörler

Şekil 6.1’de 1980 ve 2020 yılları arasında, rüzgâr ile üretilen elektriğin birim maliyeti gösterilmektedir. 2005 ve 2020 yılları arasına ait tahminler yaygın eğilime göre yapılmıştır. 1980’de 26 cent olan kWh maliyetinin, 2005’te neredeyse 5 cente düştüğü görülmektedir. Son 23 yılda % 84’lük bir azalma gözükmektedir. 1980 ve 1985 yılları arasındaki azalış daha da belirgin olup, bu da türbin boyutlarının artmasına dayanmaktadır. Maliyetin 2020 yılında 2,6 sent/kWh’ye kadar ineceği tahmin edilmektedir (Mathew, 2006).

Bir rüzgâr enerjisi projesinde, ekonomik uygulanabilirliği etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar sahaya özgü faktörler, sistem veya makine değişkenleri, piyasa faktörleri ve politik faktörlerdir.

6.1.1.1 Sahaya özgü faktörler

Rüzgâr enerjisi, rüzgâr hızının küpü ile orantılıdır. Yani, bir yerdeki rüzgâr hızının iki katına çıkması, enerjinin 8 kat artması anlamına gelmektedir. Bundan dolayı, proje sahasında mevcut rüzgâr spektrumunun, rüzgâr enerjisi maliyetindeki en önemli faktör olduğu ortaya çıkmaktadır.



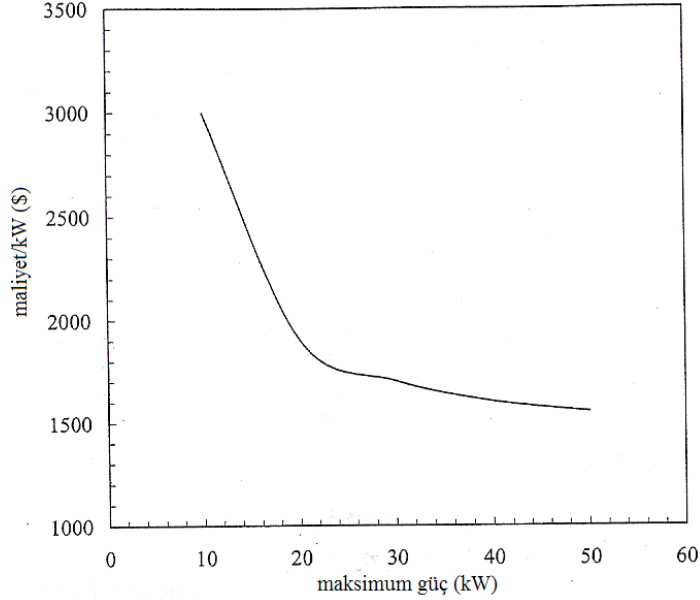
Şekil 6.2 Rüzgâr şiddetinin rüzgâr ile üretilen elektrik maliyetine etkisi (Mathew, 2006)

Ortalama rüzgâr şiddetinin, üretilen birim enerji maliyetine etkisi Şekil 6.2’de gösterilmektedir. Ortalama şiddet 7 m/s’den 9,5 m/s’ye yükseldiğinde, maliyet % 50 oranında düşmektedir (kWh başına 5 centten 2,5 cente). Ayrıca rüzgâr profilinin ve makine ekipmanlarının uyumu da, maliyeti minimum seviyede tutmaktadır.

Kurulum fiyatı, arazi bedeli ve çalışan ücretleri sahadan sahaya değişmektedir. Bu çalışmada rüzgâr türbini, Yıldız Teknik Üniversite’sinin kampüs sınırları içerisine yerleştirileceğinden dolayı, arazi bedeli maliyet hesabına katılmamıştır. Kurulum harcamaları, arazi profiline bağlı olarak da değişkenlik göstermektedir.

Rüzgâr şiddeti, yükseklikle arttığından, yüksek kuleli sistemler genellikle daha fazla güç üretir. Rüzgâr enerji sistemlerinde, kuleler en maliyetli ekipmanlardan birisidir. Minimum

kule yüksekliği, yerel alanın pürüzsüzlüğüne bağlıdır. Yerel iklimsel şartlar da rüzgâr enerji ekonomisini etkilemektedir. Atmosferdeki mevcut aşındırıcı ve zararlı maddeler türbinin ömrünü kısaltmaktadır. Bu nedenle sık sık bakım gerekmektedir. Böylece sistemin işletme ve bakım maliyetinde artış olur.



Şekil 6.3 Orantılı büyüme yoluyla maliyetin azalması (Mathew, 2006)

6.1.1.2 Makine değişkenleri

Sistem boyutlarının artmasıyla orantılı olarak, rüzgâr türbinlerinin maliyeti oldukça azalmaktadır. Bunun anlamı 2 MW'lık bir türbindeki kW başına maliyet, 2 kW'lık bir türbine göre daha düşüktür. Geçtiğimiz 20 yıl içinde, rüzgâr türbinlerinde birim enerji maliyeti, 2500 \$/kW'tan 750 \$/kW'a düşmüştür (Mathew, 2006). Maliyetteki düşüşteki bu başarı, türbin boyutlarındaki orantılı büyüme ile elde edilmiştir. Böylece, rüzgâr enerji teknolojisinde geçtiğimiz yıllardaki küçük boyutlardan MW kapasitesindeki makinelere geçiş, rüzgâr enerjisi kaynaklı elektrik üretimi maliyetinde azalma ile sonuçlanmıştır.

Şekil 6.3'te farklı boyutlardaki küçük bağımsız rüzgâr türbinlerinin birim enerji maliyetleri kıyaslanmıştır. Türbin boyutlarının 20 kW'tan 50 kW'a çıkması ile kW başına maliyette % 18 oranında bir azalma söz konusudur. Bunun sebebi, birçok bileşenin masrafının türbin boyutlarıyla aynı oranda artmamasıdır. Örneğin küçük birimler ve büyük makineler için gerekli olan güvenlik ekipmanları, elektronik devreler, vs. neredeyse aynıdır. Aynı şekilde, türbini geliştirmek için gerekli olan insan gücü de boyutlara göre fazla değişiklik göstermemektedir.

Üretim ölçeği de rüzgâr türbinin birim enerji maliyetini etkileyen faktörlerden birisidir. Üretimdeki ilk birkaç aşama, doğal olarak, araştırma geliştirme konusunda yüksek maliyet gerektirebilir.

Üretim miktarı artarken birim maliyet düşer. Ticari üreticiler, ürettikleri türbinlerde karakteristik tasarımlar yaparak türbin maliyetini düşürebilirler. Değişken hızlı sabit frekanslı makine buna bir örnektir. Bu sistemlerde, aktarma ekipmanlarının maliyeti yükün pürüzsüzce iletilmesiyle azalmaktadır. Aynı zamanda rotorun aerodinamik etkisi, değişken hız opsiyonundan faydalanmaktadır. Bu da şebeke bağlantısını daha basit ve etkili hale getirmektedir.

Rüzgâr enerjisi sistemlerinin ekonomik hesaplamalarında türbin ömrü de önemlidir. Genellikle bir rüzgâr türbininin ömrü 20 ile 30 yıl arasında değişmektedir. Sistem uzun ömürlü olduğu zaman, projenin ilk yatırım masrafları daha çok yıla bölüneceğinden yıllık işletim maliyeti de azalacaktır. Projenin ömrü, 15 yıldan 30 yıla çıktığı zaman, maliyet yaklaşık olarak % 25 civarında düşmektedir. Ancak, hesaplamalarda projenin ömrü gerçekçi alınmalıdır. Bu çalışmada proje ömrünün 25 yıl olduğu düşünülerek hesaplamalar yapılmıştır (Mathew, 2006).

6.1.1.3 Enerji pazarı

Var olan enerji pazarı, rüzgâr enerjisinin yararlarının ne olacağını belirlemektedir. Türbinden üretilen elektrik tamamen sahibi tarafından tüketilirse, türbin kurmanın ekonomik avantajı bölgesel elektrik vergilerine göre belirlenir. Fakat üretilen enerji, talepten fazla olursa, artan enerji şehir şebeke hattına satılabilir. Genelde şebeke hattının bireysel türbin sahiplerinden satın aldığı enerji ücreti, bölgesel perakende satış ücretine oranla çok daha düşüktür. Bunun nedeni, perakende vergisinin ortaklığın kazancı yanında işletim ve yönetim harcamalarını içermesidir.

Şirketlerin enerji talepleri, günün bazı özel saatlerinde en üst seviyede olur. Eğer rüzgâr türbini, bu pik talebi karşılayabilirse şirketler rüzgâr enerjisi için çok yüksek miktarlarda para harcayabilirler. Böylelikle pik talebi karşılamak için kapasitelerini artıracak çok büyük yatırımlara girmek yerine, rüzgâr enerjisi için daha fazla ödeme yapabilirler.

Bağımsız rüzgâr türbinleri tarafından fazla üretilen elektriğin kullanımı için yapılan birçok özel düzenleme vardır. Örneğin, net faturalama sistemi altındaki türbin sahibi talep fazla olduğunda şebekeyi besleyebilir. Eğer üretim tüketimi aşarsa, kullanım şirketi anlaşılmış fiyat

üzerinden için ödeme yapar. Bu nedenle elektrik giriş çıkışı ölçülür.

6.1.1.4 Teşvik ve muafiyet

Bölgesel olarak mevcut olan yenilenebilir enerji kaynaklarını desteklemek için birçok hükümet çeşitli muafiyet ve teşvik destekleri sağlayabilir. Bu destekler doğrudan veya dolaylı yollardan olabilir. Bu gibi destekler, rüzgâr enerjisi seçeneğini daha çekici kılmaktadır. Kömür ve doğal gaz gibi klasik enerji kaynaklarının, çeşitli masrafları mevcuttur. Örnek olarak, ABD’de hükümet, son otuz yılda kömür madencilerinin akciğer hastalıkları için 35 milyar dolardan fazla harcama yapmıştır. Bu aslında; kömür için yapılan gizli bir finansal destektir.

