

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR ENERJİSİNİN DÜNYADAKİ GELİŞİMİ VE
TÜRKİYE’ DEKİ POTANSİYELİ**

Niyazi CELAYİR

FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nurettin UMURKAN

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Ön Bilgiler.....	2
2. ENERJİ KAYNAKLARI.....	4
2.1 Fosil Yakıtlar.....	4
2.1.1 Petrol.....	4
2.1.2 Taşkömürü ve linyit.....	4
2.1.3 Doğal gaz.....	5
2.2 Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	6
2.2.1 Hidrolik enerji.....	6
2.2.2 Nükleer enerji.....	6
2.2.2.1 Nükleer enerji nedir?.....	6
2.2.3 Güneş enerjisi.....	8
2.2.4 Rüzgar enerjisi.....	9
2.2.5 Jeotermal enerji.....	10
3. RÜZGAR ENERJİSİ.....	11
3.1 Rüzgar Enerjisi Kullanımının Gerekliliği ve Dünya Genelindeki Durumu.....	11
3.2 Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi.....	15
3.2.1 Rüzgar Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi.....	16
3.2.2 Yakın Çevresel Engel Bilgileri.....	17
3.2.3 Arazi Yüzey Pürüzlülük Bilgileri.....	17
3.2.4 Topografya Bilgisi.....	19
3.3 Santral Sahası İçin Rüzgar Atlasının Oluşturulması.....	19
3.4 Rüzgar Enerjisi Teknolojilerinde Türkiye'deki Durum ve Gelişmeler.....	20
3.5 Rüzgar santralleri teknolojisi.....	22
3.6 Türbin tipleri.....	24
3.6.1 Pervane Kanat Sayılarına Göre Türbin Çeşitleri.....	26
3.6.1.1 Üç-kanatlı Rüzgar Türbini.....	26
3.6.1.2 İki-kanatlı Rüzgar Türbini.....	27
3.6.1.3 Tek-kanatlı Rüzgar Türbini.....	28
3.6.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	28

3.6.3	Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	29
3.6.3.1	Üst Rüzgarlı (Upwind) Türbinler.....	29
3.6.3.2	Alt Rüzgarlı (Downwind) Türbinler.....	29
4.	KURULUŞ YERİ.....	31
4.1	Kuruluş Yeri Seçim Kriterleri.....	32
4.1.1	Rüzgarın Ortalama Hızı.....	32
4.1.2	İletim Şebekesine Yakınlık.....	35
4.1.3	Kuruluş Yeri Topografyası.....	36
4.1.4	Tarımsal Yaşam.....	37
4.1.5	Yatırım Maliyetleri.....	37
4.1.6	Müşteri Unsuru.....	38
4.1.7	Çevresel Etkileşim.....	39
4.1.8	Araziyi Kullanma.....	39
4.1.9	Gürültü.....	40
4.1.9.1	İnsanın Ses ve Gürültüyü Algılaması.....	42
4.1.10	Sosyo Ekonomik Koşullar.....	43
4.1.11	Bakım Onarım Giderleri.....	43
5.	RÜZGAR ENERJİSİNİN DÜNYADAKİ KULLANIMI.....	44
5.1	Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi ve Gelişimi.....	44
5.2	Rüzgar Enerjisinin Tarihte İlk Kullanımı.....	46
5.2.1	Rüzgarın Enerji Üretimi için İlk Kullanımı.....	47
5.2.2	1940 Sonrasında Rüzgar Enerjisinin Dünyadaki Durumu.....	47
5.3	Dünyadaki Mevcut Durum.....	49
5.4	Avrupa Birliği Hedefleri.....	53
6.	TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ KURULU GÜCÜ VE POTANSİYELİ.....	55
6.1	Türkiye Rüzgar Atlası.....	62
6.2	Türkiye'nin İlk Rüzgar Santrali ve Mevcut Durum.....	64
7.	RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN VERİ ANALİZİ YÖNTEMLERİ.....	66
7.1	Weibull Dağılımı.....	66
7.1.1	Kullanım Alanları ve Tarihçesi.....	66
7.1.2	Rüzgar Değerlendirmeleri.....	67
7.1.3	Weibull Dağılımı (Rüzgar Potansiyeli İçin Kullanımı).....	67
7.1.4	Rayleigh Dağılımı (Rüzgar Potansiyeli İçin Kullanımı).....	68
7.2	Rüzgar Hızı ve Rüzgar Enerjisi Denklemleri	68
7.2.1	Güç Katsayısı.....	68
7.2.2	Dönüştürme Oranı.....	69
7.2.3	Kanat Alanı.....	69
7.2.4	Yoğunluk.....	70
7.2.5	Rüzgar Hızı- Yükseklik Etkisi	71
7.2.6	Rüzgar Hızı- Çalışma Aralığı.	72
7.3	Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Gücünün Hesaplanması.....	72
7.4	Rüzgar Değişimlerinin Tanımlanması	74
7.4.1	Rüzgar Hızı Değişimlerinin Genel Modellenmesi.....	74
7.4.2	Rüzgar Hızlarının İstatistiksel Tanımlanması.....	76

7.4.3	Ortalama Şişe Yanılgısı.....	76
7.4.4	Ortalama Rüzgar Gücü.....	78
7.4.4.1	Güç Dağılımının Dengesi.....	78
7.5	Weibull ve Rayleigh Dağılımları.....	79
7.5.1	Rüzgar Enerjisi Potansiyeli.....	80
8.	İSKENDERUN BÖLGESİ İÇİN WEİBULL VE RAYLEİGH DAĞILIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....	82
8.1	İstatistiksel Analiz.....	82
8.1.1	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları.....	82
8.1.2	Rüzgar Hızı Olasılık Dağılımları.....	85
8.1.3	Rüzgar Gücünün Yoğunluk Fonksiyonu ve Ortalama Güç Yoğunluğu.....	86
9.	SONUÇ ve DEĞERLENDİRME.....	91
	KAYNAKLAR.....	92
	ÖZGEÇMİŞ.....	94

SİMGE LİSTESİ

A	Kanat alanı (m^2)
Btep	Bin ton eşdeğer petrol
c	Ölçek parametresi
C_p	Güç katsayısı
H_1	V_1 hızının ölçüldüğü yükseklik (m)
H_2	V_2 hızının hesaplanacağı yükseklik (m)
k	Şekil parametresi
Mtep	Mega ton eşdeğer petrol
P	Enerji watt (joule/s)
P_m	Ortalama rüzgar güç yoğunluğu
U-238	Uranyum-238
U-235	Uranyum-235
V	Rüzgar hızı (m/s)
v_m	Ortalama rüzgar hızı (m/s)
V_1	H_1 yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı (m/s)
V_2	H_2 yüksekliği için hesaplanacak rüzgar hızı (m/s)
Z_0	Pürüzlülük uzunluğu (m)
α	Pürüzlülük katsayısı (0.10 -0.40)
μ_c	Dönüştürme oranı
ρ	Yoğunluk
Γ	Gama fonksiyonu

KISALTMA LİSTESİ

AREB-TŞ	Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi
BOTAŞ	Boru Hatları ile Petrol Taşıma A.Ş.
ÇET	Çevresel Etki Değerlendirmesi
EC	Avrupa Komisyonu
EPDK	Enerji Piyasası Denetleme Kurumu
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EWEA	Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IRR	International Rate of Return
kW	Kilo Watt
kWh	Kilo Watt Saat
MW	Mega Watt
NPV	Net Present Value
RES	Rüzgar Enerji Santrali
RT	Rüzgar Türbini
TEAŞ	Türkiye Elektrik Üretim İletim Anonim Şirketi
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TPAO	Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
TWh	Tera Watt Saat
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
WASP	Rüzgar Atlası Analiz ve Uygulama Programı (Wind Atlas Analysis and Application Program)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Farklı enerji kaynakları için üretim maliyetleri	10
Şekil 3.1 Türbin gövde içi	23
Şekil 3.2 Bir rüzgar türbini teknesinin içi (Ültanır, 1999).....	24
Şekil 3.3 Enercon E40 tipi bir rüzgar türbininin iç yapısı	25
Şekil 3.4 Üç kanatlı rüzgar türbini.....	27
Şekil 5.1 Smith-Putnam rüzgar türbini.....	48
Şekil 5.2 Gedser türbini.....	48
Şekil 5.3 Dünyadaki toplam kurulu güç.....	51
Şekil 5.4 Dünyadaki yıllık kurulu güç değişimi.....	51
Şekil 5.5 Yıllık değişimin bölgesel dağılımları.....	51
Şekil 5.6 Avrupa'daki kurulu rüzgar gücü dağılımı.....	54
Şekil 6.1 Türkiye rüzgar atlası.....	63
Şekil 7.1 Rüzgar hızı ile güç katsayısı arasındaki ilişkisi.....	69
Şekil 7.2 Hava yoğunluğu ile yükseklik arasındaki ilişkisi.....	70
Şekil 7.3 Yükseklik etkisi ile yükseklik arasındaki ilişkisi.....	71
Şekil 7.4 Frekans histogramı.....	75
Şekil 7.5 Ortalama şişe yanılğısı.....	77
Şekil 7.6 Rüzgar gücü dağılımı.....	78
Şekil 8.1 Hesaplanan rüzgar güçlerinin karşılaştırılması.....	88
Şekil 8.2 Hesaplanan rüzgar güçlerindeki hata oranları.....	89

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Nükleer enerji ile rüzgar enerjisinin karşılaştırılması.....	8
Çizelge 3.1 kWh enerjinin üretim maliyeti (AREB-TŞ, 1999).....	14
Çizelge 3. 2 Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve TEAŞ tarafından yapılan elektrik enerjisi planlama çalışması (Ültanır, 1999).....	15
Çizelge 5.1 Kurulu rüzgar gücü dağılımı 2002-2007 (MW).....	50
Çizelge 5.2 Kurulu rüzgar gücünde en iyi 10 ülke.....	52
Çizelge 5.3 Kurulu rüzgar gücü artışındaki en iyi 10 ülke.....	52
Çizelge 6.1 Türkiye'nin yıllık elektrik üretim ve tüketim istatistikleri (TEİAŞ).....	56
Çizelge 6.2 Türkiye kurulu gücünün yıllık gelişimi 1970-2007 (MW).....	58
Çizelge 6.3 Türkiye yenilenebilir enerji kaynağı potansiyelleri (Atılğan İ., 2000).....	58
Çizelge 6.4 Türkiye'nin bölgesel ortalama rüzgar güç yoğunluğu.....	59
Çizelge 6.5 Türkiye'de birincil enerji kaynakları üretim hedefleri (Btep).....	61
Çizelge 6.6 Türkiye rüzgar enerjisi santralleri.....	65
Çizelge 8.1 Aylara göre belirlenmiş parametre değerleri.....	85
Çizelge 8.2 Olasılık yoğunluk dağılımları.....	86

ÖNSÖZ

Her geçen gün boyutları giderek artan enerji sıkıntısı hem dünyada hem ülkemizde önlem alınması gereken en önemli konuların başında gelmektedir. Bu sıkıntıya çare olabilecek alternatif enerji kaynaklarının başında gelen rüzgar enerjisinin önemi de hızla artmaktadır. Bu anlamda, rüzgar enerjisinin gelişiminin ve potansiyelinin incelenerek, rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan veri analiz yöntemlerinin ülkemizdeki belirli bir bölge için karşılaştırıldığı bu araştırmanın, bu konuda yapılacak çalışmalara yardımcı olmasını ümit ederim.

Bu tezin hazırlanması aşamasında, değerli vaktini ve desteğini esirgemeyen, sayın hocam Doç. Dr. Nurettin UMURKAN' a, sabır ve anlayışları için de aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

ÖZET

Ülkemizde ve dünyada hızla artan enerji ihtiyacı, bu artış karşısında mevcut tükenir enerji kaynaklarında azalma ve bazı kaynakların yol açtığı sorunlar; yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını gündeme getirmiştir.

Bu amaçla, öncelikle enerji kaynakları incelenmiş olup; kaynakların şu andaki ve gelecekteki potansiyelleri üzerinde durulmuştur.

Rüzgar enerjisinin genel tanımları yapılmış ve çevre ile ilişkileri incelenmiştir. Rüzgar enerjisinin dünyadaki ve Türkiye'deki durumu ve bu sınırsız enerji kaynağı ile ilgili gelişmeler incelenmiş, rüzgar türbinleri teknolojileri üzerinde durulmuş, bir rüzgar santrali kurarken dikkat edilmesi ve incelenmesi gereken hususlar araştırılmıştır.

Rüzgar enerjisinin dünyadaki tarihsel gelişimi, bugünkü durumu incelenmiş, ülkesel ve bölgesel gelişmeler dikkate alınarak, yapılan yatırımlardaki büyümeler belirtilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda ortaya konan gerçekçi hedefler araştırılmıştır.

Türkiye'deki rüzgar enerjisi ile ilgili yapılan ilk çalışmalardan, bugüne kadar gelen dönemdeki gelişmeler ortaya konmuş, rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan rüzgar enerji atlası incelenmiş, mevcut durum ve belirlenen hedefler ortaya konmuştur.

Son bölümde ise, rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan veri analizleri yöntemlerinden Weibull ve Rayleigh dağılımları incelenmiş, rüzgar değerleri ölçülmüş bir bölge için, bu iki dağılım karşılaştırılarak, hangi dağılımın daha iyi sonuç vereceği belirlenmiştir.

ABSTRACT

New and renewable energy resources are currently issued by the increasing demand on energy in our country and worldwide. The decrease in these current energy sources according to that demand and environmental problem caused by some resources.

In this purpose; first of all, energy resources are researched and the situation of the resources, today and in the future, has been pointed out.

General definitions of the wind energy are given and the contribution with its environment is examined. The state of wind energy in Turkey and in the world and the developments about this endless energy resource are examined, wind turbine technologies and the points that are necessary to establish wind power plant has been discussed.

Historical development of wind energy in the world and present situation are searched, increasing of investments is defined considering regional and local progresses. Declared realist targets are pointed out with these information.

In Turkey improvements about wind energy from first studies until today are defined, wind energy map using for defining potential of wind energy is searched, present situation and determined targets are examined.

In the last chapter, Weibull and Rayleigh distributions are researched, which are data analysis methods, these distributions are compared by using determined wind speeds of an area, which distribution has better results is decided.

1. GİRİŞ

Türkiye ve Dünya'daki gelişen uygarlıkla orantılı olarak artan enerji talepleri, bu alanda uzun vadeli, planlı ve bilimsel çalışmalar yapmayı gerektirmektedir. Bu amaçla , mevcutlar dışında yeni enerji kaynakları ve alternatif enerji türleri ile yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde çalışmaların yoğun olarak yapılması gereğini gündeme getirmektedir. Johnson (2001), 'Wind Energy Systems' adlı çalışmasında, dünyadaki enerji ihtiyacı ile ilgili fosil yakıtların uzun vadeli bir çözüm oluşturamamasının, kömürün ve nükleer enerjinin de çevresel riskler taşımasının, alternatif enerji kaynaklarının yakın bir gelecekte birincil enerji kaynağı vazifesi göreceğini öngörmüştür.

Uygun ve konvansiyonel birincil enerji kaynaklarından petrolün bilinen rezervlerinin bitmeye ve hesaplanan tahmini ömrünün sonuna yaklaşıldıkça enerji ihtiyaçları için gereken arz-talep dengesini kurmak daha da önem kazanmaktadır. Gelişmekte olan ve özellikle de kullanılması gereken enerjinin önemli bir kısmını ithal etmek durumunda olan ülkeler için sorunun önemi daha da büyüktür. Ültanır (1998), yaptığı çalışmada 2020 yılına kadar dünyada enerji tüketiminin yine fosil yakıtlara bağlı olacağını ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bunları yerini almasının belli bir süreç alacağını belirtmiştir.

Dünya üzerinde; özellikle de nüfusun yoğun ve artmakta olduğu yerlerde enerji ihtiyacı da her geçen gün hızla artmakta, bu enerji açığını kapatabilmek için artık sınırlı, tükenir enerji kaynaklarını kullanmanın yanı sıra yenilenebilir kaynaklara yönelmenin gerekliliği göze çarpmaktadır. Uyar (2000), 'Türkiye Enerji Sektöründe Karar Verme ve Rüzgar Enerjisinin Entegrasyonu' adlı çalışmasında , 2010 yılından itibaren rüzgar gücünün % 20' lik yıllık büyüme oranlarının gerçekleştiğinde, 2020 yılı dünya elektrik enerji talebinin %10,85' inin rüzgar enerjisinden sağlanabileceğini ve 2040 yılında ise rüzgar gücünün dünya elektriğinin %20' sini üretebilir duruma geleceğini belirtmiştir.

Rüzgar enerjisi, son yıllarda yenilenebilir kaynaklar arasında en önemli yeri teşkil eden ve teknolojik gelişmeleri açısından da oldukça önemli adımlar atılmış bir kaynak durumundadır. Bunun en önemli sebepleri arasında; sınırsız, tükenmez, doğal ve öz kaynak oluşu yani başka bir ülkeye enerji hammaddesi açısından bağımlılık yaratmaması sayılabilir. Yerebakan (2001), geleceğe yönelik enerji planlamalarının yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına yönelmesinin ve bu anlamda devletlerin teşvik edici programlar ortaya koymasının gerekliliğine dikkat çekmiştir.

Bunların dışında, hava kirliliğine ve küresel ısınmaya yol açan hiçbir etkisi bulunmamakta olup, çevre dostu olarak nitelendirilmektedir. Kekez (2007), çevre kirliliği faktörünün de etkisiyle enerji sektöründe yeni arayışların ve buna bağlı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretiminde yer almaya başladığını ortaya koymuştur.

Rüzgar santrali kurma maliyetleri, son yıllarda yapılan çalışmalar ve teknolojik gelişmeler sayesinde hızla düşmüş, bu nedenle rüzgar potansiyeline sahip ülkeler için değerlendirilmesi gereken önemli bir kaynak haline gelmiştir. Uğuz (2005), rüzgar enerjisi ile elektrik üretiminde, avantajlarından dolayı, sabit mıknatıslı makinelerin kullanımının yaygınlaşmasını, rüzgar enerjisi teknolojilerindeki gelişmeye bağlamıştır.

Ülkemiz de, üç tarafının denizlerle çevrili olması nedeniyle zengin bir potansiyele sahiptir. Yapılan uzun süreli ölçümler bunun göstermektedir. Atılgan (2000), ‘Türkiye’ nin Enerji Potansiyeline Bakış’ adlı çalışmasında, iddia edilenin aksine ülkemizin enerji kaynakları açısından potansiyelinin kötü olmadığını belirtmektedir. Şen (2003), yaptığı çalışmada, Gökçeada’ nın elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgar enerjisi ile karşılanmasını incelenmiş ve son derece verimli sonuçlara ulaşmıştır.

Bu çalışmada; öncelikle enerji kaynakları incelenmiş, rüzgar enerjisi ve diğer enerji kaynakları karşılaştırılmış, rüzgar enerjisinin Dünya’daki gelişimi ile Türkiye’deki potansiyeli incelenmiş ve teknolojik gelişmeler araştırılmış olup; son kısımda da rüzgar enerjisinin potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan veri analiz yöntemleri ortaya konmuştur.

1.1 Ön Bilgiler

Doğada elektrik enerjisi doğrudan doğruya kullanılabilir biçimde bulunmaz. Bununla beraber, çeşitli enerji türleri elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Elektrik üretiminde kullanılabilecek düzeyde kimyasal, mekanik ve ısı kökenli enerji içeren ortamlara birincil enerji kaynakları denir.

Kullanılan birincil enerji kaynakları tükenen ve yenilenen kaynaklar olarak gruplanabilir. Tükenen enerji kaynaklarının arasında taş kömürü, linyit, petrol ürünleri ve doğal gaz sayılabilir. Fosil yakıtlar olarak adlandırılan bu kaynakların yanması sonucunda elde edilen ısı, önce mekanik enerjiye, sonra da elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Elektrik enerjisi üretmek amacıyla yaygın biçimde kullanılan fosil yakıtlar (kömür, petrol), su

potansiyel enerjisi ve nükleer enerjinin dışındaki birincil kaynaklara genel olarak alternatif enerji kaynakları denir. 1970’li yıllarda ortaya çıkan petrol krizi ve nükleer santrallere karşı oluşan toplumsal tepkiler, araştırmacıları yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmeye yöneltmişlerdir. En önemlileri aşağıda kısaca tanıtılacak olan bu kaynakların ortak özellikleri, doğal çevrim ile kısa zamanda kendilerini yenileyebilmeleri, çevreye fosil yakıtlar kadar çok zarar vermemeleri, nükleer enerjiye oranla daha az risk taşımaları ve bulundukları ülkeleri enerji üretimini dışarı bağımlılığını azaltmalarıdır.

Bugün " alternatif enerji kaynağı" olarak adlandırılan kaynaklardan bazıları çok eski çağlardan beri bilinmekte ve değişik biçimlerde kullanılmaktadır. Asıl önemli olan, bu kaynakların elektrik üretmek amacıyla ekonomik biçimde değerlendirilmesi ve fosil yakıtlar ile nükleer enerjiye alternatif oluşturulmasıdır. Yaklaşık 35-40 yıldır bu alanda çalışmalar yoğun biçimde devam etmektedir. Henüz bu tür kaynaklar ülkelerin enerji üretiminde belirgin orana ulaşmamıştır. Bununla beraber, dünyadaki fosil yakıt rezervlerinin tükenmekte, su potansiyelini de sınırlı olduğu düşünülürse, ilerde enerji sorunun çözümünde, alternatif enerji kaynakların ne kadar önemli bir yer tutacağı açıkça görülür .

2. ENERJİ KAYNAKLARI

2.1 Fosil Yakıtlar

2.1.1 Petrol

Dünyada enerji ihtiyacının yaklaşık %45'i petrolden karşılanmaktadır. 2006 istatistiklerine göre dünyada petrol üretimini gerçekleştiren ülkeler arasında ilk sırayı %31,2'lik payla Orta Doğu Ülkeleri almaktadır.

Günümüz teknolojileri petrol kökenlidir. Fakat petrol kaynaklarının önümüzdeki 30-40 yıl içinde tükeneceği tahmin edilmektedir. 1973'lü yıllardan sonra petrol fiyatları artmaya başlamış, petrol dış alımı yapan ülkeler ekonomik açıdan darboğazla karşılaşmıştır. Ayrıca bu durum, dış alım yapan ülkeleri enerji kaynağı açısından petrol ihraç eden ülkelere bağımlı kılmaktadır.

Türkiye her yıl yaklaşık 20 milyon ton ham petrol ithali yaparak, 2,5 milyar dolar ödemektedir. Bu yüzden artık petrole yönelik teknolojiler yerine; potansiyeli fazla olan, mevcut yenilenebilir, sınırsız öz enerji kaynaklarımız üzerine yoğunlaşmanın gerekliliği görülmektedir.

2.1.2 Taşkömürü ve Linyit

Dünyada en büyük rezerve sahip fosil yakıt, kömürdür. Taşkömürü üreticisi ülkelerin başında %32,1 ile Çin gelmektedir. Linyit üretiminde ise %22,5 ile ABD ilk sıradadır.

Türkiye'nin taşkömürü yatakları açısından en zengin bölgesi Zonguldak'tır. Türkiye genelindeki linyit rezervlerinin yarıdan fazlası, 1500 kcal/kg gibi oldukça düşük bir ısıl değere sahiptir. 3000 kcal/kg ve üstü ısıl değere sahip linyit rezervleri ise toplamın %7'sine tekabül etmektedir. Bu yüzden üretilen linyitin büyük bölümü ısınma yerine elektrik üretiminde kullanılmaktadır.

Kömür; açığa çıkardığı azot ve kükürt oksitler ve asit yağmurları nedeniyle çevre için büyük sakınca oluşturmaktadır. Yakılan kömür, çok büyük miktarda karbondioksit oluşumuna sebep olmakta, bu da yeryüzünden ısı biçiminde uzaya giden radyasyonu önleyerek sera etkisiyle yeryüzü sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Bu durum, bilim adamları tarafından çok olumsuz olarak değerlendirilmekte, ileride anormal iklim değişikliklerine yol açacağı

öngörülmektedir (Atlı, 2000). İklimdeki ani değişimler ve atmosferdeki ısınmanın hızlı bir şekilde artması; kutuplardaki buzulların erimeye başlamasına yol açmakta ; bu da deniz seviyesinin yükselerek bazı adaları ve kıyıları su basmasına sebep olmaktadır. Ani fırtınalar ve şiddetli yağışlar, tarım topraklarına zarar vermekte, can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır. Diğer taraftan uzun süren kuraklıklar neticesinde, çöller genişlemekte, su kaynakları kurumakta, kurak araziler çöle dönüşmektedir.

2.1.3 Doğal gaz

Bilinen fosil yakıtların en temizidir. Dünyanın en büyük doğal gaz rezervine sahip ülkeleri; Rusya, İran, Birleşik Arap Emirlikleri, ABD, Suudi Arabistan, Katar, Cezayir, Venezüella, Kanada, Nijerya, Endonezya ve Libya'dır.

Doğal gaz, hızla artan çevre ve atmosfer kirliliği nedeniyle önemi artan ve alternatif olarak düşünülen bir enerji kaynağı olma özelliğe sahiptir. TPAO; 1976 yılında, ilk kez Türkiye kaynaklı doğal gaz üretimi için teşebbüslere başlamış olup, 1980'li yıllarda da gaz talep tahmini ve benzeri çalışmalar, BOTAŞ tarafından gerçekleştirilmiştir.

Doğal gaz, özellikle kış aylarında aşırı değerlere ulaşan hava kirliliğine çözüm olarak görülmüş ve ilk olarak 1987 Haziran ayında Hamitabat Kombine Çevrim Santrali'nde elektrik üretimi için kullanılmaya başlanmıştır. 1987 yılında 430 milyon m³'ü Rusya'dan olmak üzere toplam 513 milyon m³ doğal gaz ithal edilmiştir. Bu doğal gazın %100'ü elektrik enerjisi üretiminde kullanılmıştır. İthal edilen doğal gazın 1990 yılında %70'i (2.555 milyon m³), 1992 yılında %58 (2.558 milyon m³), 1996 yılında %53'ü (4.050 milyon m³) elektrik enerjisi üretiminde kullanılmıştır (Atlı, 2000).

Ucuzluğu, kullanımdaki kolaylığı, temizliği ile avantaj sağlamasına rağmen; bazı açılardan riskli bir enerji kaynağı olduğu görülmektedir. Bugün yaklaşık 10 milyar m³ olan doğal gaz ithalatının % 75-80'i Rusya'dan, kalanı Cezayir ve diğer ülkelerden yapılmaktadır. Stratejik bağımlılığın yanı sıra biten bir kaynak olması nedeniyle doğal gaz, fiyat açısından da risklidir. Bugünkü üretim ve tüketim rakamlarına göre, doğal gazın 57 yıllık ömrünün var olduğu bilinmektedir. Ancak tüketim hızındaki aşırı artış, bu ömrün çok daha kısılacacağı fikrini düşündürmektedir. Dolayısıyla böylesine hızlı tükenen bir kaynağın fiyatının da artacağı çok net bir gerçektir. Bu risk sadece ülkemiz için değil, yine doğal gaza bağımlı olan bazı Avrupa ülkeleri ve Amerika için de geçerlidir.

2.2 Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları

2.2.1 Hidrolik Enerji

Hidrolik enerji kaynağının yeri ve tüketim alanları farklı yerler olması nedeniyle enerji kayıplarının bazen fazla olduğu bilinse de; yine de yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük çapta kullanılmakta olanıdır.

Üretilen enerji miktarı; suyun debi ve düşü değişkenlerine bağlıdır. Bir hidroelektrik santralin en sakıncalı tarafı yük faktörünün su rejimine bağlı olarak değişken ve oldukça düşük olmasıdır (Ültanır, 1999).

Ayrıca; suyun sınırlı oluşunun, doğal çevre dengelerinin ve ekolojik dengelerin bozulması gibi ciddi anlamdaki problemlere yol açacağı düşünülerek; bir çok çevre korumacısı tarafından barajlara karşı çıkılmaktadır.

Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi ile elde edilir. Suyun potansiyel enerjisi türbinde kinetik enerjiye, türbine akupile edilmiş generatör aracılığıyla da elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Bir hidrolik santralin masrafları; arazi ve su hakları bedeli, baraj inşaatı, santralin mekanik aksamı, cebri boru, transformatör ve taşıma hatları masraflarıdır. Bu santraller; genellikle elektrik yük merkezlerine uzak olduklarından yüksek gerilim taşıma hatları için amortisman ve bakım masrafları da enerji maliyetine yansıtılmalıdır. Hidrolik santrallerde yakıt masrafı olmadığından giderler; sigorta, vergi, amortisman bedeli, işletme ve bakım masraflarıdır.

2.2.2 Nükleer Enerji

2.2.2.1 Nükleer Enerji Nedir?

Bir nükleer tepkimede, yani herhangi bir atom çekirdeğinde bazı değişikliklere yol açan bir tepkimede açığa çıkan enerjiye, nükleer enerji ya da çekirdek enerjisi denir. Normal bir kimyasal tepkimede, bu tepkimeye giren atomların yalnızca en dıştaki bazı elektronları arasında alış verişler gerçekleşir; yani, elementlerin atomları birbirleriyle birleşerek molekülleri oluştururken değişmeden kalırlar. Kimyasal tepkimeler sırasında, maddedeki atomların yerleşiminden kaynaklanan kimyasal enerjinin bir bölümü açığa çıkabilir; yanma olayı bu tür bir tepkimedir. Nükleer tepkimede ise, atomun tam ortasında bulunan, nötron ve

protonlardan oluşan atom çekirdeği değişikliğe uğrar ve bu tür tepkime sırasında atom kütesinin bir bölümü enerjiye dönüşür. Nükleer tepkimede, herhangi bir kimyasal tepkimede açığa çıkabilecek olanın, milyonlarca katı kadar enerji açığa çıkar ve kimyasal tepkimeden farklı olarak, bir element bir başka elemente dönüşür. İki tür nükleer tepkime vardır: Çekirdek bölünmesi (nükleer fisyon ya da kısaca fisyon) ve çekirdek kaynaşması (nükleer füzyon ya da kısaca füzyon).

