İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR ENERJİSİ FAYDA-MALİYET ANALİZİ VE HİBRİT SİSTEMLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Receb Enes GÖKÇINAR

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: HİDROLİK VE SU KAYNAKLARI MÜHENDİSLİĞİ

Haziran 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR ENERJİSİ FAYDA-MALİYET ANALİZİ

VE

HİBRİT SİSTEMLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Receb Enes GÖKÇINAR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Y. Doç.Dr. Ali UYUMAZ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Zekâi Şen
Doç.Dr. Ahmet Duran ŞAHİN

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmamda rüzgâr enerjisini oluşturan unsurları belirterek, Dünya'da ve ülkemizde rüzgâr enerjisi yatırımları, maliyet analizleri ve uygulanan teşvikleri karşılaştırmalı bir şekilde ele aldım. Ayrıca dünyada giderek yaygınlaşan rüzgâr-hidroelektrik hibrit sistemler için örnek bir model oluşturarak ülkemizde uygulanabilirliğini inceledim ve ülkemizde rüzgâr enerjisi konusunda yapılabilecek çalışmalara değindim.

Bu çalışmada bana yardımcı olan ve bilimsel katkılarını esirgemeyen Sayın Yard. Doç. Dr. Ali UYUMAZ ve Doç. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca eğitim hayatı boyunca beni destekleyen değerli aileme sevgilerimi sunarım.

Haziran 2008 Receb Enes GÖKÇINAR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **viii**
ÖZET **ix**
SUMMARY **x**

1. GİRİŞ **1**

2. RÜZGÂR ENERJİSİ **2**
2.1. Genel Bilgi 2
2.2. Kuvvetli ve Zayıf Rüzgâr Alanları 4
2.3. Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi 5
2.4. Rüzgârdan Enerji Elde Edilmesi 6
2.5. Düşey Doğrultuda Rüzgârın Değişimi 8
2.6. Rüzgârın Değerlendirilmesi 9
2.6.1. Weibull Dağılımı 10
2.6.2. Rüzgâr Gülü 11
2.7. Rüzgâr Türbini 11
2.7.1. Rüzgâr Türbinleri için Yer Seçimi 11
2.7.2. Rüzgâr Türbinlerinde Aerodinamik Verim 12
2.7.3. Rüzgâr Türbinin Güç Eğrisi 13
2.8. Dünya'da Rüzgâr Enerjisi 14
2.9. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi 17

3. MALİYET **22**
3.1. Maliyet Analizi 22
3.1.1. Maliyet Analizi Kriterleri 22
3.1.2. Muhtelif Enerji Kaynaklarının Maliyet Analizleri 22
3.1.3. Rüzgâr Enerjisi Maliyet Analizi 24
3.2. Rüzgâr Enerjisi Maliyet Değişimi 26
3.3. Dış Maliyetler 27
3.3.1. İnşaat Alanı 27
3.3.2. Çevresel Etkiler 28

4. TEŞVİKLER **31**
4.1. Enerji Pazarı Teşvikleri 31
4.2. Ödeme Mekanizmaları 32
4.2.1. Gönüllü Sistem ve Yeşil Pazar 32
4.2.2. Sabit Tarife Sistemi 33
4.2.3. Sabit Üretim Sistemi 33

4.3. Yatırım Teşviği 34
4.4. Karbon Vergisi 34
4.5. Avrupa'da ve Türkiye'de Uygulanan Teşvikler 34

5. RÜZGÂR – HİDROELEKTRİK HİBRİT SİSTEMLERİ 38
5.1. Hibrit Sisteminin Türkiye'de Uygulanabilirliği 38
5.2. Karadeniz Bölgesi'nde Örnek Uygulama 39
5.2.1. Bölge İklimi ve Yağış Rejimi 39
5.2.2. Örnek Uygulama 40