Fosil yakıt kaynaklı enerji santrallerinde, atmosfere çeşitli kirleticiler salınmaktadır. Atmosferdeki bu zararlı kimyasallar ile mücadele de enerji maliyetine eklenmelidir. Bu gizli finansal maliyetler eklendiğinde, birçok klasik enerji kaynağının maliyeti, bugün belirtilen maliyetlerden çok daha yüksek olmaktadır. Örnek olarak kömür ile üretilen elektrik enerjisi çevresel maliyetlerin eklenmesi ile % 50-100 oranında artmaktadır.

Birçok ülkede enerji ile ilgili kanunlar hala klasik enerji yöntemlerinin lehindedir. Dünyanın birçok yerinde rüzgâr enerjisi projelerine değişik teşvikler verilmektedir. Bu teşvikler, yatırım, üretim ve sigorta teşvikleri olarak sınıflandırılabilir.

Yatırım teşviklerine bazı ülkelerdeki hızlandırılmış amortismanlar örnek olarak gösterilebilir. Genelde yatırımcılar pahalı ekipmanların ve sistemlerin yıllık amortisman ücretlerini düşürebilmektedirler. Bu amortismanlar, ekipmanların piyasa değerine göre sabit oranda hesaplanmaktadır.

Rüzgâr enerjisi projelerinde, yüksek amortisman oranları teşvik olarak kabul edilebilir. Bu durum, gelir vergisinde düşüş olmasından dolayı yatırımcılara kolaylık sağlar. ABD, Kanada ve Hindistan gibi ülkelerde, rüzgâr enerjisi yatırımcıları enerji maliyetlerindeki vergi yüklerinde azaltma yapabilmektedirler. Bazı durumlarda, rüzgâr enerjisi projelerinde nakit para da kabul edilebilir. Danimarka ve Almanya gibi ülkeler buna örnek olarak gösterilebilir. ABD’de verilen üretim teşviklerinden en yaygın olanı, hükümet tarafından verilen üretim vergisi kredisidir. Bir rüzgâr enerjisi projesinde, ilk on senede üretilip kamuya ya da diğer elektrik firmalarına toptan olarak satılan elektrik, üretim vergi kredisi yerine geçebilmektedir.

Bazı ülkelerde, rüzgâr türbinleri ve ekipmanları gümrük vergisine tâbi tutulmamaktadır. Bazı durumlarda, rüzgâr çiftliklerinin bulunduğu araziler tamamen ya da kısmen emlak vergisinden

muafırlar. Rüzgâr enerjisinde projelere destek sağlamak için başka yollar da bulunmaktadır. Iowa Enerji Merkezi (IEC) tarafından yürütülen “Alternate Energy Revolving Loan” programı buna örnek olarak verilebilir. Burada, proje maliyetinin yarısı 20 seneye kadar geri ödeme koşulu ile IEC tarafından karşılanmaktadır. Geri kalan miktar ise çeşitli mali kuruluşlar tarafından karşılanmaktadır.

Bazı gelişmiş ülkelerde rüzgâr enerjisi gibi çevreyi kirletmeyen enerji kaynaklarını cazip kılan çeşitli çevresel yönetmelikler düzenlenmiştir. Örnek olarak, çevreye CO₂ ve SO_x gibi kirletici emisyon salan endüstrilerden vergi alınarak, yenilenebilir enerji teknolojilerine ilgi artırılır. Tüm bu örneklerden anlaşıldığı üzere, rüzgâr enerjisine verilen teşvik miktarları ve tipleri bölgeden bölgeye değişmektedir.

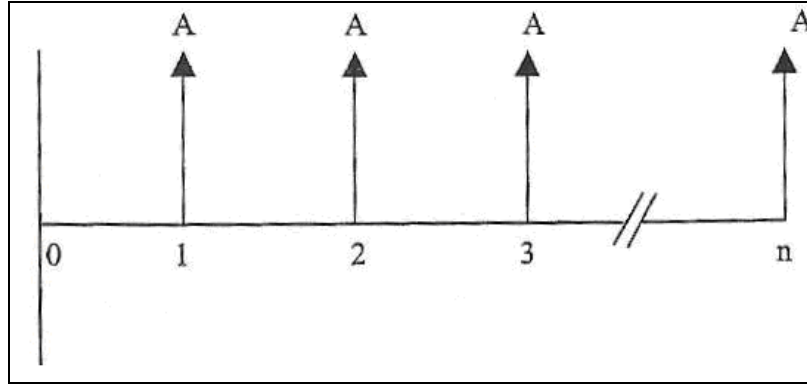
Enerji üretiminde, çevresel etki maliyetleri, enerji satış fiyatlarına yansıtıldığı takdirde, rüzgâr enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji sistemlerinin desteğe ihtiyacı kalmayacağı Avrupa Birliği Enerji Komisyonu raporunda yer almaktadır (Gökçınar ve Uyumaz, 2008). Komisyonun raporuna göre çevresel etki maliyetleri ve sağlık giderleri gibi dolaylı maliyetler enerji fiyatlarına yansıtıldığında, kömür ve petrol kaynaklı enerji üretim maliyetleri iki katına çıkacak, gaz kaynaklı enerji üretim maliyetleri % 30 oranında artacaktır.

Elektrik piyasası lisans yönetmeliği ile ülkemizde uygulanan teşvikler aşağıda belirtilmektedir. (Gökçınar ve Uyumaz, 2008):

- Uygulanacak fiyat, her yıl için EPDK'nın belirlediği, bir yıl önceki Türkiye ortalama toptan satış fiyatıdır. Bu fiyat, 5 c€/kWh karşılığı TL'den az, 5,5 c€/kWh karşılığı TL'den fazla olamaz.
- Sabit fiyat tarifesi 31.12.2011 tarihine kadar işletmeye giren tesislerin, ilk 10 yılı geçerlidir.
- Geliştirilecek projelerde devlete ait araziler, yasaklı bölgeler haricinde, rüzgâr enerjisi yatırımcılarına tahsis edilecektir.
- 2011 yılı sonuna kadar devreye alınacak bu tesislerden, ulaşım yollarından ve şebekeye bağlantı noktasına kadarki enerji nakil hatlarından, yatırım ve işletme dönemlerinin ilk 10 yılında kira ve kullanma izin bedellerinde % 85 indirim uygulanacaktır.

6.1.2 Şimdiki değer yaklaşımı

Şimdiki değer yaklaşımı, mühendislik proje ve yatırımlarının ekonomik mukayesesinde çok kullanılan bir metottur. Bu metotla, gelecek zaman içindeki tüm para akışları şimdiki değere getirilir ve alternatif yatırımların şimdiki değerleri ile mukayese edilerek en ekonomik olan seçilir.



Şekil 6.4 Para akış diyagramı.

Rüzgâr enerjisi projeleri, ömürleri 20 ile 30 yıl arasında değişen yatırımlardır. Bütün bu yıllar boyunca nakit giriş ve çıkışları mevcuttur. Bu nedenle projenin ekonomik analizinde, projenin bütün ömrü süresince maliyet ve yararları düşünülmelidir.

C yatırımının gelecekteki değeri Denklem (6.1)'de gösterilmiştir.

$$A_1 = C(1+i), A_2 = C(1+i)^2, A_3 = C(1+i)^3, A_n = C(1+i)^n \quad (6.1)$$

Burada $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü... n 'inci yıllardaki değerleri ifade etmektedir. i faiz oranı, ya da genel ifadeyle iskonto oranıdır. Başka bir ifade ile A değerinin n yıl sonrasının şimdiki değer ile ifadesi;

$$PV(A) = \frac{A_n}{(1+i)^n} \quad (6.2)$$

Şekil 6.4'teki gibi n sene için yıllık para akış diyagramı düşünüldüğünde, bütün ödemelerin toplamının şimdiki değeri en yalın hali ile Denklem (6.3)'te gösterilmiştir.

$$PV(A)_{1-n} = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (6.3)$$

Şimdiki değer metodu ile hesaplama yapılırken, faiz oranının dışındaki bir diğer önemli etken de enflasyon oranıdır (r). Enflasyon, fiyatların genel düzeyinin sürekli ve hissedilir artışını ifade eden bir durumdur. Enflasyon etkisi ayrı bir şekilde veya faiz oranıyla birleştirilerek *düzeltilmiş faiz oranı* ismiyle hesaplamalara iki türlü dâhil edilebilir.

Enflasyonla düzeltilmiş iskonto oranı, faizin (iskonto oranının) reel değeridir. Hesaplamalarda da faizin gerçek değeri kullanılmalıdır. Reel iskonto oranı (I) Denklem (6.4)'teki gibi

hesaplanır.

$$1 + I = \left(\frac{1+i}{1+r} \right) \quad (6.4)$$

Bazı ticari değerler, enflasyon oranından daha yüksek bir oranda artış gösterebilir. Enflasyonun üzerindeki artış, uluslararası pazar baskısı, yakıtlarda yaşanan kıtlık ya da politik sebeplerden dolayı olabilir. Örneğin Körfez Savaşı yıllarında petrol fiyatlarının hızla yükselmesi, elektrik fiyatlarına da yansımıştı. Ticari değerlerin enflasyona oranla fiyat artışı *eskalasyon* (e) olarak açıklanır.

Eskalasyon oranı (e), enflasyon oranı (r) ile birleştiğinde *görünür eskalasyon oranı* (e_a) elde edilir.

$$e_a = \{(1+e)(1+r)\} - 1 \quad (6.5)$$

Böylece enflasyon ve eskalasyon oranlarıyla birlikte reel iskonto oranı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$I = \frac{(1+i)}{(1+e_a)} - 1 \quad (6.6)$$

6.1.3 Rüzgâr enerjisi maliyeti

Rüzgâr enerjisi maliyeti için yaygın olarak kullanılan üç farklı yol vardır. Bunlar; türbinin tasarım gücüne göre maliyet, birim rotor boyutuna göre birim maliyet, üretilen kWh başına maliyettir.