Çekirdek kaynaşması yoluyla da nükleer enerji üretimi mümkün olmakla birlikte, bunun güçlüğü sebebiyle günümüzde kullanılan reaktörlerde, ağır atomların parçalanmasıyla açığa çıkan çekirdek bölünmesi enerjisinden yararlanılmaktadır.

Atom çekirdeği bölünebilen elementlere "bölünebilir element" denir. Doğada bulunan tek bölünebilir element "uranyum"dur. Uranyum doğada iki ana biçiminin (izotopunun) bir karışımı halinde bulunur. Bu karışımın %99'undan çoğunu uranyum-238 (U-238), %1'den daha azını da uranyum-235 (U-235) oluşturur. Buradaki rakamlar kütle numarasını, yani çekirdekteki proton ve nötron sayılarının toplamını göstermektedir. U-238'in çekirdeğinde üç nötron fazlası vardır ve bu nedenle iki izotop, farklı fiziksel özelliklere sahiptir. Yalnızca U-235'in atomları bölünebilir, U-238'in atomları ise doğurgandır yani kolayca bölünmeye uğramazlar, ama yüksek hızdaki nötronları soğurarak, daha ağır bir element olan plütonyum-239 atomlarına dönüşürler. Plütonyumun bu izotopu ise bölünebilir özelliktedir. Hem uranyum hem de plütonyum nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılır.

Nükleer enerji santralleri, kömürle çalışan termik santrallerden pek farklı değildir. Termik santrallerde kömür yakılarak su kaynatılır, böylece elde edilen buhar gücüyle bir türbin döndürülür ve türbin elektrik üretir. Nükleer enerji santrallerinde ise gerekli ısı, atomların bir reaktörde bölünmesiyle üretilir.

Çizelge 2.1 Nükleer enerji ile rüzgar enerjisinin karşılaştırılması

	Nükleer	Rüzgar
Yatırım Maliyeti (USD/kW)	3.000 – 4.000	1.000 – 1.200
Üretim Maliyeti (sent/kWh)	7.5 – 12.0	3.5 – 4.0
Atık Maliyeti (USD/ton)	500.000 – 650.000	–
İstihdam (kişi/yıl.TWh)	75 kişi	918 kişi
Yatırım Süresi (yıl)	8 – 10 yıl	1 - 2 yıl
Dışsalılık/Yerellik	Dışsal	Yerel
Çevresel Risk	Yüksek	Düşük

2.2.3 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisinin elektriğe dönüştürülmesi için ilk incelemeler, 1839'da başlamış olup, bu yolla elektrik üretimi, 1954 yılında Amerika'da Bell Telefon Laboratuarlarında PV güneş pillerinin yapımı ile gerçekleştirilmiştir (Ültanır, 1997).

Güneş ışınlarının aynalarla ve merceklerle yoğunlaştırılmasıyla; teorik olarak güneş sathındaki sıcaklıklara yakın değerlere varan sıcaklıklar elde etmek mümkündür. Eski Sirakuza'da, Archimedes'in, hücum eden Roma gemilerinin yelkenlerini yakmak için büyük miktarda parlatılmış kalkan kullandığı söylenir. Yaklaşık olarak iki asır önce Fransız bilgin Antoine Lavoisier, iki mercekli güneş fırınında platini eritmeyi başarmıştır (Laguil vd., 1998).

Güneş enerjisi, sıcak su elde edilmesi ve ısıtma amacıyla da kullanılabilir. Güneş enerjisini, elektrik enerjisine dönüştürmede kullanılan teknikler şunlardır:

-Fotoelektrik dönüşümü

-Termoelektrik generatörleri

-Fotovoltaik güneş pilleri

-Termodinamik dönüşüm

Fotoelektrik dönüşümü, diğer adıyla doğrudan dönüşüm tekniğinde temel prensip, radyasyon enerjisinin iletken metallerin elektronlarını harekete geçirerek elektrik üretmesi esasına dayanır.

Fotovoltaik pillerin küçük ve hafif olmaları, ayrıca yine sınırsız ve tükenmez bir kaynak olan güneş ışığını kullanmaları; uydu ve uzay araçlarında tercih edilen kaynak olmalarına yol açmıştır. Güneş pilleri; seri ve paralel bağlanarak foto voltaj panellerini meydana getirirler. Küçük boyutlu ve hafif olan bu paneller, istenilen gücü elde etmek amacıyla birleştirilerek de kullanılabilirler.

Sistemin çalışması için ışığın olması yeterlidir, bulutlu ve kapalı havalarda bile yani direk olarak güneşin olmaması durumunda dahi, sistem; ışık şiddetine bağlı olarak verim az olsa da yine de elektrik üretmeye devam edecektir. Geceleri ise gerekli olan enerji, sistem tarafından şarj edilen solar aküler tarafından karşılanacaktır.

Güneş pili, çalışması sırasında çevreye gürültü, ısı, gaz yaymamaktadır.

Termodinamik dönüşümle elektrik enerjisi üretimi, güneş ışınlarının bir kule üzerinde bulunan kazana; iki eksen etrafında hareketli parabolik aynalar tarafından yönlendirilmesi ve buhar üretilmesi esasına dayanır. Elde edilen buhar, burada ayrıntısı anlatılmayacak bir çevrimde kullanılarak, klasik bir turbo-generatör sistemi çalıştırılır (Aybers ve Şahin 1995).

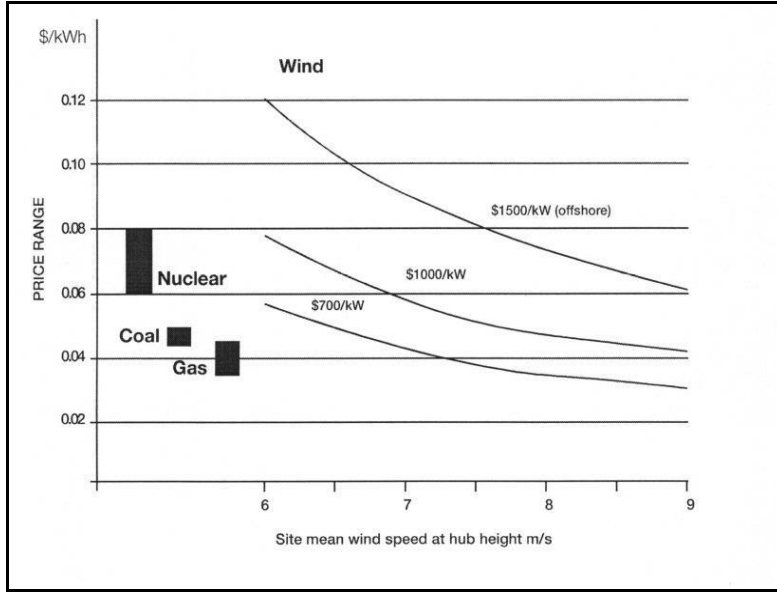
Güneş ışığının elektrik kaynağı olarak kullanıldığı bazı uygulama alanlarını şöylece sıralayabiliriz: Meteoroloji istasyonları, masa ve cep tipi hesap makineleri, deniz fenerleri, karavanlar, su pompaları, uydu alıcılar ve radar istasyonları mobil evler ve hastaneler, sokak ve bahçe aydınlatmaları, mobil telefonlar.

2.2.4 Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi elde etme teknolojisi, özellikle son yıllarda çok büyük rağbet görmeye başlamıştır. Bunda rüzgar enerjisinin atıksız, sınırsız ve çevreye zararsız bir kaynak olmasının önemi çoktur. Bunun yanı sıra 1970'lerdeki petrol krizi sırasında, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde yoğunlaştırılan çalışmalar; rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri ve elektrik üretim maliyetlerinin azaltılması açısından olumlu neticeler vermiştir.

Rüzgar enerjisi; dış ülkelere bağımlılık yaratmayan, yerli ve tükenmeyen bir enerji kaynağıdır. Ayrıca, rüzgar enerjisi kullanımı sayesinde, tükenen fosil yakıt rezervleri korunmuş olur. Rüzgar gücü, herhangi bir radyoaktif ışınım tahrifatı yaratmamaktadır. Rüzgar, yerli ve bağımsız bir enerji kaynağıdır. Rüzgar türbinleri, herhangi bir büyüklükte imal edilebilmekte ve tek olarak ya da gruplar halinde kullanılabilir. Rüzgar türbinleri,

inşaatın başlamasından üretime geçişe kadar üç ay gibi çok kısa bir sürede gerçekleşmektedir (Uyar, 1998).



Şekil 2.1 Farklı enerji kaynakları için üretim maliyetleri

2.2.5 Jeotermal Enerji

Yağmur ve kar suları, yerkabuğundaki çatlaklardan aşağı katmanlara doğru iner. Burada, magmanın ısıttığı kayalık katmanlarla karşılaşır ve ısınır. Isınan sular; sıcak su kaynakları, buhar ve sıcak su-buhar karışımı halinde yeryüzüne ulaşır. Yani kısacası jeotermal enerji, yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş basınç altındaki su, buhar, gaz veya sıcak kuru kayaların içindeki ısı enerjisi demektir. Eğer suyun doğal olarak dolaşabilmesi için müsait kırık ve çatlaklar yoksa, yapay borular gibi teknikler kullanılarak, sıcak kuru kayaların dahi jeotermal enerji kaynağı olarak kullanılması mümkündür.

3. RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgar enerjisi, çevrime uğramış güneş enerjisidir. Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde özdeş ısıtmaması nedeniyle oluşan sıcaklık ve basınç farkları rüzgarı oluşturmaktadır. Rüzgar yüksek basınç alanından, alçak basınç alanına yer değiştiren havanın, Dünya yüzeyine göre bağıl olarak yaptığı harekettir. Yer değiştiren hava kütesine Dünya'nın dönmelerinden kaynaklanan Coriolis kuvveti de etki eder. Ayrıca, rüzgarlar bir merkez çevresinde dolandıklarından, santrifüj kuvveti etkisinde kaldıkları gibi, yeryüzü ile hava arasındaki sürtünme kuvvetinden de etkilenirler. Kutuplar ve ekvator arasındaki hava akımlarına bağlı belli rüzgarlar varsa da, enerji üretimi açısından denizler, karalar, dağlar ya da vadiler arasındaki hava akımlarına dayalı yerel rüzgarlar önemlidir.

Rüzgarlar atmosferde bol ve serbest olarak bulunan, kararlı, güvenilir ve sürekli bir kaynaktır. Doğası gereği kinetik enerji taşımaktadır. Atmosferin rüzgarı oluşturan brüt kinetik gücü $0,191 \times 10^{12}$ kW kadardır. Dünya'nın 50° kuzey ve güney enlemleri arasında rüzgar gücü potansiyelinin 3×10^9 kW olmasına karşın ekonomik ve fiziksel planlamanın getirdiği sınırlılıklardan dolayı, 1×10^9 kW kapasitenin kullanılabileceği hesaplanmıştır.

Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgardan sağlanacak enerjinin miktarı hızına bağlıdır. Rüzgarın hızı yükseklikle, gücü ise, hızının kübü ile orantılı olarak artar. Sağlayacağı enerji, gücüne ve estiği süreye bağlıdır. Özgül rüzgar gücü, hava debisine dik olarak, birim yüzeye düşen güçtür. Topoğrafik koşullara bağlı olarak rüzgarın yerden 50 m yükseklikteki özgül gücü, hızı 3,5 m/s' den küçük iken 50 W/m^2 'den az, 11,5 m/s' den büyük iken 1800 W/m^2 ' den çok olabilir. Dünya yüzeyinin % 27'sinde yıllık ortalama rüzgar hızının yerden 10 m yükseklikte 5,1 m/s' den büyük olduğu saptanmıştır. Bu alan rüzgar enerjisi bakımından zengin olan bölgelerin toplamıdır.

3.1 Rüzgar Enerjisi Kullanımının Gerekliliği ve Dünya Genelindeki Durumu

Rüzgar gücünün temiz ve sonsuz bir kaynak olması nedeniyle; rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri, önemi gittikçe artan teknolojilerden biri durumuna gelmiştir.

1970'lerdeki petrol şoku nedeniyle, başka enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar ve çalışmalar hızlanmış; sonuçta da rüzgar enerjisinden elektrik elde edilmesi dönüşüm sistemleri ve elektrik enerjisi üretim maliyeti; fosil yakıtlı güç santralleriyle rekabet edebilecek düzeye inmiştir (Uyar, 1999).

Ayrıca, birincil enerji kaynakları olarak adlandırılan doğal kaynakların bazılarının ömrünün oldukça sınırlı olması, yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimine ağırlık verilmesine neden olmuştur.

Dünyada enerji potansiyeli açısından en fazla rezerv, taşkömüründe bulunurken, ardından; linyit, petrol ve doğal gaz sıralanmaktadır. Bugün dünyada enerji kullanımında son derece yoğun olarak kullanılan birincil enerji kaynaklarından petrol rezervlerinin; 2040 yılında, doğal gaz rezervlerinin ise 2055 yılında tükeneceği tahmin edilmektedir.

Bu durum çevre açısından daha zararlı olan ve birçok ülkede daha pahalı olan enerji kaynaklarına yönelme sonucunu doğurmuştur. Özellikle 80'li yılların başından itibaren gelişmiş ülkelerde başlayan nükleer enerji üretiminde artış sonucunda, 1980 yılında dünya enerji üretiminde %8,4 payı olan nükleer enerji üretimi, 1996 yılında %17'ye yükselmiştir.

Aynı dönem itibarıyla, dünya enerji üretiminin yaklaşık %19'u hidrolik kaynaklardan sağlanırken, kalan kısmı kömür, petrol ve doğal gaz arasında paylaşılmaktadır. 2010 yılında ise nükleer enerji payının %10 seviyelerine gerilemesi ve buna bağlı olarak başta rüzgar ve güneş enerjisi olmak üzere diğer enerji kaynaklarının kullanımında artış olması beklenmektedir.

Rüzgar, yerli bir kaynaktır. Petrol ve doğal gaz gibi ithal edilmesine gerek yoktur; bu sayede enerji meselesi yüzünden, dış ülkelere olan bağımlılığın ortadan kalkmasında önemli rol oynar. Rüzgar; sonsuz, sınırsız bir enerji kaynağıdır. Fosil yakıtlar ve uranyum gibi tükenir olmayıp, sağlıklı yaşam ve temiz çevre için çok önemli ve değerlendirilmesi gereken bir kaynaktır.

Rüzgar enerjisinin, gelişen teknolojiye paralel olarak, ekonomik değer kazanması, yaşam için bir ümit olmuştur. Dünyamızda oluşan, iki milyar MW' lık rüzgar gücünün ancak çok az bir bölümünden yararlanılabilmesi, yakın tarihlerde, ilgiyi bu alana kaydıracaktır. Rüzgar gücünün belirgin yararları:

- Yenilenebilir olması
- Kirliliğe sebep vermemesi
- Ucuz olması
- Ticari boyutunun giderek genişlemesi
- Her yere kurulabilir olması

- Yan sanayi terimleri ile büyük üreticilerin giderek uyumlu hale gelmesi
- Fosil yakıtlarına bir alternatif olması
- Tükenmemesi
- Çevre dostu olması
- Tarımsal faaliyetleri olumsuz etkilememesi
- Ekolojik dengeyi koruması
- Yatırım ve yer değiştirme maliyetlerinin düşük olması

Rüzgar enerjisinin dezavantajları ise;

- Görüntü kirliliği yaratabilir.
- Gürültü kirliliği yaratabilir.
- Radyo ve TV sinyallerini bozabilir.
- Kuş göç yollarında, kuşlara zarar verebilir.
- Rüzgar türbinlerinin büyük yer kaplaması
- Yatırım maliyetlerinin yüksek olması
- Kullanım ömrü dolan kompozit parçaların doğada geri dönüştürülmesinin mümkün olmaması
- Rüzgârın sürekliliği olmadığı için enerji üretim değerinin sabit olmaması

Yapılan araştırmalara göre, Türkiye'deki toplam elektrik enerjisi tüketiminin en az iki mislinin rüzgar enerjisinden sağlanabileceği, bilim adamlarınca öngörülmektedir (Uyar, 1999).

Çizelge 3.1 kWh enerjinin üretim maliyeti (AREB-TŞ, 1999)

Güç Kaynağı	Minimum (cent)	Maksimum (cent)	Ortalama (cent)
Solar termal hibrid	6.0	7.8	6.9
Nükleer	5.3	9.3	7.3
Doğal Gaz	4.4	5.0	4.7
Hidrolik	5.2	18.9	12.1
Rüzgar	4.7	7.2	6.0
Kömür	4.5	7.0	5.8
Jeotermal	4.3	6.8	5.6
Biomass	4.2	7.9	6.1

Rüzgar yeni bir teknoloji olmasına rağmen maliyeti, geleneksel üretimlere göre daha hızlı düşmektedir. Rüzgar türbinlerinin tasarım ömrü 20 yıl olup, işletme ve bakım maliyetleri yatırım maliyetlerinin %2-3' ü kadardır. Ayrıca yakıt maliyeti olmadığından doğal gaz, petrol ve uranyuma benzer temin ve fiyat artışı riskleri yoktur (Uyar, 1998).

Dünyada; ABD, Almanya ve Danimarka başta olmak üzere birçok ülke, rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisi üretmekte ve var olan kurulu gücünü arttırma yolunda çalışmalarına devam etmektedir. Sistem kuruluş maliyetlerinin son yıllarda hızla düşmesi sonucu rüzgar potansiyeline sahip diğer ülkeler de yatırım planları yapmaktadır.

Türkiye'nin taşkömürü rezervi 428 milyonu görünür olmak üzere, 1.127 milyon tondur. Yıllık üretim 2,5-3 milyon ton olup, 8-9 milyon tonluk ihtiyacın üçte ikisi ithalatla karşılanmaktadır.

Ülkemizin hidrolik enerji brüt potansiyeli, 433 milyar kWh/yıl, teknik potansiyeli 216 milyar kWh/yıl olarak belirlenmiştir. 125,2 milyar kWh/yıl olarak belirlenen ekonomik potansiyele karşı gelen güç 35.440 MW, güvenilir enerji üretim potansiyeli ise 80,7 milyar kWh/ yıl'dır.

Artan enerji gereksinimi dolayısıyla linyit ve hidrolik enerji kullanımı çok hızlanacak ve linyit kaynakları 2015'de hidrolik potansiyel ise 2020'de tamamen kullanılmış olacaktır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve TEAŞ tarafından yapılan elektrik enerjisi planlaması

alışmalarına göre brüt ve net talep, üretim için gerekli kurulu güç ve puant güç değerleri izelge 3.2'de yer almaktadır.

Çizelge 3. 2 Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve TEAŞ tarafından yapılan elektrik enerjisi planlama çalışması (ltanır, 1999)

Yıllar	Brüt Talep (GWh)	Net Talep (GWh)	Kurulu G (MW)	Puant G (MW)
2010	289.820	257.687	64.703	45.802
2015	398.168	356.306	85.602	64.443
2020	547.060	492.666	108.999	88.007
2023	639.045	576.455	124.235	104.508
2025	708.952	640.248	134.892	116.463

Özellikle fosil yakıtlı kaynakların kullanılması, büyük ölçüde hava ve evre kirlenmesine yol açmaktadır. Bu yüzden yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları gün geçtikçe önem kazanmaktadır.

3.2 Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi

Çeşitli ülkelerce hazırlanıp kullanıma sunulan ve bir alandaki rüzgar ölçüm parametrelerini kullanarak rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesine yardımcı olan bilgisayar programları mevcuttur. Bu bilgisayar programların başında Danimarka RISQ Ulusal Laboratuvarında geliştirilmiş olan ve Avrupa kıtasının rüzgar atlasının hazırlanmasında kullanılan WASP (Rüzgar Atlası Analiz ve Uygulama Programı) bilgisayar programı gelmektedir. WASP bilgisayar programı rüzgar hız ve yn bilgileri ile rüzgar gözlem istasyonu çevresindeki engellerden, arazi yüzey pürüzlülüğü ve arazinin topoğrafik özelliklerinden yola çıkarak bölgesel rüzgar atlas istatistiklerinin ve enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. WASP yazılımı ile bir bölgenin rüzgar enerji potansiyelini belirleyebilmek için aşığıda sıralanan işlem basamakları takip edilir:

3.2.1 Rüzgar Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi

Rüzgar enerji gözlem istasyonlarından belli bir yükseklikten alınan en az bir yıllık rüzgar hızı ve rüzgar yönü ölçüm kayıtlarının bilgisayar ortamında düzenlenmiş hali ve bu istasyonlara ait 1/25000 ölçekli harita üzerindeki UTM ile derece - dakika cinsinden belirlenmiş koordinatları WASP ortamına aktarılıp değerlendirilir ve ilk etapta ölçüm yüksekliğine ait frekans dağılım tablosu elde edilir. Bu tablo yardımıyla ölçüm yüksekliğindeki rüzgarın sektörlere (yönler) göre esme sıklığı, hakim rüzgar yönü, ortalama rüzgar hızı, ortalama enerji yoğunluğu ve rüzgar hız verilerine ait Weibull parametreleri gibi istatistiksel değerler belirlenmiş olur.

Frekans dağılım tablosundaki bilgiler kullanılarak frekans histogramı (rüzgar hızları - esme sıklıkları) ve yön histogramı (rüzgar esme yönü - esme sıklığı) da elde edilebilir. Frekans histogramı yardımıyla hangi rüzgar hızı değerlerinin sık gözlemlendiği, yön histogramı yardımıyla ise hangi yönlerde rüzgar hız değerlerinin yüksek olduğu tespit edilebilir. Rüzgar türbinleri seçilirken frekans histogramından, araziye konumlandırılırken ise yön histogramından yararlanılmaktadır.

Rüzgar ölçüm verilerinin incelenmesi sonucu, ölçüm yapılan noktanın türbülans yoğunluğu da ayrıca belirlenmelidir. Türbülans yoğunluğu seviyesinin yüksek olması enerji üretim miktarını düşürür, rüzgar türbini üzerine etkiyen kuvvetlerin şiddetini ve malzeme yorulmasının hızını artırır. Bu durum rüzgar enerji santrallerinin ekonomik ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Türbülans yoğunluğunun belirlenmesi için öncelikle rüzgar hız ölçüm serilerinin ortalama hızı ve standart sapması belirlenmelidir. Standart sapma önemli bir kavram olup rüzgar hızlarındaki dalgalanmaları tanımlamak için kullanılır. Rüzgar hız verilerinin standart sapması 0 ile 3 m/s, rüzgar yön verilerinin standart sapması ise 3° ile 75° arasında olmalıdır. Herhangi bir alandaki standart sapmanın küçük olması demek o alandaki rüzgar rejiminin son derece düzenli olması anlamına gelmektedir. Rüzgar 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 da ise orta yoğunluklu ve 0.25 değerinden büyükse yüksek yoğunluklu olarak sınıflandırılır. Türbülans yoğunluğunun yüksek olduğu alanlara rüzgar enerji santrali kurmaktan kaçınılmalıdır.

3.2.2 Yakın Çevresel Engel Bilgileri

Rüzgar gözlem istasyonları civarındaki yakın çevresel engeller, ölçülen rüzgar hız ve yön değerlerini kayda değer ölçüde etkilemektedir. Binalar, ağaçlar gibi yakın çevresel engeller rüzgar hız ve yön profilini oldukça değiştirmekte, engel etrafında türbülansa neden olmakta ve rüzgar verilerinin sağlıklı olmasını engellemektedir. Bu nedenle rüzgar gözlem istasyonlarının yeri, civarda fazla engel olmayacak şekilde seçilmelidir. Bir nesnenin ölçüm direğine olan uzaklığı, yüksekliğinin 10 katı kadar mesafe içinde ise bu nesne yakın çevresel engel olarak tanımlanır. Daha uzak mesafedeki nesneler engel sınıfına girmez ve arazi pürüzlülüğü olarak değerlendirilir. WASP bilgisayar programı ile en fazla 50 adet engel tanımlanabilse de prensip olarak sayıca 5'ten fazla engel içeren noktalara rüzgar gözlem istasyonu kurulması önerilmemektedir.

Rüzgar hızındaki azalma engelin geçirgenliğine bağlıdır. Geçirgenlik (porosity) 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. Geçirgenlik ne kadar fazlaysa hız profilinin değişimi ve gölgeleme etkisi de o nispette az olacaktır. Rüzgar gözlem istasyonları civarındaki mevcut yakın çevresel engelleri tanımlayabilmek için ilgili parametreler belirlenerek WASP formatına uygun "Engel Tanımlama Formu" düzenlenmelidir.

Rüzgar türbinlerinden üretilebilecek enerji miktarını doğruya yakın bir şekilde hesap edebilmek için özellikle hakim rüzgar yönünde en az 1000 m mesafeye kadar olan engeller net olarak belirlenmelidir. WASP bilgisayar programı yardımıyla santral sahasının rüzgar atlası elde edildiğinde, türbin hub yüksekliğinde engel etkisinin %40'ı aşmaması gerekmektedir. Aksi halde, seçilen bölgenin rüzgar enerji santrali kurmak için uygun olmadığını düşünmemiz gerekecektir. Ayrıca arazi üzerine türbinler yerleştirilirken (micrositting) mevcut engellerden mümkün olduğunca uzak yerler tercih edilmelidir.

3.2.3 Arazi Yüzey Pürüzlülük Bilgileri

Arazi yüzey pürüzlülüğünün değişmesi yüzey sürtünme karakteristiklerini ve dolayısıyla hız profilini değiştirmektedir. Bir alanın yüzey pürüzlülüğü, bu alan üzerindeki pürüzlülük elemanlarının boyutları ve alan içindeki dağılımına bağlı olmaktadır. Karasal alanlar için bitki örtüleri, göller, yerleşim yerleri, doğal arazi yapıları tipik pürüzlülük elemanlarıdır. Bu

pürüzlülük elemanları, rüzgar enerjisi potansiyel belirleme çalışmalarında 4 değişik pürüzlülük sınıfıyla tanımlanır. Bir arazinin pürüzlülüğü Z_0 (m) pürüzlülük uzunluğu parametresi ile belirtilir. Z_0 pürüzlülük uzunluğu 0.0001 ile 1.0 arasında değişmekte olup yoğun yerleşim birimleri için 1.0 ve su yüzeyleri için 0.0001 olarak alınır. Diğer doğal arazi yapıları için alınması gereken Z_0 pürüzlülük uzunluğu değerleri WASP menüsünde bulunan tablodan belirlenir.

WASP bilgisayar programı pürüzlülüğü modellemek için her bir sektöre ait pürüzlülük değişimini dikkate alır. 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.

Rüzgar hızı, yükseklik arttıkça arazi pürüzlülüğüne (α pürüzlülük katsayısı) bağlı olarak logaritmik şekilde artmaktadır. Belirli bir yükseklikte (10 m, 30 m vb.) ölçülmüş rüzgar hızları kullanılarak, istenilen herhangi bir yükseklikteki (hub yüksekliği vb.) rüzgar hızları aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır.

$$(V_1/V_2) = (H_1/H_2)^\alpha$$

H_1 : V_1 hızının ölçüldüğü yükseklik

H_2 : V_2 hızının hesaplanacağı yükseklik

V_1 : H_1 yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı

V_2 : H_2 yüksekliği için hesaplanacak rüzgar hızı

α : Pürüzlülük katsayısı (0.10 -0.40) dır.

α pürüzlülük katsayısı değeri ne kadar fazlaysa hız profilinin değişimi de o nispette fazla olacaktır. Hız profilindeki değişim ancak türbin hub yüksekliğinin artırılması ile azalmakta ve bu durum da maliyeti artırıcı unsur olmaktadır.

3.2.4 Topografya Bilgisi

Topografya rüzgarın yönü ve hızının dağılımında önemli bir rol oynar. Dağ silsileleri, tepeler ve kayalıklar rüzgar hız ve yön profilini büyük ölçüde etkiler. Dağ silsilelerinin denize paralel, hakim rüzgar yönüne dik, orta eğimli (10° - 22°) ve özellikle çıplak olduğu sahalar enerji üretimi için uygun sahalardır. Zirvede rüzgar hızı, eğim ve dağ grubunun büyüklüğüne bağlı olarak artar. Bu nedenle, tepelerin üst-ön kısmı tesis için uygundur. Fakat tepenin üst-arka kısmı türbülans nedeniyle göz önüne alınmamalıdır.

Rüzgar enerji santralı 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. Sayısal haritanın çok dikkatli hazırlanmış olması rüzgar enerji potansiyelinin de doğruya yakın bir değer olarak elde edilmesini sağlar.

3.3 Santral Sahası İçin Rüzgar Atlasının Oluşturulması

Belirli bir ölçüm yüksekliğine ait yeterli sayıda rüzgar hız ve yön verilerinden elde edilen frekans dağılım tablosu, yakın çevresel engel ve pürüzlülük bilgileri ve santral alanının topografyasını temsil eden 1/25000 ölçekli sayısallaştırılmış harita kullanarak WASP bilgisayar programı yardımıyla santral alanına ait rüzgar atlas istatistikleri çıkarılır. Rüzgar atlası, yer seviyesinden belli bir yükseklikte (10 m, 30 m vb.) ölçülmüş rüzgar verilerinin, yakın çevresel engeller, arazi pürüzlülüğü ve arazinin topografik yapısı ile birlikte değerlendirilmesi sonucu istenilen bir yükseklik için (türbin hub yüksekliği vb.) elde edilen istatistiksel sonuçlardır. Rüzgar atlas istatistiklerinin elde edilmesi ile istenilen herhangi bir yükseklikteki ortalama rüzgar hızı, sektörlere göre rüzgar esme sıklığı, hakim rüzgar yönü, ortalama enerji yoğunluğu, enerji yoğunluğunun hakim olduğu sektör gibi parametreler ile yakın çevresel engeller ve arazi pürüzlülüğünün etkileri belirlenmiş olur.