6. SONUÇLAR 46

KAYNAKLAR 47

ÖZGEÇMİŞ 50

KISALTMALAR

IRESMED : Integration of Renewable Energies into Electricity Network
REPA : Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası
YEK : Yenilenebilir Enerji Kaynağı
EPDK : Enerji Piyasası Denetleme Kurulu
EİE : Türkiye Elektrik İşleri Etüt İdaresi
CBS : Coğrafi Bilgi Sistemi
RES : Rüzgâr Enerji Santrali
HES : Hidroelektrik Santrali

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1	Kurulu Rüzgar Güçleri ……	16
Tablo 2.2	Enerji Kaynakları Oranları …….	17
Tablo 3.1	Santral İşletme Giderleri …….	25
Tablo 3.2	Maliyet Etki Oranları …….....	26
Tablo 3.3	Enerji Üretim Maliyetleri ……	27
Tablo 3.4	Santral Gaz Salınımları …….....	29
Tablo 3.5	Fosil Enerji Kaynağı Kullanımı …….....	29
Tablo 3.6	Gaz Salınım Miktarları ……	29
Tablo 3.7	İç ve Dış Maliyetler …….	30
Tablo 4.1	Türkiye ve Dünyadaki Mevcut Uygulamalar ……..	37
Tablo 5.1	Türbin Güç Değerleri (Bonus 2000/76) …….....	41
Tablo 5.2	Üretilen Türbin Model Gücü (Bonus 2000/76) ……...	42
Tablo 5.3	Türbin Güç Değerleri (NEG Micon 2750/92) ……	42
Tablo 5.4	Üretilen Türbin Model Gücü (NEG Micon 2750/92) ……..	43
Tablo 5.5	Türbin Güç Değerleri (Nordex 2300 N90) ……..	44
Tablo 5.6	Üretilen Türbin Model Gücü (Nordex 2300 N90) ……...	45
Tablo 5.7	Rüzgar Hidroelektrik Hibrit Sistem Modeli …….	45

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1:	Cp, Maksimum Güç Katsayısı Grafiği …….	13
Şekil 2.2:	Rüzgar Türbinin Güç Eğrisi …….	14
Şekil 2.3:	Türkiye Rüzgar Potansiyeli Atlası ……...	20
Şekil 5.1:	Türkiye Hidroelektrik Potansiyeli Atlası …….	39
Şekil 5.2:	Karadeniz Havzası Hidroelektrik Potansiyeli Atlası ……...	40
Şekil 5.3:	Türbin Güç Eğrisi (Bonus 2000/76) ……	41
Şekil 5.4:	Türbin Güç Eğrisi (NEG Micon 2750/92) ……...	43
Şekil 5.5:	Türbin Güç Eğrisi (Nordex 2300 N90) ……	44

SEMBOL LİSTESİ

m	**:** Kütle
t	**:** Zaman
u	**:** Yatay rüzgar şiddeti
ρ	**:** Özgül yoğunluk
A	**:** Rüzgâr yönüne dik alan
k	**:** Von Karman sabiti
Cp	**:** Maksimum güç katsayısı
H	**:** Hacim
Zo	**:** Yüzey pürüzlülük uzunluğu