Maliyeti açıklamanın en kolay yolu türbinin kapasitesine göreler. C_T türbin maliyeti, P_R türbinin tasarım gücü olmak üzere, kW başına düşen maliyet C_{PR} (\$/kW), Denklem (6.7) ile hesaplanabilir.

$$C_{PR} = \frac{C_T}{P_R} \quad (6.7)$$

Bu şekilde belirlenen maliyet, piyasadaki sistemlerde kıyaslama yapmak için oldukça kullanışlı bir metot olmasına rağmen çoğu zaman yanlış yönlendirmelere sebep olabilir. Örneğin türbin maliyetleri (C_T) çoğu zaman farklı farklıdır. Bazı üreticiler, türbinin bütün parçalarını ve ekipmanlarını fiyata dâhil ederken, bazıları ise dâhil etmez.

Bir başka problem de türbinin tasarım gücünün, anma hızının bir fonksiyonu olmasıdır. Örneğin, aynı rotor alanına fakat farklı anma hızlarına sahip 12 m/s ve 15 m/s'lik iki farklı sistemi ele alalım. Hızlarının oranı 15/12 olmasına rağmen güçlerinin oranı daha farklıdır. İkinci sistemin güç ilkinin yaklaşık iki katıdır. İkinci sistem daha büyük bir jeneratöre sahiptir. Jeneratör ve benzer parçalar sistem maliyetinde küçük bir farklılık oluşturur. Her iki sistem için de C_T 'de büyük bir farklılık olmayacaktır. Burada kW başına düşen maliyet açısından ikinci sistem biraz daha ucuz gibi gözükabilir. Ancak rüzgâr rejimi açısından düşük güce sahip olan birinci sistem, rüzgâr spektrumu ile etkileşerek daha fazla güç üretebilir. Böylece birinci sistem daha ekonomik hale gelebilir.

Sistemin maliyetini açıklamanın daha iyi bir yolu da sistemi rotor boyutları açısından incelemektir. Birim alan başına düşen maliyet C_a ($\$/m^2$) Denklem (6.8) ile hesaplanabilir.

$$C_a = \frac{C_T}{A} \quad (6.8)$$

Burada A rotor alanını ifade etmektedir. Denklem (6.8)'de yalnızca rotor boyutlarının maliyetteki etkisi dikkate alınmaktadır. C_a , değişik tip, boyut ve rüzgâr hızına sahip türbinlerin karşılaştırılması için kullanılır. Rotor alanları aynı olan iki türbin, yukarıdaki durumda olduğu gibi, farklı rüzgâr hızlarına maruz kalabilir. Kuvvetli rüzgâr rejimine sahip olan sistemin, diğerine göre ekonomik avantajı olacaktır.

Sistemden üretilen elektriğin kWh maliyeti bizi en çok ilgilendiren durumdur. Bundan dolayı birim kWh başına maliyet daha iyi bir ekonomik göstergedir. Rüzgâr kaynaklı elektrik üretiminde maliyetin belirlenmesinde rüzgâr rejiminin karakteristiği kritik faktördür. C_F kapasite faktörü olmak üzere, yıllık işletme maliyeti (C_A) ve 1 yılda üretilen kWh (E_I) ile rüzgâr kaynaklı elektriğin birim fiyatı (C_E) Denklem (6.9) ile belirlenir.

$$C_E = \frac{C_A}{E_I} = \frac{C_A}{8760 C_F P_R} \quad (6.9)$$

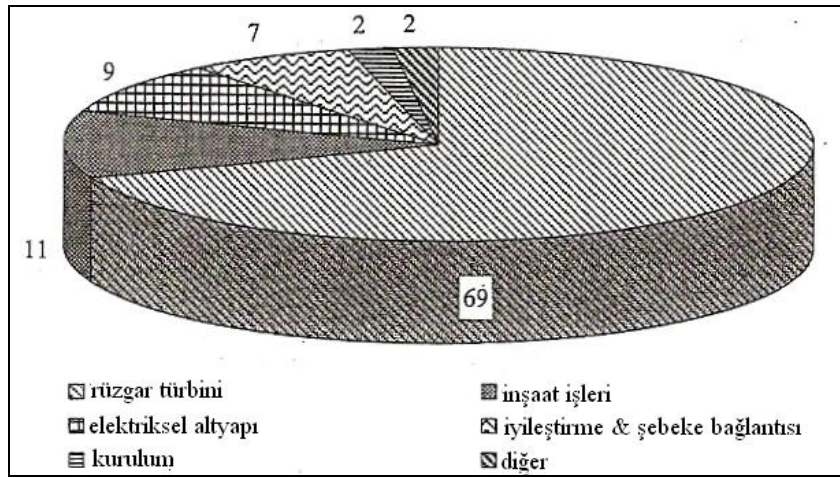
Projenin yıllık işletme maliyetinin, sabit maliyet ve değişken maliyet olmak üzere iki tamamlayıcı parçası vardır. Sabit maliyet, mevcut projenin etkisiyle belirlenir. Yani projenin işlevselliğine ve ne kadar güç üreteceğine bakılmaksızın belirlenir. Diğer yandan değişken maliyet, projede üretilen miktar ile orantılıdır. Toplam yıllık işletme maliyeti (C_A), sabit (F_C) ve değişken (V_C) maliyetlerin toplamıdır.

$$C_A = F_C + V_C \quad (6.10)$$

Rüzgâr enerjisi projelerinde, yıllık maliyetin sabit bileşeni ilk yatırıma dâhilken, değişken maliyet işletme ve bakım giderlerini içerir.

6.1.3.1 İlk yatırım

Projenin anaparası belirlenirken, rüzgâr türbininin maliyeti dışında diğer gerekli elemanların maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Bu maliyetler; arazinin, gerekirse ekstra kulenin, denetimin, güç ünitesinin, inşaat işlerinin, şebeke entegrasyonu için elektriksel altyapı tesislerinin ve de kurulum masraflarının toplamını kapsar.



Şekil 6.5 Rüzgâr enerji projeleri için ana para yatırımı. (Mathew, 2006)

5 MW kapasiteli bir rüzgâr projesinin sermaye maliyeti dağılımı Şekil 6.5'teki gibidir. Yatırımın önemli bölümünü % 69'luk oranıyla rüzgâr türbini oluşturmaktadır. İlk yatırımda; inşaat işleri, elektriksel alt yapı tesisleri, şebeke entegrasyonu sırasıyla yüzde 11, 9 ve 4'lük oranlara sahiptirler. Kurulum ve diğer çeşitli harcamalar yüzde 4'lük orana sahiptirler.

Türbin, elektriksel altyapı, kurulum, inşaat, şebeke bağlantısı masraf kalemlerini içeren ilk yatırım maliyetinin birim fiyatı 900 €/kW ve 1150 €/kW arasında değişmektedir [5].

6.1.3.2 İşletme ve bakım maliyeti

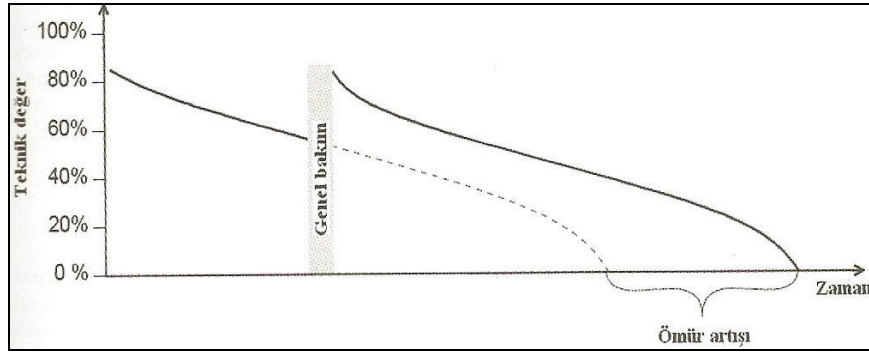
Rüzgâr enerji santrali yatırımı yapmak aslında geri dönüşü uzun yılları kapsayan bir yatırımdır. 25 yıllık ömür boyunca ilk 5 - 8 yıl herhangi bir yüksek kâr marjı getirmemektedir. Bu yüzden rüzgâr türbinlerinin arıza olmadan kesintisiz bir işletme yönetimi ile verimli bir şekilde çalıştırılması gerekmektedir.

Geleneksel güç santrallerinde işletme ve bakım maliyetinin önemli bir bölümünü yakıt ve yağlama harcamaları oluşturmaktadır. Rüzgâr enerjisi için yakıt yani rüzgâr bedavadır. Ancak problemsiz bir işletme için türbine periyodik bakım yapılmalıdır. Bu makinelerde, dişli kutusu ve aktarma elemanları gibi devamlı çalışmadan dolayı aşınmaya meyilli bazı bileşenler bulunur. Aşırı aerodinamik yükler, rotor kanatlarında yorulmaya sebep olabilir. Sistemin bakımının sıklığı çalışma saatleri ile orantılı olmalıdır.

Sistemin bakımını gerektiren bir diğer önemli faktör de iklim koşullarıdır. Rüzgâr, türbülanslı bir yapıya sahipse, türbin bakımı daha fazla ilgi gerektirecektir. Atmosferde aşındırıcı maddelerin varlığı da bazı elemanların ömürlerini azaltmaktadır.