Rüzgar türbinlerinin santral sahasına konumlandırılması planlanırken rüzgar atlasından yararlanılmaktadır. WASP 6.0 ve üstü versiyonlarındaki bilgisayar programları ve rüzgar atlas istatistikleri kullanılarak, sayısal harita üzerinde enerji üretim miktarının yüksek olacağı konumlar renk dağılımından elde edilebilir. Her bir rüzgar türbininin optimum yeri; arazi

yapısı, ulaşım imkanları, hakim rüzgar yönü gibi unsurlar da dikkate alınarak bahsedilen renk dağılımları yardımıyla belirlenebilir.

3.4 Rüzgar Enerjisi Teknolojilerinde Türkiye'deki Durum ve Gelişmeler

Üç tarafının denizlerle çevrili olması nedeniyle oldukça iyi bir rüzgar potansiyeline sahip ülkemizin, bu hem ücretsiz hem de dış ülkelere bağımlılık yaratmayan kaynağı değerlendirmek amacıyla, rüzgar enerjisi teknolojilerine daha fazla önem vermesinin gerekliliği göze çarpmaktadır.

Türkiye, şu anda elektrik enerjisinin %60'ını doğal gaz ve petrol olarak ithal etmekte olup, bunun yakın zamanlardaki enerji artışlarına paralel olarak %75'lere çıkması, tahmin edilebilecek bir sonuçtur.

Doğal gaz ithalatı; ülkemizi hem dış ülkelere bağımlı bırakmakta hem de tükenir bir kaynak olduğu için fiyatının artması açısından olumsuzluk yaratmaktadır. Zaten doğal gazın tükenecek bir kaynak olması, yalnız ülkemiz için değil, bu kaynaktan yararlanan Avrupa ülkeleri ve ABD için de bir risk teşkil etmektedir.

Ülkemizin batı sahilleri, rüzgar türbinlerinin kurulması için en elverişli kesimler olarak düşünülmektedir. Ayrıca, enerji tüketiminin de batı bölgelerinde daha yoğun olması dolayısıyla enerjinin taşınması sırasında oluşan kayıplar da önlenmiş olacaktır. Çünkü doğudan batıya, örneğin bir barajdan enerji taşınması sırasında %18'lere varan kayıplar oluşmaktadır.

Türkiye'nin yenilenebilir kaynaklar dışında kullanabileceği öz kaynaklar; linyit, su ve taşkömürüdür. Linyitle çalışan termik santraller, çevre sorunlarına sebep olurken, taşkömürü ise oldukça sınırlı bir kaynak durumundadır. Barajların yapımının uzun sürmesi de birtakım sıkıntılara sebep olmaktadır.

Rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde en büyük gelişimi Almanya göstermektedir. Almanya; dünyanın en büyük üreticisi olma yolundadır. Birkaç yüz kilometre sahili olan Almanya'da böyle bir gelişme mevcut olabiliyorsa, binlerce kilometre sahili olan ülkemizin potansiyelinin ciddi anlamda değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalardan çıkan sonuçlara göre; Afyon, Akhisar, Alaçatı, Anamur,

Antakya, Bandırma, Belen, Bozcaada, Bozkurt, Çanakkale, Çeşme, Çorlu, Datça, Didim, Dikili, Edremit, Erdek, Erzurum, Foça, Gökçeada, Haymana, İnebolu, Karabiga, Karaburun, Karaman, Kocadağ, Kumköy, Malatya, Mardin, Nurdağ, Pozantı, Samsun, Seydişehir, Silifke, Sinop, Söke, Şarköy, Tekir Yaylası, Ulukışla, Urla, Yalıkavak yöreleri rüzgar enerjisi bakımından zengin görülmektedir. Buralarda rüzgar ölçümleri geliştirilerek ve başka yerlerde de ölçümler yapılarak, rüzgar potansiyeli açısından verimliliklerinin belirlenmesi ile ilk etapta Ege ve Marmara kıyılarında başlayan çalışmalar, böylece Türkiye'nin diğer yörelerine de yayılmış olacaktır.

Yurt genelindeki bazı bölgelerde, 10 metre yükseklikte yapılan ölçümlere göre yıllık ortalama rüzgar hızları şöyledir:

	(m/s)
Kocadağ (Çeşme)	:9,28
Şenköy (Hatay)	:7,69
Gökçeada	:7,03
Belen (İskenderun)	:7,01
Nurdağı (K.Maraş)	:7.00
Akhisar	:6,84
Karabiga (Çeşme)	:6,52
Datça	:5,85
Yalıkavak (Bodrum)	:5,68
Göktepe (Bitlis)	:5,66
Bandırma	:5,12

Söke	:5,00
Didim	:4,81
Sinop	:4,73
Zenger (Bor)	:3,54

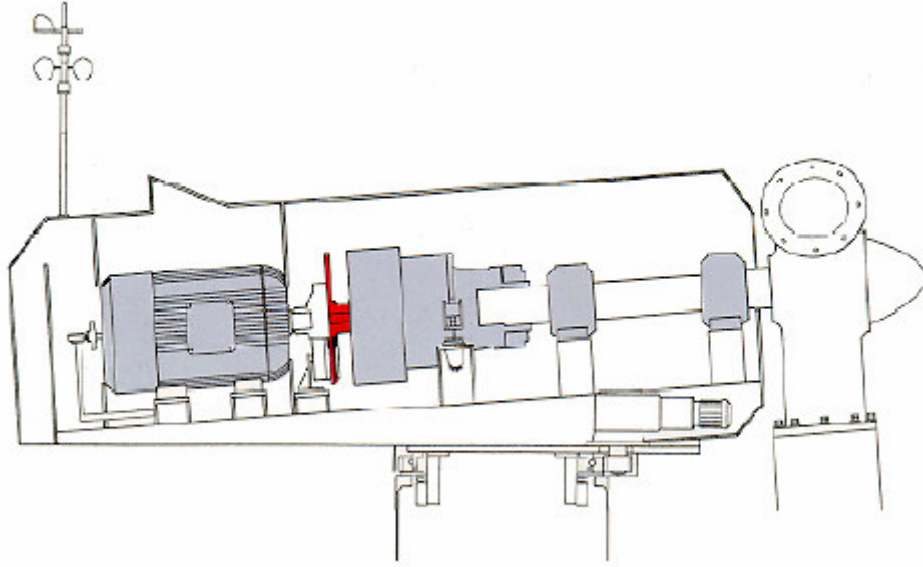
Ege'de, kıta sahanlığı üzerindeki kayalıklar doğal zemin oluşturarak karadakine kıyasla az bir maliyet farkıyla deniz üstü rüzgar santralleri kurulabilmesi mümkündür.

3.5 Rüzgar Santralleri Teknolojisi

Rüzgar santralinin ana yapı elemanı aerogeneratör de denilen rüzgar türbinidir. Bir rüzgar türbini; kanatların, göbeğin ve milin bağlandığı rotor, vites kutusu, frenleme mekanizması, generatör, kule, denetim ve güvenlik sistemlerinden oluşan alt sistemlerden oluşur. Türbinin gövde içi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Rüzgar türbinleri, yatay eksenli veya dikey eksenli olarak üretilirler. Türbin tipleri daha sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Bir rüzgar türbininde, güç üretiminin temel prensibini, kanatlara gelen rüzgarın oluşturduğu moment teşkil etmektedir. Kanatlar aracılığıyla bir vites kutusu üzerinden rotora ulaştırılan güç en büyük oranda, rüzgar hızına bağlıdır. Çünkü rüzgar hızı, çıkış gücünü kübü oranında etkilemektedir.



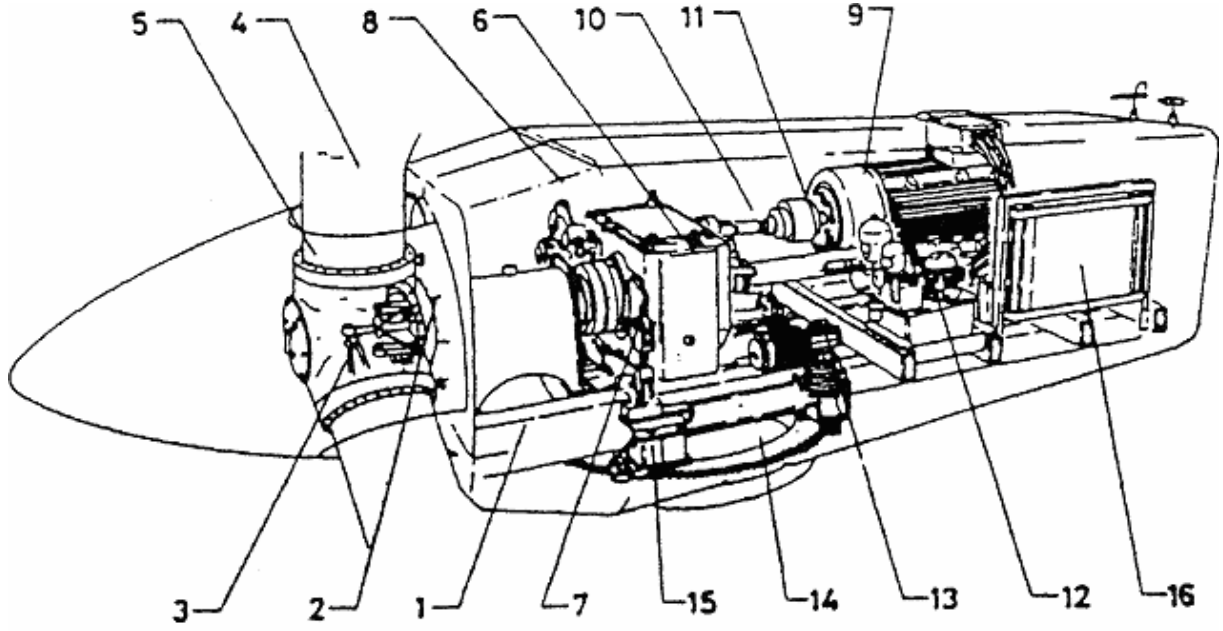
Şekil 3.1 Türbin gövde içi

Rüzgarın oluşturduğu moment, pervaneyi dişli çark düzenine bağlayan ve düşük devirle dönen bir mil üzerine aktarılır. Bu mil üzerinde, hidrolik ünitenin frenleme mekanizması için gerekli iletim boruları da bulunmaktadır. Aktarılan moment, bir dişli çark kutusu üzerinden 1.500 d/d hızla dönen bir başka mile iletilir. Bu mil doğrudan generatörü tahrik eder ve üzerinde, hidrolik frenleme ünitesinin çalışmaması durumunda acil frenleme yapabilmek amacıyla bir mekanik fren sistemi de bulunmaktadır.

Generatör, senkron veya asenkron olarak seçilebilir. Asenkron generatörler, basit ve ucuz olmalarına rağmen şebekeden reaktif güç çekmeleri dezavantajlarıdır. Senkron generatörlerin ise reaktif güç problemi olmamasına karşın, bunlar da pahalıdır. Kullanımdaki türbinlerin çoğunda asenkron generatörler kullanılmaktadır.

Rüzgarın tam olarak karşıdan alınabilmesi amacıyla, türbin içerisindeki ayar mekanizması aracılığıyla türbinin yönü birkaç derece kadar döndürülebilir. Bunun için bir elektronik kumanda sistemi, türbin üzerindeki anemometre ve ilgili cihazlarla bağlantı kurarak ayar mekanizmasını yönlendirir.

Generatörün soğutulmasını sağlamak amacıyla sistemde bir de havalandırma ünitesi mevcuttur.



1 .Makine şasesi, 2. Ana mil (şaft), 3. Göbek (hub), 4. Kanat, 5. Döküm çelik bağlantı ucu, 6, Dişli kutusu 7. Dişli bağlama çubuğu, 8. Disk fren, 9. Generatör, 10. Kardan mili, 11. Kavrama, 12. Hidrolik ünite, 13. Yav dişlisi, 14. Yav halkası, 15. Yav kontrol, 16. Kontrol ünitesi.

Şekil 3.2 Bir rüzgar türbini teknesinin içi (Ültanır, 1999).

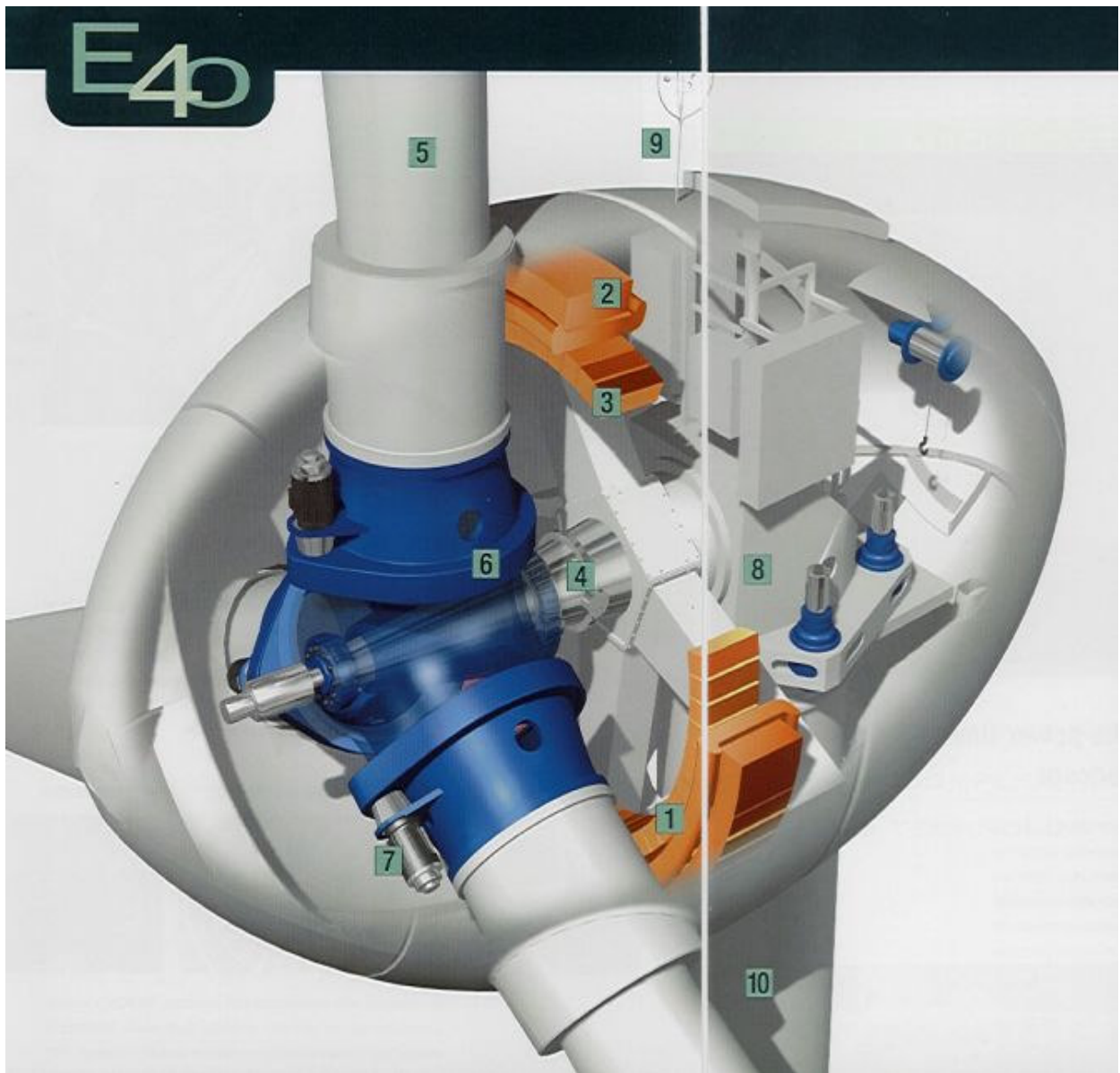
Bir türbinin gücü; rüzgar hızının, rotor süpürme alanının ve güç faktörünün (iyilik derecesinin) bir fonksiyonudur. Üretilecek güç; analitik olarak güç faktörü, süpürme alanı ve rüzgar hızının kübü ile doğru orantılıdır.

Aynı çaplı değişik rotorların güç karakteristik eğrileri birbirinden farklı olmaktadır. Rüzgar hızı yükseklikle arttığından, aynı çaplı bir rüzgar rotorunun daha yüksek bir kuleye yerleştirilmesi ile elde edilebilecek güç artmakta ise de, kule kütesinin ve maliyetinin artması bir sınır koymaktadır. Türbinden bir yıl boyunca üretilebilecek enerji ise yıllık ortalama rüzgar hızına ve rüzgar frekansına bağlıdır.

3.6 Türbin Tipleri

Türbinler; dönüş eksenlerinin doğrultusuna göre, yatay eksenli ve dikey eksenli türbinler olarak ikiye ayrılmasına rağmen, şu anda kullanımda olan ve üretilen türbinlerin büyük

Dikey eksenli türbinler, rüzgarın esiş yönünden bağımsız çalışabilme avantajlarına rağmen henüz yüksek güçlerde üretilmemektedir. Orta güçlerdeki dikey eksenli rüzgar türbinleriyle ise daha verimli bir işletme elde edilebilmektedir



25

Türbinin teknik yapısı;

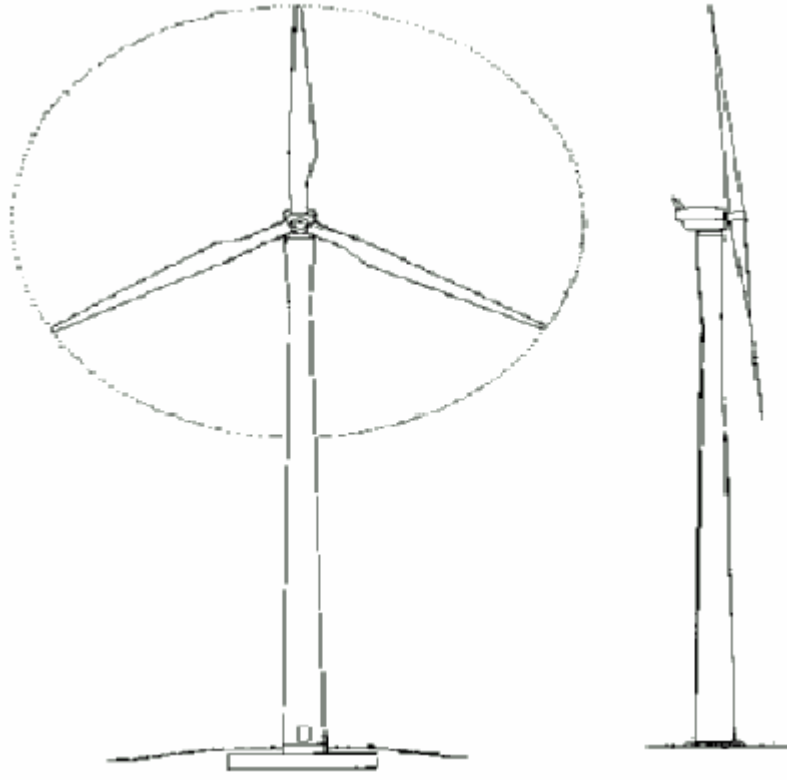
1. Jeneratör kanatlardan gelen mekanik enerjiyi 2. stator ve 3. rotor arasında elektrik enerjisine dönüştürür 4. Ana mil kanatları taşır 5. Kanatlar rüzgarın enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür 6. Kanat flanşı ve 7. Kanat çevirme motoru kanadın ideal açısını ayarlar 8. Kabin çevirme motoru 9. Rüzgar ölçüm sensöründen gelen bilgilere göre kabin önünü rüzgara çevirir.

3.6.1 Pervane Kanat Sayılarına Göre Türbin Çeşitleri

Daha önceleri, tek-kanatlı ve 2-kanatlı rüzgar türbinlerinin yaygın olarak kullanılmasına karşın, günümüzde en fazla 3-kanatlı rüzgar türbinler kullanılmaktadır. Bunların çeşitli fayda ve zararları bulunmaktadır. İzleyen kısımlarda bunlar üzerinde durulacaktır.

3.6.1.1 Üç-kanatlı Rüzgar Türbini

Modern rüzgar türbinlerinde en çok kullanılan model üç kanatlı olandır (Şekil 3.3). Bunun temel nedeni, pervanenin tüm hızlarda sabit atalet momentine sahip olmasıdır. Üç veya daha fazla kanada sahip olan tüm pervaneler bu avantaja sahiptir. Ayrıca, üç kanatlı pervane bu avantajlarından dolayı türbinler üzerinde ek bir yük getirmemektedir.



Şekil 3.4 Üç kanatlı rüzgar türbini

3.6.1.2 İki-kanatlı Rüzgar Türbini

20 yıl öncesine kadar iki kanatlı rüzgar türbinleri yaygın bir şekilde kullanılırdı. 10 m' den 100 m' ye kadar değişen farklı pervane çaplarında Avrupa ve Amerika'da kullanılmıştır. 2-kanatlı rüzgar türbini, 3-kanatlı rüzgar türbininden daha ekonomik gibi görünmesine rağmen, 2-kanatlı rüzgar türbininden dinamik etkilerden dolayı bir takım ek ekipmanlar getirdiğinden, 3-kanatlı rüzgar türbini ile aynı maliyete gelmektedir. 3-kanatlı rüzgar türbininden farklı olarak dönmeden meydana gelen ve kulinin yatay eksenine göre olan bir atalet momentine sahiptir. Bu durum rüzgar türbini üzerinde ek bir yüklenme meydana getirir ve sadece sallanan göbek (teetering hub) ile giderilebilir. Sallanan göbek kullanılmasının nedeni, dönen pervane üzerinde büyük atalet moment değişimlerinin etkilerini önlemektir. Ayrıca düşük şiddetteki rüzgar hızlarında (örneğin 3 m/s) pervane devreye girememektedir.

3.6.1.3 Tek-kanatlı Rüzgar Türbini

Tek kanatlı rüzgar türbinlerinin kullanımının temel amacı, pervanelere etkiyen yüksek rotasyonel hızın düşürülmesidir. Diğer yandan, tek -kanatlı rüzgar türbini aerodinamik olarak dengesizdir ve bu durumda ek hareketler ile istenmeyen bazı yüklere sebep olur. Bu mekanizmayı kontrol etmek için, göbek kısmına ek yapılar gerektirir. Diğer dezavantajlarından birisi de, yüksek aerodinamik gürültü seviyesidir. Uç hız oranı, 120 m/s civarındaki üç kanatlı pervanelerle kıyaslandığında, uç hızı iki kat yüksektir. Dolayısıyla 3-kanatlı rüzgar türbinlerinden daha gürültülüdür.

3.6.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Eole C, Kanada Çap Chat, Quebec'deki 100 m rotor çaplı, 4200 kW'lık dikey eksenli Darrieus Rüzgar türbini; dünyanın en büyük rüzgar türbini olan bu makine şu anda kullanılmamaktadır.

Klasik su çarkları, suyun rotasyonel eksene dik açıyla ulaşmasını sağlamaktadır. Bu anlamda dikey eksenli rüzgar türbinleri (diğer bir deyişle VAWT-Vertical Axis Wind Türbine-) bir açıdan su çarklarına benzerler. Bazı dikey eksenli türbinler, yatay bir eksenle de çalışabilir, ancak bu şekilde pervane tipi türbinlerin verimine ulaşamazlar.

Ticari amaçla üretilmiş tek dikey eksenli türbin, 1931 yılında, Fransız bir mühendis olan Georges Darrieus tarafından inşa edilen Darrieus'dur. (Flo Wind isimli, 1997 yılında iflas eden Amerikalı bir şirket tarafından üretilmiştir.) Darrieus'un C şeklinde rotor kanatları onun bir yumurta kıracağına benzemesine yol açar. Darrieus çoğunlukla iki yada üç kanatlı olarak üretilir.

Dikey eksenli makinelerin temel teorik avantajları şöyledir:

1. Generatörü, dişli kutusunu, vs. yere yerleştirebilirsiniz ve makine için bir kuleye ihtiyaç duymazsınız.
2. Rotoru rüzgara karşı çevirmek için bir sapma mekanizmasına ihtiyacınız yoktur.

Temel bazı dezavantajlar ise şöyledir:

1. Rüzgar hızı toprağa yakın seviyelerde düşüktür, dolayısıyla bir kuleden tasarruf edilmesine rağmen, rüzgar, rotorun alt kısımları için çok düşük olabilir.
2. Dikey eksenli makinelerin genel verimliliği etkili değildir.

3. Makine kendi kendine çalışamaz. (ör: Darrieus çalışmak için bir itme hareketine ihtiyaç duyar. Bu, ancak generatörü, makineyi çalıştırmak üzere şebekeden akım çeken bir motor olarak kullandığımızda, şebeke bağıntılı bir türbin için küçük bir sorundur).
4. Makineyi tutmak için çelik tellere ihtiyaç duyulabilir ancak bu teller yoğun alanlarda kullanışlı değildir.
5. Ana yatağı rotor ile yer değiştirmek, rotorun hem yatay hem de dikey eksenenden çıkarılmasını gerekli kılar ki bu da tüm makineyi parçalara ayırmayı gerektirir.

3.6.3 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

3.6.3.1 Üst Rüzgarlı (Upwind) Türbinler

Üst rüzgarlı türbinlerde rotor, rüzgar tarafına bakar, bu dizaynın temel avantajı kulenin arkasındaki rüzgar gölgesini önlemesidir. Rüzgar türbinlerinin çoğu bu dizayna sahiptir.

Bunun yanında, kulenin önünde de bir rüzgar gölgesi oluşur. Şöyle ki rüzgar, kule yuvarlak olsa da kuleden uzakta, oraya ulaşmadan kırılmaya başlar, bu yüzden rotor kanatlarının kuleyi her geçişinde, rüzgar türbininden elde edilen güç biraz azalır.

Üst rüzgarlı türbinlerdeki temel sakınca, rotorun daha az esnek olma ihtiyacı ve kuleden biraz uzağa yerleştirilmesi gereğinden kaynaklanır ki bazı üreticiler bunu yüksek maliyetli bulurlar, bunlara ek olarak bir üst rüzgarlı türbin, rotoru rüzgara karşı tutabilmek için bir sapma mekanizmasına ihtiyaç duyar.

3.6.3.2 Alt Rüzgarlı (Downwind) Türbinler

Alt rüzgarlı türbinler, rotor kulenin rüzgar altı tarafındadır. Bunlar, eğer rotor ve gövde, gövdenin rüzgarı pasif bir biçimde izlemesine uygun bir dizayna sahipse, sapma makinesi olmadan da inşa edilebileceğine ilişkin teorik bir avantaja sahiptir. Bu avantaj büyük rüzgar türbinleri için ekstradan çizelgelere ihtiyaç vardır.

Daha önemli bir avantaj olarak rotorun daha esnek yapılabilmesi karşımıza çıkar. Bu hem ağırlık hem de makinenin dinamik gücü düşünüldüğünde bir avantajdır. Örneğin kanatlar kuleden, yükün bir kısmını alarak yüksek rüzgar hızında bükülecektir. Bu yüzden alt rüzgarlı

türbinlerin temel avantajı üst rüzgarlı türbinlerden daha hafif olmasıdır. Temel sakınca ise kulenin rüzgar gölgesinden geçen rotora karşılık rüzgar gücündeki değişimdir. Bu da, türbine, üst rüzgarlı türbin dizaynından daha fazla yük bindirebilir.

4. KURULUŞ YERİ

Rüzgar türbini veya türbinlerinin konuşlandırılması, büyük bir mühendislik çalışmasıdır. Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük potansiyele ve kullanım alanına sahiptir. Teknolojik gelişimin hızla sürdüğü rüzgar enerjisi endüstrisinde, üretilen elektriğin oldukça ekonomik oluşu da bu enerjiye olan ilgiyi kaçınılmaz hale getirmektedir.

Hızla gelişen bu endüstride gerçekçi bir yatırım için yapılması gereken incelemeler şöyle sıralanabilir; rüzgar çiftliğinin kurulacağı bölgenin belirlenmesi, bölgenin ön değerlendirmesi, rüzgar verisi gözlemleri veri analizi, rüzgar yapısı modellenmesi, mikro konuşlandırma, altyapı tasarımı, türbin seçimi, enerji üretim değerlendirmesi, ekonomik analiz ve çevre etki değerlendirmesi.

Bugünkü tüketim oranları baz alınarak yapılan hesaplamalara göre, günümüzde yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlardan kömürün 230, petrolün 35 ve doğalgazın 60 yıl sonra tükeneceği belirtilmektedir. Bunların neden olduğu çevre kirliliği de göz önünde bulundurulduğu zaman yüksek nüfus artışı oranına sahip Türkiye'nin yakın bir gelecekte mümkün olan bütün enerji kaynaklarına ihtiyaç duyacağı inkar edilemez bir gerçektir. Bugünkü enerji planlamaları ve bunların sonucunda yüz yüze gelinen çevreci karşı çıkışlar, gerek fosil yakıt kullanan santrallerin, gerekse geleceği halen açıklık kazanmayan nükleer enerji kullanımının önünü tıkamaktadır. Bunun yerine yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmakta ve bunların kullanımını desteklemektedir.

Bu enerjiden en ekonomik ve en verimli düzeyde yararlanabilmek için, ilk yatırım maliyetinin yüksek oluşu da dikkate alınarak kapsamlı fizibilite çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bu bölümde, rüzgar santrallerinin kurulmasında en önemli olan faktör olan, türbin yerleştirme alanlarını belirlenmesine ilişkin bilgiler verilecektir. Rüzgar santrallerine, rüzgar parkları veya rüzgar çiftlikleri adı da verilmektedir. Bu tezde, rüzgar çiftliği tanımı esas alınmıştır. Rüzgar çiftliklerinin kurulmasında izlenen yollar, özet halinde bu bölümde verilmiştir. Genellikle, rüzgar enerjisi tasarımcıları, kuruluş yeri seçiminde onbir temel kriter üzerinden hareket ederler.