RÜZGÂR ENERJİSİ FAYDA - MALİYET ANALİZİ VE HİBRİT SİSTEMLER

ÖZET

Dünya temel anlamda birbiriyle ilişkili iki felaket ile karşı karşıya kalmıştır. Bunlardan birincisi küresel iklim değişikliği, diğeri ise enerji kaynaklarının giderek tükenmesidir. Ayrıca fosil enerji kaynaklarının gaz salınımları ile belirtilen iklim değişikliğine neden olması tam bir çıkmaz ile karşı karşıya bırakmaktadır. Bu sebeplerden dolayı yenilenebilir enerji sistemlerine ilgi artmaktadır. Yenilenebilir enerjilerden rüzgâr enerjisi kullanımı son yıllarda hızlı bir artış göstermiş olup, birçok ülkede rüzgâr enerjisi kullanımını teşvik etmek için sabit tarife, karbon vergisi, yeşil sertifika gibi çeşitli teşvikler geliştirilmiştir. Özellikle dolaylı maliyetler göz önüne alındığında rüzgâr enerjisi konvansiyonel enerji sistemlerinden çok daha ekonomik olmaktadır. Hammadde ihtiyacının olmaması, santral kurulumunun daha hızlı gerçekleştirilmesi, temiz bir enerji kaynağı olması, işletme maliyetinin düşük olması ve dışa bağımlılığı azaltması rüzgâr enerjisini cazip kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarındaki süreksizlikler sebebiyle ülke ihtiyaçlarını belirli bir oranda karşılayabilmesi veya fosil kaynaklar ile rekabet edebilmesi için dünyada teşvik esasları geliştirilmiştir. Bu teşvikler ile hem yenilenebilir enerjilere dayalı bir sanayi oluşmakta hem de uygulanabilirlikleri yaygınlaşmaktadır. Bu çalışma ile ülkemizde ve dünyada rüzgâr potansiyeli belirtilerek rüzgâr enerjisine yönelik teşvik ve uygulamaların maliyet açısından karşılaştırılması yapılmış, ülkemizde rüzgâr enerjisi yatırımını ve kullanımını artırmaya yönelik yapılabilecek çalışmalar tanımlanarak, enerjide sürekliliğin ve verimin artırılmasına yönelik hibrit (bütünleşik) sistem uygulamalarına değinilmiş ve örnek bir uygulama yapılmıştır.

WIND ENERGY COST-ADVANTAGE ANALYSIS AND

HYBRIT SYSTEMS

SUMMARY

Recently, world has been facing two main disasters; the global climate change which almost depends on the fosil based energy consumption and the other one is the lack of energy reservoirs. These regarding serious issues irresistable increase the attraction towards the renewable energy systems. The consumption of wind energy has increased recently. In several countries, wind energy incentive programmes such as fixed tariff, carbon tax, green certificate have been established. When compared with indirect expenses, wind energy becomes more economical than other conventional energy systems. Wind energy is considered as a competitive energy source due to its renewable, clean energy supplement, low operation and maintenance costs. The incentives for renewable energy sources have been developed in several countries in order to maintain the national energy demand and competitivity against the fuel based energy sources. In this thesis, the incentives and applications of wind energy among several countries and Turkey are compared regarding the definition of developing wind energy investment and consumption methods whereas a hydro electric hybrit model is developed in order to provide the efficiency and durability of wind energy.

1. GİRİŞ

Bilindiği gibi yeryüzünde mevcut bütün enerji kaynaklarının kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi o kaynağın kendine özgü niteliği, zenginliği ve cinsine göre değişmektedir.

Dışa kapalı, plancı ekonomilerde enerji üretimi çoğu zaman maliyet/fayda analizleri yapılmadan hemen erişilebilir ve üretim teknolojisi hazır kaynaklara dayandırılmaktaydı. Ancak dünya genelinde bütün ülke ekonomilerinin serbest piyasa ekonomisine doğru gittikleri 1990'lı yıllardan itibaren elektrik üretimi için kullanılan enerji kaynaklarının çok detaylı fiyat/maliyet analizleri yapılarak toplam maliyeti en düşük olan enerji kaynaklarına doğru bir yönelme olmuştur.

Bu gelişim içinde devletlerin rolü hangi enerji türünün kullanılacağından ziyade, hangi enerji türünün kullanımının desteklenmesi ve hangi üretim teknolojisinin hükümet destekli bilimsel araştırma ve geliştirme çalışmaları ile ilerletilmesi yönünde olmuştur.