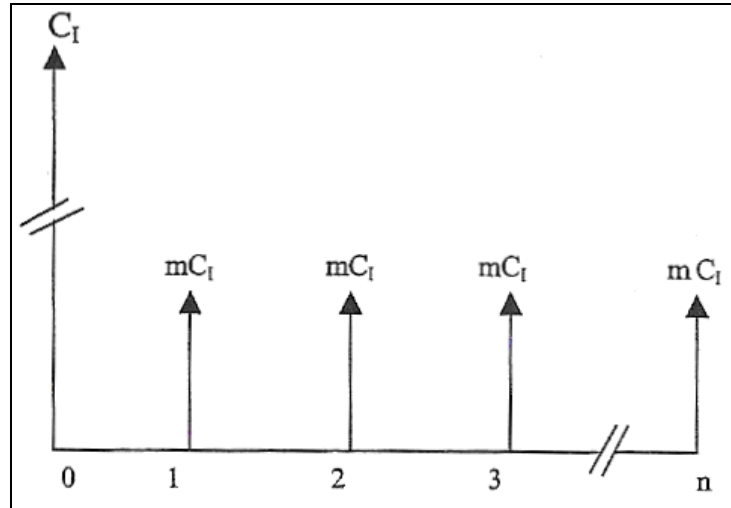
Bakım ve onarım faaliyetlerinin başarılı sürdürülebilmesi için uygun personelin ve donanımın sağlanması, etkili bir bakım stratejisinin ve düzgün güvenlik prosedürlerinin uygulanması gerekmektedir. Bir rüzgâr santralının işletilmesi süreci genel hatlarıyla, türbinlerin performanslarının takip edilmesi, türbinlerin çalışmalarının izlenmesi, önleyici ve planlı bakımlar veya arıza durumlarında bakım ekibinin sahaya ulaşmasının sağlanması gibi faaliyetleri içerir. İşletmeci, sahada kendi teknik personeli ve satıcının verdiği destek ve garantilerle de bakım ve onarımı gerçekleştirebilir. Tam zamanlı olarak sahada bulunacak personelin sayısı, türbinlerin sayısı ve idari yapıya göre belirlenmelidir. İşletme ve bakımdan sorumlu personel, iş planlaması, koruyucu bakımların düzenlenmesi, geçmiş bakım ve onarım bilgilerinin depolanması ve analizi, yedek parça yönetimi, satın alma planlaması, ölçüm değerlerinin değerlendirilmesi doğrultusundaki çalışmaları yapar. Söz konusu personele imalatçı tarafından birkaç haftalık teorik ve pratik eğitimler verilir. Eğitim alacak personelin iyi seçilmesi gerekmektedir. Verilen eğitim, mekanik ve elektriksel teknik uzmanlık, bilgisayar bilgisi, stok yönetimi, iş ve teçhizat planlama, performans kayıt bilgilerinin saklanması, istatistiksel analiz ile veri inceleme süreci gibi kapsamlı konuları içerir. Bakım; periyodik bakım, önleyici bakım ve arıza bakımı olmak üzere üç sınıfa ayrılır (Durak ve Özer 2008).

DEWI (German Wind Energy Institute) tarafından yapılan 2002 yılındaki bir çalışma sonuçlarına göre, rüzgâr türbinleri 8 - 10 yaşına geldiğinde genel bir bakıma ihtiyaç duymaktadır. Şekil 6.6'da görüldüğü gibi, genel bakım yapıldığında rüzgâr türbinlerinin ömürleri uzamaktadır.



Şekil 6.6 Genel bakımın türbin ömrüne etkisi. (Durak ve Özer, 2008)

Sigorta ve vergi harcamaları da yıllık diğer harcama kalemlerini oluşturmaktadır. Projede beklenmedik kazalara ve felakatlere karşı sigortalanması gereken birçok masraflı ve hassas eleman vardır. Sigorta acentelerinin müşterilerin ihtiyaçlarına uygun birçok farklı programı vardır. Projede doğru programın hangisi olduğunu bulmak için, yerel araştırma yapmak da önemlidir. Birçok ülkede rüzgâr enerji projeleri vergiden kısmen ya da tamamen muaf tutulmaktadır. Muafiyetin derecesi, yerel vergi yasalarınca belirlenir. Eğer proje için gerekli arazi kiralanırsa, bu bedel de işletme ve bakım masraflarının içinde değerlendirilebilir. Proje çalışanlarının maaşları da bu kalem altında incelenen diğer harcamalardır. Bütün bu faktörler, sistemin işletme ve bakım masraflarını oluşturur. Yıllık bakım ve onarım masrafları sistem maliyetinin yüzde 1,5 ile 2'si arasındadır (Mathew, 2006).



Şekil 6.7 Rüzgâr enerji projesinin maliyeti.

6.1.3.3 Yıllık maliyetin şimdiki değeri

Bir rüzgâr enerji projesinin n yıllık ömrü boyunca yıllık maliyeti Şekil 6.7'de gösterilmiştir.

C_I projenin ilk yatırımı, C_{OM} 'de işletme ve bakım masrafları olsun. C_{OM} , C_I 'nın yüzde m 'si kadardır.

$$C_{OM} = mC_I \quad (6.11)$$

n yıllık işletme ve bakım maliyetinin kümülatif değeri,

$$CPV(C_{OM})_{1-n} = mC_I \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \quad (6.12)$$

ile bütün maliyetin ilk yatırımı (C_I) ve işletme bakımını (C_{OM}) içeren toplam net şimdiki değeri,

$$CPV(C_A)_{1-n} = C_I \left\{ 1 + m \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \right\} \quad (6.13)$$

formülleri ile hesaplanabilir.

Projenin kümülatif maliyeti bulunduktan sonra, projenin yıllık maliyetini ($CPV(C_A)$) bulmak için Denklem (6.14)'ten A_1 çekilir ve Denklem (6.15)'te yerine konulur.

$$CPV(C_A)_{1-n} = A_1 \frac{[1 - (1+e_a)^n (1+I)^{-n}]}{(I - e_a)} \quad (6.14)$$

Denklem (6.14)'ün sağında A_1 'in dışında kalan büyüklüğe, *geometrik seri şimdiki değer faktörü* adı verilir. Denklem (6.14)'ten A_1 çekilerek Denklem (6.15) ile $CPV(C_A)$ değeri bulunur (Aybers ve Şahin, 1995).

$$CPV(C_A) = A_1 (1+e_a)^{-1} \quad (6.15)$$

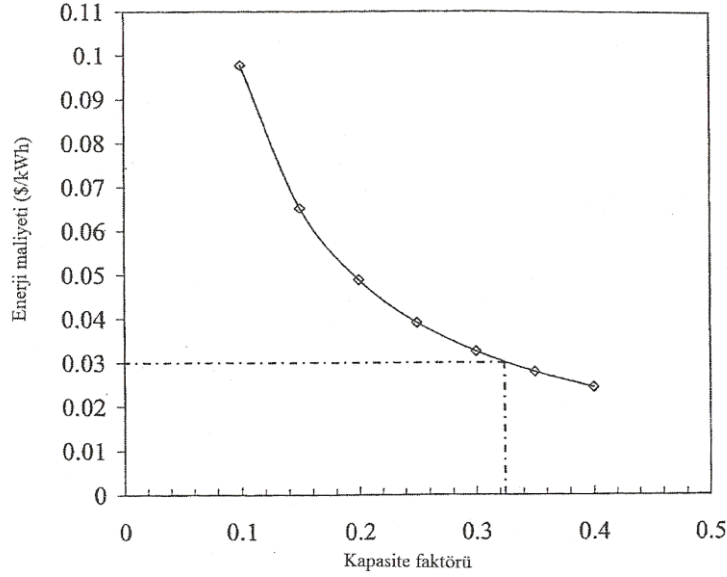
Eğer P_R türbinin tasarım gücü ve C_F de kapasite faktörü ise türbinden bir yılda üretilen enerji, Denklem (6.16)'daki şekilde hesaplanır.

$$E_I = 8760 P_R C_F \quad (6.16)$$

Böylece rüzgârdan üretilen elektriğin kWh maliyeti aşağıdaki gibi bulunur.

Şekil 6.8'de kapasite faktörünün enerji maliyetine etkisi görülmektedir.

$$c = \frac{CPV(C_A)}{E_I} \quad (6.17)$$



Şekil 6.8 Kapasite faktörünün enerji maliyetine etkisi (Mathew, 2006)

6.1.3.4 Harici masraflar

Harici masraflar üretim veya tesisle doğrudan ilgisi olmayan, çevreye, enerji sektörüne veya diğer sektörlerde verilen zararların maliyeti olarak tanımlanmaktadır. Küresel iklim değişikliği ve çevre kirliliğinin tehlikeli boyutlara ulaşmasıyla, rüzgâr enerjisi yatırımları neticesinde sera etkisi doğuran gaz salınım miktarları düşürülmüştür. Çizelge 6.2'de kömür, gaz ve rüzgâr enerjisi için iç ve harici ortalama maliyetler karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi, rüzgâr enerjisi harici maliyetler göz önüne alındığında en avantajlı enerji kaynağı olmaktadır.

Çizelge 6.2 İç ve harici maliyetler (Gökçınar ve Uyumaz, 2008).

	İç Maliyet (c€/kWh)	Harici Maliyet (c€/kWh)
Kömür	4,8	5,0
Gaz	4,0	2,5
Rüzgar	4,2	0,1

Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretilirken çevre kirliliğine yol açan kirleticilere rastlanmaz. Fakat harici masraflar olarak rüzgâr türbininin ve kulesinin yapımı sırasında oluşan emisyonlardan söz edebiliriz. Gürültü kirliliği etkisi bu etkilere nazaran çok daha azdır. Görüntü kirliliğini hesaplamak ise çok daha zordur. Her iki etki de türbin konumlandırılırken planlama yapılarak en aza indirilmeye çalışılır. Rüzgâr enerjisinin kuşlar ve hayvanlar üzerindeki etkileri ise

rakamlara döküldüğünde önemsiz kalmaktadır. Türbin üretimi ve dikimi sırasındaki kazaları da göz önünde bulundurmalıyız. Çizelge 6.3'te Almanya için rüzgâr enerjisi ile üretilen elektriğin harici masraf değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 Almanya için rüzgâr enerjisi ile üretilen elektriğin harici masraf değerleri. (Ruiz, 2003)

Masraf kalemleri	c€/kWh
Gürültü	0,005
Sağlık	0,072
Materyal	0,002
Ekin	0,0007
Ekosistem	0,04
Global ısınma	0,04
Toplam	0,16

Kişi başına düşen milli gelir büyüklüklerine bakarak bu değerın Türkiye için kaç olabileceğini tahmin edebiliriz. Almanya'nın 2009 yılı kişi başına düşen milli geliri 39442 \$ iken Türkiye'ninki 8456 \$'dır [4]. Bu durumda Türkiye'nin kişi başına düşen milli geliriyle Almanya'nın kişi başına düşen milli gelirini oranlarsak Türkiye için harici masraf değeri 0,034 c€/kWh olarak değerlendirilebilir.

6.1.3.5 Harici gelirler

Kyoto Protokolü zehirli gazları, bunları üretenleri bir bedel ödemeye zorlayarak, azaltmayı amaçlamaktadır. Protokolü imzalayan ülkeler, zehirli gazları kademeli olarak belli değerlerin altına indirmek zorundadır. İşte bu protokol 2005'te karbon ticaretini de başlatmıştır. Ülkeler ve şirketler, karbon salım haklarının altında kaldıklarında, bu miktarı izinleri aşmış başka bir ülke ya da şirkete satmaktadırlar.