4.1 Kuruluş Yeri Seçim Kriterleri

Rüzgar enerjisinin değerlendirilebilmesi için, kurulacak rüzgar santralinin yeri çok önemlidir. Kuruluş yeri belirlemede onbir temel parametre dikkate alınmalıdır. Bu parametreler aşağıda özetlenmiştir.

4.1.1 Rüzgarın Ortalama Hızı

Doğanın kendisine bakmak çoğunlukla uygun bir rüzgar türbin alanı bulmak için mükemmel bir rehberdir. Alanda ağaçlar ve çalılar varsa etkin rüzgar yönü hakkında iyi bir ipucu elde edebilirsiniz. Engebeli bir kıyı boyunca ilerlerken, belirli bir yönde yüzyıllar boyunca olan erozyon fark edilebilir. Yatırım yeri için; meteorolojinin otuz yıllık verilerine dayanarak geliştirilen rüzgar gülü muhtemelen en iyi rehber olacaktır. Ancak, otuz yıllık güvenilir verilere ulaşmak oldukça zordur. Kuruluş yerlerine yakın alanlarda, muhtemel rüzgar türbinleri üretim sonuçları yerel rüzgar şartları için önemli bir kaynak olacaktır. Danimarka ve Almanya gibi ülkelerde yaygın uygulamalar, komşu alanlarda yatırım yapacaklar için bir fırsattır. Türbinler yayıldıkça, rüzgar verilerine güvenirlilik de artacaktır.

Bir rüzgar çiftliğinin ekonomik uygulanabilirliği incelenirken dikkate alınacak en önemli parametre öngörülen uzun dönem ortalama rüzgar hızıdır. Bu, rüzgar çiftliğinin kurulması düşünülen bölgede yapılan ölçümlerle birlikte sayısal modellemelerden yararlanılması daha isabetli sonuçlar verecektir.

Belirlenecek uzun dönem ortalama rüzgar hızı değeri için yüksek bir güvenilirlik tesis etmek amacıyla çiftlik bölgesinde yapılacak gözlemlerle yakın civarda bulunan bir meteoroloji istasyonundan alınacak veri birlikte kullanılır. Çiftlik bölgesine bir rüzgar verisi ölçüm sistemi (anemometre) kurularak, ölçümler yapılır ve analiz edilir. Bu veri daha sonra meteoroloji istasyonundan elde edilen-aynı döneme ait- eş zamanlı veriyle karşılaştırılır. Elde edilen sonuçlar meteoroloji istasyonunda mevcut eski veriye uygulanarak, çiftlik kurulması düşünülen bölgenin uzun dönem rüzgar verisi elde edilmiş olunur. Bu inceleme programı, rüzgar hızının uzun dönem ortalamasının, hızın yıllara göre, aylık ve ortalama günlük değişiminin, rüzgar gülünün Weibull Parametreleri'nin (genel ve sektörel) ve türbülans yoğunluğu rejiminin belirlenmesini sağlar. Bu verilerin güvenilirlikleri, tamamen çiftlik alanında yapılan gözlemlerin kapsadığı zaman aralığına ve bu veriyle meteoroloji

istasyonundan elde edilen veri arasındaki korelasyonun derecesine bağlıdır. Yukarıda bahsedilen çıktılara, hata sınıfı belirlenerek, yetkinlik kazandırılabilir.

Rüzgar kaynağının belirlenmesi, kuruluş yerinde ilk aşamadır. Rüzgar hızları genellikle zemin pürüzlüklerinden, engellerden (ağaçlar, binalar) ya da diğer çevresel şartlardan etkilenir. Birçok durumda meteorolojik veriler gerçek durumun ve bölgedeki enerji potansiyelinin tespitinde yetersiz kalmaktadır. Kuruluş yerinde mevcut rüzgar gücü, santral tasarımına giren ilk ve en önemli parametredir. Bir alanın, potansiyel rüzgar enerji kuruluş yeri olarak seçilebilmesi için, yıllık ortalama rüzgar hızının 11-13 mil/saat düzeyinde olmalıdır. Bu hızın altında bir alan, rüzgar enerjisi için potansiyel kabul edilmez. Bölge rüzgar verileri, yakın civar meteoroloji ve havaalanı verileri ile desteklenmelidir. Ulusal rüzgar haritaları bu amaçla önemli ipuçları verebilir. Ancak, daha sağlıklı çözüm, yatırımcının ölçüm istasyonunu, konuşlandırması gereklidir.

Rüzgar perdesi de kuruluş yeri seçiminde önemli bir parametre olarak dikkate alınmaktadır. Hesaplayıcı bir rüzgar türbininin civarındaki herhangi bir 30 derecelik daire dilimi içindeki etkisiz engellerin (binalar, ağaçlar vs.) sığınma etkisini (rüzgar perdesini) göstermektedir.

Engel çok uzunsa (türbininizin göbek yüksekliğinin yarısından fazla) ya da çok yakınsa (engellerin yüksekliğinin 5 katından daha az), risk unsurları taşıdığını ifade eder. Engellerin detaylı geometrisi ve rüzgarın açısının sonuçları etkilemede büyük etkisi vardır.

Türbinin enerji çıktısını etkileyen tek unsurun belirli olan engel yönünden gelen rüzgar olması dolayısıyla, rüzgar gülü yönünden gelen rüzgar enerjisi yüzdesinin hesaba katılması gerekmektedir. Rüzgar perdesi hesaplamada kullanılan çeşitli yazılımlar geliştirilmiştir. Kuruluş yeri seçiminde, rüzgar perdesi için;

- Türbin Göbek Yüksekliği
- Türbinle Engeller Arasındaki Mesafe
- Düzgün Alanının Uzunluğu
- Düzgünlük Sınıfı
- Engel Yüksekliği
- Engel Genişliği
- Engel Dairesi Genişliği

- Boşluk

Parametrelerinin sayısal değerleri bilinmelidir. Türbin mühendisleri, çeşitli ampirik formüllerle veya programlarla, rüzgar perdesini kolayca hesaplayabilir.

Kıyı konuşlandırmalarında da en önemli parametreler, rüzgarın gücüdür. Kıyı konuşlandırmasının da kendine özgü ilave parametreleri vardır:

Denizde Rüzgar Şartları: Denizlerin ve göllerin yüzeylerinin düz olduğu aşık olup, deniz alanının sertliği (sabit rüzgar hızlarında) çok düşüktür. Artan rüzgarla beraber rüzgardaki bir kısım enerji dalga yapmada kullanılır. Örneğin düzensiz artışlar. Bir kez dalgalar oluştu mu, düzensizlik yine azalır. Böylelikle değişik düzensizlikte bir yüzeye sahip oluruz. Genel olarak, su yüzeyi düzensizliği düşük olup, rüzgara olan engeller azdır. Rüzgar hesaplamaları yaparken adaları ve fener kulelerini tıpkı arazi üzerinde düzensiz değişimlerde ve engellerde olduğu gibi dikkate almak gerekir.

Düşük Rüzgar Kesimi Düşük Poyra Yüksekliği Anlamına Gelir: Düşük düzensizliklerde, denizlerde rüzgar kesimi çok düşüktür. Örneğin rüzgar hızı rüzgar türbinlerinin poyra yüksekliğindeki farklılaşmalarla değişiklik göstermez. Bu yüzden mahalli şartları göz önüne alarak denizde kullanılacak rüzgar türbinleri için ortak yapının 0,75 katı kadarlık alçak kuleler kullanmak ekonomik olacaktır (Tipik olarak arazi alanlarındaki kuleler rotor çapı kadar boyutta veya daha yüksektir).

Düşük Türbülans Yoğunluğu (Türbinler İçin Daha Uzun Yaşam Şansı): Denizdeki rüzgar genellikle karadakinden daha az çalkantılıdır. Bu yüzden denize kurulmuş rüzgar türbinlerinin karadaki türbinlerden daha uzun ömürlü olması beklenir. Denizdeki düşük türbülans (çalkantı) deniz yüzeyinin üzerindeki atmosfer yüksekliklerindeki değişkenliklerin karadakinden daha düşük olmasındandır. Güneş ışığı deniz yüzeyinden metrelerce aşağı girerken (sızarken); karada güneşten gelen radyasyon, toprağın sadece üst yüzeyini ısıtır ki bu da daha ılık olmasını sağlar. Sonuç olarak yüzey ve hava arasındaki ısı farklılığı deniz üzerinde karadakinden daha az olacaktır. Bu da daha düşük türbülans demektir.

Denizde Rüzgar Gölgesi Şartları: Kıyı üstü (sahil üstü) rüzgar modellemesinde kullanılan geleneksel WASP modeli tasarımcısı Risq Ulusal Laboratuvarınca offshore rüzgar şartları için değiştirilme sürecindedir. Vindeby, Danimarka ilk önemli offshore rüzgar parkı deneyiminden alınan farklı üretim sonuçları, ve yine Tun&Knob, Danimarka 'da kurulu rüzgar parkı bilgileri, 1996 yılından beri Danimarka sularındaki birkaç offshore mahalde kurulan anemometer gemi direkleriyle yeni araştırmalara yol açmıştır. İlk sonuçlar, karadan rüzgar gölgesi etkileri, 120 kilometreden daha fazla olan yerlerde daha önce düşünülenlerden daha önemli olabilir. Diğer bir yandan, offshore rüzgar kaynağı daha önce tahmin edilen değerlerden %5-10 fazla olabilir.

Bir rüzgar çiftliğinin net enerji üretimi, projenin ekonomik açıdan uygulanabilirliğinin belirlenmesindeki anahtar faktörlerden birisidir. Bu, bilgisayar ortamında hazırlanan modeller kullanılarak hesaplanır.

Sayısallaştırılmış alan verileri, rüzgar türbini verisi (geometrik yapısı, güç eğrisi, devreye girme vb.) rüzgar hızı ve yönü dağılımları, rüzgar profili ve türbülans düzeylerini rüzgar türbini dizilişiyle birleştirerek, türbinlerin tek tek veya birarada üretecekleri yıllık enerji miktarları hesaplanır. Bu hesaplamalarda, çiftlik bölgesindeki akış değişimleri ve iz bölgesi etkileri (wake effects) de dikkate alınmalıdır. Elektrik sisteminde meydana gelebilecek diğer kayıplar da bu hesaba dahil edilebilir. Prosedürün etkileşimli olarak kullanılmasıyla türbin dizilişini optimize etmek ve böylece enerji üretimini, dolayısıyla karlılığı en yüksek değerine yükseltmek de mümkündür.

Bu işlemler sonucunda rüzgar çiftliğinin toplam ve ayrı ayrı her türbinin beklenen yıllık enerji üretimi miktarı elde edilir. Buna bağlı olarak da rüzgar çiftliğinin kapasite faktörü hesaplanarak, çiftliğin verimi belirlenir.

4.1.2 İletim Şebekesine Yakınlık

Kuruluş yeri seçimine etki eden ikinci önemli faktör, alanın ulusal enerji iletim ve dağıtım ağına olan yakınlığıdır. Rüzgar türbinlerinin yanındaki elektrik şebekesi türbinden gelen elektriği karşılayabilmelidir. Eğer halihazırda türbine bağlanmış şebekeler mevcut ise şebekeye takviye gerekir. Örneğin, daha büyük bir kablonun yanı sıra, belki de daha yakın bir yüksek gerilim trafo istasyonuna bağlamak gerekebilir.

Büyük ve modern rüzgar türbinlerinin jeneratörleri genellikle 690 volt elektrik üretirler. Enerjini 154 kV' luk indirme istasyonlarına yükseltilerek iletilmesi, ulusal şebekeye bağlanmanın maliyeti göz ardı edilmemelidir. ETKB bu amaçla rüzgar çiftlikleri için özel bir teşvik getirebilir. Ancak, günümüzde, TEAŞ iletim noktalarına olan yakınlık rüzgar çiftlikleri için önemli bir avantaj kabul edilmelidir. Yüksek gerilim hatlarının maliyeti, santral maliyetini olumsuz etkilemektedir (Yerebakan, 2001).

Rüzgar çiftliği planlamalarında ihmal edilen özelliklerinden bir tanesi de elektriksel altyapının durumudur. Bu, rüzgar çiftliğinin yatırım maliyeti, enerji üretimi ve dolayısıyla karlılığı üzerinde önemli etkilere neden olabilmektedir. Elektrik sistemindeki kayıplar tipik olarak rüzgar çiftliğindeki toplam üretimin %2-3'ü kadardır. Bu nedenle optimum hat ve transformatörlerin belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla hazırlanacak modelde alternatif akımlı elektrik sistemlerinin durumlarının detaylarıyla birlikte, rüzgar hızı dağılımı ve türbinlerin performans detayları veri olarak kullanılır. Maliyetlerin ve iletim hatlarıyla transformatörlerin belli bir alan için enerji kayıplarının veri tabanı kullanılarak yatırım maliyetleri ve enerji kayıpları hesaplanır. Alınan enerji ve reaktif güç miktarları ayrıca belirlenmektedir. Daha sonra basit bir yatırım-kazanç testi yardımıyla en ekonomik durum belirlenir. Yapılan hesaplamalar sonucunda maliyetleri, enerji kayıplarının kaynaklarını ve reaktif güç gereksinimlerini gösteren bir tablo oluşturulur. Şebeke boyunca voltaj profilleri de hesaplanarak sunulur.

4.1.3 Kuruluş Yeri Topografyası

Etkin rüzgar yönünde mümkün olduğu kadar geniş ve açık bir görünüm istenir ve yine aynı yönde mümkün olduğu kadar düşük sertlik ve az engel olması istenir. Şayet türbinleri yerleştirmek için kıvrımlı bir tepe bulunabilirse hızlandırma etkileri de göz önüne alınır.

Hakim olan rüzgar yönüyle ilgili olarak olabildiğince geniş ve açık bir manzaraya (görüşe) sahip olmalıyız, ve aynı yönde mümkün olduğu kadar az engel ve sertlik çıkmalıdır. Türbinleri yerleştirmek için yuvarlak bir tepe bulabilirseniz, bedavadan bir hızlanma etkisine bile sahip olabilirsiniz.

Rüzgar çiftliği ekonomisinde önemli bir faktör de inşaat işlemleri, erişme yolları (geçici veya daimi) yapımı, ara istasyonlar ve kontrol binası yapımını içeren altyapı işlemleridir. Bu işlerin maliyeti tipik bir rüzgar çiftliği için toplam proje maliyetinin yaklaşık %30-40'ı kadardır. Bu çalışmalar inşa periyodunun özellikle kış aylarında önemli etkilere neden olabilmektedir. Dolayısıyla, bu faktörlerin projenin ilk aşamalarında belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

Gerekli zaman ve maliyetlerinin tahminlerinin iyilik derecesi önceden ele alınan tasarım çalışmalarının kalitesine bağlıdır. Altyapı tasarımı bölgenin ziyaretinden ve deneme kazılarından elde edilen veriye dayalı olarak yapılır. Ana hatları oluşturacak parametreler bir rüzgar çiftliğinin ön tasarımının yapılabileceği yeterlilikte oluşturulur. Bu aşamada, taşıtların geçiş yolları ve türbinlerin kurulması ile ilgili potansiyel problemler belirlenir.

Bu işlemler sonucunda bölgenin ziyaretinden ve incelemelerden elde edilen veri sunulur. Bütçe tahmini yapılabilecek detaylara sahip bir ön tasarım hazırlanır.

4.1.4 Tarımsal Yaşam

Kuruluş yeri seçiminde bir önemli parametre de, alanın tarımsal potansiyelidir. Zengin tarım topraklarına kurulacak rüzgar santralleri için, arazi sahiplerine, belli oranlarda dengeleme parası veya, tazminat ödemesi yapılmalıdır. Türbinlerin bina yapım aşamaları ve ağır kamyonların santrale ulaşabilmelerini sağlayacak yolların yapısı, türbin projesi için hesaba katılması gereken hususlardır. Kuruluş yerinde, kulelerin yerleştirilmesi, bağlantı yolları ve zorunlu amaçlar için arazi kullanım durumları dikkate alınarak, arazi sahipleri ile anlaşmalar yapılmalıdır. Yer seçiminde arazinin verimliliği, arazi sahiplerinin çokluğu, maliyeti olumsuz etkileyecek parametrelerdendir.

4.1.5 Yatırım Maliyetleri

Yapılması gereken teknik ve mühendislik işlemleri şöyle sıralanabilir;

- Rüzgar türbinlerinin satın alma koşullarının ve mevcut türbinlerin teknik karakteristik ve fiyat analizlerinin hazırlanması.
- Rüzgar çiftliği bölgesinin incelenmesi; yerin jeolojik yapı analizi ve yol gereksiniminin belirlenmesi.
- Rüzgar türbini temel inşaatının tasarlanması.

- Bölgenin elektrik şebekesinin incelenmesi.
- Veri ve türbin karakteristiklerinin gerçekleşme durumlarını belirlemek için rüzgar türbini performans testi ölçümlerinin yapılması.

Kuşkusuz en önemli parametrelerden biri, yatırım maliyetleridir. Yatırım maliyetleri, kuruluş yerine göre değişmektedir. Bir MW'lık bir rüzgar santralinin maliyeti, yaklaşık bir milyon Amerikan doları düzeyindedir. Rüzgar çiftliği için minimum ekonomik kapasite 20 MW olup, bu yatırımın minimum maliyetle gerçekleşmesinde kuruluş yerinin önemli etkisi vardır. Türbinlerin yerleştirilmesi, arazi içinde dağılımı, kapasiteleri ve sistemleri birer yatırım kalemidir.

Bir rüzgar çiftliği bölgesinin uzun bir dönem enerji üretiminin tahmininin ve türbin sayısı ile türbin kapasitesinin kararlaştırılması için proje maliyetinin belirlenmesi gereklidir. Geri ödeme oranı (International Rate of Return, IRR) ve net bugünkü değer (Net Present Value, NPV)' in belirlenmesi için rüzgar çiftliği projesinde ekonomik analiz olanak sağlayan bir model kullanılır.

Rüzgar çiftliği düzeni, rüzgar rejimi gibi çeşitli detaylar verilerek, oluşturulan bir model yardımıyla proje ömrü boyunca her yıl, enerji üretimi ve bu enerjinin satışından elde edilecek gelir, bakım ve onarım masrafları, arazi kirası ve diğer giderler hesaplanır. Değer kaybı ve vergiler ödendikten sonra, yıllık nakit akışı hesaplanır; bunlar projenin net bugünkü değerini hesaplamak için göz ardı edilebilir veya projenin geri ödeme oranını belirleme de kullanılır. Kredilerin geri ödemesindeki provizyon ve enflasyon basit bir şekilde dahil edilebilir. Yapılan hesaplamalar sonucunda hazırlanacak raporda her proje için mukayeseli bir para akışı sınıflandırması ve ekonomik göstergelerin (IRR ve NPV gibi) özeti sunulur.

4.1.6 Müşteri Unsuru

Müşteri parametresi de rüzgar enerjisi seçiminde büyük önem taşımaktadır. Otoprodüktör santraller hariç, enerji santral yatırımcıları, ulusal enerji sistemine enerji satarlar. Mevcut yasalarımıza göre, üreticiler TEAŞ'a enerji satmak durumundadır. Ancak, enerji piyasası kanunun uygulanması ile, üreticiler ulusal enerji havuzuna enerji satacaktır. Bu havuzda oluşan fiyata göre, tüketim için dağıtım şebekeleri tarafından çekilecektir. Doğalgaz kombine santrallerinin bir kısmı TEAŞ'a 12 cent/kW bedelle enerji satarken, bir kısmı da 4.5 cent/kW'

dan satmaktadır. Enerji değeri bu iki uç nokta arasında değişmektedir. 4.5 cent/kW' ın geçerli olması durumunda, maliyetine veya çok düşük marjlarla enerji satılabileceği hususu dikkate alınmalı, maliyeti yüksek olanlardan kaçınılmalıdır.

4.1.7 Çevresel Etkileşim

Çevresel etkileşim durumu da önemli parametrelerden biridir. Bir kuruluş yerine ait yapılabirlik değeri, cesaret verici değeri ihtiva edebilir. Kuruluş yerinde, yaşamları tehdit altına girebilecek hayvan popülasyonunun bulunması, kuruluş yeri zemin bilgileri, gürültü etkileşim durumları ile santralin hava trafiğine etkisi, birer olumsuz parametreye dönüşebilir. Her santral alanı için, ÇET raporu alınmalıdır. Rüzgar türbinleri bulundukları bölgede rahatlıkla görülebilen yapılardır. Aksi takdirde meteorolojik olarak o bölgeye yerleştirilmeleri anlamlı olmayacaktır.

Rüzgar tarlalarının yakınında yaşayan insanlar aşırı gürültüden rahatsız olmaktadır. Büyük miktarlarda alana ihtiyaç vardır. Örneğin bir rüzgar santralinin, normal bir doğalgaz santrali ile aynı enerjiyi üretmesi için 85 kat daha fazla alana gereksinim duymaktadır. Ayrıca rüzgar türbinlerinin bakım ve onarımı çok pahalıdır. Rüzgar olmadığı zaman gerekli olacak elektriği sağlamak için pahalı enerji depolama sistemlerine de ihtiyaç vardır.

Rüzgar türbinlerinin getirdiği en büyük sorunlardan birisi de çok sayıda kuşun ölümüne neden olmalarıdır. Özellikle yüksekten uçan, avlanması yasak olan veya nesli tükenmekte olan kuşlar için potansiyel bir tehlikedir. Örneğin A.B.D.' deki dünyanın en geniş rüzgar tarlası (yaklaşık 200 km²) olan Altamont Pass' de, ak tüylü kartalların ölmesi bu kuşları koruma sözleşmesine göre federal bir cinayet sayılmaktadır. Çevre örgütleri bu yüzden Washington eyaletinde planmış bulunan rüzgar çiftliğinin yapımını durdurmuşlardır.

4.1.8 Araziyi Kullanma

Düz alanlarda türbinleri geometrik bir yapıda dizmek uygun olacaktır. Eşit mesafelerde doğrusal olarak dizilen türbinler oldukça iyi çalışmaktadır. Buna karşılık başka yöntemlerde tespit etmek mümkündür.

Basit dizilimler kullanmak her ne kadar düzgün arazilerde uygun olsa da, tepelik bölgeler için aynı yaklaşım uygun olmayacaktır. Bu durumlarda yükseltileri takip eden yapılar tercih edilmelidir. Türbinler birden fazla sırada dizilirse normal göz seviyesinden düzenli olup olmadığını tespit etmek zorlaşır.sadece sıranın sonunda duran kişi düzeni fark edebilir.

Açık Gri Boya kullanımı bu türbinlerin ortama uyumunu artırmaktadır. Geniş rüzgar türbinleri daha az türbinle aynı miktarda enerji üretimine imkan vermektedir. Bu durum daha az bakım maliyeti vb. avantajlar getirmektedir.

Estetik açıdan geniş rüzgar türbinleri arazide avantaj sağlamaktadır. Zira dönme hızları daha küçük olmaktadır. Bu şekilde gözü fazla rahatsız etmeyen yavaş bir dönme izlenmektedir.

Türbinlerin zemindeki yerleşimleri genellikle kişisel zevklere bağlıdır. Bu türbinlere yakın oturan kişilerin türbinler hakkındaki görüşlerinin uzakta olanlara nazaran daha olumlu olduğu gözlemlenmiştir.

4.1.9 Gürültü

Türbinlerde gürültü iki kaynaktan oluşmaktadır. Gürültünün en önemlisi mekanik gürültü olup; genellikle metalik malzemelerin birbirine sürtünmesinden kaynaklanmaktadır. Dişli kutuları mekanik gürültünün ana kaynağı konumundadır. Türbin yatağında yer alan her eleman, gürültüye neden olabilir. Gürültü, son yıllarda, öncekine oranla önemli ölçüde düşmüştür. Türbine çok yaklaşmadıkça, gürültü hissedilemeyecek kadar azdır.

İkinci önemli gürültü kaynağı, aerodinamik kuvvetlerden gelen aerodinamik gürültülerdir. Rüzgar, farklı geometrideki yüzeylere farklı hızlarla estiğinde, farklı sesleri oluşturur. Rüzgarın, çalılara, ağaçlara, su yüzeylerine ve tarlalara çarpması ile oluşan oldukça yüksek frekanslı seslere beyaz gürültü adı verilmektedir. Bazı yüzeylere çarpan rüzgar, bu yüzeylerde titreşimler de yol açar. Hızlı esen rüzgarın pencereleri titreştirmesi de buna bir örnektir. Bu durumda, titreşen yüzey, kendi sesini yaymaya başlar. Bazı müzik aletleri de bu tür sesler çıkarmaktadır. Bu seslere de saf ton sesler adı verilmektedir.

Rotor kanatları, yaklaşıldığında, özellikle düşük rüzgar hızlarında, aerodinamik saf ton bir ses üretmektedir. Kuşkusuz kanatların görevi akan rüzgarı durdurarak enerjisini almaktır.

Rüzgarın sert engele çarpması, beyaz gürültünün yayılmasına yol açarken, hareketin getirdiği saf ton gürültüsü ile girer. Ses basıncı, rüzgar hızının beşinci kuvveti olup, yüksek frekansın doğmasına neden olmaktadır. Büyük türbinlerde kanatlar, daha düşük hızlarda döndürülerek, sesin gürültüye dönüşmesi engellenmektedir. Hız arttıkça, ses basıncı da artacaktır. Kanat yüzeyleri aerodinamik olarak mükemmel tasarlandığından bu gürültüler, insanı ve canlı habitatı rahatsız etmez. Ancak, rüzgar hızı arttıkça, rotor gövdesinin diğer ucu, hızla bağlı yükselen bir gürültü yaymaya başlar. Yeni nesil rotorlarda, geliştirilen göğüs tasarımları ile titreşimler bu bölgede de azaltılmıştır. Türbinlerin, zamanla, rüzgar hızına bağlı, birer müzik aleti gibi çalışması beklenmektedir. Bu yaklaşımın gerçekleştirilmesi ile; her türbinden farklı müzik sesi çıkartılarak, rüzgar çiftlikleri adeta bir orkestraya dönüşmüş olacaktır.

Kanat uçlarından gelen gürültü, daha da önemlidir. Rotor devri arttıkça, kanat uçlarının açılma hızları da artmaktadır. Halen, kanatlarda yürütülen çalışmalar, kanat ucu geometrisine odaklanmıştır. Kanat uçları, aynı zamanda dönme momentinden kaynaklanan, dönme enerjisinin en yoğun alanlarından biridir. Kanat ucunda oluşan hava hareketleri henüz tam analiz edilememiştir. Bu itibarla, yeni nesil rotorlar, kanat ucu tasarımları ile farklılık kazanacaktır. Her durumda, gürültü düzeyi, gerekli emisyon sınırlarının çok altında bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar, gürültüyü önlemekten öte, daha yüksek devirlere ulaşmak amacına yönelmiştir.

Yeni türbin tasarımlarında artık gürültü emisyon değerleri birbirine çok yakın çıkmaktadır. Bu durum yeni tasarım daha az ses çıkaran rotor bıçaklarının uçlardaki hızı artırması ve enerji kazancı sağlaması ile ilgilidir.

Sanayi için artık gürültünün çok mühim bir problem olmadığı gözlenmektedir. Ses konsepti ve ölçüm değerleri toplum tarafından pek bilinmemektedir. Buna karşılık hesaplamalar oldukça kolay yapılabilir.

Hiçbir arazinin tamamen sessiz olmasını bekleyemezsiniz. Kuşlar ve insan hareketleri dahi ses üretir ve 4-7 m/s' lik rüzgar hızı yapraklar, dallar ve ağaçlar üzerinde etkilidir. Bu seslerin dahi rüzgar türbininden gelecek olan sesleri örtmesi beklenir.

Bu durum sadece rüzgar türbininden gelen seslerin tek başına ölçülmesine engel olur. Rüzgarın 8 m/s ve üstünde hızı olduğunda artık rüzgar türbininin rahatsız edici sesinden bahsetmek mümkün olmaz zira dış sesler gürültüyü tamamen örtecektir.

Ses yansıması ve bu seslerin binalar tarafından absorbe edilmesi farklı bölgeler için farklı durumlar meydana getirebilir. Bu anlamda rüzgar gülü sesin muhtelif yönlere dağılımı konusunda önemli bir gösterge olacaktır.

4.1.9.1 İnsanın Ses ve Gürültüyü Algılaması

Birçok insan dalgaların sesini dinleme konusunda isteklidir. Çok azımız komşumuzdan gelen radyo sesinden rahatsız oluruz. Komşumuzun müzik zevki bizim açımızdan çok önemlidir. Çünkü dalga sesi beyaz bir gürültüdür ve bilgi içeriği olmadığından ihmal edilebilir buna karşılık müzikten zevk almazsanız bu sizin için problem ve istenmeyen bir durum olacaktır. Ses ve gürültü arasındaki fark daha çok psikolojiktir ve bunu standart düşünmek kolay değildir. Rüzgar türbinini de dalgaya benzer bir beyaz gürültü kaynağı olarak algılamak mümkündür.

Rüzgar enerjisi maliyetleri doğru hesaplanmalıdır. Daha önce ifade edildiği gibi, türbin verimi, ortalama rüzgar hızının kübü ile orantılıdır. Rüzgar hızındaki küçük dalgalanmaların da verime etkisi, azalan hızın kübü ile orantılı olacaktır. Türbin kanatlarının yüzey alanı, kanat uzunluğunun karesi ile orantılı olup, kanatta muhtemel uzatmalar, enerji çıkışında önemli artışlara neden olmaktadır. Kuruluş yerine uygun boyutsal tasarım, santral verimliliğini etkileyecektir.

Rüzgar çiftliğinin meydana getireceği gürültü etkisinin dağılımı, çiftliğin kabul edilebilirliğinin ortaya konulmasında önemli bir parametredir. Bu nedenle rüzgar çiftliği içerisinde ve civarındaki her noktada gürültü düzeylerinin meteorolojik koşullara göre belirlenmesi gerekir.