2006 yılı itibariyle ülkemizde elektrik santrallerinin toplam gücü 40,8 GW olup, bu gücün %34'ü doğal gazdan, %32'si barajlardan ve %20'si linyitten elde edilmektedir. Ülkemizde ortalama rüzgâr verimliliğinin %30'un üzerinde olduğu ve Kyoto protokolü çerçevesinde küresel ısınma ve çevre kirliliği göz önüne alındığında, Türkiye'de hükümet alım garantisi desteği ile rüzgâr enerjisi yatırımlarına büyük bir yönelme gerçekleşmiştir.

Rüzgâr enerjisindeki süreksizlik planlama açısından hem maliyetleri artırmakta hem de uygulanabilirliği sorgular hale getirmektedir. Bundan dolayı ülkemizde önemli temel kaynak olan hidroelektrik santraller ile rüzgâr santrallerinin birlikte yani hibrit kullanımı gündeme gelmiştir. Bu iki kaynağın hibrit kullanımıyla süreksizlik problemlerinin büyük oranda azalması öngörülmektedir.

2. RÜZGÂR ENERJİSİ

2.1 Genel Bilgi

Bütün yenilenebilir enerji sistemlerinin kaynağı güneştir. Ekvator bölgesi Dünya'nın geri kalan bölgelerine göre daha fazla ısınır. Bu bölgede ısınarak yükselen hava kuzeye ve güneye doğru yayılır. Dünya kendi ekseni etrafında döndüğü için kuzey yarım küredeki her hareket sağa, güney yarımkürede ise sola doğru yönlenir. Bu hareketi oluşturan kuvvete Coriolis Kuvveti denir. Yükselerek yayılan rüzgâr her iki yarımkürede 30° enlem civarında Coriolis kuvvetinin etkisiyle daha düşük seviyelere doğru yönlenir. Havanın aşağıya doğru hareket ettiği bu enlemlerde yüksek basınç alanı oluşmaktadır. Havanın yükselmeye başladığı ekvator bölgesinde ise alçak basınç alanı oluşmaktadır. Hakim rüzgarlar bahsedilen Coriolis kuvvetinin neticesidir.

Uzun bir dönem içerisinde atmosferin ortalama hareketine dolaşım denir. Atmosferdeki bu hareketin en önemli sebebi ekvatoral bölgenin aşırı derecede ısınması ve kutup bölgelerinin de aşırı derecede soğumasıdır. Bu iki bölge arasındaki sıcaklık farkından dolayı atmosferin genel dolaşımı oluşmaktadır. Atmosferin genel dolaşımı basit gibi gözükse de birçok dinamik faktörlerin yani dünyanın dönüşü, sınır tabaka yüksekliği, momentumun taşınımı ve yeryüzünün homojen olmaması gibi durumların bir araya gelmesi ile karmaşık bir durum arz etmektedir. Ancak asıl sebep termal ısı farkıdır (Kaymak, 2007).

Literatürde genellikle rüzgâr enerjisi ile ilgili yapılan çalışmalar teknik özellikleri ele almaktadır. Ekonomik değerlendirilmelere son yıllarda değinilmeye başlanmıştır.

Rüzgâr enerjisi ve diğer enerji sistemlerine göre faydaları Polat (2000) tarafından genel olarak incelenmiş ancak değinildiği gibi maliyet açısından karşılaştırma yapılmamıştır.

Kırım (2002), yaptığı çalışmada rüzgâr enerjisi ve uygulamalarından bahsetmiş ancak rüzgâr potansiyelinden söz etmemesinden dolayı çalışma tam istenilen seviyeye ulaşmamıştır.

Rüzgâr enerjisinde verimliliğini artırmaya yönelik yöntemler Pollard (2005) tarafından sunulmuş ancak diğerlerinde olduğu gibi teşvikler ve uygulamalarla ilgili bilgi verilmemiştir.

Şahin (2008), Türkiye'de rüzgâr enerjisi alanındaki gelişmelerden ve uygulanan teşviklerden bahsetmiş ancak bu konuda yapılan çalışmada diğer ülkelerle bir karşılaştırma yapılmadığından rüzgâr enerjisinde rekabet düzeyimiz anlaşılmamaktadır.