Zorunlu pazar, Kyoto Protokolü'ne üye ülkeler arasında yapılan ticareti içermektedir. Londra ve Chicago borsalarında, 1 ton karbondioksiti atmosfere bırakmanın karşılığında ödenmesi gereken karbon fiyatı arz talebe göre değişmektedir. Zorunlu pazarda, bir ton karbonun fiyatı, 19-25 € arasındadır. Çin, Hindistan, Brezilya, Meksika, Güney Kore, Rusya, Ukrayna, Kanada, Avrupa Birliği, Japonya, Avustralya ve Yeni Zelanda gibi ülkeler sertifikalı karbon kredisi net satışı yapmaktadır.

Gönüllü pazarda ise şirket, birey ya da organizasyonlar, saldıkları karbonun karşılığı olan parayı diğer ülkelerdeki çevreci projeleri finanse etmektedirler. Gönüllü pazar, Kyoto Protokolü mekanizmalarından bağımsız ve sosyal sorumluluk çerçevesinde çalışmaktadır. Bu piyasada zorunlu bir belirleyici kural yoktur. Gönüllü piyasadan, teorik olarak, bireyler bile alım yapabilmektedir. 2009 başında Kyoto Protokolü'nü imzalayan Türkiye de gönüllü karbon pazarında yer almaktadır. Ankete dayalı 2008 verilerine göre, dünyada gönüllü karbon ticareti hacmi yüzde 87 artarak 124 milyon ton karbondioksit ve eşdeğerine ulaşmıştır. Mali değer olarak 700 milyon dolara çıkan pazarda, gönüllü karbon kredisinin ortalama fiyatı, 2008 yılında ton başına ortalama 7,34 dolarlık CO₂ (5,24 €/tCO₂) ve eşdeğeri olmuştur⁵ [3].

Türkiye için sera gazı emisyon faktörü $6,65 \times 10^{-4}$ tCO₂/kWh'tir (Hatipoğlu, 2010). Yani Türkiye'deki enerji üretimi perspektifi dikkate alındığında, kömür, doğalgaz, hidro, rüzgâr, vb. üretilen her kWh için atmosfere $6,65 \times 10^{-4}$ tCO₂ salımı yapılmaktadır. Rüzgâr türbini ile enerji üretildiğinde atmosfere kWh başına $6,65 \times 10^{-4}$ tCO₂ gazının salımı engellenmiş olur.

Bu verilere göre Türkiye için gönüllü pazarda kWh başına CO₂ fiyatı $c_c = 6,65 \times 10^{-4}$ tCO₂/kWh x 5,24 €/tCO₂ = $3,48 \times 10^{-3}$ €/kWh olmaktadır.

6.1.4 Rüzgâr enerjisinden elde edilen fayda

Bir rüzgâr türbininden elde edilen elektriğin gerçek değeri nedir? Basit gibi görünmesine rağmen aslında bu değer belirlenmesi oldukça zordur. Üretilen elektriğin değeri farklı perspektiflerden bakılarak belirlenebilir.

Eğer kazanç devletin bakış açısına göre değerlendirilirse, üretilen enerjinin yanında temiz ve çevre dostu olan bu teknolojinin getirisi de sayısallaştırılmalı ve elektriğin fiyatına eklenmelidir. Diğer teknolojilerdeki gizli toplumsal maliyetler de rüzgâr enerjisinin kazancına eklenmelidir.

Eğer bir şirketin kazancı olarak konu değerlendirilirse, üretilen enerjiyi şebekeye satan özel bir yatırımcı için satış fiyatları yatırımcının kazancını belirler. Türbin sahibi kendi enerji ihtiyacına göre rüzgârdan ürettiği enerjinin tümünü ya da bir kısmını tüketebilir. Ürettiği enerjiden fazlasına ihtiyacı olduğunda, şebekeden perakende fiyattan elektrik almak zorunda kalacaktır. Bu durumda rüzgâr enerjisinden elde edilecek fayda bölgeden bölgeye farklılık gösterecektir.

⁵ \$ - € dönüşümü 28.01.2010 tarihli TCMB kurları €/ \$ çapraz kur değeri kullanılarak yapılmıştır.

Rüzgâr enerjisinin kazancı, aynı zamanda rüzgâr türbini ile karşılaştırılabilecek diğer teknolojilerin maliyetleri ile kıyaslanarak da değerlendirilebilir.

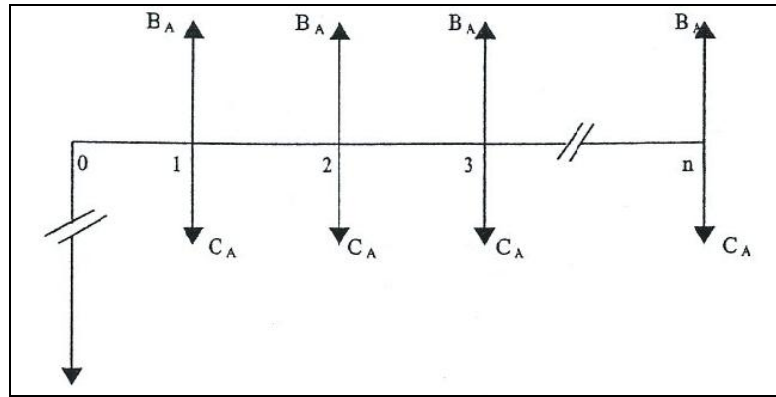
Buradaki hesaplamalarda perakende elektrik fiyatının değeri, rüzgârdan üretilen elektriğin fiyatı olarak düşünülmüştür. Eğer projenin yıllık elektrik satışından elde ettiği gelir B_A ise projenin ömrü boyunca kümülatif şimdiki değere getirilmiş fayda aşağıdaki gibi bulunur.

$$CPV(B_A)_{1-n} = B_A \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \quad (5.18)$$

6.1.5 Ekonomik değer kriterleri

Bir rüzgâr enerji projesinde nakit akış diyagramı Şekil 6.9'da gösterilmiştir. İlk yatırım maliyetinin dışında, projenin ömrü boyunca, projeden kaynaklanan faydalar ve maliyetler söz konusudur. Projeye geniş bir perspektiften bakıldığı zaman bilinmesi gereken başlıklar şunlar olacaktır.

1. Projenin şimdiki değere getirilmiş maliyeti nedir? (NPV)
2. Projenin fayda masraf oranı nedir? (BCR)
3. Projeye yapılan yatırım kaç senede geri alınabilir? (PBP)
4. Projenin gerçek getirisi nedir? (IRR)



Şekil 6.9 Bir rüzgâr enerji projesinde nakit akış diyagramı.

6.1.5.1 Net şimdiki değer (NPV)

Şimdiki değer yöntemiyle bulunan bütün değerlerin toplamının alınmasıyla elde edilir. Pozitif değer çıkması, kazancımızın, yatırımımızdan yüksek olacağını (kâr), negatif değer çıkması

yatırım giderlerinin, gelirden fazla olacağını göstergesidir (zarar). Sıfıra eşit olması ise projenin başa baş noktasında olduğunu göstergesidir.

Elektrik satışından elde edilecek faydadan ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım masraflarının kümülatif değeri çıkarılarak net şimdiki değer bulunur.

$$NPV = CPV(B_A)_{1-n} - \{C_I + CPV(C_{OM})_{1-n}\} \quad (6.19)$$

$CPV(B_A)_{1-n}$, $CPV(C_{OM})_{1-n}$ değerleri yerlerine konulduğunda Denklem (6.20) elde edilir.

$$NPV = B_A \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] - \left\{ C_I \left[1 + m \left(\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right] \right\} \quad (6.20)$$

6.1.5.2 Fayda masraf oranı (BCR)

İlk yatırım maliyetleri farklı düzeyde olan iki projenin karşılaştırılması durumunda yalnızca NPV değeri ile bir karara varmak yanıltıcı olabilir. Bu sebeple ekonomik analiz yaparken BCR , NPV 'den daha iyi bir araç olacaktır.

Projeden elde edilecek faydaların, projeye yapılacak yatırım değerine bölünmesiyle bulunur. BCR ; 1'den büyükse projenin getirisinin, yatırımından yüksek olduğu anlaşılır. " BCR değeri 2,5 olarak bulundu" demek, projeye yatırılan 1 lira, 2,5 lira olarak dönecek demektir. BCR ; 1'den küçükse projenin yatırım harcamaları, getirisinden fazla olacak demektir. BCR ; 1'se proje başa baş noktasında demektir.

$$BCR = \frac{CPV(B_A)_{1-n}}{C_I + CPV(C_{OM})_{1-n}} \quad (6.21)$$

$$BCR = \frac{B_A \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right]}{C_I \left[1 + m \frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right]} \quad (6.22)$$

6.1.5.3 Geri ödeme süresi (PBP)

Geri ödeme süresi, projenin getirilerinin toplamının, yatırım bedellerini geçtiği zamana verilen addır. Bir diğer ifadeyle projenin kara geçtiği andır. Birden fazla projeyi

karşılaştırırken hızlı geri dönüş sağlayacak projenin seçimi doğru olacaktır. Bu da geri ödeme süresi küçük olan projenin daha iyi olduğunun göstergesidir.