Bu belirlemeleri yapabilmek için mesafe, atmosferik ve yeryüzü absorpsiyonu gibi faktörleri de içeren bir gürültü yayılma modeli kullanılır. Model için gerekli olan girdi, yeryüzü verisi ile her türbinin gürültü karakteristikleri ve dizilişleridir. Ayrıca meteorolojik etkiler de buna

dahil elde edilir. Model yardımıyla çiftlik düzenini optimize ederek gürültü düzeyini en az düzeye indirmek mümkündür.

Burada, kullanılan öngörü tekniği tek tek her nokta için hesaplamaların yapılmasına olanak sağlamaktadır. Böylece civardaki bir yerleşim yerinde gözlenecek gürültü değerleri belirlenebilmektedir. Ayrıca gürültü düzeyi ile kontürleri çizilmiş haritaların elde edilmesi de mümkün olmaktadır.

4.1.10 Sosyo Ekonomik Koşullar

Santral alanının sosyal ve çevresel konumu da kuruluş yeri için önemlidir. Kuruluş yeri için her türlü izinler, etütler ve projeler başlı başına birer yatırım harcaması olup, dikkate alınmalıdır. Bu amaçla, yatırımcıların danışmanlara ihtiyaçları olacaktır. Zonlama olarak tanımlanan bu aşamada, kuruluş yerinin yasal dayanağı ve sosyo-ekolojik uygunluğu araştırılmalıdır.

Her türbin benzer görünmekle beraber, imalatçısına göre farklıdır. Bazı türbinler düşük hızlarda yüksek verimle çalışabilirken, bazıları aynı performansı verememektedir. Yatırımcıların, mevcut kaynaklara uygunluğu için, potansiyel teknolojileri araştırmaları ve mukayese etmeleri gereklidir. Teknolojilere göre referansların incelenmesi, seçilen teknolojinin uygunluğunu bu aşamada netleştirmelidir.

4.1.11 Bakım Onarım Giderleri

Kuruluş yeri seçiminde bir diğer parametre de, işletme ve bakım giderlerinin sağlıklı tahminidir. Yeni teknolojiler, geçmişe oranla, işletme ve bakım maliyetleri yönünden büyük avantajlar getirmektedir. Ancak, yeni teknolojiler eskisine oranla daha kompleks ve elektronik tasarlanmıştır. Bu türbinlerin bakım ihtiyaçları daha fazladır. Yatırımdan önce, türbin imalatçılarından, bakım ve onarım garantileri alınmalıdır.

5. RÜZGAR ENERJİSİNİN DÜNYADAKİ KULLANIMI

5.1 Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi ve Gelişimi

Rüzgar enerjisinin tarihi oldukça eskidir. İran, Irak, Mısır ve Çin'de, rüzgar enerjisi ile çalışan makinelerin mevcut olduğu bilinmektedir.

Rüzgar enerjisi kullanımıyla ilgili ilk yazılı dokümanlar, onuncu yüzyılda Persia'da çıkmıştır. İran ve Afganistan'da o dönemden kalma tahrip olmuş dikey eksenli rüzgar türbinlerine rastlanmıştır (Uyar, 1998).

M.Ö.200' ün hemen başlarında Ortadoğu' da rüzgar değirmenleri, tahıl öğütmek amacıyla kullanılmıştır.

Ortaçağ'da; İtalya, Fransa, İspanya ve Portekiz' de rüzgar makineleri görülmüş ve kısa bir süre sonra da Büyük Britanya, Hollanda ve Almanya'da varlığı keşfedilmiştir.

Bazı yazarlar; rüzgar türbinlerinin Avrupa'ya gelişinin Haçlı Seferleri sırasında olduğunu öne sürmektedir. Bu makinelerin, yatay eksenli ve 4 kanatlı olduğu, ana kullanım alanlarının ise tahılların öğütülmesi olduğu da ifade edilmektedir.

Hollanda'da bu makineler M.S.1350' den itibaren; fındık ve ceviz gibi sert kabuklu yemişlerden ve hububattan yağ elde edilmesinde, odun kesme işleminde, eski giysilerin kağıda dönüştürülmesinde ve renkli pudra yapımında kullanılmıştır.

Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi ise ilk kez; 1890'lı yıllarda Danimarka'da yapılmıştır. 1918 yılında 20-35 kW' lık türbinlerle, 120 kırsal merkezin elektrifikasyonu sağlanmıştır. 1941 yılında ABD'de Grandpa's Knob'da kurulan 1250 kW gücündeki Putnam Rüzgar Türbini, o dönemin en büyük rüzgar türbini olmuştur ve bu; modern rüzgar makinelerinin ilkidir.

İngiltere'de 1945 yılında yapılan çalışmalar neticesinde, 1950' lerin başında; 100 kW gücünde, rotoru üç kanatlı, çapı 15 m olan Andreau makinesi kurulmuştur. 1947 yılında Danimarka'da başlatılan çalışmalar sonucu, 1957 yılında; 24 m çaplı, rotoru da üç kanatlı olan 200 kW'lık Gedser Türbini yapılmıştır.

Avrupa'nın o dönemdeki en gelişmiş rüzgar generatörü, 1958 yılında Fransa'da yapılan 31 m

rotor çaplı ve 3 kanatlı 800 kW' lık makinedir. 1970'li yıllarda ABD'deki çalışmalar; büyük tip yatay ve dikey eksenli makineler üzerine olmuştur. Bunların dışında; o yıllarda Avusturya, İtalya ve İsviçre' de rüzgar türbinleri üzerinde çalışmalar yapan ülkelerdir.

Rüzgar enerjisiinden yararlanma çalışmalarının hızlanarak; öneminin iyiden iyiye artmasının belki de en önemli sebeplerinden biri petrol sıkıntısıdır. Bu sıkıntı nedeniyle; rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleriyle ilgili çalışmalar hız kazanmış ve rüzgar türbinlerinden oluşan rüzgar çiftlikleri kurmak; amaç olmuştur.

1980'li yıllarda yürütölen çalışmalar sonucu; ABD, Danimarka, Hollanda, İngiltere ve İsveç'in katkılarıyla, deniz üstünde kıyıdan uzak rüzgar santralleri teknolojisi geliştirilmiştir. Avrupa'da ilk deniz üstü rüzgar türbini, 1990'da işletmeye alman İsveç'teki 220 kW' lık Norgersund türbinidir. 11x450 kW' lık makinelerden oluşan Danimarka'nın Vindeby adasında kurulmuş olan 5 MW' lık çiftlik ise; dünyanın ilk deniz üstü rüzgar çiftliğidir.

1980'lerde, Amerika'da vergi kredileri ile desteklenen rüzgar endüstrisi, çok hızlı bir gelişim dönemine girmiş ve bu gelişim süreci, 1980-1990 yılları arasında rüzgar türbin maliyetlerinin %80 azalmasına yol açmıştır. 1989 yılında California Enerji Komisyonu; santralleri tüm ömürleri göz önüne alınarak; yakıt, yatırım ve işletme maliyetleri değeriendirildiğinde, rüzgar enerjisinin diğeri tüm geleneksel kaynaklardan daha ucuz olduğu sonucuna varmıştır. 1989 yılında California'da bulunan rüzgar santralleri; San Francisco'nun bir yıllık ihtiyacına yetecek kadar elektrik üretmiştir (Uyar,1998).

Amerikan rüzgar endüstrisinin kurulması, bu alandaki çok büyük gelişmelerin anası olmuştur. 1982-1992 yılları arasında Kaliforniya'da, yaklaşık 15.000 rüzgar türbini kurulmuş, 1993 yılında bu çiftliklerden 3 milyar kWh elektrik üretilmiştir.

Bugün dünyanın en büyük rüzgar çiftliği 370 MW gücü ile Amerika'da bulunan "Kenetech Windpower"ın "Altamount Pass" rüzgar tesisidir. Bu çiftlikte 100 kW' lık 3.500 adet ve 300-405 kW' lık 40 adet türbin bulunmaktadır.

1990 yılında dünyada rüzgar santrali kurulu gücü 2.160 M W iken, 1996 yılında 6.097 MW' a, 2005 yılı başında ise 46.048 MW' a yükselmiştir. Bu kurulu gücün %57,5'i Avrupa'da, %26,4'ü Kuzey Amerika'da (Kuzey Amerika'dakinin %98,7'si ABD'de), %14,7'si Asya'da (Asya'dakinin %91'i Hindistan'da) bulunmaktadır.

Rüzgar enerjisi diğer yenilenebilir kaynaklarla ortak özelliklere sahip, büyük potansiyeline karşın dağınık karakteristikli bir enerji kaynağıdır. Endüstri devrimi sırasında yerini geniş çapta diğer kaynaklara bırakmıştır. 1973 Petrol Krizi, rüzgar enerji teknolojisini şebeke bağlantılı elektrik üretimi, su pompajı ve uzak yerleşim yerlerinde enerji temini konularında harekete geçirmiştir. Günümüzde bu ilgi çevresel sorunlar nedeniyle, daha da canlanmıştır. Elektrik üretimi için rüzgar türbinlerinde son yıllarda muazzam ilerlemeler sağlanmıştır. Özellikle ABD, Danimarka, Hollanda, Almanya, Diğer Batı Avrupa, Hindistan, Çin ve Kanada'da olmak üzere ~3000 MW şebeke bağlantılı kurulu güç tesis edilmiş olup, üretim ~4250 GWh düzeyine erişmiştir.

Rüzgar enerjisinin diğer bir uygulama alanı su pompajıdır. 18.yy.da ve bu yüzyılın birinci yarısında geniş çapta kullanılan rüzgar-mekanik su pompaj sistemlerinde 1950-1960'larda oldukça ani düşüşler görülmüş olup, bu sistemler yerini motorlu pompalara bırakmıştır. Ancak rüzgar enerji kaynaklı su pompajı için Arjantin'in ve Güney Afrika'da hala bir pazar bulunmaktadır. Halen dünya çapında 1.000.000 su pompaj sisteminin işletilmekte olduğu tahmin edilmektedir.

Günümüzde rüzgar enerjisinin önemli şebeke bağlantılı elektrik üretim sistemleri içindir. Halen elektrik arzında sınırlı bir katkısı olmakla birlikte, söz konusu katkının 2020 yılında 450.000 MW kurulu rüzgar gücü kapasitesi kullanılarak ~900 TWh / yıl üretim düzeyine erişebileceği tahmin edilmektedir. Klimatolojik, ekonomik, kurumsal ve teknolojik faktörlerin dışında uzun dönemdeki konvansiyonel enerji maliyetleri dikkate alındığında, rüzgar enerjisi uygulamalarının gelişmekte olan ülkelerde elverişli olacağı öngörülmüştür. Bu potansiyele haiz ülkeler Ürdün, Hindistan, Pakistan, Çin, Moritanya, Fas ve Şili'dir.

5.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihte İlk Kullanımı

Rüzgar enerjisinin kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. İlk olarak, Asya Medeniyetlerinden Çin, Tibet, Afganistan ve İran'da kullanıldığı bilinmektedir. Rüzgar Tribünlerinin (RT) kullanımına ait ilk yazılı bilgiler Büyük İskender tarafından M.Ö. 200-300 yıllarında basit yapıdaki yatay-eksenli rüzgar türbinler hakkındadır. Düşey eksenli ilk rüzgar türbinleri, M.Ö.500-900 yıllarında Farşlılar tarafından dizayn edilip, buğday öğütme ve su pompalama amaçlı kullanılmıştır. Bu RT' ler merkezi düşey bir şafta bağlı, ağaç ve kamış dallarından yapılan düşey yelkenlerden oluşmuş bir yapıya sahiptir.

Rüzgar gücü kullanımı Asya'dan Avrupa'ya 10.yüzyıl civarında geçmiştir. Bu geçişin ilk belirtileri olarak 11. ve 12.yüzyılda İngiltere de rüzgar değirmenlerinin kullanıldığı bilinmektedir. Mesela, 1190'lı yıllarda Alman hacıları rüzgar değirmenlerini Suriye'ye getirmiştir. Dolayısıyla Orta çağ döneminde rüzgar enerjisinin Avrupa da kullanıldığını görmekteyiz. Hala günümüzde birçok ülkede çiftçiler tarafından kullanılan rüzgar değirmenleri daha çok kuyulardan su çekmek amaçlı kullanılmaktadır.

Rüzgar enerjisi ilk kullanımı M.Ö. 2800 yıllarına kadar uzanmaktadır. Rüzgar enerjisi ilk olarak Orta Doğuda kullanılmıştır. M.Ö. 17. Yüzyılda Babil kralı Hammurabi döneminde Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanılan rüzgar enerjisinin, aynı dönemde Çin'de de kullanıldığı belirtilmektedir. Persler M.S. 7. yüzyıl ortalarında dikey eksenli rüzgar değirmenleri yaygın olarak kullanmaktaydılar (Johnson G.L., 2001).

Endüstri devrimi ile birlikte, 18.yüzyılda buhar makinelerinin ortaya çıkması sonucunda dünya,enerji ihtiyacı temini için termodinamik işlemlere dayanan makinelerden yararlanmaya başlamıştır. Özellikle kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların kullanımı ile beraber , bu makineler daha avantajlı bir duruma gelmiştir.

İstenildiği anda enerji üretimi olanağı sağlamasından dolayı, rüzgar enerjisinden daha popüler hale gelmişlerdir. Bu nedenle 19.yüzyılda ve 20.yüzyılın ortalarına doğru rüzgar enerjisinin önemi azalmıştır. Sadece, Amerika, Rusya ve Avustralya gibi nüfusu geniş bir alana yayılmış olan ülkelerde rüzgar enerjisi çiftçiler tarafından su çekmek için kullanılmıştır.

5.2.1.Rüzgarın Enerji Üretimi İçin İlk Kullanımı

1981 yılında Paul la Cour ve Danimarka Askov Folk High School bilim adamlarının oluşturduğu bir grup rüzgardan elektrik enerjisi üreten ilk tribünü yaptılar. Danimarka hükümetinin desteğiyle de test amaçlı bir rüzgar santrali kurdular.1918 yılına gelindiğinde Danimarka'da rüzgardan elektrik enerjisi üretmek amacıyla kurulan 120 adet RT bulunmaktaydı. Güçleri 20-30 KW arasında değişen bu RT 'lerin toplu güçleri 3 MW civarındaydı.

5.2.2 1940 Sonrasında Rüzgar Enerjisinin Dünyadaki Durumu

İkinci Dünya Savaşı yıllarında rüzgar enerjisinde büyük gelişmeler oldu. Danimarkalı bir şirket olan F.L Smith 2 ve 3 kanatlı rüzgar tribünleri inşa etmiştir. Bunların en büyüğü 1941

yılında Vermont’ da inşa edilen 1.25 megawatt Smith-Putnam makinesidir (Şekil 5.1). Yatay eksenli, 2 kanatlı ve 175-foot rotor çapına sahiptir.



Şekil 5.1 Smith-Putnam rüzgar türbini



Şekil 5.2 Gedser türbini

Bu zamana kadar inşa edilen tribünler doğru akım ürettiyordu. 1951 yılından sonra doğru akım generatörlerinin yerini alternatif enerji üreten 35 kW asenkron makineler almaya başladı. 1960 yılların başında, 200 kW gücünde Gedser tribünü Juul tarafından SEAS elektrik şirketi için Gedser ‘de yapılmıştır. Bu tribün 3 kanatlı, elektromagnetik yaw (yönerge) sistemini ve asenkron generatör kullanmaktaydı. Stall (durdurma) kontrol sistemine göre çalışan Gedser türbinin de ayrıca, aerodinamik üç fren bulunmaktaydı. Bu sistem günümüzde kullanılan türbinlerde de bulunmaktadır (Şekil 5.2).

1960’lı yıllardan sonra rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde ekonomik nedenlerden dolayı azalma meydana gelmiştir. Daha ucuz olan fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz vb.) kullanılarak yapılan termik santraller popüler olmaya başlamıştı.

1973 dünya petrol krizi, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına gösterilen ilginin artmasına sebep olmuştur. Dünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılayan fosil yakıtların kısıtlı kullanım sürelerinin olması, enerjinin elde edilmesi sırasında çevreye yapılan tahribat ve gelecek nesillerin de enerji ihtiyacı dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha iyi anlaşılmaktadır.

5.3 Dünyadaki Mevcut Durum

Rüzgar Enerjisi; özellikle 1990' lı yıllardan itibaren önemli bir gelişme göstermiş, Amerika ve Avrupa'da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Yapılan araştırmalara göre; şu an yürütülmekte olan politikaların devam etmesi durumunda dünya üzerindeki elektrik enerjisi üretimindeki payının hızla artacağı tahmin edilmektedir. Rüzgar gücü, dünyada kullanımı en çok artan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Günümüzde dünyadaki kullanım oranının çok düşük olmasına karşılık, 2020 yılında dünya elektrik talebinin %12'sinin rüzgar enerjisinden karşılanması için çalışmalar yapılmaktadır.

Günümüzde rüzgâr enerjisinden üretilen toplam güç 94.123 MW civarındadır. Bu güçten en fazla yararlanan ülke % 23,6' lık payıyla Almanya'dır. Almanya toplamda 22.247 MW güç üretmektedir. Rüzgar gücünden en çok yararlanan diğer ülkeler sırasıyla ABD, İspanya, Hindistan, Çin, Danimarka, İtalya, Fransa, Britanya ve Portekiz'dir. Diğer tüm ülkeler toplamda 13.019 MW' lık güç üretimi ile % 13,8 paya sahiptirler.

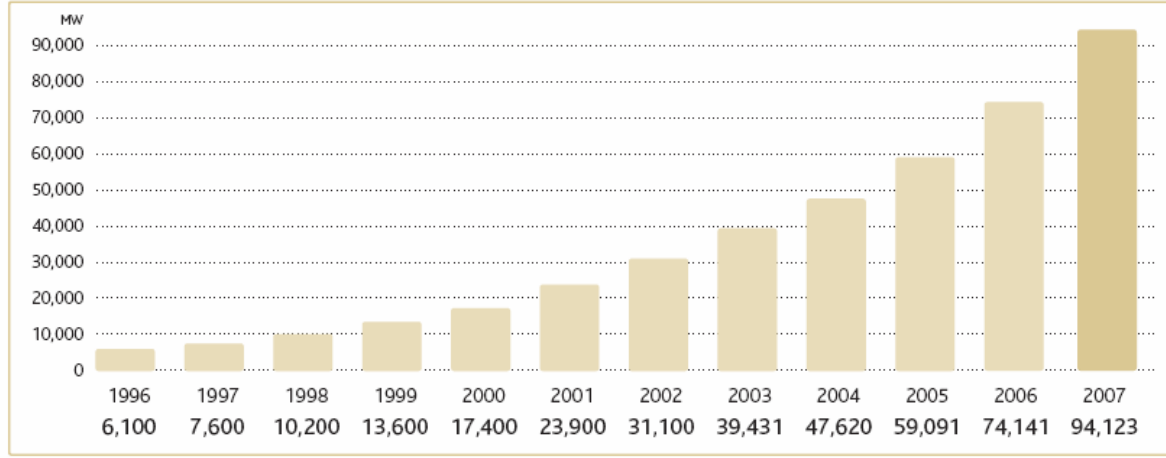
1996 yılında kurulu güç 6100 MW iken, 2007 yılında %1400'lük artışla 94.123 MW olmuştur. Bu gelişmenin en büyük nedeni, Avrupa ve Amerika'da rüzgar enerjisine olan ilginin son derece artmasıdır. Dünyada kurulu rüzgar gücündeki en iyi 10 ülke, toplam kurulu rüzgar gücünün %86.2'lik payına sahiptir (Çizelge 5.1). Ayrıca yıllık artışlar baz alındığında da, bu alandaki en iyi 10 ülkenin payının %91.4 olduğu gözlenmektedir (Çizelge 5.2). Bu istatistikler bize göstermektedir ki; rüzgar enerjisini kullanan ve bu alanda yatırım yapan ülkeler, mevcut enerji üretimlerinde rüzgar enerjisinin oranını çok daha yüksek seviyelere çekmek istemektedir.

Bu gelişmeler doğrultusunda, dünyadaki rüzgar enerji kurumlarının geleceğe yönelik olarak öngördükleri en büyük hedefleri; 2020 yılına kadar dünya elektriğinin %12'sini rüzgar enerjisi ile üretebilmektir.

Çizelge 5.1 Kurulu rüzgar gücü dağılımı 2002-2007 (MW)

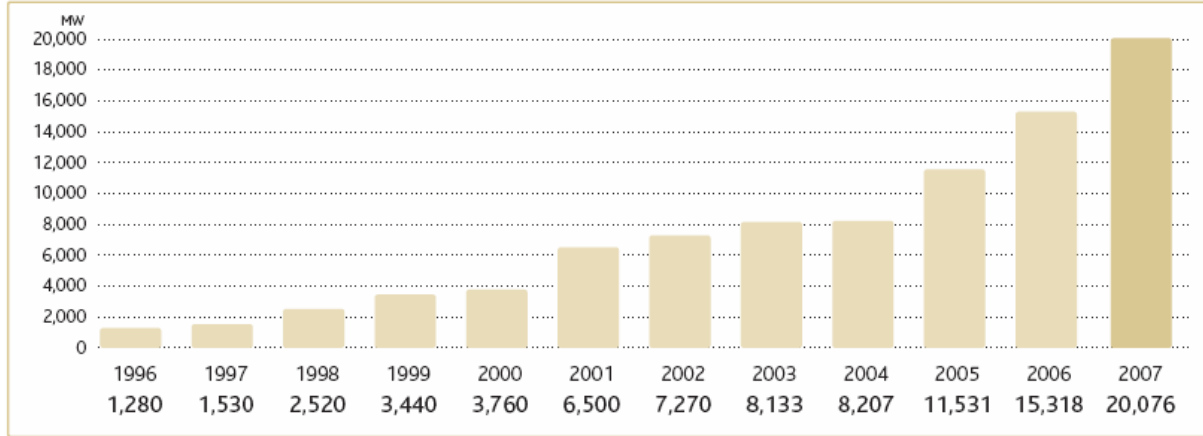
		2002	2003	2004	2005	2006	2007
1	Almanya	12,001	14,609.1	16,628.8	18,427.52	20,622	22,247.4
2	A.B.D.	4,685	6,37	6,725	9,149	11,603	16,818.8
3	İspanya	4,83	6,202	8,263	10,027.91	11,63	15,145.1
4	Hindistan	1,702	2,110	3,000	4,430	6,270	7,850
5	Çin	468	567	764	1,266	2,599	5,912
6	Danimarka	2,88	3,11	3,124	3,128	3,136	3,125
7	İtalya	785	904	1,265	1,718.29	2,123.36	2,726.06
8	Fransa	148	248	386	757.24	1,567	2,455
9	Britanya	552	648	888	1,353	1,962.85	2,389
10	Portekiz	194	299	522	1,022	1,716	2,130
11	Kanada	236	322	444	683	1,46	1,846
12	Hollanda	682	908	1,078	1,224	1,559	1,747
13	Japonya	334	506	896.2	1,04	1,309	1,538
14	Avusturya	139.3	415	606	819	964.52	981.5
15	Yunanistan	276	365	473	573.3	757.59	873.25
16	Avustralya	103	197.2	379	579	817.28	817.28
17	İrlanda	137	186	338.9	495.2	746	805
18	İsveç	345	404	452	509.1	571.2	788.65
19	Norveç	97.3	100	270	268	325	332.95
20	Y. Zelanda	35	36.3	168.1	168.23	171	322
21	Mısır	69	180	145	145	230	310
22	Belçika	44	68	95	167.4	194.3	286.9
23	Tayvan	0	0	13	103.7	187.7	280
24	Polonya	28.2	58.2	58.2	73	153	276
25	Brezilya	22	23.8	23.8	28.55	236.85	247.05
26	G. Kore	16	18.7	22.5	119.14	176.3	191.3
27	Türkiye	19.4	20.1	20.6	20.6	50.9	146.25
28	Çek Cum.	3	10	39584	29.46	56.5	116
29	Finlandiya	41	51	82	82	86	110
30	Ukrayna	46	56.4	68.8	77.26	85.56	89
	Toplam	31,100	39,431	47,620	59,091	74,141	94,123

DÜNYADAKİ TOPLAM KURULU GÜÇ 1996-2007



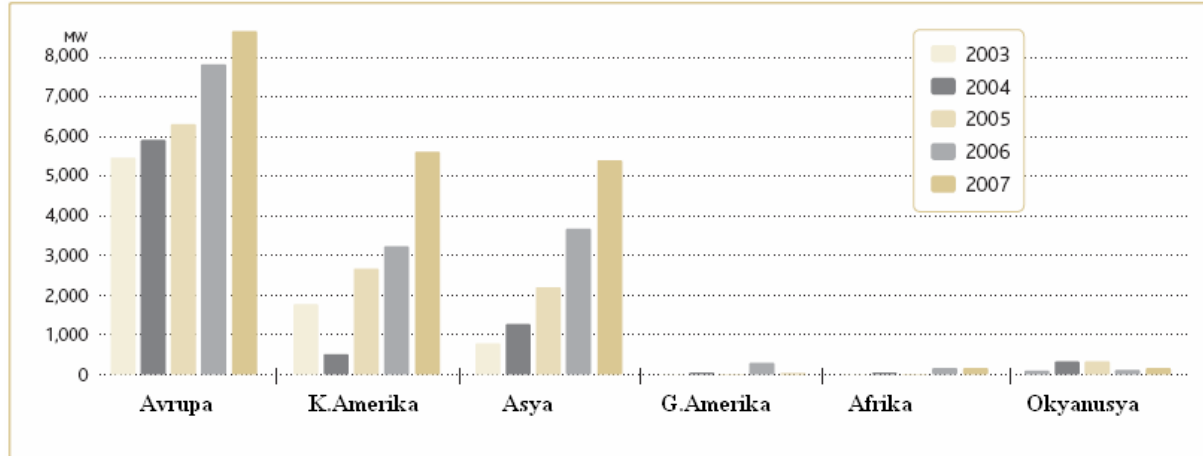
Şekil 5.3 Dünyadaki toplam kurulu güç

DÜNYADAKİ YILLIK KURULU GÜÇ DEĞİŞİMİ 1996-2007



Şekil 5.4 Dünyadaki yıllık kurulu güç değişimi

YILLIK DEĞİŞİMİN BÖLGESEL DAĞILIMLARI 2003-2007



Şekil 5.5 Yıllık değişimin bölgesel dağılımları

Çizelge 5.2 Kurulu rüzgar gücünde en iyi 10 ülke

Ülkeler	Kurulu Güç (MW)	%
Almanya	22.247	23.6
ABD	16.818	17.9
İspanya	15.145	16.1
Hindistan	8.000	8.5
Çin	6.050	6.4
Danimarka	3.125	3.3
İtalya	2.726	2.9
Fransa	2.454	2.6
Britanya	2.389	2.5
Portekiz	2.150	2.3
Diğer ülkeler	13.019	13.8
Toplam (En iyi 10)	81.104	86.2
Toplam	94.123	100

Çizelge 5.3 Kurulu rüzgar gücü artışındaki en iyi 10 ülke

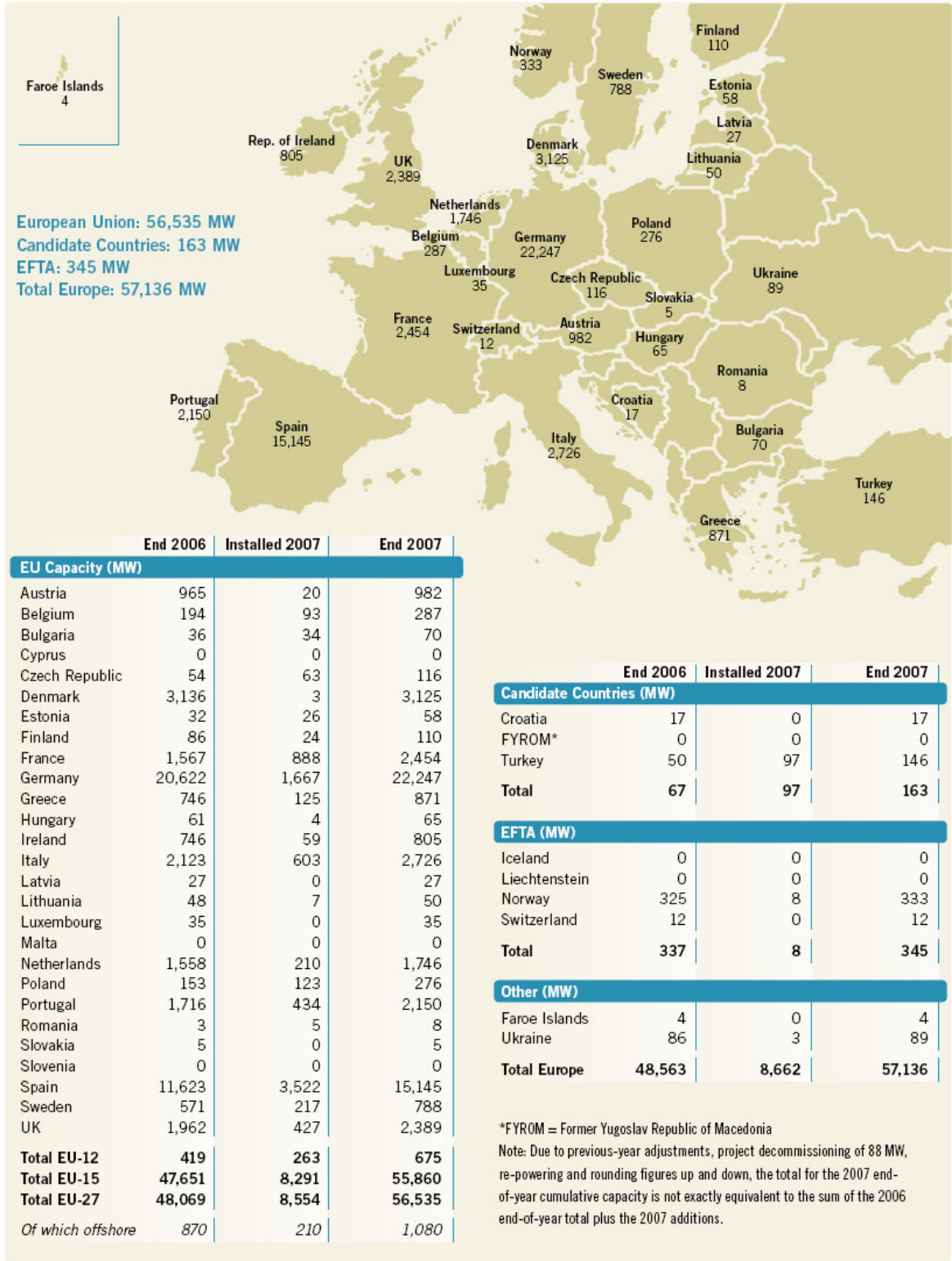
Ülkeler	Kurulu Güç (MW)-2007	%
ABD	5.244	26.1
İspanya	3.522	17.5
Çin	3.449	17.2
Hindistan	1.730	8.6
Almanya	1.667	8.3
Fransa	888	4.4
İtalya	603	3.0
Portekiz	434	2.2
Britanya	427	2.1
Kanada	386	1.9
Diğer ülkeler	1.726	8.6
Toplam (En iyi 10)	18.350	91.4
Toplam	20.076	100

5.4 Avrupa Birliği Hedefleri

Avrupa Birliği lkeleri enerji ihtiyaçlarının %50 sini dışarıdan karşılamaktadır. Bu dışa bağımlılığın 2010 yılında %70 olması beklenmektedir. Bu durum da yenilenebilir enerji kaynaklarının, dolayısıyla da rüzgar enerjisinin önemini arttırmaktadır. Avrupa birliğinin yenilenebilir enerjiler için belirlediği hedefler rüzgar enerjisinin Avrupa Birliği enerji sistemindeki payının hiçte azımsanmayacak lde olduğunu gösteriyor. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği (EWEA), Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Avrupa Komisyonunun (EC) tarafından her yıl düzenli olarak hazırlanan hedeflere bakıldığında ıtanın devamlı yükseldiği görülmektedir.