Farklı enerji teknolojilerinin sosyal hayata ve çevreye olan etkileri Hohmeyer (2005) tarafından incelenmiş ancak maliyetler ele alınmamıştır. Maliyetlerin ele alınmamış olması bu konuda yapılan çalışmalara şüpheyle yaklaşımı getirmektedir.

Durak (2004), AB ülkelerinde rüzgâr enerji yatırımlarına verilen teşviklerden bahsetmiş ve Türkiye için önerilerini belirtmiştir. Buna rağmen ülkemizdeki rüzgâr enerjisi potansiyelinden ve diğer enerji kaynaklarına göre avantajlarından bahsetmemiştir.

Rüzgâr enerjisi teşviklerinden karbon vergisinin uygulama ve sonuçlarından Akyüz (2000) bahsetmiştir. Ülkemizde ise henüz bu konuda yapılmış detaylı bir çalışma bulunmamaktadır.

Rüzgâr enerjisiyle ilgili ülkemizdeki ve dünyadaki mevzuat ve gelişmeler Altuntaşoğlu (2007) tarafından incelenmiş ancak rüzgâr enerji potansiyeli ve üretim maliyeti ele alınmamıştır.

Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli Kaya (2006) tarafından incelenmiş ve çevresel etkileri karşılaştırılmıştır.

Enerji kaynaklarının çevreye etkilerini ve emisyon oranlarını düşürmek için gerekli önlem ve uygulamalar Karakaya ve Özçağ (2004) tarafından belirtilmiştir. Ancak Türkiye'de uygulanabilirliğinden bahsedilmemiştir.

Bu çalışmada temel amaç, ülkemizde rüzgâr enerjisi potansiyelinin, fayda-maliyet açısından çeşitli ülkelerle karşılaştırılmalı olarak incelenerek, rüzgâr enerjisinin ülkemizde daha avantajlı hale gelebilmesi için yapılabilecekleri belirtmektir. Ayrıca rüzgâr enerjisinin hem maliyet hem de uygulama açısından problem çıkaran süreksizliğini ele alıp bu sorunun giderilmesi için rüzgâr-hidroelektrik hibrit sistemler irdelenmiş ve örnek bir uygulama yapılmıştır.

2.2 Kuvvetli ve Zayıf Rüzgâr Alanları

Bir bölgedeki rüzgârın şiddeti ve diğer karakteristikleri üzerinde meteorolojik koşulların ve topografik yapının önemli bir etkisi vardır. Kuvvetli ve zayıf rüzgârların oluştuğu tipik bölgeleri şu şekilde sıralamak mümkündür.

Kuvvetli rüzgâr alanları;

- Basınç farkının yüksek olduğu yerler
- Yüksek engebesiz tepe ve vadiler
- Güçlü jeostrofik rüzgâr ve termal etkileşimlerin meydana geldiği kıyı şeritleri
- Kanal etkilerinin meydana geldiği dağ dizileri, vadiler, tepeler
- Sürekli inici akış bölgeleri
- Hakim rüzgâr yönüne paralel vadiler

Zayıf rüzgâr alanları;

- Kısa, dar vadi ve kanyonlar
- Hakim rüzgâr yönüne dik vadiler
- Engebelerle gölgelenmiş araziler
- Pürüzlülük yüksekliği z_0'ın büyük olduğu alanlar

Bir bölgede rüzgâr enerjisi potansiyelinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi ve buna bağlı olarak da rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerine uygun yer seçilebilmesi için kuvvetli ve zayıf rüzgâr alanlarının doğru tespit edilmesi önemlidir. Topografyanın rüzgâr üzerinde pürüzlülük, yükselti farkı ve perdeleme etkisi olmak üzere üç önemli etkisi vardır. Ayrıca fön rüzgârları, katabatik rüzgârlar, dağ ve vadi rüzgârları, kara ve deniz meltemleri gibi topografik etkilerle meydana gelen rüzgârlar bulunmaktadır (Kaymak ve Şahin, 2008).