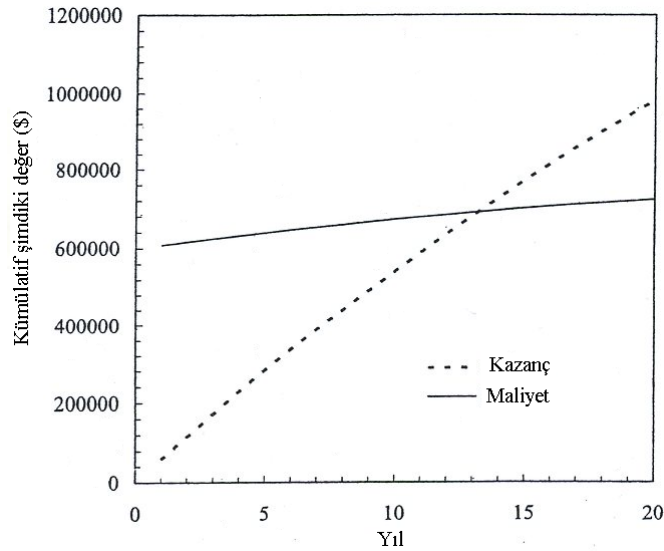
$$CPV(B_A)_{1-n} = C_I + CPV(C_{OM})_{1-n} \quad (6.23)$$

$$B_A \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] = C_I \left[1 + m \frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \quad (6.24)$$

Geri ödeme süresi n 'nin çözümü ile bulunacaktır.

$$PBP = - \frac{\ln \left(1 - \frac{IC_I}{B_A - mC_I} \right)}{\ln(1+I)} \quad (6.25)$$

Tipik bir rüzgâr enerli santrali projesinde faydaların ve masrafların kümülatif net şimdiki değeri Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Maliyet ve fayda eğrilerinin kesişme noktası geri ödeme süresini gösterir. Burada proje kendi yatırımını 13. ve 14. yıllar arasında karşılamaktadır.



Şekil 6.10 Maliyet ve faydanın kümülatif şimdiki değeri. (Mathew, 2006)

6.1.5.4 İç verimlilik oranı (IRR)

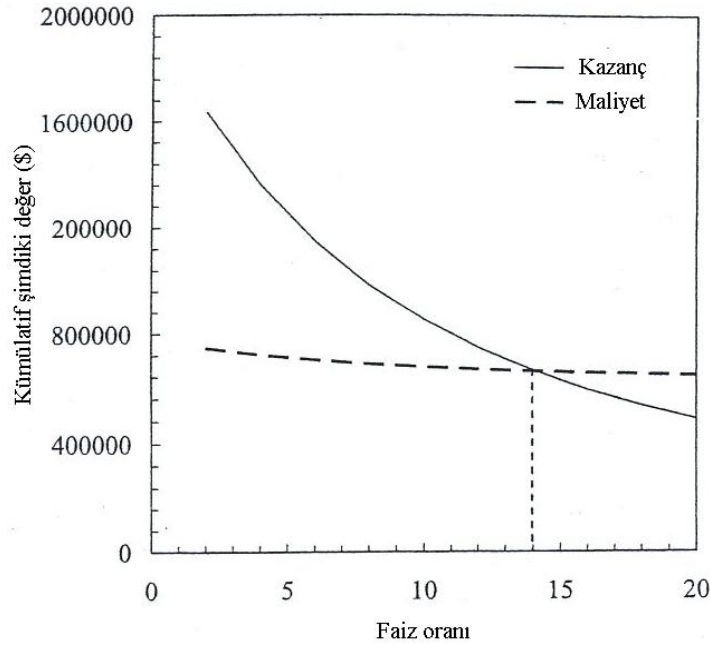
IRR de proje seçiminde önemli bir sayısal göstergedir. Projeye yapılacak harcamalarla, getirileri arasında yapılan matematiksel işlemlerle (öncekilerine göre biraz daha karmaşık) yüzdeli bir değer bularak, projenin getirisi analiz edilir. IRR'nin 0,22 olarak bulunması

projenin zaman içinde % 22 oranında kazandıracaklarının göstergesidir. Proje seçiminde *IRR*'si büyük olan projenin seçilmesi doğru olacaktır.

Eğer *IRR* iskonto oranı ile eşit çıkarsa projenin net şimdiki değeri sıfırdır. Başka bir deyişle iç verim oranı projenin anaparasından kazanabileceğimiz maksimum orandır.

$$B_A \left[\frac{(1+IRR)^n - 1}{IRR(1+IRR)^n} \right] = C_I \left[1 + m \frac{(1+IRR)^n - 1}{IRR(1+IRR)^n} \right] \quad (6.26)$$

Yukarıdaki denklemde *IRR*, Newton-Raphson metodu gibi nümerik tekniklerle çözülebilir. Şekil 6.11'de fayda ve masrafların kümülatif net şimdiki değeri gösterilmiştir. Fayda ve masrafların kesişim noktası projenin *IRR* değerini bize vermektedir. Aşağıdaki şekilde *IRR*'nin % 14 çıkması, gerçek faiz oranının yüzde 14'e kadar olması durumunda projenin kabul edilebilirliğinin bir göstergesidir.



Şekil 6.11 Maliyet ve faydaların farklı faiz oranlarındaki kümülatif şimdiki değeri. (Mathew, 2006)

6.2 Yıldız Kampüsü İçin Ekonomik Analiz

Bu bölümde Yıldız Teknik Üniversitesi Yıldız Kampüsü'ne konumlandırılan farklı iki rüzgâr türbini ile kampüsün enerji ihtiyacının karşılanması durumunun ekonomik olarak uygulanabilir olup olmadığı araştırılacaktır.

Analiz için Matlab ve Excel programlarından faydalanılmıştır. Yukarıda ekonomik analiz için belirtilen formüller bilgisayar ortamında yazılmış ve bazı sonuçlar elde edilmiştir.

- Her iki senaryo için de öncelikle rüzgârdan üretilen elektriğin kWh maliyeti (C_e) bulunmuştur.

$$C_e = c_w + c_e - c_c$$

c_e = harici masraflar

c_c = harici gelirler

$c_e = 0,34 \times 10^{-3}$ €/kWh (senaryo 1 ve senaryo 2 için sabit)

$c_c = 3,48 \times 10^{-3}$ €/kWh (senaryo 1 ve senaryo 2 için sabit)

$$c_w = \frac{CPV(C_A)}{E_I}$$

$CPV(C_A)$ = şimdiki değere getirilmiş ilk yatırım ve işletme bakım masraflarının yıllık değeridir.

c_w değerinin bulunabilmesi için C_I , E_I , n , m ve I değerlerinin belirlenmesi gereklidir.

C_I = projenin ilk yatırım masrafı (senaryo 1 ve senaryo 2 için değişken)

E_I = yıllık üretilen enerji miktarı (senaryo 1 ve senaryo 2 için değişken)

$n = 25$ (senaryo 1 ve senaryo 2 için sabit)

$m = 0,015$ (senaryo 1 ve senaryo 2 için sabit)

Her iki senaryo için de işletme ve bakım masrafları ilk yatırım maliyetinin 1,5 %'i ($m = 0,015$), projenin ömrü ($n = 25$) yıl olarak kabul edilmiştir.

Reel iskonto oranı (I) için gerekli değerler faiz oranı (i), görünür eskalasyon oranı (e_a)'dır.

$$i = \% 7$$

$$e_a = \% 3$$

Denklem 6.6'da gösterildiği şekilde I hesaplanır.

$$I = \frac{(1+i)}{(1+e_a)} - 1 = \frac{(1+0,07)}{(1+0,03)} - 1 = 0,039$$

$I = 0,039$ (senaryo 1 ve senaryo 2 için sabit)

- Sonra projeden elde edilecek yıllık fayda miktarları (B_A) hesaplanmıştır. B_A 'nın hesaplanması sırasında tüketicinin devletten elektrik alış fiyatı ($c_{alış}$) ve üreticinin devlete elektrik satış fiyatı ($c_{satış}$) değerlerinin bilinmesi gereklidir.

$$c_{alış} = 0,110 \text{ €/kWh}$$

$$c_{satış} = 0,070 \text{ €/kWh (Hatipoğlu, 2010).}$$

- Daha sonra ise sırasıyla NPV , BCR , PBP ve IRR değerleri bulunmuştur.

6.2.1 Birinci senaryo

Rüzgârdan üretilen elektriğin kWh maliyeti (C_e)

1,8 MW gücündeki rüzgâr türbini ile yılda 2,923 GWh enerji üretilecek, kampüsün kalan ihtiyacı olan $4,858 - 2,923 = 1,935$ GWh değerindeki enerji devletten temin edilecektir. ($E_I = 2,923 \times 10^6$ kWh/yıl)

İlk yatırım masrafı için birim fiyat 900 €/kW kabul edilmiştir. Bu durumda toplam ilk yatırım masrafı aşağıdaki gibi olur.

$$C_I = 900 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \times 1800 \text{ kW} = 1620000 \text{ €}$$

C_I değeri belirlendiğine göre c_w değeri için gerekli bilinmeyenler olan C_I , E_I , n , m , I ve e_a değerleri bilinmektedir.

$$CPV(C_A)_{1-n} = C_I \left\{ 1 + m \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \right\} = 2,004 \times 10^6 \text{ €}$$

$$A_1 = \frac{CPV(C_A)_{1-n}}{\frac{[1 - (1-e_a)^n (1-I)^{-n}]}{(I-e_a)}} = 9,21 \times 10^4 \text{ € / yıl}$$

$$CPV(C_A) = A_1 \times (1+e_a)^{-1} = 8,942 \times 10^4 \text{ € / yıl}$$

$$c_w = \frac{CPV(C_A)}{E_I} = \frac{8,942 \times 10^4 \text{€} / \text{yıl}}{2,923 \times 10^6 \text{kWh} / \text{yıl}} = 0,03059 \text{€} / \text{kWh}$$

$$C_e = 0,03059 + 0,00348 - 0,00034 = 0,02745 \text{€} / \text{kWh}$$

Projeden elde edilecek yıllık fayda miktarı (B_A)

B_A = mevcut elektriğin yıllık masrafı – türbin sonrası elektriğin yıllık masrafı

Mevcut elektriğin yıllık masrafı = kampüsün enerji ihtiyacı (KEI) x devletten elektrik alış fiyatı ($c_{alış}$)

Türbin sonrası elektriğin yıllık masrafı = [üretilen enerji (E_I) x üretilen elektriğin birim maliyeti (C_e)] + [devletten temin edilecek enerji ($KEI - E_I$) x devletten elektrik alış fiyatı ($c_{alış}$)]

$$B_A = (KEI \times c_{alış}) - [(E_I \times C_e) + (KEI - E_I) \times (c_{alış})]$$

$$B_A = (4,858 \times 10^6 \times 0,110) - [(2,923 \times 10^6 \times 0,02745) + \{(4,858 \times 10^6 - 2,923 \times 10^6) \times 0,110\}]$$

$$= 2,413 \times 10^5 \text{€} / \text{yıl}$$

$NPV(B_A)_{1-n}$ = Projeden elde edilecek kümülatif faydanın şimdiki değeri

$$NPV(B_A)_{1-n} = B_A \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] = 3,817 \times 10^6 \text{€} \quad NPV(B_A)_{1-n}$$

Projenin net şimdiki değeri (NPV):

Elektrik satışından elde edilecek faydadan ilk yatırım maliyeti ve işletme ve bakım masraflarının kümülatif değeri çıkarılarak net şimdiki değer bulunur.

$$NPV = CPV(B_A)_{1-n} - CPV(C_A)_{1-n} = 3,817 \times 10^6 - 2,004 \times 10^6$$

$$= 1,812 \times 10^6 \text{€}$$

Projenin fayda masraf oranı (BCR):

$$BCR = \frac{NPV(B_A)_{1-n}}{C_I + NPV(C_{OM})_{1-n}} = \frac{3,817 \times 10^6}{2,004 \times 10^6}$$

$$= 1,90$$

Projenin geri ödeme süresi (PBP):

$$PBR = -\frac{\ln\left(1 - \frac{IC_I}{B_A - mC_I}\right)}{\ln(1+I)} = 8,99 \text{ yıl}$$

Projenin geri ödeme süresi 9 yıldır.