1997 yılında, rüzgar enerjisinin toplam enerji üretimindeki payının 2010 yılında %6' dan %12' ye çıkarılması n görülmüş-2010 yılında 40 GW kurulu rüzgar enerji kapasitesi- ve bu hedef 2005 yılında elde edilmiştir. Bu durum Avrupa lkelerinin rüzgar enerjisine ne kadar önem verdiğinin bir ispatıdır. EWEA' nın her yıl revize ettiği senaryosunda 2010 yılında 75 GW, 2020 yılında 180 GW ve 2030 yılında 300 GW kurulu rüzgar gücüne ulaşacaktır. Avrupa'da bugün yaklaşık olarak 47.000 türbinle 83 milyar kWh elektrik enerjisi üretilmektedir. Üretilen bu miktar Avrupa'nın yaklaşık %3 elektrik tüketimini karşılamaktadır. Günümüzdeki gelişmeler doğrultusunda 2030 yılında 90.000 türbinle yaklaşık 1 trilyon kWh enerji retilimi sağlanarak Avrupa'da tüketilen elektriğin %23'n rüzgar santralleri ile karşılanması öngörülmektedir. Avrupa'nın bu hedeflerine ulaşması hiçte zor değildir. Bugün Danimarka'nın tükettiği elektriğin %20'sini rüzgar santrallerinden sağlanmaktadır. Almanya'da ise Schieswig-Holstein eyaletin % 30 elektriği rüzgardan sağlanmaktadır.

Wind power installed in Europe by end of 2007 (cumulative)



Source: EWEA

Şekil 5.6 Avrupa'daki kurulu rüzgar gücü dağılımı

6. TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ KURULU GÜCÜ VE POTANSİYELİ

Ülkemiz çok çeşitli birincil enerji kaynaklarına sahip bir ülkedir. Ülkemizde taşkömürü, linyit, ham petrol, doğal gaz, uranyum ve toryum gibi fosil kaynak rezervleri ile hidrolik enerji, jeotermal enerji, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, dalga enerjisi, biyokütle enerjisi gibi tükenmez kaynak potansiyelleri bulunmaktadır. Ülkemizin, dünyada halen yoğun olarak kullanılan fosil kaynakların, özellikle akışkan fosil yakıtların görünür rezervleri yeterli düzeyde değildir. Ülkemizin kömür, jeotermal ve hidrolik enerji rezerv ve potansiyeli ise dünya kaynak varlığının %1'i civarındadır.

Ülkemizde 2006 yılı sonu toplam elektrik enerjisi üretimi 176,3 milyar kWh ulaşmıştır. 2006 yılında elektrik enerjisi üretiminin % 44'ü doğal gazdan; % 25,1'i hidrolikten; % 18,4'ü linyitten; % 6,3'ü ithal kömürden; % 3'ü fuel-oil'den; % 1,6'sı taşkömüründen ve % 1,1'i naftadan elde edilmiştir. 2006 yılında % 54,7'lik kısmı ithal kaynaklardan sağlanan ülkemiz elektrik enerjisi, üretiminin % 74,7'lik kısmı termik santrallerde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1'de Türkiye'nin yıllık elektrik üretim ve tüketim değerleri görülmektedir. Üretim ile tüketim arasındaki dengenin oldukça hassas olduğu ve bu nedenle de her sene gerekli enerji yatırımının mutlaka gerçekleştirilmesi gerçeği bu tabloda açıkça görülmektedir.

Çizelge 6.2'de ise, ülkemizdeki kurulu gücün yıllık değişimleri, enerji kaynaklara göre belirtilmiştir. Bu tabloda da, yenilenebilir enerji kaynaklarının oranının son derece az olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.1 Türkiye'nin yıllık elektrik üretim ve tüketim istatistikleri (TEİAŞ)

	Toplam kurulu güç (MW)	Brüt üretim (GWh)	Net tüketim (GWh)	Kurulu güç (MW)
1975	4 186,6	15 622,8	13 491,7	103,8
1976	4 364,2	18 282,8	16 078,9	106,7
1977	4 727,2	20 564,6	17 968,8	113,2
1978	4 868,7	21 726,1	18 933,8	114,2
1979	5 118,7	22 521,9	19 663,1	117,6
1980	5 118,7	23 275,4	20 398,2	114,4
1981	5 537,6	24 672,8	22 030,0	121,6
1982	6 638,6	26 551,5	23 586,8	142,2
1983	6 935,1	27 346,8	24 465,1	144,9
1984	8 461,6	30 613,5	27 635,2	172,4
1985	9 121,6	34 218,9	29 708,6	180,0
1986	10 115,2	39 694,8	32 209,7	196,7
1987	12 495,1	44 352,9	36 697,3	237,7
1988	14 520,6	48 048,8	39 721,5	270,3
1989	15 808,2	52 043,2	43 120,0	288,0
1990	16 317,6	57 543,0	46 820,0	288,9
1991	17 209,1	60 219,1	49 282,9	301,6
1992	18 716,1	67 342,2	53 984,7	323,1
1993	20 337,6	73 807,5	59 237,0	345,8
1994	20 859,8	78 321,7	61 400,9	349,4
1995	20 954,3	86 247,4	67 393,9	345,7
1996	21 249,4	94 861,7	74 156,6	345,3
1997	21 891,9	103 295,8	81 885,0	348,2
1998	23 354,0	111 022,4	87 704,6	368,1
1999	26 119,3	116 439,9	91 201,9	405,7
2000	27 264,1	124 921,6	98 295,7	401,9
2001	28 332,4	122 724,7	97 070,0	413,4
2002	31 845,8	129 399,5	102 948,0	457,4
2003	35 587,0	140 580,5	111 766,0	503,3
2004	36 824,0	150 698,3	121 141,9	512,9
2005	38 843,5	161 956,2	130 262,9	539,0
2006	40 564,8	176 299,8	143 070,5	548,9

Ülkemizde tüketilen enerjide ağırlıklı olarak petrol ve doğal gaza bağımlılık söz konusudur. Ülkemiz ithalatının yaklaşık üçte birini ihtiyaç duyduğu enerjiye ödemektedir. Ülkemiz sürdürülebilir kalkınma hedefini gerçekleştirebilmesi için bu tablonun değişmesi gerekmektedir. Yerli ve yenilenebilir kaynakların tamamı hızlı bir şekilde devreye sokularak ülkemizin enerjide dışarıya bağımlılığının azaltılması (özellikle doğal gaz miktarının azaltılması), çözümlenmesi gereken en önemli sorunlardan birisidir.

Çizelge 6.2 Türkiye kurulu gücünün yıllık gelişimi 1970-2007 (MW)

YILLAR	TERMİK	HİDROLİK	JEOTERMAL RÜZGAR	GENEL TOPLAM
1980	2987,9	2130,8		5118,7
1981	3181,3	2356,3		5537,6
1982	3556,3	3082,3		6638,6
1983	3695,8	3239,3		6935,1
1984	4569,3	3874,8	17,5	8461,6
1985	5229,3	3874,8	17,5	9121,6
1986	6220,2	3877,5	17,5	10115,2
1987	7474,3	5003,3	17,5	12495,1
1988	8284,8	6218,3	17,5	14520,6
1989	9193,4	6597,3	17,5	15808,2
1990	9535,8	6764,3	17,5	16317,6
1991	10077,8	7113,8	17,5	17209,1
1992	10319,9	8378,7	17,5	18716,1
1993	10638,4	9681,7	17,5	20337,6
1994	10977,7	9864,6	17,5	20859,8
1995	11074,0	9862,8	17,5	20954,3
1996	11297,1	9934,8	17,5	21249,4
1997	11771,8	10102,6	17,5	21891,9
1998	13021,3	10306,5	26,2	23354,0
1999	15555,9	10537,2	26,2	26119,3
2000	16052,5	11175,2	36,4	27264,1
2001	16623,1	11672,9	36,4	28332,4
2002	19568,5	12240,9	36,4	31845,8
2003	22974,4	12578,7	33,9	35587,0
2004	24144,7	12645,4	33,9	36824,0
2005	25902,3	12906,1	35,1	38843,5
2006	27420,2	13062,7	81,9	40564,8

Dünya üzerindeki toplam enerji gereksinimi yaklaşık 15 trilyon kWh civarındadır ve hızla artmaktadır. Bu ihtiyacın %80'i fosil yakıtlarından sağlanırken, kalan %20'lik kısmı hidroelektrik santraller ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Ülkemizde ise enerji ihtiyacının yalnızca %0,55'lik kısmı yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır.

Her ne kadar kullanım oranları düşük olsa da ülkemiz yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça yüksek bir potansiyele sahiptir. Çizelge 6.3 de ülkemizdeki yenilenebilir enerji kaynağı potansiyelleri gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 Türkiye yenilenebilir enerji kaynağı potansiyelleri (Atılğan İ., 2000)

KAYNAKLAR	Brüt	Teknik	Ekonomik (Kullanılabilir)
Hidrolik Enerji (MW) (milyar kWh/yıl)	107.500 430	53.750 215	34.682 124.5
Jeotermal Enerji Isı (MW) (Mtep/yıl) Elektrik (MW) (milyar kWh/yıl)	31500 - 4500 -	7.500 5.4 500 -	2.843 1.8 350 1.4
Güneş Enerjisi Isı+Elektrik (MW) (milyar kWh/yıl) (Mtep/yıl)	11.500 x 10 ³ 977.000 80.000	1.400.000 6105 500	116.000 305 25
Rüzgar Enerjisi Elektrik (MW) (milyar kWh/yıl)	220.000 400	55.000 110	20.000 50
Klasik Biomas Enerji Yakıt (Mtep/yıl)	30	10	7
Modern Biomas Yakıt (Mtep/yıl)	90	40	25

Türkiye, oldukça iyi rüzgar potansiyeline sahiptir. Fakat bu kapasitenin kullanımını özendirmek için finansal ve düzenleyici bir yapının oluşturulmaması, yenilenebilir enerji kaynaklarını desteklediği bir kanunu olmaması bu alanda belirsizliklere neden olmakta ve gelişmeleri yavaşlatmaktaydı. Bu ihtiyaç doğrultusunda Mayıs 2005'te "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun" yürürlüğe girmiştir.

Çizelge 6.4 Türkiye'nin bölgesel ortalama rüzgar güç yoğunluğu

Bölge adı	Ort. Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m ²)
Akdeniz Bölgesi	21.36
İç Anadolu Bölgesi	20.14
Ege Bölgesi	23.47
Karadeniz Bölgesi	21.31
Doğu Anadolu Bölgesi	13.19
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	29.33
Marmara Bölgesi	51.91

Ülkemizde rüzgardan elektrik üretilmesi gecikme ile 1998 yılında başlamıştır. Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları politikalarında belirsizlikler yaşanmaktadır. Bu tür politikalarda, planlamalar yapılırken temel verilerin doğru olarak saptanması gerekmektedir. Yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle de elektrik enerjisi alanında rüzgar enerjisi kaynakları, kullanımını özendirecek teşvik uygulamaları, dünyadaki örnekleri incelenerek ve toplumsal fayda ön planda tutularak, yasal düzenlemelere yansıtılmalıdır. Bu süreçte, bu politikaların yeniden yaşama geçirilmesi yönünde üniversiteler ile ilgili meslek odalarının da içinde olacağı katılımcı bir ortam yaratılmalıdır.

Rüzgar enerjisi santralleri kurulmasının ilk aşaması olan uzun dönemli rüzgar değerleri ölçümü, tüm projeyi etkilemesi açısından çok büyük bir öneme sahiptir. Standartlara uygun ölçüm cihazları ile uygun şartlarda veri toplama ve değerlendirme işlemlerinin yapılması kapasite tahminlerindeki hatayı en aza indirecektir. Bu nedenle, ölçümlerin uzman kişiler tarafından gerçekleştirilmesi sağlanmalıdır. Bu konuda Meteoroloji Genel Müdürlüğü rüzgar tahmin işlerinden de sorumlu olmalıdır ve eğitim konusunda ilgili meslek odaları ve üniversiteler görevlendirilmelidir. Bu şekilde hassas olarak elde edilen verilerin bir araya

getirilmesi ile oluşturulacak Türkiye Rüzgar Atlas'ı, kullanılabilir rüzgar potansiyelimizi belirlememizi sağlayacaktır. Fosil yakıtlı enerji kaynakları diğerlerinin yanı sıra çevre üzerindeki zararların ortadan kaldırılması için enerji bedeline dahil olmayan bir maliyet doğurmaktadırlar. Enerji kaynaklarının birim yatırım maliyetleri karşılaştırılırken çevresel ve toplumsal etkileri de dikkate alınmalıdır. Bunun için, üretim maliyetlerinde marjinal maliyet yerine alternatif maliyetlerin göz önüne alınması gerekir. Buna göre fosil yakıtlı enerji kaynaklarından elde edilen elektrik ayrıca vergilendirilmelidir. Kömür veya gazdan üretilen her kWh başına belirli bir miktar vergi konması, bu gelirle rüzgar enerjisi ve diğer yenilenebilir enerjilerin teşvik edilmesine yetecektir.

Bunlara ek olarak rüzgar değirmenlerinin parçalarını yerli üretecek firmalara Ar-Ge teşviki sağlanmalı ve üniversitelerimizin bu alandaki araştırma geliştirme çalışmaları desteklenmelidir. Büyük çoğunluğu ithal edilen türbinlerin öncelikle belli donanımlarının ulusal olanaklarla yapılması için bu gereklidir. Oluşturulacak teknolojik bilgi birikimi ve arttırılacak istihdam rüzgar enerjisinin gelişmesini sağlayacaktır. Almanya, İngiltere, Danimarka'da on binlerce insan rüzgar değirmenleri ile ilgili işlerde doğrudan ve dolaylı çalışmaktadır. Dünyadaki değişik ülkelerde rüzgar enerjisini desteklemek için uygulanan çeşitli modeller vardır. Bunlar; rüzgardan elde edilen elektriğe sabit fiyat vermek, rüzgar elektriği üretenlere vergi indirimini sağlamak, rüzgar elektriği yatırımcılarına ithalat ve yatırım kolaylıkları sağlamak, elektrik üreticilerine rüzgar enerjisi kotası koymak olarak sıralanabilir. Türkiye kendi sistemine uygun bir rüzgar enerjisi politikası belirlemelidir. Ayrıca sektörle ilgili yurtdışındaki politikalar, teknolojik gelişmeler ve uygulamalar yakından izlenmeli ve ülkemiz açısından olumlu olabileceklerin ulusal rüzgar enerjisi politikamıza katkısı sağlanmalıdır.

Türkiye coğrafik konumu nedeni ile belirli mevsimlerde farklı basınç sistemlerinin etkisi altında kalmaktadır. Bu sebeple dört mevsimin tüm özelliklerini taşıyabilmektedir. Belli başlı basınç sistemlerinin etkisi mevsimsel olarak irdelenecek olursa; kış aylarında merkezi Rusya üzerinde bulunan ve kara yüzeyinin aşırı soğuması nedeni ile, etki alanının Türkiye'nin güney enlemlerine kadar uzandığı İzlanda Alçak Basınç sisteminin etkisi altında kaldığı görülmektedir. Bu sistemlerle ilgili hava akışları dikkate alınarak, kuzey ve özellikle kuzeydoğu kuvvetli hamleli rüzgarların etkili olduğu söylenebilir. Ayrıca sonbahar mevsiminden itibaren özellikle Cenova körfezinde oluşan cephesel sistemlerin doğuya hareketi neticesinde de Kuzey Ege özellikle batı ve kuzeybatılı rüzgarların etkisinde

kalmaktadır. Bu etki polar hava kütlelerinin kuzey enlemlerine doğru çekildiği ilkbahar mevsimi sonlarına kadar zaman zaman gözlenir. Yaz aylarında ise Azor Yüksek Basıncı kara yüzeyi boyunca hareket ederek, Avrupa üzerinde merkezlenir ve özellikle Türkiye'nin batı bölgelerinde kuvvetli kuzeyli akışların etkili olmasına neden olur. Aynı zamanda Basra Alçak Basıncı Türkiye'nin Güney ve Güneydoğu bölgeleri üzerinden karasal bölgelerin ısınması neticesinde hareket ederek tüm İç Anadolu ve Karadeniz kıyılarını etkisi altına almaktadır. Türkiye'nin, Güney ve Doğu bölgeleri güney ve güneydoğu'lu rüzgarların etkisinde kalırken batı bölgeleri de, batıda Azor Yüksek Basınç merkezi ve doğudan ise Basra Alçak Basınç merkezinin oluşturduğu kuvvetli gradyan nedeni ile hamleli kuzeydoğulu rüzgarların etkisinde kalmaktadır.

Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü verilerine göre, Avrupa'da rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından en zengin ülkelerden biri olan Türkiye'de, rüzgar enerjisi kaynakları elektrik ihtiyacının tamamını karşılayacak düzeydedir.

Türkiye'nin rüzgar potansiyeli için yapılan ve ilk kez 1998'de TÜSİAD'ın "21. Yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi" adlı raporunda açıklanan bulgulara göre; Türkiye'nin karasal alanlarında 20 bin MW'lık kullanılabilir rüzgar enerjisine sahip olduğu denizlerde ise bu rakamın 15 bin MW olduğu ortaya konmuştur (Kekezoğlu, 2007).

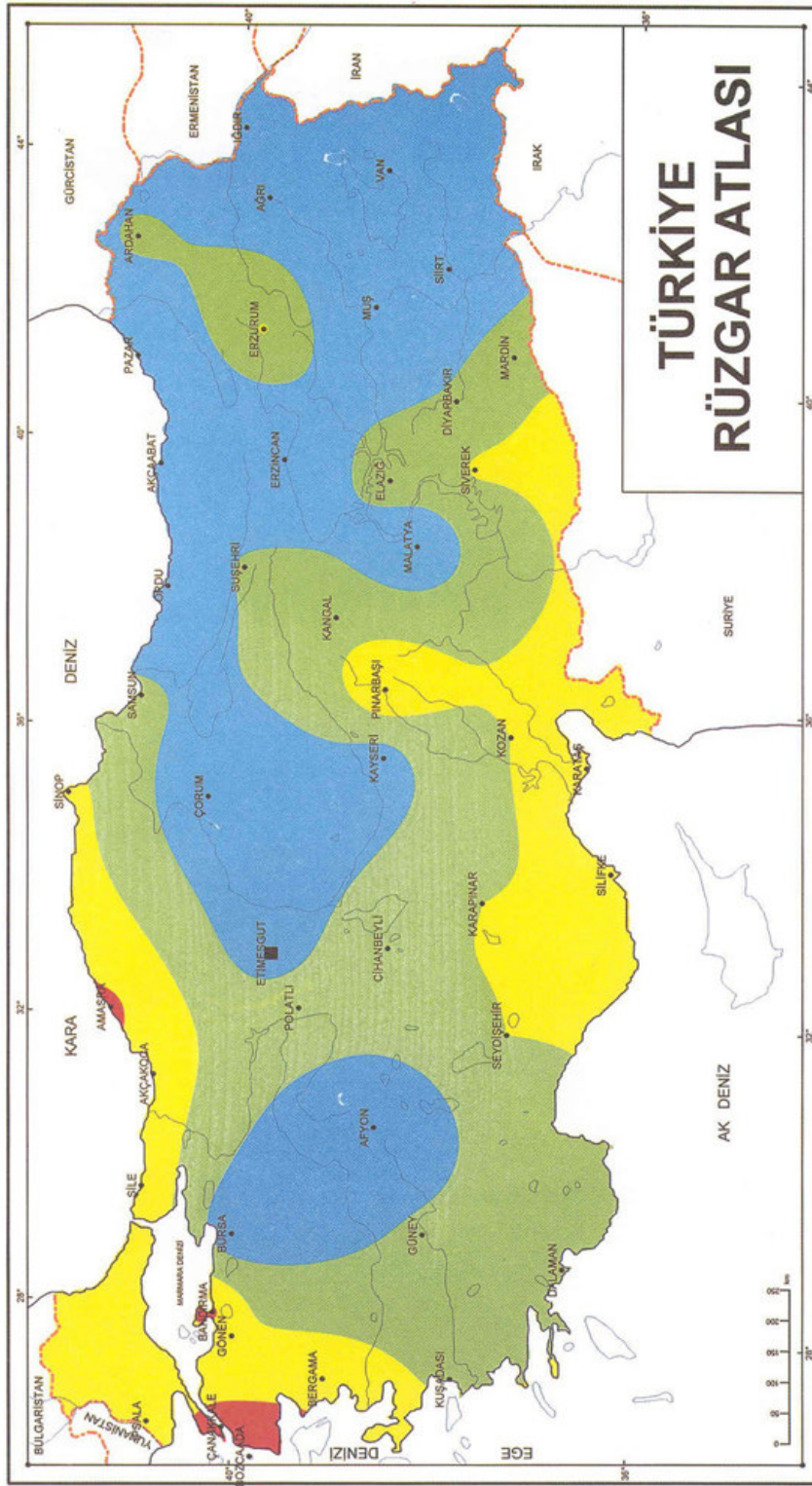
Çizelge 6.5 Türkiye'de birincil enerji kaynakları üretim hedefleri (Btep)

Yıllar	Taşkömürü	Linyit	Petrol	Doğalgaz	Hidrolik	Rüzgar	Güneş	Nükleer
2008	5104	16974	1841	293	4678	361	460	
2009	5097	17672	1699	248	4692	391	475	
2010	5092	18001	1573	235	4903	421	495	
2011	5096	19456	1459	228	5177	450	515	
2012	5105	20131	1359	221	5646	480	536	2743
2013	5111	21565	1264	225	6172	511	558	2743
2014	5115	22778	1161	223	6673	541	580	5486
2015	5109	24190	1069	213	7060	571	605	8229
2016	5123	25600	990	213	7491	601	650	8229
2017	5124	27233	915	212	7948	631	697	8229
2018	5124	29374	849	216	8421	661	748	8229
2019	4986	30813	754	220	8932	691	803	8229
2020	4755	32044	693	229	9419	721	862	8229

6.1 Türkiye Rüzgar Atlası

Türkiye rüzgar analizi çalışmasına bir PC paket programı olan WASP (wind atlas analysis and application program) kullanılmaktadır. Bu program menülerle işletilmektedir. Ve her menü kendi içinde aktif entegre bir programdır. Menülere gerekli girdi uygun formatta verildiğinde sonuç çıktısını hemen görmek mümkün olmaktadır. Menüler Fizik esaslı bir takım alt modellerden oluşmuştur.

Rüzgar analizinin amacı meteoroloji istasyonlarında ölçülmüş olan rüzgar hız ve yön bilgisi datasına yakın engeller çevre pürüzlülük durumu ve orografik etkilerden dolayı olabilecek etkilerin WASP programı yardımıyla hesaplanmasıdır. Burada WASP, sahip olduğu alt modelleri kullanarak yakın engellerin, pürüzlülük durumunun ve var olan orografinin etkilerini hesaplar, rüzgar datasında gerekli düzeltme yapılır. Hatadan arındırılmış bu bilgiler bölgesel rüzgar potansiyeli tespitinde kullanılır. Rüzgar atlası çalışması, bölgesel rüzgar potansiyelini yerden 50 m yükseklik ve 5 farklı yüzey durumu için rüzgar hızı aralıkları ve bunlara karşılık gelen rüzgar enerji yoğunluklarını gösterecek şekilde haritalandırma işlemidir.



1. Rüzgar potansiyeli, rüzgarın gücünü temsil etmektedir. Rüzgar türbini halihazırda potansiyelin % 20 ile % 30 luk bölümünü kullanabilir. Potansiyel hesaplamaları, deniz seviyesinde 1 Am ilk standart basınç ve 15 °C sıcaklığa karşılık gelen 1.23 kg/m³ hava yoğunluğuna göre yapılmıştır.
2. Yerleşim alanları, ormanlar ve rüzgar kırıcıları yoğun olduğu tarım alanları (pürüzlülük sınıfı 3) edilen alanlar genellikle bu sınıfta bulunmaktadır.
3. Az sayıda rüzgar kırıcının olduğu açık araziler (pürüzlülük sınıfı 1). İç bölgelerde en fazla tercih edilen alanlardır.
4. Düzgün kıyı alanları ve çok az sayıda rüzgar kırıcı içeren kara yüzeyleri (pürüzlülük sınıfı 1). Eğer hakim rüzgar yönü deniz tarafından ve sürekli ise, potansiyel daha fazla olabilir.
5. Kıyılardan en az 10 km uzaklıktaki açık denizler (pürüzlülük sınıfı 0).
6. Bütün sınıflarda % 50 ye varan bir hız artışı görülmektedir ve bu sonuç 400 m yüksekliğinde ve 4 km çapındaki simetrik bir tepede yapılan hesaplamalarda elde edilmiştir.

Rüzgar hızındaki artış, tepenin yüksekliğine, uzunluğuna ve yapısına bağlıdır.

Beş farklı topografik durum için yer seviyesinden 50 m. yükseklikteki rüzgar potansiyelleri ¹						
Kapalı Araziler ² m s ⁻¹	Açık Araziler ³ m s ⁻¹	Kıyılar ⁴ m s ⁻¹	Açık Deniz ⁵ m s ⁻¹	Topo ve Bayır ⁶ m s ⁻¹		
> 6.0	> 7.5	> 8.5	> 9.0	> 11.5	> 1800	
5.0-6.0	6.5-7.5	7.0-8.5	8.0-9.0	10.0-11.5	1200-1800	
4.5-5.0	5.5-6.5	6.0-7.0	7.0-8.0	8.5-10.0	700-1200	
3.5-4.5	4.5-5.5	5.0-6.0	5.5-7.0	7.0-8.5	400-700	
< 3.5	< 4.5	< 5.0	< 5.5	< 7.0	< 400	

Şekil 6.1 Türkiye rüzgar atlası

6.2 Türkiye'nin İlk Rüzgar Santrali ve Mevcut Durum

Demirer Holding A.Ş. rüzgar enerjisinden elektrik üretmek için ilk adımı, bünyesindeki Delta Plastik End. A.Ş.'nin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla otoprodüktör statüsünde bir rüzgar enerji santrali kurarak atmıştır.

Türkiye'nin ilk rüzgar enerji santrali olma özelliğini taşıyan bu santral, İzmir'in Çeşme Germiyan bölgesinde kurulmuştur. 3 adet türbinden oluşan tesisin kurulu gücü 1.74 MW'dır.

Şubat 1998'den itibaren üretim yapan tesis, yılda yaklaşık 5.000.000 kilowat saat elektrik üretmektedir. Bu üretim 5.000 kişinin elektrik ihtiyacını karşılayacak kapasitededir.

Santral 1998 yılından 2003 yılına kadar yaklaşık 25 milyon kWsaat elektrik üretmiştir. Bu elektrik bir kömür santralinde üretilseydi atmosfere 25 bin ton karbondioksit atılmış olacaktı.

Ülkemizde uygulamaları 1998 yılında başlayan rüzgar santralleri ilk dönemler küçük ölçekliydi. İki sene içinde toplam kurulu gücü 17.4 MW olan iki santral "Yap-İşlet-Devret" modeliyle üretim yaparken, toplam kurulu gücü 1.7 MW olan bir diğer santral "Otoprodüktör" statüde üretim yapmaktadır. (1998'de Güçbirliği Holding tarafından kurulan 600kW'lık türbinleri içeren 7,2 MW'lık Alaçatı RES ile Demirer Holding tarafından kurulan ve Enercon GmbH işletmesindeki 600 kW türbinli 10 MW'lık Bozcaada RES'tir.) Bu santrallerden elde edilen yıllık elektrik enerjisi de yaklaşık 54 000 000 kWh'dır.