2.3 Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi

Tarih boyunca rüzgâr, hem enerji kaynağı olarak hem de taşıma amaçlı olarak kullanılmıştır. Rüzgâr enerjisi M.Ö 5000'li yıllarda Nil nehrinde kayıkları hareket ettirmek için kullanılmıştır. Ayrıca Asya medeniyetlerinden Çin, Tibet ve İran'da da kullanıldığı bilinmektedir. Rüzgâr türbinleri kullanımına ait ilk yazılı bilgiler Büyük İskender tarafından M.Ö 200-300 yıllarında basit yapıdaki türbinler hakkındadır (Kırım, 2002).

640 yılında Orta Asya ve İran'da çeşitli rüzgâr değirmenleri yapılmıştır. Anadolu'da bulunan birçok rüzgâr değirmeni kalıntısı bölgede rüzgâr enerjisinin yaygın olarak kullanıldığının bir göstergesidir (Polat, 2000).

Rüzgâr gücü kullanımı haçlı seferleri ile Asya'dan Avrupa'ya geçmiştir. 12. yüzyıl başlarında Fransa'da yaygınlaşan rüzgâr değirmenleri daha sonra İngiltere'de kullanılmaya başlanmıştır. Aynı dönemde Diyarbakır'da yaşayan Abou-l Iz ilk modern dikey rüzgâr türbinini üretmiştir (Şen, 2000). Avrupa'da 19.yy'a kadar rüzgâr türbinleri geliştirilmiş ve 19.yy sonunda 25m rotor çaplı 30 m kule yüksekliğinde türbinler kullanılmaya başlanmıştır.1800'lü yıllara gelindiğinde sadece Fransa'da 20.000 rüzgar mili çalışmaktaydı. Hollanda'da endüstriyel güç ihtiyacının %9'u rüzgâr enerjisi üzerinden sağlanmaktaydı (Şahin, 2004).

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretmeyi düşünen ve günümüzün modern rüzgar jeneratörlerinin öncüsü olan Danimarka'lı Poul La Cour (1846-1908) ilk rüzgar jeneratörünü 1891 yılında yapmıştır. Askov Folk Koleji'nde rüzgar jeneratörleri ile çeşitli dersler vermiş ve aynı okulda 1897 yılında 89W (Watt) gücünde test amaçlı bir rüzgar türbini kurmuştur. 1905 yılında kuruculuğunu yaptığı 'Society of wind electricians' adlı dernek konu ile ilgili ilk dergi olan Journal of Wind electricity'yi La Cour editörlüğünde yayınlamıştır (Kırım, 2002).

1918 yılına gelindiğinde Danimarka'da rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretmek maksatlı 120 adet rüzgâr türbini bulunmaktaydı. Güçleri 20-35 kW (Kilowatt) arasında değişen bu türbinler toplam 3MW (Megawatt) gücünde olup Danimarka'nın elektrik ihtiyacının %3 ünü karşılamaktaydı.

Endüstri devrimi ile birlikte buhar makinalarının ortaya çıkması sonucunda dünya enerji gücünün temini için termodinamik işlemlere dayanan makinalardan yararlanmaya başlamıştır. Özellikle kömür petrol ve gaz gibi fosil yakıtların kullanımı ile beraber bu makinalar istenildiği zaman enerji kaynağı sağladıkları için daha avantajlı duruma gelmiştir. Böyle bir dönemde bile 1904 yılında Almanya'nın endüstriyel enerji ihtiyacının %11'i rüzgâr enerjisinden sağlanmaktaydı (Patel, 1999).