İç verimlilik oranı (IRR):

$$B_A \left[\frac{(1+IRR)^n - 1}{IRR(1+IRR)^n} \right] = C_I \left[1 + m \frac{(1+IRR)^n - 1}{IRR(1+IRR)^n} \right]$$

İterasyon yöntemiyle $IRR = 0,127$ bulunmuştur. Bu değer faiz oranı olan 0,07 değerinden yüksek olduğu için bu şekilde yapılacak bir yatırımın ekonomik açıdan uygun olacağı sonucu doğmaktadır.

6.2.2 İkinci senaryo

Rüzgârdan üretilen elektriğin kWh maliyeti (C_e)

3,6 MW gücündeki rüzgâr türbini ile 6,234 GWh enerji üretilecek, kampüsün ihtiyacı dışında kalacak olan 1,376 GWh değerindeki enerji devlete satılacaktır. ($E_I = 6,234 \times 10^6$ kWh)

İlk yatırım masrafı için birim fiyat 900 €/kW kabul edilmiştir. Bu durumda toplam ilk yatırım masrafı aşağıdaki gibi olur.

$$C_I = 900 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \times 3600 \text{ kW} = 3240000 \text{ €}$$

C_I değeri belirlendiğine göre c_w değeri için gerekli bilinmeyenler olan C_I , E_I , n , m , I ve e_a değerleri bilinmektedir.

$$CPV(C_A)_{1-n} = C_I \left\{ 1 + m \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \right\} = 4,009 \times 10^6 \text{ €}$$

$$A_1 = \frac{CPV(C_A)_{1-n}}{\left[\frac{1 - (1-e_a)^n (1-I)^{-n}}{I - e_a} \right]} = 18,42 \times 10^4 \text{ € / yıl}$$

$$CPV(C_A) = A_1 (1+e_a)^{-1} = 17,88 \times 10^4 \text{ € / yıl}$$

$$c_w = \frac{CPV(C_A)}{E_I} = \frac{17,88 \times 10^4 \text{€} / \text{yıl}}{6,234 \times 10^6 \text{kWh} / \text{yıl}} = 0,02869 \text{€} / \text{kWh}$$

$$C_e = 0,02869 + 0,00348 - 0,00034 = 0,02555 \text{€} / \text{kWh}$$

Projeden elde edilecek yıllık fayda miktarı (B_A)

B_A = mevcut elektriğin yıllık masrafı – türbin sonrası elektriğin yıllık masrafı

Mevcut elektriğin yıllık masrafı = kampüsün enerji ihtiyacı (KEI) x devletten elektrik alış fiyatı ($c_{alış}$)

Türbin sonrası elektriğin yıllık masrafı = [üretilen enerji (E_I) x üretilen elektriğin birim maliyeti (C_e)] - [devlete satılacak enerji ($E_I - \text{KEI}$) x devlete elektrik satış fiyatı ($c_{satış}$)]

$$B_A = (\text{KEI} \times c_{alış}) - [(E_I \times C_e) - (E_I - \text{KEI}) \times (c_{satış})]$$

$$B_A = (4,858 \times 10^6 \times 0,110) - \left[(6,234 \times 10^6 \times 0,0255) - \left\{ (6,234 \times 10^6 - 4,858 \times 10^6) \times 0,070 \right\} \right]$$

$$= 4,71 \times 10^5 \text{€} / \text{yıl}$$

$CPV(B_A)_{1-n}$ = Projeden elde edilecek faydanın şimdiki değeri

$$CPV(B_A)_{1-n} = B_A \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] = 7,46 \times 10^6 \text{€}$$

Projenin net şimdiki değeri (NPV):

Elektrik satışından elde edilecek faydadan ilk yatırım maliyeti ve işletme ve bakım masraflarının kümülatif değeri çıkarılarak net şimdiki değer bulunur.

$$NPV = CPV(B_A)_{1-n} - CPV(C_A)_{1-n} = 7,456 \times 10^6 - 4,008 \times 10^6$$

$$= 3,447 \times 10^6 \text{€}$$

Projenin fayda masraf oranı (BCR):

$$BCR = \frac{CPV(B_A)_{1-n}}{C_I + CPV(C_{OM})_{1-n}}$$

$$BCR = 1,86$$

Projenin geri ödeme süresi (PBP):

$$PBR = -\frac{\ln\left(1 - \frac{IC_I}{B_A - mC_I}\right)}{\ln(1+I)}$$

Geri ödeme süresi 9,3 yıldır.

İç verimlilik oranı (IRR):

$$B_A \left[\frac{(1+IRR)^n - 1}{IRR(1+IRR)^n} \right] = C_I \left[1 + m \frac{(1+IRR)^n - 1}{IRR(1+IRR)^n} \right]$$

İterasyon yöntemiyle $IRR = 0,123$ bulunmuştur. Bu değer faiz oranı olan 0,07 değerinden yüksek olduğu için bu şekilde yapılacak bir yatırımın ekonomik açıdan uygun olacağı sonucu doğmaktadır.

Çizelge 6.4 Senaryo 1 ve 2 için ekonomik kriterlerin kıyaslaması

	1. senaryo	2. senaryo
C_e [€/kWh]	0,02745	0,02555
NPV [€]	1812000	3447000
BCR	1,9	1,86
PBP [yıl]	9,0	9,3
IRR	0,127	0,123

Çizelge 6.4'ten de görüleceği üzere her iki senaryonun ekonomik kriterlerinin değerleri birbirine oldukça yakındır. İki senaryo için de net şimdiki değer miktarlarının yapılan ilk yatırım masraflarına yakın olduğu görülmüştür. Fakat bir kıyaslama yapmak gerekirse, yukarıdaki tabloya baktığımızda ikinci senaryoda birim maliyetin birinci senaryoya göre daha düşük olduğu gözükmemektedir. NPV değerine baktığımızda 2. senaryonun 1. senaryoya göre getirisi daha yüksektir. Bu değerlendirmeler ışığında projeler ekonomik açıdan karşılaştırıldığında 2. senaryonun hayata geçirilmesi daha mantıklıdır.

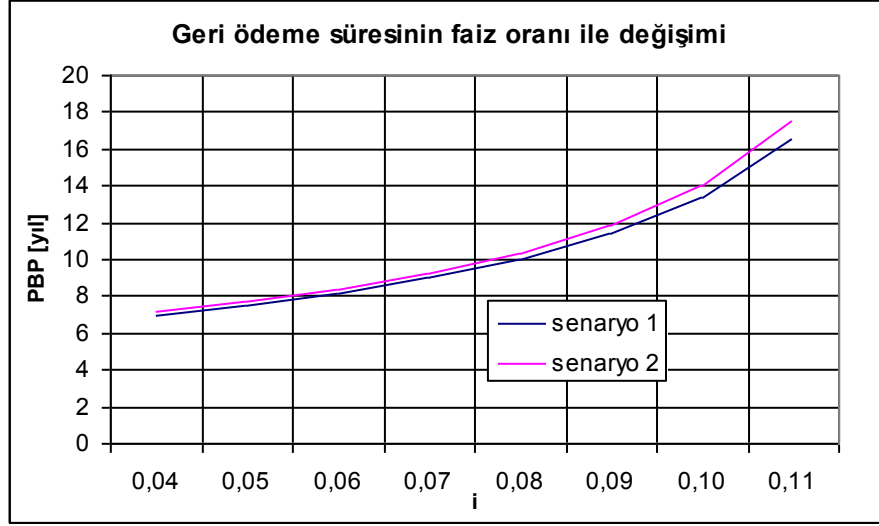
6.2.3 Duyarlılık analizi

Yukarıda yapılan inceleme sonucunda elde edilen değerler, bilimsel veriler dâhilinde yapılan belirli kabuller ışığında ortaya çıkmıştır. Ekonomik değerlendirme sonuçları; türbin fiyatına bağlı olarak ilk yatırım bedeli, faiz oranı, rüzgârdan elde edilen elektriğin satış fiyatı, üretilen enerji değeri, türbinin işletme süresi gibi birçok dinamik etkene bağlıdır.

Bu durumu daha iyi açıklamak adına her iki senaryo için geri ödeme sürelerinin faiz oranı ve

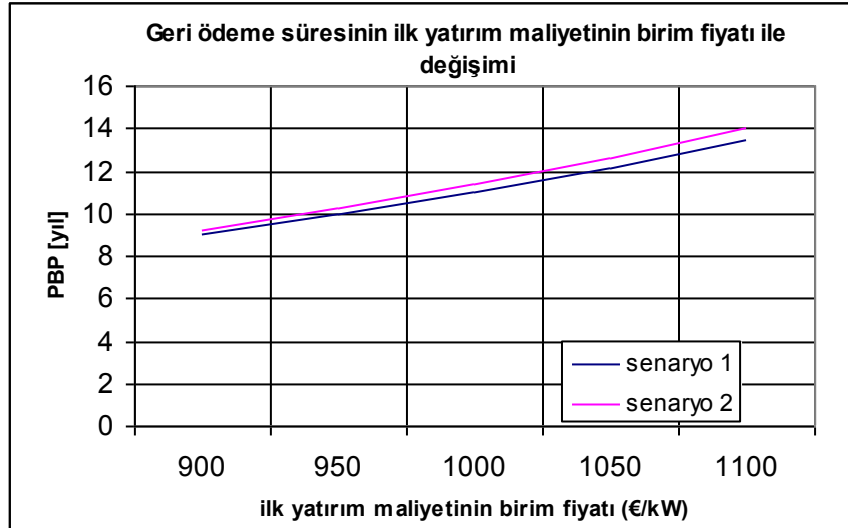
ilk yatırım bedeli ile değişimi incelenmiştir.