Günümüzde ise, Türkiye'deki kurulu rüzgar gücü 250 MW değerine yaklaşmıştır. Aynı zamanda inşası devam eden 174 MW gücündeki rüzgar enerjisi santrali projeleri devam etmektedir. 2006 yılı sonu itibarıyla kurulu gücü 50 MW olan ülkemizdeki rüzgar enerjisinin son yıllardaki gelişimi oldukça hızlıdır.

Ayrıca EPDK' dan yapılan yazılı açıklamada, kuruma yapılan yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yeni lisans başvurularından, 3138 MW kurulu güçte 54 adet rüzgar enerjisi tesisi için incelemenin devam ettiği, 1318 MW kurulu güçte 36 adet rüzgar enerjisi tesisi için uygun bulma kararı alındığı, 2086 MW kurulu güçte 57 adet rüzgar enerjisi tesisi için lisans verildiği bildirildi. Ayrıca 1 Kasım 2007 tarihinde de, rüzgar enerjisine dayalı 85000 MW kurulu güçte 751 üretim tesisi için ise lisans başvurusu yapıldığı açıklanmıştır.

Çizelge 6.6 Türkiye rüzgar enerjisi santralleri

Türkiye’deki Rüzgar Santralleri					
Mevkii	Şirket	Üretime Geçiş Tarihi	Kurulu Güç (MW)	Türbin imalatçısı	Türbin adet ve kapasitesi
İzmir-Çeşme	Alize A.Ş.	1998	1.5	Enercon	3 adet 500 kW
İzmir-Çeşme	Güçbirliği A.Ş.	1998	7.2	Vestas	12 adet 600 kW
Çanakkale-Bozcaada	Bores A.Ş.	2000	10.2	Enercon	17 adet 600 kW
İstanbul-Hadımköy	Sunjüt A.Ş.	2003	1.2	Enercon	2 adet 600 kW
Balıkesir-Bandırma	Bares A.Ş.	I/2006	30	GE	20 adet 1.500 kW
İstanbul-Silivri	Ertürk A.Ş.	II/2006	0.85	Vestas	1 adet 850 kW
İzmir-Çeşme	Mare A.Ş.	I/2007	39.2	Enercon	49 adet 800 kW
Manisa-Akhisar	Deniz A.Ş.	I/2007	10.8	Vestas	6 adet 1.800 kW
Çanakkale-İntepe	Anemon A.Ş.	I/2007	30.4	Enercon	38 adet 800 kW
Çanakkale-Gelibolu	Doğal A.Ş.	II/2007	14.9	Enercon	13 adet 800 kW + 5 adet 900 kW
Hatay-Samandağ	Deniz A.Ş.	I/2008	30	Vestas	15 adet 2.000 kW
Manisa-Sayalar	Doğal A.Ş.	I/2008	30.4	Enercon	38 adet 800 kW
İzmir-Aliağa	İnnores A.Ş.	I/2008	42.5	Nordex	17 adet 2.500 kW
İŞLETMEDEKİ KAPASİTE TOPLAMI			249.15		
İstanbul-Gaziosmanpaşa	Lodos A.Ş.	I/2008	24	Enercon	12 adet 2.000 kW
İstanbul-Çatalca	Ertürk A.Ş.	I/2008	60	Vestas	20 adet 3.000 kW
Balıkesir-Şamlı	Baki A.Ş.	I/2008	90	Vestas	30 adet 3.000 kW
İNŞA HALİNDEKİ KAPASİTE TOPLAMI			174		
Muğla-Datça	Dares A.Ş.	I/2008	28.8	Enercon	36 adet 800 kW
Bilecik	Sagap A.Ş.	II/2008	66.6	Conergy AG	74 adet 900 kW
Hatay-Samandağ	Ezse Ltd. Şti.	II/2008	35.1	Nordex	900 kW
Hatay-Samandağ	Ezse Ltd. Şti.	II/2008	22.5	Nordex	2.500 kW
Aydın-Didim	Ayen A.Ş.	II/2008	31.5	Suzlon	2.100 kW
İzmir-Çeşme	Kores A.Ş.	II/2008	15	Nordex	2.500 kW
Osmaniye-Bahçe	Rotor A.Ş.	I/2009	135	GE	54 adet 2.500 kW
Manisa-Soma	Soma A.Ş.	I/2009	140.8	Enercon	176 adet 800 kW
Balıkesir-Kepsut	Poyraz A.Ş.	I/2009	54.9	Enercon	61 adet 900 kW
İzmir-Aliağa	Doruk A.Ş.	I/2009	30	Enercon	15 adet 2.000 kW
TÜRBİN TEDARİK SÖLEŞMESİ İMZALI PROJE TOPLAMI			560.2		
Lisans Alan		2 086			
Lisans Başvurusu		85 000			

7. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN VERİ ANALİZİ YÖNTEMLERİ (WEİBULL VE RAYLEİGH DAĞILIMLARI)

7.1 Weibull Dağılımı

7.1.1 Kullanım Alanları ve Tarihçesi

Weibull dağılımı 1939 yılında İsveçli fizikçi Waloddi Weibull tarafından materyallerin bozulma sürelerinin gösteriminde ilk kez kullanılmıştır. Weibull dağılımı 1951 yılından itibaren kalite kontrolü, binaların ekonomik ömrü ve fabrika üretimiyle ilgili olarak kullanılmış, pratik sonuçlar elde edilmiştir.

Hogware ve Rikitake deprem oluşumu için Fisher ve Chov sismik ve risk saptanmasında Weibull dağılımından yararlanmışlardır.

Ülkemizde Weibull dağılımı ile ilgili ilk çalışma 1984'te Ahmet Mete Işıkara tarafından yapılmıştır.

Uygulamada, pozitif rassal değişkenlerin ortaya çıktığı çok önemli örnekler vardır. Örneğin, bekleme modelleri, yaşam tabloları, salgın hastalıkların sürme müddeti, öğrenme üzerine harcanan zaman ve yolculuk süreleri bu tip pozitif rassal değişkenlerdir. Aynı zamanda, radyoaktif yoğunluğu, metrekaareye düşen yağmur miktarı ve endüstri kazalarının maliyetlerini tanımlayan rassal değişkenler de pozitiftir. Her ne kadar, üstel ve gamma dağılımları bu tip rassal değişkenlerin sıklık dağılımlarını içerebiliyorsa da, bazı durumlarda bu iki dağılım, tanımlanan rassal değişkeni tam olarak açıklayamaz. Böyle durumlarda, pozitif rassal değişkenle çalışılan pek çok durumda olduğu gibi Weibull dağılımı kullanılabilir.

Weibull dağılımı parametrelerinin aldığı değere bağlı olarak sağa yada sola çarpık bir dağılım yada simetrik bir dağılım olabilmektedir. Bu özelliği sayesinde de birçok farklı dağılım yerine Weibull dağılımının kullanılması daha avantajlı olmaktadır. Bugün için kalite kontrol alanında geniş bir uygulama sahasına sahip olan önemli bir dağılımdır.

Olasılık kuramı ve istatistik bilim dallarında Weibull dağılımı (Waloodi Weibull anısına isimlendirilmiş) bir sürekli olasılık dağılımı olup olasılık yoğunluk fonksiyonu şöyle ifade edilir:

$$f(x; k; \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} \exp^{-(x/\lambda)^k}$$

Burada $x \geq 0$ ve $x : 0$ için $f(x; k; \lambda) = 0$. $k > 0$ şekil parametresi ve $\lambda > 0$ ölçek parametresi olurlar.

Weibull dağılımı için yığılmalı olasılık fonksiyonu bir gerilmiş üstel (stretched) fonksiyondur.

Yaşama, hayatta kalım ve yetmezlikle yıkım süreçlerini inceleyen verilerin analizi alanında Weibull dağılımı çok elastik olup kolayca değiştirilebildiği için çok kullanılmaktadır. Değişik parametre değerleri kullanılarak normal dağılım, üstel dağılım gibi çok popüler diğer istatistiksel dağılımların davranışların Weibull dağılımı kullanarak aynen taklit etme imkanı bulunmaktadır.

Eğer $k = 3.4$ ise, Weibull dağılımı normal dağılımına benzerlik gösterir. Eğer $k = 1$ ise o zaman Weibull dağılımı üstel dağılımına dönüşür

Weibull dağılımı çok popüler olarak rüzgar hızı dağılımını tanımlamak için kullanılır çünkü doğasal pratik rüzgar hızı çizelgelerine teorik Weibull şekli çok uygun olmaktadır.

Eğer

$$X \sim Weibull(k = 2, \sqrt{2}\beta) \text{ ise}$$

$$X \sim Rayleigh(\beta)$$

bir Rayleigh dağılımı olur.

7.1.2 Rüzgar Değerlendirmeleri

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

7.1.3 Weibull Dağılımı (Rüzgar Potansiyeli İçin Kullanımı)

Rüzgarın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, hem enerji üretimi değerlendirmelerinde hem de rüzgar endüstrisinde çok önemlidir. Türbin tasarımcıları, türbin iyileştirilmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgar dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar. Eğer bir yıl boyunca rüzgar ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgarların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgarların daha çok ortaya çıktığı görülür. Bir site için rüzgar dağılımı ya ölçülerek,

ya da ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde “Weibull dağılımı “ ile belirlenir. Bu dağılım, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirtilir. Bu dağılımın altında kalan alanın toplam olabilirliği 1’ dir. Yani, sakın havalar da bunun içinde olmak üzere, belli bir periyotta rüzgarın her aralıkta toplam olma olasılığı %100 dür. Weibull dağılımı eğrisi simetrik değil çarpıktır. Bu eğriyi oluşturan her bir hız frekansları, ortalama hızın bulunmasını da sağlar.

7.1.4 Rayleigh Dağılımı (Rüzgar Potansiyeli İçin Kullanımı)

Eğer Weibull dağılımı şekil değişkeni 2 ise, böyle bir dağılıma “Rayleigh dağılımı denir. Rüzgar türbini üreticileri genellikle makine başarımlarını Rayleigh dağılımına göre verirler. Bunun nedeni, değişik yerlerdeki rüzgar dağılımlarının bilinmemesidir.

7.2 Rüzgar Hızı ve Rüzgar Enerjisi Denklemleri

Rüzgar enerjisi ile ilgili temel denklem aşağıdaki gibidir:

$$P = \frac{C_p \mu_c A \rho V^3}{2} \quad (7.1)$$

P: Enerji watt (joule/s)

C_p : Güç katsayısı

μ_c : Dönüştürme oranı

A: Kanat alanı (m²)

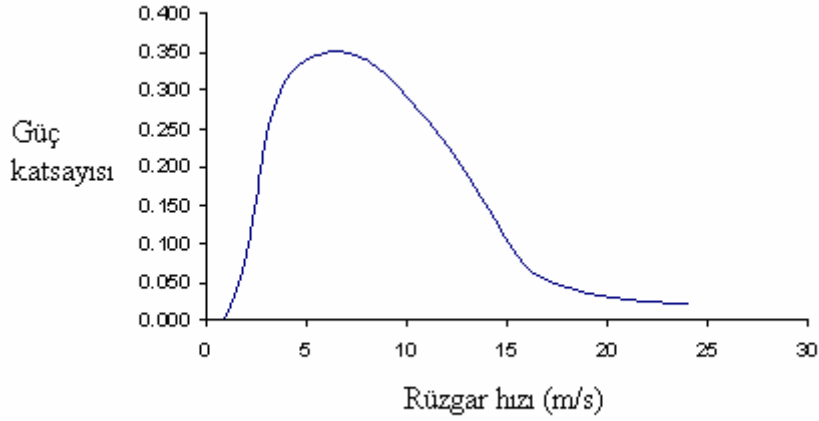
ρ : Yoğunluk

V: Rüzgar hızı (m/s)

7.2.1 Güç Katsayısı

Rüzgar gücünün tamamından verimli bir enerji elde etmek mümkün değildir. Teorideki maksimum verimlilik katsayısı değeri 0.593’tür. Bu değere sahip ideal rüzgar türbini, Rayleigh-Betz adı verilen türbindir. Pratikteki katsayı değerleri 0.25 ile 0.45 değerleri

arasındadır. Genellikle daha büyük türbinlerin, katsayı değerleri de daha büyüktür. Rüzgar değişimleri göz önüne alarak kullanılacak olan değişken açılı rotorlar, bu katsayı değerini optimum noktaya getirebilirler.



Şekil 7.1 Rüzgar hızı ile güç katsayısı arasındaki ilişkisi

Katsayının maksimum değeri, Rayleigh modellenmesi yapılmış rüzgar hızları içinde, 5 ile 7m/s arasındaki değerlere karşılık gelmektedir. Rotor bu değerler göz önüne alınarak optimize edilmelidir.

7.2.2 Dönüştürme Oranı

Enerjinin ancak küçük bir kısmı türbinlerin merkezinde elektriğe çevrilebilmektedir. Burada örnek değeri 0.7 seçelim. Bu değer mekaniksel ve elektriksel iki kısımdan oluşmaktadır. Mekanik etki dişli kutusu, mil yatağı vb. elemanlardan dolayı oldukça yüksektir, elektriksel etki ise generatörün özelliklerine bağlıdır.

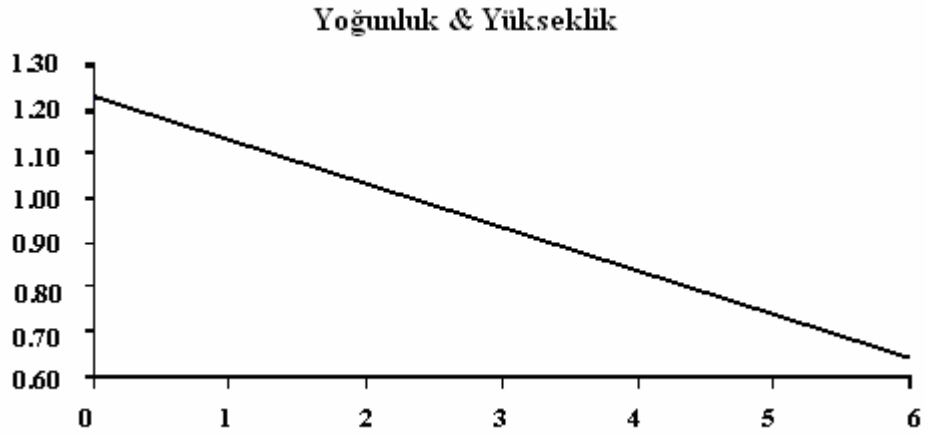
7.2.3 Kanat Alanı

Bu alan rotor kanatlarının süpürdüğü alandır, aşağıdaki örnek hesaplamada m^2 başına üretilen güç, rüzgar türbinlerini boyutları da göz önüne alınarak gösterilmektedir.

<u>Açıklama</u>	<u>Rotor çapı (m)</u>	<u>Alan (m²)</u>	<u>Güç (kW)</u>
Küçük	< 2.5	5	< 1
Orta	5-15	20-200	10-50
Büyük	> 50	2000	> 1000

7.2.4 Yoğunluk

Havanın yoğunluğu deniz seviyesinde, 1.23 kg/m^3 ’dür. Ama bu değer aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi yükseklikle azalmaktadır.



Şekil 7.2 Hava yoğunluğu ile yükseklik arasındaki ilişkisi

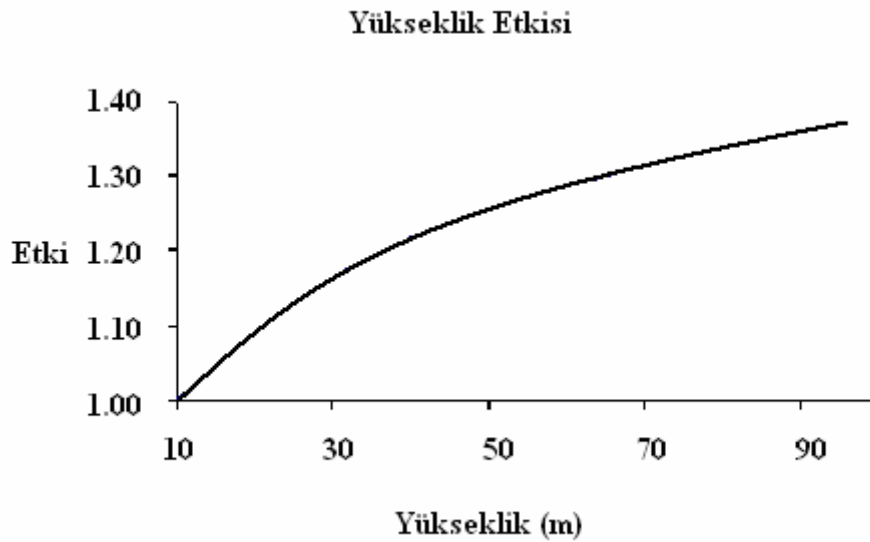
Bu yüzden 1000m yüksekliğe yerleştirilmiş bir türbin, deniz seviyesindeki bir bölgeye yerleştirilmiş bir türbinin üreteceği enerjinin %80’ ine denk gelen bir enerji üretecektir.

7.2.5 Rüzgar Hızı- Yükseklik Etkisi

Rüzgar hızı, yükseklikle değişir. Rüzgar hızı yer seviyesinde düşük ve dengesizdir, daha yükseklerde, örneğin; 1000m civarında, daha yüksek ve düzgündür. Bunun nedeni, rüzgarın geçişi sırasında yeryüzü ile yaptığı sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Yer yüzeyinin değişkenliği nedeniyle, rüzgar hızı ile yükseklik arasında bir ilişki kurmak zorunluluktur.

$$V = V_{ref} \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^{0.142}$$

Rüzgar hızı datalarının alındığı, en yaygın kullanılan standart yükseklik 10m' dir. Üretilcek enerji, rüzgar hızının kübüyle değişeceği için, 30 ile 80m yüksekliğe yerleştirilecek türbin kulesi önemli bir avantaj sağlamış olacaktır. Yerleşim şartlarının bu yüksekliklere izin vermediği durumlarda, başlangıçtaki hesaplamalar 10m yükseklikten alınmış datalar baz alınarak yapılacaktır. Bu durumda, yukarıda verilen denklemden faydalanacaktır.



Şekil 7.3 Yükseklik etkisi ile yükseklik arasındaki ilişkisi

Örnek hesaplamada, türbin yüksekliğinin 30m olduğunu kabul edelim, bu yüzden Rayleigh rüzgar hızı 10m için 5m/s olurken, 1.17' lik faktör dikkate alınarak hız 5.58 m/s değerine çıkarak, alınacak çıkış değerlerinde %60' lık bir artışa neden olacaktır.

7.2.6 Rüzgar Hızı- Çalışma Aralığı

Türbinler, düşük hızlarda (2m/s' den düşük durumlarda), yüksek hızlardaki (25m/s' den yüksek durumlarda) gibi dönüş gücüne sahip olamayacaktır. Bu nedenle aşırı hızlara karşı, olası hasarları önlemek için türbinler sınırlandırılmalı veya durdurmalıdır.

Örnek hesaplama için, çalışma aralığı 2-25 m/s seçilir ve bu çalışma aralığı dışında bir güç üretimi olmaz.

7.3 Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Gücünün Hesaplanması

Rüzgar enerjisi, kinetik enerji temelinde geometri ve fizik bilgileri kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir.

$$K.E. = \frac{1}{2} * M * V^2 \quad (7.2)$$

Şimdi hareketli hava moleküllerinin yani rüzgarın kinetik enerjisini bulalım. Rüzgar türbininin bıçaklarını, içinden rüzgarın geçtiği bir düzlem gibi düşünelim. Rüzgarın geçtiği kesit alanına A, geçiş sürelerini belirleyen düzleme yani kalınlığına D diyelim.

O zaman bu bölgenin hacmi:

$$v = A * D \quad (7.3)$$

olur.

Havanın yoğunluğu;

$$\rho = M / h \quad (7.4)$$

olur.

Şimdi bu hava düzlemindeki hızı bulmaya çalışalım. Zamanı T ile gösterirsek, türbin bıçakların geçmek için rüzgarın alması gereken yolu da D ile tanımlarız. Buna göre,

$$V = D / T \quad (7.5)$$

Bu durumda ilk olarak yazdığımız formülü aşağıdaki gibi değiştirebiliriz:

$$K.E. = \frac{1}{2} * M * V^2 \quad (7.6)$$

$$K.E. = \frac{1}{2} * (\rho * v) * V^2 \quad (7.7)$$

$$K.E. = \frac{1}{2} * (\rho * A * D) * V^2 \quad (7.8)$$

$$K.E. = \frac{1}{2} * (\rho * A * V * T) * V^2 \quad (7.9)$$

$$K.E. = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A * T \quad (7.10)$$

Buradan güç ise,

$$P = K.E. / T = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A \quad (7.11)$$

şeklinde olur.

Rotor alanına düşen güç ise,

$$P / A = \frac{1}{2} * \rho * V^3 \quad (7.12)$$

olur.

Burada dikkate alınması gereken iki nokta vardır. Birincisi rüzgar gücünün, rüzgar hızının kübü ile değiştiği, diğeri de rüzgar türbininin rotor boyutundan bağımsız bir formül elde ettiğimizdir. Yani, P / A formülü, havanın yoğunluğuna ve rüzgarın hızına bağlıdır. Bu tanım ile birlikte rüzgar türbininin boyut, verimlilik veya diğer karakteristiklerinden bağımsız bir sonuç ortaya çıkmaktadır.

1. Rotor çapı 43m olan (600kW gücündeki bir türbin için standart değer) bir rüzgar türbininin, rotor bıçaklarından geçecek rüzgar alacağı yolun yani kanat kalınlığını 1m

olduğu durum için, havanın kütle ve hacmini bulalım. (Bu örnekte hava yoğunluğu: 1.225kg/m^3 kabul edelim.)

2. İlk sorudaki türbininin bıçaklarından geçen rüzgarın hızını 10m/s olduğunu kabul edersek, rotor alanına düşen rüzgar gücü ne olur?
3. İlk iki sorudaki şartların geçerli olduğu bire durumda, 50kW gücünde 7m yarıçaplı rüzgar türbininin, rotor alanına düşen gücü bulalım.

Cevaplar:

1. $A = \frac{1}{4} * \pi * (\text{dia})^2$

$$v = \frac{1}{4} * 3.1416 * (43)^2 * 1 = 1451 \text{ m}^3$$

$$M = \rho * v = 1.225 \text{ kg/m}^3 * 1451\text{m}^3 = 1780 \text{ kg}$$

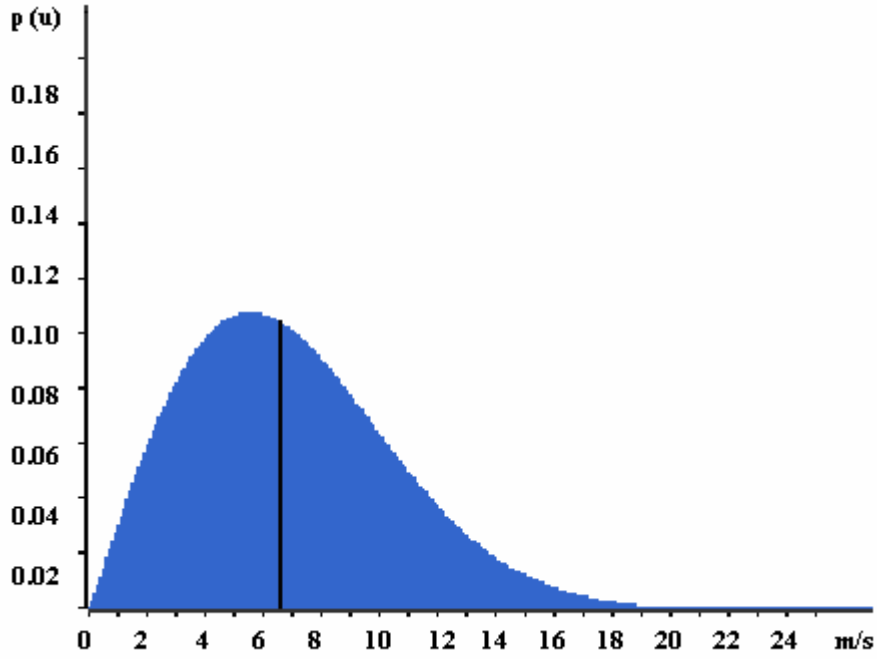
2. $P / A = \frac{1}{2} * \rho * V^3 = \frac{1}{2} * 1.225\text{kg/m}^3 * (10\text{m/s})^3 = 613 \text{ W/m}^2$

3. P / A formülü türbinin özelliklerinden bağımsız olduğu için, 2. sorunun cevabı ile aynı olacaktır, yani 613 W/m^2 dir.

7.4 Rüzgar Değişimlerinin Tanımlanması

7.4.1 Rüzgar Hızı Değişimlerinin Genel Modellenmesi

Rüzgar enerji endüstrisi için rüzgar hızı değişimlerinin tanımlanması oldukça önemlidir. Türbin tasarımları sırasında, türbinlerin optimizasyonu ve üretim maliyetlerinin minimize edilmesi için bu bilgilere ihtiyaç vardır. Ayrıca bu bilgiler yatırımcıların, elektrik üretiminden elde edecekleri gelirin hesaplanmasında da kullanılır.



Şekil 7.4 Frekans histogramı

Bir yıl boyunca rüzgar ölçümleri yaparsanız, kuvvetli rüzgarların nadir, ortalama ve zayıf rüzgarların ise daha sık estiğini fark edersiniz.

Rüzgar değişimleri genellikle, Weibull dağılımı adı verilen sistemle belirlenir. Bu bölgede rüzgar hızının ortalaması 7m/s dir ve şekil parametresinin 2 olduğu belirlenmiştir.

Frekans histogramı rüzgar şiddeti sınıflarına karşılık gelen esme yüzdelerini (frekans) gösteren grafiksel bir gösterimdir. Frekans tablosundaki bilgiler yardımıyla hazırlanabilecek bu grafik yardımıyla incelenen alanda hangi rüzgar şiddeti diğerlerinin daha sık gözlemlendiği tespit edilebilmektedir. Histograma veri saklamada bir tasarruf yapmak amacıyla bir istatistiksel dağılım fonksiyonu olan 2 parametrelili bir Weibull dağılım fonksiyonu uydurmak mümkündür. Böylece verinin tamamını saklamak ve kullanmak yerine sadece Weibull parametrelerini kullanarak, hesap yapmak mümkün olacaktır.

Uydurulan Weibull dağılım fonksiyonu ne kadar iyi olursa olsun mutlaka bir hata payı içerecektir. Gözlem sayısı azaldıkça ve/veya mod değeri küçüldükçe uydurulan dağılım fonksiyonundaki hata miktarı genel olarak artacaktır. Özellikle iki tepe noktası bulunan frekans histogramlarında 2 parametrelili Weibull dağılım fonksiyonu çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bazı ticari programlarda tercih edilen yüksek rüzgar şiddeti değerlerine daha

fazla ağırlık verilmesi zaman zaman ham veri ile weibull fonksiyonu kullanılarak hesaplanan enerji üretim miktarlarında ciddi farklılıklar yaratmaktadır (Uğuz, 2005).

7.4.2 Rüzgar Hızlarının İstatistiksel Tanımlanması

Yukarıdaki şekil bize olası yoğunluk dağılımını göstermektedir. Taralı alan, rüzgar hızlarının esme sıklığını %1-100 arasında belirlendiği durumlarda, her zaman 1 olacaktır.

Taralı bölge, dikey bir çizgi ile rüzgar hızının 6,6m/s olduğu noktadan ikiye ayrılmıştır. Bunun anlamı ise, rüzgar hızının, ölçüm süresinin yarısında 6,6m/s den düşük, diğer yarsında ise yüksek olduğudur.

Daha önce ortalama rüzgar hızını 7m/s olarak kabul edildiğini söylemiştik, bu değer aslında ölçümlerin yapıldığı bölgedeki rüzgar hızlarının ortalamasıdır.

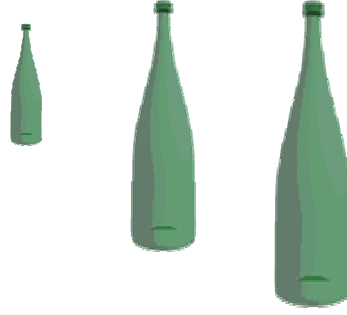
Görüldüğü gibi rüzgar hızı dağılımları simetrik değil, değişkendir. Bazen çok yüksek rüzgar hızları görülür, fakat oldukça seyrekler. Rüzgar hızının 5,5m/s olduğu, diğer bir deyişle en sık bu değerde görüldüğü için, dağılımın model hız değeri bu değer kabul edilmiştir. Eğer her bir rüzgar hız aralığını, dikkate değer rüzgar hızlarıyla çarpıp birbirine eklersek, gerçek ortalama değeri bulmamız mümkün olur.

Rüzgar hızı değişimlerinin istatistiksel dağılımları, her bölgenin iklimsel şartlarına, karasal yapısına ve yüzeysel durumuna göre değişir. Weibull dağılımı da böylece şekilsel ve değersel olarak değişiklik gösterir.

Şekil parametresi net olarak 2 kabul edilirse, dağılım Rayleigh dağılımı olarak adlandırılır. Rüzgar türbin üreticileri genellikle makinelerinin standart performanslarını, Rayleigh dağılımına göre şekillendirirler.

7.4.3 Ortalama Şişe Yanılgısı

Rüzgar türbinlerinin olduğu bölgedeki, ortalama rüzgar enerji hacmi ne kadardır?



Şekil 7.5 Ortalama şişe yanılığı

Bu sorunun cevabını bulmak için ortalama rüzgar hızını bulmamız yeterlidir. Bu sayede rüzgar türbinlerinin üreteceği rüzgar enerjisini rahatlıkla bulabiliriz. Diğer bir deyişle, ortalama rüzgar hızının 7m/s olduğu bir bölgede, rotor alanında m^2 başına düşen ortalama rüzgar gücünün 210W olduğunu hesaplayabiliriz.