İkinci Dünya savaşı yıllarında Danimarkalı bir şirket olan F.L Smith 2 ve 3 kanatlı rüzgâr türbinleri inşa etmiştir. Bu türbinler de öncekilerde olduğu gibi doğru akım üretiyorlardı. Fakat 1951 yılından itibaren DC (Doğru akım) jeneratörleri yerlerini alternatif akım üreten 35 kW asenkron jeneratörlere bıraktı. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde AC (Alternatif akım) jeneratör kullanımıyla ilgili ilk çalışma Poul La Cour'un öğrencilerinden Johannes Juul tarafından 1956-57 yıllarında SEAS adlı bir elektrik şirketi için Gedser kıyılarına kurulan 200 kW'lık bir rüzgâr türbiniyle başlamıştır. 3 kanatlı elektromekanik yaw (yönerge) sistemli ve asenkron motor kullanılan bu türbin stall (durdurma) kontrol prensibine göre çalışmakta olup ayrıca aerodinamik uç freni bulunmaktaydı. 1956-1967 yılları arasında Danimarka bu türbinle yaklaşık 2.2 milyon kWh (Kilowattsaat) enerji üretmiştir (Şahin, 2004).

2.4 Rüzgârdan Enerji Elde Edilmesi

Havanın ağırlığı ve hızı olması sebebiyle kinetik enerjisi vardır. Bu enerji;

$$E=\frac{1}{2}mv^2 \qquad \textbf{(2.1)}$$

kinetik enerji eşitliği ile hesaplanır. Ancak burada rüzgârın düşey bileşeni yatay bileşenine nispetle küçük olduğundan ihmal edilir ve

$$E=\frac{1}{2}mu^2 \qquad \textbf{(2.2)}$$

halini alır.

Burada; m, kütle, u, yatay rüzgâr şiddeti olup

Kütle;

$$m=\rho \times H \tag{2.3}$$

ρ havanın özgül kütlesini ve H ise hacmini göstermektedir.

Rüzgârın esme yönüne dik alan "A" ile rüzgâr yönündeki uzunlukta "L" ile gösterilirse, hacim;

$$H = A \times L \tag{2.4}$$

olur.

Yolun hız ve zaman çarpımına eşit olduğu bilindiğine göre, L mesafesini rüzgâr şiddetine ve zamana bağlı olarak şu şekilde yazabiliriz;

$$L = u \times t \tag{2.5}$$

Hesaplanan L denklemde yerine konur ve kütle denklemi yeniden yazılırsa,

$$m = \rho \times A \times u \times t \tag{2.6}$$

elde edilir. Böylece yeni enerji denklemimiz;

$$E = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times t \times u^3 \tag{2.7}$$

olur.

Birim zamanda, birim alandan elde edilen rüzgâr enerjisi formülü (Kaymak, 2008);

$$E = \frac{1}{2} \text{ x } \rho \text{ x A x t x } u^3 \qquad \textbf{(2.8)}$$

Şeklinde ifade edilebilir. Yukarıdaki eşitlikte ρ, deniz seviyesindeki standart atmosfer şartlarında kabul edilen yoğunluk olup sayısal değeri 1.223 kg/m^3, u ise farklı yüksekliklerde ölçülen yatay rüzgâr şiddetidir.

2.5 Düşey Doğrultuda Rüzgârın Değişimi

Rüzgârın yatayda değişimi düşeydeki değişime oranla daha azdır bu yüzden yataydaki değişim ihmal edilip, düşeydeki değişim hesaplanmalıdır. Atmosferin yeryüzü ile temas halinde olan tabakası "Atmosferik Sınır Tabaka" olarak adlandırılır. Bu tabakanın yüksekliği atmosferik şartlara bağlı olarak değişir. Açık yaz günlerinde atmosferik sınır tabaka 2 km yükseklikte olabilirken, rüzgârsız gece şartlarında 100m `ye kadar inebilir. Sınır tabakanın derinliğinin %10`luk en aşağıda kalan kısmına ise yüzey tabaka denir. Düzgün ve oldukça homojen bir arazide, yüksek rüzgâr şiddetlerinde rüzgâr profilini belirlemek için logaritmik rüzgâr kanunu kullanılır.