Şekil 6.12’de faiz oranı yüzde dokuzu geçtiği zaman her iki senaryo içinde geri ödeme süresinin on iki yılı geçtiği görülmektedir.

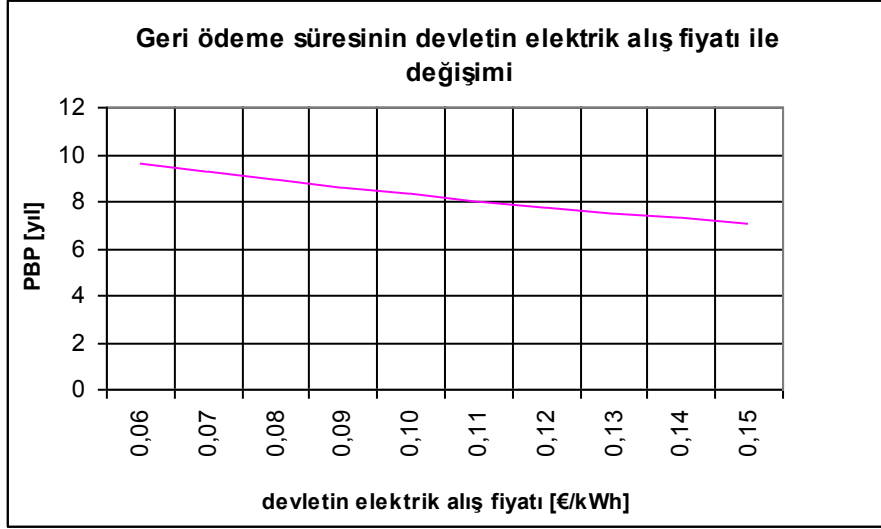


Şekil 6.12 Geri ödeme süresinin faiz oranı ile değişimi.

Şekil 6.13’te ilk yatırım maliyetinin birim fiyatının geri ödeme süresinin etkisi görülmektedir.



Şekil 6.13 Geri ödeme süresinin ilk yatırım maliyetinin birim fiyatı ile değişimi.



Şekil 6.14 Geri ödeme süresinin devlete elektrik satış fiyatı ile değişimi.

Son olarak ikinci senaryo için devlete elektrik satış fiyatı ile projenin geri ödeme süresinin değişimi Şekil 6.14'te incelenmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere devlete satış fiyatı arttıkça geri ödeme süresi azalmaktadır.

Yapılan analizler neticesinde rüzgâr enerjisinde ilk yatırım maliyetinin projenin ekonomisine etkisinin oldukça fazla olduğu görülmüştür. Teknolojinin ilerlemesiyle bu konuda yapılan bilimsel çalışmaların etkisi önemli derecede görülmektedir. Gelecek yıllarda ilk yatırım maliyet değerlerinin daha da aşağı çekileceği düşünülmektedir.

Rüzgâr enerjisinin ülkemizde daha hızlı mesafe kat edebilmesi için yenilenebilir enerji kanununda iyileştirme yapılmalıdır. 2008 yılına kadar rüzgâr enerjisi alanında dünya lideri olan Almanya'nın alım garantisi 9 c€/kWh iken Türkiye'deki 5 c€/kWh'lik bedel, yatırımcılar tarafından yetersiz bulunmaktadır.

7. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında rüzgâr enerjisi kaynaklı elektrik üretimi incelenmiş ve Yıldız Teknik Üniversitesi Yıldız Kampüsü için teknik ve ekonomik açıdan uygulamasının analizi yapılmıştır. Çalışmada iki farklı senaryo oluşturulmuş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Teknik analizde Yıldız Kampüsü'ne konumlandırılacak 1,8 MW ve 3,6 MW'lık rüzgâr türbinlerinin enerji potansiyelleri WAsP aracılığıyla hesaplanmıştır. Yıldız Teknik Üniversitesi Yıldız Kampüsü 2008 yılı elektrik tüketim değeri referans alındığında ortaya çıkan sonuç birinci senaryoda yıllık gereksinimden az, ikinci senaryoda ise fazla miktarda enerji üretiminin yapılabileceği yönünde olmuştur.

Ekonomik incelemede ise ihtiyaçtan az enerji üretilmesi durumunda geriye kalan enerji miktarının devletten temin edileceği ve ihtiyaçtan fazla enerji üretilmesi durumunda fazla enerji miktarının devlete satılacağı düşünülerek rüzgârdan elde edilen elektriğin birim maliyeti, geri ödeme süresi, iç verim oranı gibi kıyaslama yapmak için gerekli ekonomik kriterler Matlab ve Excel programları yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçlarına göre iki senaryo için de yapılacak yatırımın ekonomik açıdan getirisi olduğu görülmüştür. İki senaryo için yakın sonuçlar oluşmasına rağmen ihtiyaçtan fazla enerji üretiminin yapıldığı, fazla enerjinin devlete satılması durumunun daha avantajlı olduğu ortaya çıkmıştır.

Yıldız Kampüsü'nün rüzgâr potansiyeli çok iyi olmamasına rağmen ortaya çıkan tabloda İki senaryo için de net şimdiki değer miktarlarının yapılan ilk yatırım masraflarına yakın olduğu görülmüştür.

Rüzgâr enerjisi kaynaklı elektrik üretimi için yapılan çalışmaya benzer bir projenin hayata geçirilmesi; bilimsel araştırmalar yapılmasına olanak tanıyacağı, konuyla ilgilenen, diğer bilimsel merkezlere örnek olacağı, enerji üretirken sera gazı salımı yapmayarak dünyayı gelecek nesillere taşıyabilmek adına katkıda bulunacağı düşünüldüğünde olumlu olacaktır.

Rüzgâr enerjisi kullanımında dünyadaki birçok ülkeden geride kalan Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili yasal düzenlemeyi arzu edilen seviyeye çekmelidir. Aksi takdirde enerji kaynaklarındaki dışa bağımlılık durumu devam edecektir.

KAYNAKLAR

Aybers, N. ve Şahin B., (1995), Enerji Maliyeti, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

Bildirici, İ.Ö., Üstün, A., Uluğtekin, N., Selvi, H.Z., Abbak, A., Buğdaycı, İ. ve Doğru, A.Ö. (2007), "SRTM Verilerine Dayalı Ülke Bazında 3" x 3" Çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modelinin Oluşturulması", Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği IV. Sempozyumu, 5-7 Haziran 2007, İstanbul.

Durak M., (2010), "2009 Yılı Sonu İtibariyle Dünyada ve Ülkemizde Rüzgâr Santrali Projeleri", Yeni Enerji, Sayı 15.

Durak M. ve Özer S., (2008), Rüzgâr Enerjisi: Teori ve Uygulama, Impress, Ankara.

EWEA, (2010), Wind in power, 2009 European Statistics, A press release by the European Wind Energy Association.

EWEA, (2009), Wind now leads EU power sector, A press release by the European Wind Energy Association.

Gökçınar, R.E., Uyumaz, A., (2008), "Rüzgâr Enerjisi Maliyetleri ve Teşvikleri", VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 17-19 Aralık 2008, İstanbul.

Hatipoğlu, A., (2010), Rüzgâr Santrallerinde Rüzgâr Karakteristiği ve Saha Topografisine Göre Türbin Seçimi ve Yerleştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Köse, F. ve Özgören, M. (2005), "Rüzgâr Enerji Potansiyeli Ölçümü ve Rüzgâr Türbini Seçimi", Mühendis ve Makina, 46(551):20-30.

Küçükçalı, R., (2008), Yenilenebilir Enerjiler Alternatif Sistemler, Isısan Çalışmaları No: 375.

Mathew, S., (2006), Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Springer, The Netherlands.

Patel, M. R., (2006), Wind and Solar Power Systems, Design, Analysis and Operation, CRC Press, Boca Raton.

Ruiz, P.F., (2003), External Costs, Research Results On Socio-Environmental Damages Due To Electricity and Transport, European Commission.

Su Ş. ve İlbaş M., (2003), Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Bildiriler Kitabı, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Kayseri.

WAsP 9 Help Facility and On-line Documentation

WWEA, (2009), World Wind Energy Report, World Wind Energy Association.

İNTERNET KAYNAKLARI

[1]

<http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/RUZGAR%20POTANSİYELİ%20BELİRLENME%20Sİ.doc>, erişim tarihi: 20.11.2009

[2] <http://www.yildiz.edu.tr/~tanriov/RG1.pdf>, erişim tarihi: 03.03.2010[3] http://www.solar-santral.com/menu_detay.asp?id=275, erişim tarihi: 03.05.2010[4] <http://www.hurriyet.com.tr/yazarlar/14036935.asp?yazarid=82>, erişim tarihi: 06.05.2010

[5]

http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WETF/Facts_Volume_2.pdf, erişim tarihi: 13.05.2010

[6] <http://www.yildiz.edu.tr/~tanriov/RG2.pdf>, erişim tarihi: 03.03.2010[7] <http://www.yildiz.edu.tr/~tanriov/RG3.pdf>, erişim tarihi: 03.03.2010

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	12.05.1985	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	2000-2003	Çankaya Milli Piyango Anadolu Lisesi
Lisans	2003-2007	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2007-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Mak. Programı

Çalıştığı kurumlar

2007-2007	Etkin Mühendislik Ltd Şti.
2008-2009	Opet Petrolcülük A.Ş.
2009- Devam	Sarmakina Sanayi ve Ticaret A.Ş.