Fakat bu sonuç kesinlikle yanlıştır. Burada olası rüzgar kaynaklarının nerdeyse büyük kısmını eksik tahmin etmiş oluruz. Bunu yaparsak, ortalama şişe yanılığına düşmüş oluruz. Şekildeki en küçük ve en büyük şişelere bakalım; aynı şekle sahipler, biri 0,24m, diğeri 0,76m uzunluğundadır. Ortalama şişenin uzunluğu kaçtır?

Cevabınız 0,5m ise, aynı hataya düşmüşsünüz demektir. Bu hata şişelerin hacminden kaynaklanmaktadır. Hacimleri kübik olarak değişmektedir. Bu yüzden, en büyük şişe, en küçük şişeye göre yalnızca 3,17 kat daha büyüktür. Hacimleri arasındaki fark ise, bunun kübü kadar yani 32 kat olacaktır.

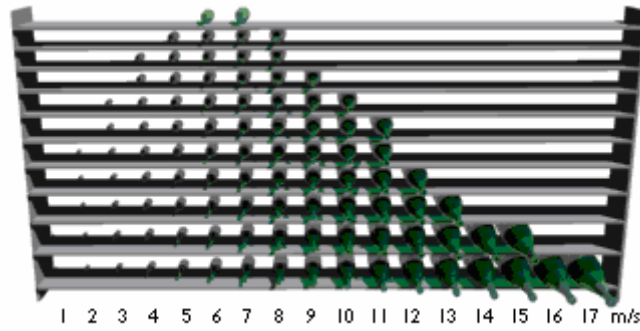
Ortalama hacim bu yüzden, küçük şişenin 16,5 katı olacaktır. Bunun anlamı da, ortalama hacme sahip şişenin uzunluğu, küçük şişenin 2,55 katı olmalıdır yani 0,61m. (16,5, 2,55'nin kübüdür.)

Burada anlatılmak istenen şey, ortalama rüzgar hızını baz alarak, ortalama rüzgar gücünün hesaplanamayacağı gerçeğidir. Her bir rüzgar hızını hesaba katmanız gerekmektedir. Rüzgar enerji potansiyeli ancak bu şekilde ortaya konabilir.

7.4.4 Ortalama Rüzgar Gücü

7.4.4.1 Güç Dağılımının Dengesi

Yukarıdaki şişe örneğinde hacmin boyuların kübü ile değiştiğini görmüştük. Rüzgar gücü de, rüzgar hızının kübü ile değişir. Weibull dağılımı ile aşağıdaki şekilde, her bir raftaki her bir şişenin %1'lik ölçüme denk geldiği kabulü ile rüzgar hızı dağılımlarını elde edebiliriz. Burada her bir şişenin boyutu rüzgar hızına, ağırlıkları da rüzgar enerjisine de karşılık gelecektir.



Şekil 7.6 Rüzgar gücü dağılımı

Sağa doğru gittiğimiz zaman 17m/s hızına denk gelen şişelerin çok daha ağır olduğunu gözlemleyeceğiz, 1m/s' lik şişeler göre hemen hemen 5000 kat daha fazladır. (1m/s lik hızlarda $0,61\text{W/m}^2$, 17m/s lik hızlarda ise 3009W/m^2 lik güç oluşacaktır.

Ortalama güç dağılımının elde edildiği noktadaki rüzgar hızını bulmak, bu rafların denge noktasını bulmaktan geçer. Bu durumda da görüldüğü gibi yüksek hızlı rüzgar ne kadar seyrek olursa olsun, üretecekleri güç daha fazla olacaktır.

Ortalama rüzgar hızı her ne kadar 7m/s gibi görünse de, gücün yoğunlaştığı ortalama hız 8,7m/s dir. Bu hızta oluşacak rüzgar gücü 402 W/m^2 olacaktır ki, daha önceden hesaplanan gücümüz nerdeyse iki katı kadardır.

7.5 Weibull ve Rayleigh Dağılımları

İstatistiksel Metotlar

- Rayleigh ve Weibull dağılımları, rüzgar analizi için kullanılan yöntemlerdir.
- Her ikisi de rüzgar hızı olasılıklarını vermektedir.

Weibull Dağılımı

- Farklı sıklıktaki rüzgar dağılımlarında da kullanılır.
- İki parametreye bağlıdır: k = şekil faktörü, c = ölçek parametresi.
- $k = 2$ olduğu durumlar, Rayleigh dağılımını verir.

Rayleigh Dağılımı

- Tipik rüzgarlar için geçerlidir.
- Basittir fakat genel kabul görmez.
- Rüzgar hızına yani sadece tek parametreye bağlıdır.

Rüzgarın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, enerji üretimi değerlendirmeleri için çok önemlidir. Türbin tasarımcıları; türbin iyileştirmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgar dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar.

Bir yerde sadece ortalama rüzgar hızı (V_{ort}) biliniyorsa; Rayleigh Dağılım Fonksiyonu yardımıyla herhangi bir rüzgar hızının (V_i), esme saati (h_r) yüzdesi bulunabilir. Bunun sonucunda ortaya çıkan rüzgar hızları bir olasılık yoğunluğu dağılımıdır. Dağılım şematik

olarak çizilirse bu dağılımın altında kalan alan 1'e eşittir. Çünkü, rüzgarın sıfır dahil herhangi bir hızda esme olasılığı %100'dür (Şen, 2003).

İhtiyaç duyulan ve vazgeçilmez olan enerjinin sürekli, kaliteli ve güvenli olarak ağılanabilmesi günümüzün en önemli konularında biridir. Dünya genelinde fosil kaynaklar, gerek ısınmada gerekse yakıt olarak çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu fosil kaynakların rezervlerinin gelecek için yeterli görülmemesi, büyük ölçüde ileri teknoloji ve finans kaynağı gerektirmesi, tüm dünya ülkelerinin mevcut enerji programlarını tekrar gözden geçirmesine ve acilen gerekli önlemleri almasına sebep olmuştur. Alınacak önlemlerin başında, toplam enerji talebinde petrolün payının giderek düşürülmesi, enerji tasarrufunun sıkı bir şekilde yapılması ve kaynakların verimli kullanılmasının yanında yenilenebilir enerji kaynaklarından mümkün olduğu kadar yararlanmaya yönelik teknolojilerin hızla geliştirilip uygulamaya konulması gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakların en önemlilerinden biri de rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisi, son yıllara kadar daha çok su pompalama ve kırsal alanda elektrik enerjisi elde etme amaçları ile kullanım alanı bulmuştur. Günümüzde ise artık alternatif bir enerji üretim kaynağı olarak enerji sektöründe yerini almıştır. Bu enerjinin kullanılabilmesi, rüzgar rejimine, rüzgar milinin yerleştirildiği yüksekliğe ve enerji üretim isteminin boyutlarına bağlıdır (Kurban vd., 2005).

7.5.1 Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgar, atmosferin ısınması ve soğumasından kaynaklanan sıcaklık ve basınç farkından dolayı yer değiştiren havanın, dünya yüzeyine göre bağıl olarak yaptığı harekettir. Burada, yüksek basınçtan alçak basınca doğru bir hareket söz konusudur. Rüzgar, olumsuz yanları az olan, atmosferde serbest olarak dolaşan, kararlı, güvenilir ve sürekli bir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisi, kinetik bir enerjidir. Atmosferin rüzgarı oluşturan brüt kinetik gücü yaklaşık olarak 190×10^9 kW değerindedir. Dünyanın 50° kuzey ve güney enlemleri arasındaki 3×10^9 kW 'lık kinetik rüzgar gücü potansiyelinin çeşitli nedenlerden dolayı yalnızca üçte birinin kullanılabileceği düşünülmektedir. Yeryüzünün aldığı toplam güneş enerjisinin yaklaşık olarak %2'sinin rüzgarın kinetik enerjisine dönüştüğü tahmin edilmektedir.

Bu miktarın toplam dünya enerji tüketiminin 100'lerce katı kadar olduğu düşünülecek olursa, rüzgar enerjinin önemi daha da iyi anlaşılacaktır. Yapılan rüzgar türbinleriyle, ancak belirli bir rüzgar hızı aralığında enerji üretilebilmektedir. Bu nedenle, enerji üretim sisteminin kurulacağı yörenin rüzgar rejiminin bilinmesi öncelikli ve önemli bir konudur. Rüzgar

enerjisinin miktarı, rüzgarın hızına bağlıdır. Rüzgarın hızı yükseklikle, gücü ise hızının kübüyle orantılı olarak artmaktadır. Rüzgarın sağlayacağı enerji, gücüne ve esme süresine bağlıdır. Rüzgar türbini alanında esas gelişme, uçak pervane ve kanatlarının geliştirilmesi ile mümkün olmuştur (Kurban vd., 2005).

8. İSKENDERUN BÖLGESİ İÇİN WEİBULL VE RAYLEİGH DAĞILIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, Hatay ili İskenderun bölgesinde elde edilmiş rüzgar hızı verilerinin analizi, önceki bölümde anlatılan Weibull ve Rayleigh dağılımları ile incelenerek, hangi dağılımın bu bölge için daha iyi sonuçlar vereceği ortaya konacaktır. Rüzgar gözlem istasyonlarından belli bir yükseklikten alınan rüzgar hızı verilerinin frekans dağılımları elde edilerek veri analizi işlemine başlanılır. Bu frekans dağılımı yardımıyla hangi rüzgar hızı değerlerinin sık gözlemlendiği belirlenebilir. Rüzgar türbinleri seçilirken bu tür dağılımlardan yararlanılmaktadır. Rüzgar hızı verilerinin standart sapması 0 ile 3 m/s arasında olmalıdır. Herhangi bir alandaki standart sapmanın küçük olması demek o alandaki rüzgar rejiminin son derece düzenli olması anlamına gelmektedir. Bu çalışmada rüzgar hızı değerlerinden yararlanacağımız bölge olan İskenderun’ da ölçümlerin yapıldığı alana ait özellikler aşağıdaki gibidir:

Rüzgar gözlem istasyonunun;

Konumu: 36°35' N, 36°10'E

Direk yüksekliği: 10m

şeklindedir.

8.1 İstatistiksel Analiz

8.1.1 Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları

Rüzgar hızının dağılımın belirlenmesinde kullanılan pek çok dağılım vardır. İki parametrelili Weibull ve Weibull’ un şekil parametresinin 2 olduğu durum olan Rayleigh dağılımları en yaygın kullanılan dağılımlardır. Rayleigh dağılımı tek parametrelili olduğu için Weibull’ a göre daha az esnektir; ancak parametrelerinin hesaplanması daha kolaydır. Ayrıca, yıllık ortalama rüzgar hızının 4.5’ den büyük olduğu durumda, rüzgar hızı dağılımının Rayleigh dağılımına yaklaştığı bilinmektedir.

Rüzgar hızı için iki parametrelili Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun genel ifadesi

$$f_w(v) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) \quad (8.1)$$

şeklindedir. Bu eşitlikte k şekil parametresidir ve genellikle 1 ile 3 değeri arasında görülmektedir. Verilen ortalama bir rüzgar hızı değeri için, düşük değerli şekil parametresi ortalama hız değeri civarında göreceli olarak daha geniş bir dağılımın olduğunu, yüksek değerli bir şekil parametresi de daha dar bir dağılım olduğunu gösterir. Daha düşük değerli bir şekil parametresi doğal olarak, verilen rüzgar hızında daha yüksek bir enerji üretimine yol açacaktır. Bu parametreler aşağıdaki formüllerden hesaplanacaktır:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v} \right)^{-1.086} \quad (8.2)$$

$$c = \frac{V}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (8.3)$$

Burada V ortalama rüzgar hızını, Γ ise gama fonksiyonunu göstermektedir.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \xi^{x-1} \exp(-\xi) d\xi \quad \text{ve} \quad \Gamma(1+x) = x\Gamma(x). \quad (8.4)$$

Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu

$$F_w(v) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) \quad (8.5)$$

şeklindedir. Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu, rüzgar hızının, belli bir v değerinden küçük ya da eşit gerçekleşme olasılığını verir.

Rayleigh yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki ifade ile verilebilir:

$$f_R(v) = \left(\frac{2v}{c^2} \right) \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right) \quad (8.6)$$

Rayleigh kümülatif dağılım fonksiyonu

$$F_R(v) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right) \quad (8.7)$$

şeklindedir. Rayleigh dağılımının en büyük avantajı sadece ortalama rüzgar hızı ile dağılımın belirlenmesidir. Rayleigh dağılımının rüzgar çalışmalarında geçerliliği pek çok referansta gösterilmiştir.

Ortalama rüzgar hızı ve rüzgar hızının standart sapması, sırasıyla aşağıdaki eşitliklerinden hesaplanır:

$$v_m = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N v_i \right] \quad (8.8)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - v_m)^2 \right]^{1/2} \quad (8.9)$$

Çizelge 8.1 Aylara göre belirlenmiş parametre değerleri

	v_m (m/s)	c (m/s)	c (m/s)	k
Ocak	2.71	1.69	3.04	1.66
Şubat	1.62	1.12	1.80	1.49
Mart	2.14	1.60	2.35	1.37
Nisan	2.28	1.97	2.41	1.17
Mayıs	2.22	1.85	2.37	1.21
Haziran	3.38	2.37	3.73	1.46
Temmuz	3.35	2.41	3.69	1.42
Ağustos	2.74	2.51	2.84	1.10
Eylül	1.87	1.53	2.00	1.23
Ekim	2.43	1.82	2.66	1.36
Kasım	1.91	1.12	2.15	1.79
Aralık	2.07	1.16	2.34	1.89

Weibull dağılımına dayanarak, en büyük sıklığa sahip rüzgar hızı aşağıdaki eşitliğinden hesaplanır.

$$v_{\text{mod}} = c \left(1 - \frac{1}{k} \right)^{1/k} \quad (8.10)$$

Maksimum rüzgar hızı şu ifadeyle bulunabilir:

$$v_{\text{max } E} = c \left(\frac{k+2}{k} \right)^{1/k} \quad (8.11)$$

Yukarda ifade edilen formüllerde $k=2$ alındığında Rayleigh dağılımı için hesaplamalar gerçekleşir.

8.1.2 Rüzgar Hızı Olasılık Dağılımları

Zamana bağlı olarak alınan rüzgar hızı dataları, istatistiksel analiz için daha uygun olması nedeniyle artık frekans dağılımlarına göre elde edilmektedir. Bu yüzden, alınan bu datalar frekans dağılımı formatına göre dönüştürülmektedir. Bunun için de aşağıda verilen tablo oluşturulur. İkinci sütunda rüzgar hızı sınıflandırılmış, üçüncü sütunda ise ortalama rüzgar

hızları hesaplanmıştır. Dördüncü sütunda ise, her bir rüzgar sınıfında oluşan frekanslar verilmiştir. Olasılık yoğunluk dağılımı da, beşinci sütunda sunulmaktadır.

Çizelge 8.2 Olasılık yoğunluk dağılımları

j	v _j	v _{m,j}	f _j	f(v _j)	f _w (v _j)	f _R (v _j)
1	0-1	0.5	195	0.262	0.316	0.153
2	1-2	1.5	231	0.310	0.261	0.334
3	2-3	2.5	127	0.171	0.178	0.294
4	3-4	3.5	74	0.099	0.112	0.159
5	4-5	4.5	52	0.070	0.067	0.057
6	5-6	5.5	30	0.040	0.038	0.014
7	6-7	6.5	17	0.023	0.021	0.002
8	7-8	7.5	8	0.011	0.012	0.000
9	8-9	8.5	6	0.008	0.006	0.000
10	9-10	9.5	1	0.001	0.003	0.000
11	10-11	10.5	1	0.001	0.002	0.000
12	11-12	11.5	1	0.001	0.001	0.000
13	12-13	12.5	-	0.000	0.000	0.000

8.1.3 Rüzgar Gücünün Yoğunluk Fonksiyonu ve Ortalama Güç Yoğunluğu

Ortalama rüzgar hızı başka bir ifadeyle aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$v_m = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (8.12)$$

Birim alandaki rüzgar gücü aşağıdaki gibi verilirse,

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (8.13)$$

Ortalama rüzgar güç yoğunluğunun hesaplanması için kullanılan en genel eşitlik aşağıdaki gibidir:

$$P_m = \int_0^{\infty} P(v) \Leftrightarrow f(v) dv \quad (8.14)$$

Ancak, ortalama değer biliniyorsa, ortalama rüzgar güç yoğunluğu direkt olarak aşağıdaki formülle bulunabilir:

$$P_m(v) = \frac{1}{2} \rho (v^3)_m \quad (8.15)$$

Ortalama değer ise, aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$(v^3)_m = \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \quad (8.16)$$

Bu eşitliğin integralinin alınması ile de Weibull fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir:

$$(v^3)_m = \frac{\Gamma(1 + 3/k)}{\Gamma^3(1 + 1/k)} (v_m)^3 \quad (8.17)$$

(8.12) ve (8.17) eşitliklerini (8.15)' de yerine koyarsak, ortalama güç yoğunluğu Weibull fonksiyonuna göre ortaya çıkmış olur:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left[1 + \frac{3}{k} \right] \quad (8.18)$$

(8.12) eşitliğinde $k = 2$ alınırsa,

$$v_m = c \sqrt{\pi/4} \quad (8.19)$$

bulunur ve Rayleigh fonksiyonu için ortalama güç yoğunluğu da aşağıdaki gibi olur:

$$P_R = \frac{3}{\pi} \rho v_m^3 \quad (8.20)$$

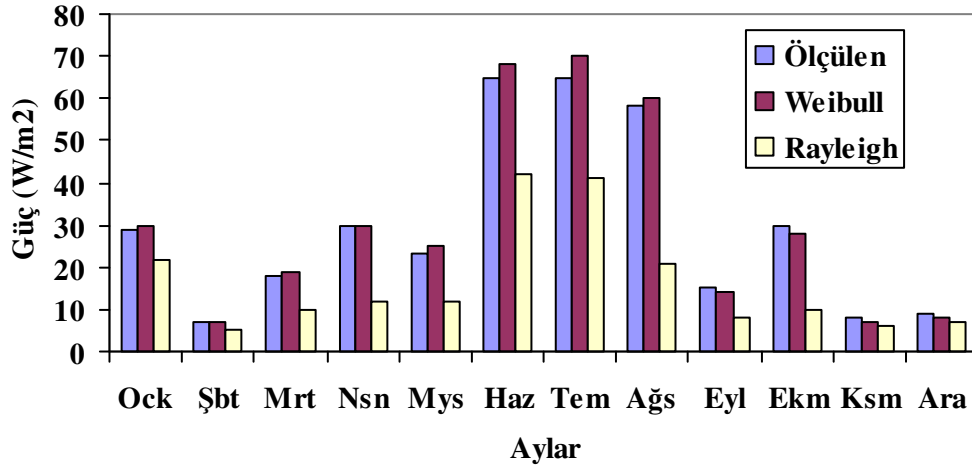
Ölçülmüş bir olasılık yoğunluk dağılımına karşılık gelen, ‘referans güç yoğunluğu’ olarak da adlandırılan rüzgar gücü yoğunluğu şöyledir:

$$P_{ref} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \rho v_{m,j}^3 f(v_j) \quad (8.21)$$

Burada $v_{m,j}$, j. aralıktaki ortalama hızı, aralıktaki olasılık değerini göstermektedir.

Ölçülen yoğunluk dağılımlarından yararlanılarak, ortalama güç yoğunlukları bulundu ve elde edilen değerler Şekil 8.1’ deki gibi gösterilmiştir. Güç yoğunluğu aydan aya önemli farklılıklar göstermiştir. Bu modeller baz alınarak yapılan güç hesaplamalarındaki hatalar aşağıdaki formülle hesaplanır ve şekilde gösterilir:

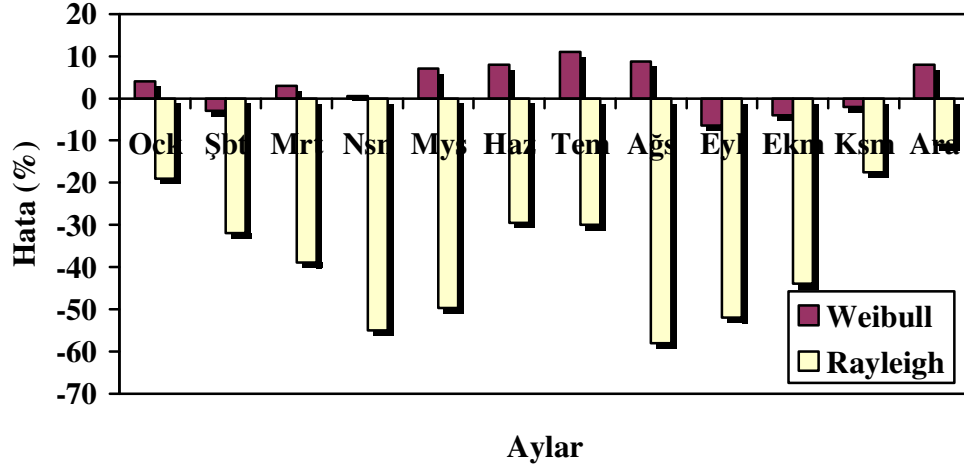
$$\text{Hata (\%)} = \frac{P_{W,R} - P_{m,R}}{P_{m,R}} \quad (8.22)$$



Şekil 8.1 Hesaplanan rüzgar güçlerinin karşılaştırılması

Weibull modeli, Rayleigh modeli ile karşılaştırılırsa hesaplamalarda ortaya çıkan hatlar oldukça küçük değerlerdedir. Oluşan en büyük hata Haziran ayındaki %11,4 lük hatadır. Nisan ayında ise, bu oran %0,1 gibi çok çok düşük değerde kalmıştır. Yıllık ortalama hata değerini aşağıdaki formülle hesaplırsak, Weibull fonksiyonu için bu değer %4,9 çıkacaktır.

$$\text{Hata (\%)} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \left| \frac{P_{W,R} - P_{m,R}}{P_{m,R}} \right| \quad (8.23)$$



Şekil 8.2 Hesaplanan rüzgar güçlerindeki hata oranları

Aylık analizler incelendiğinde, Rayleigh modelinde hata değerleri nispeten çok daha yüksek hatta kimi aylarda %50' nin bile üzerine çıkmaktadır. En düşük oran bile %11,3 olmaktadır ve yıllık ortalama hata oranı %36,5 hesaplanmaktadır.

Bu örnekte yıllık ortalama enerji hesabında, Weibull dağılımı kullanıldığında %4,9 hata yapılmakta iken Rayleigh dağılımı ile yapılan hesabın içerdiği hata % 36,5'tir. Bu örnekte de daha düşük hata yüzdesine sahip olduğu görülen Weibull dağılımı rüzgar enerjisi konusundaki çalışmalarda tercih edilen metottur. Verilen işlenmesi yoluyla elde edilen Weibull parametreleri kullanılarak herhangi bir rüzgar hızının frekansı konusunda hassas bir tahminde bulunmak mümkün olabilmektedir. Weibull olasılık yoğunluğu fonksiyonu şu şekilde tanımlanabilir. Weibull olasılık yoğunluğu fonksiyonu, rüzgarın herhangi bir hızda esme sıklığını gösteren fonksiyondur ve buna rüzgar hızı frekansı adı da verilir. Olasılık yoğunluğu fonksiyonunun elde edilmesi, şekil katsayısı (k) ile büyüklük katsayısı (c)' nin bilinmesini gerektirir ve bu iki katsayı, ortalama hız ile standart sapmanın fonksiyonudur. Weibull şekil katsayısı (k), oluşacak olasılık yoğunluğu eğrisinin biçimi konusunda da fikir vermektedir. Bu katsayının büyümesi ile eğri daha sivrilmekte ve hız değişimi aralığı daralmakta iken, değerin

düşmesi eğrinin daha fazla hız değerinin içerecek şekilde yayılması sonucunu vermektedir. (Çelik, 2004; Carta and Ramirez, 2006).

Bölgedeki rüzgar hızı ölçümleri 10m’de yapılmasına rağmen, her ay için hesaplanan ortalama hızın 3 m/s’den ve ortalama rüzgar gücünün ise uygun dağılımlar kullanıldığında 50 W/m² ‘den büyük çıkması nedeniyle bölgenin rüzgar enerjisi üretimi açısından elverişli ve umut verici olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, yapılan çalışmaların sürdürülerek ölçümlerin farklı bölgelerde ve yüksekliklerde uzun dönemli alınarak tüm bölgenin detaylı araştırılması, bölge özelliklerinin çıkarılması ve maliyet analizi yapılması sonucunda daha doğru ve kesin değerlendirmeler yapılabileceği açıktır. Ülkemizde bu tür enerji kaynaklarına yönelimi hızlandıracak benzer çalışmaların yapılması ve üretime katılması geleceğimiz için büyük önem taşımaktadır

9. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Rüzgar enerjisi, hammaddesi ücretsiz olan, tükenmeyen, çevre sorunlarına yol açmayan bir kaynaktır. Ayrıca, rüzgar enerjisinin kullanımı ile hammaddesi sınırlı, tükenir olan kaynakların da kullanımı azaltılmış olur. Dünyadaki enerji sıkıntısı göz önüne alınarak, rüzgar enerjisinin tarihsel gelişimi, bu konuda yapılan yatırımlar ve ulaşmak istenen hedefler bu çalışmamızda ortaya konmuştur.

Yapılan hesaplamalar sonucunda, ülkemizde bir rüzgar santralinde, üretilecek enerjinin kWh bedeli 5,9 sent olmaktadır. Rüzgar potansiyeli açısından zengin olan ülkemizde, bir rüzgar santrali kurmanın maliyet olarak da, dünya standartlarında ve mevcut enerji açığımızın kapatılmasında rahatça yararlanabilecek bir kaynak olduğunu göstermektedir.

Türkiye'deki özellikle rüzgar enerjisindeki yatırımların artırılması rüzgar potansiyelinden faydalanması bir zorunluluk haline gelmektedir. Çünkü, mevcut ve yeni kaliteli petrol rezervlerinin, kömür rezervlerinin sınırlı olması, Türkiye'nin enerji üretiminde dışa bağımlılığının azaltılması / kaldırılması, termik santrallerin elektrik üretimi veriminin % 35 gibi düşük verimlerde çalışması, nükleer enerjinin çevreye vereceği olası muhtemel zararlar; rüzgar enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarını ön plana çıkarmaktadır. Bu çalışma ile Türkiye' deki rüzgar enerjisi çalışmalarının bugüne kadar gelmiş olduğu nokta, yapılacak yatırımlar ve ülkemizin sahip olduğu yüksek potansiyel araştırılmıştır.

Rüzgar enerjisine her geçen gün artan ilgi, bu konuda yapılacak olan yatırımların gerçekçi bir şekilde ortaya konması zorunluluğunu ve buna bağlı olarak da rüzgar enerjisi potansiyelinin net bir biçimde belirlenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu anlamda alınan rüzgar hızı verilerinin analizleri de önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, veri analiz yöntemlerinin başında gelen Weibull ve Rayleigh dağılımları incelenerek, ülkemizdeki bir bölge için bu yöntemler karşılaştırılmış ve Weibull analizinin çok daha iyi sonuç verdiği ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- Atılgan İ., 2000, “Türkiye’nin Enerji Potansiyeline Bakış”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi.
- Atlı C., 2000, “Dünya’ da ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi”, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh.
- Carta, J.A., Ramirez, P., 2006, “Analysis of two-component mixture Weibull statistics for estimation of wind speed distributions”, Renewable Energy.
- Çelik, A.N., 2004, “A Statistical Analysis Of Wind Power Dencity Based On The Weibull And Rayleigh Models At The Region Of Turkey, Renewable Energy”, M.K.Ü., Mak. Müh.
- Güner S., Albostan A., 2007, “Türkiye’nin Enerji Politikası”, Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi.
- Johnson G.L., 2001, “Wind Energy Systems”, Manhattan, KS.
- Kekezoğlu B., 2007, “Şebekeden Bağımsız Çalışan Hibrid Enerji Sistemlerinde Risk Değerlendirmesi”, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Müh.
- Kurban M., Kantar Y.M., Hocaoglu F.O., 2005, “Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Araştırılmasında Weibull ve Rayleigh Dağılımlarının Kullanılması”, Anadolu Üniversitesi
- Şen Ç., 2003, “Gökçeada’nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile Karşılanması”, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Müh.
- Uğuz, S., 2005, “Rüzgar Enerjisi ile Elektrik Üretimi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elk.-Elek. Müh.
- Uyar, T. S., 1998, “Enerji Üretiminde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı”, Elektrik Mühendisliği, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Yayını
- Uyar, T.S., 2000, “Türkiye Enerji Sektöründe Karar Verme ve Rüzgar Enerjisinin Entegrasyonu”, Kocaeli Üniv. TEF.
- Ültanır M.Ö., 1997. “Türkiye’de Güneş ve Rüzgar Elektrik Santralleri Kurulması”, Enerji, Uzman Yayıncılık A.Ş., Yıl 2, Sayı 5, s. 34-38, İstanbul.
- Ültanır, M.Ö., 1998. “21. Yüzyıla girerken Türkiye’nin enerji stratejisinin değerlendirilmesi”, TÜSİAD, İstanbul
- Ültanır M.Ö., 1999. “Türkiye Açısından Hidroelektrik Enerji, Enerji”, Yıl 4, Sayı 3, Uzman Yayıncılık A.Ş., s. 57-61, İstanbul
- Yerebakan, M., 2001, Rüzgar Enerjisi, İstanbul Ticaret Odası.

www.ewea.org (European Wind Energy Association)
www.awea.org (American Wind Energy Association)
www.eie.gov.tr (Elektrik İşleri Etüt İdaresi)
www.enerji.gov.tr (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı)
www.emo.org.tr (Elektrik Mühendisleri Odası)

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	27.07.1982	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1996-2000	Şişli Kurtuluş Lisesi
Lisans	2000-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak. Elektrik Müh. Bölümü
Yüksek Lisans	2005-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı

Çalıştığı kurumlar

2006-devam ediyor Tümkar Elektrik Proje Taahhüt A.Ş.