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \qquad \textbf{(2.9)}$$

Bu bağıntıda; $u(z)$, Ortalama yer seviyesinden z kadar yukarıdaki rüzgâr şiddeti, z_0, Yüzey pürüzlülük uzunluğu, k, Von Karman sabiti (k= 0.38), u_* Sürtünme hızıdır.

Ancak sıcaklık gradyanı mevcut olmadığı durumlarda yukarıdaki eşitlik düşeydeki değişimi hesaplamakta uygun değildir. logaritmik rüzgâr kanunu yerine güç kuralı olarak bilinen

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^n \quad \textbf{(2.10)}$$

ile belirlenir.

Burada;

U_1, Z_1 yüksekliğindeki hız, U_2 ise Z_2 yüksekliğindeki hızdır.

Denklemdeki n ifadesi rüzgârın değişiminde rol oynayan termal kararlılığa bağlıdır. Nötr şartlarda 1/7 değerini alır. Rüzgâr gradyanındaki artış rüzgâr hızında daha fazla bir değişime neden olur.

Ancak türbini kurmak istediğimiz noktada n değerini bilmek istersek o noktayı temsil eden iki farklı yükseklikte ölçülmüş hızı Logaritmik rüzgâr kanunu ve güç kuralı eşitliğini birleştirip gerekli işlemleri yaptıktan sonra aşağıdaki denklem çıkar.

$$\left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^n = \frac{\ln Z_1 - \ln Z_0}{\ln Z_2 - \ln Z_0} \quad \textbf{(2.11)}$$

Bu denklemde logaritmik dönüşüm yaparsak;

$$n = \frac{\ln(U_1 / U_2)}{\ln(Z_1 / Z_2)} \quad \textbf{(2.12)}$$

klasik n değerini bulabiliriz.

2.6 Rüzgârın Değerlendirilmesi

Elde edilen rüzgâr kayıtları, kalite kontrolü yapılarak istatistik çözümlemeler de kullanılmak üzere değerlendirilir. Değerlendirmelerde, hem uzun dönemli rüzgâr

kayıtlarını elde etmek, hem de farklı alan ve farklı yüksekliklerde rüzgâr özelliklerini belirlemek için rüzgâr hızı dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılır. Bu fonksiyonlar, Weibull dağılımı, Rayleigh dağılımı ve Beta dağılımı olup bu çalışmada rüzgâr şiddeti verisinin temsilinde en çok kullanılan yöntem olan Weibull Dağılımı fonksiyonu açıklanmıştır.

2.6.1 Weibull Dağılımı

Rüzgârın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, hem enerji üretimi değerlendirmelerinde hem de rüzgâr endüstrisinde çok önemlidir. Türbin tasarımcıları, türbin iyileştirilmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgâr dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar. Eğer bir yıl boyunca rüzgâr ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgârların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgârların daha çok ortaya çıktığı görülür. Bir bölge için rüzgâr dağılımı ölçülerek, ya da ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde "Weibull dağılımı " ile belirlenir.

$$f(u) = \frac{k}{A}\left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^{k}\right) \qquad u>0 \qquad \textbf{(2.13)}$$

Burada; f(u), rüzgâr şiddeti frekansı, u, rüzgâr şiddeti (m/s), A, ölçek parametresi, k, boyutsuz şekil parametresidir.

Weibull dağılımı, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirtilir. Bu dağılımın altında kalan alanın toplam olabilirliği '1' dir. Yani, sakin havalar da bunun içinde olmak üzere, belli bir periyotta rüzgârın 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.

Şekil ve ölçek parametrelerinin tahmininde rüzgâr şiddetinin ortalaması ve standart sapma değerleri önem taşır. Özellikle standart sapma ve çarpıklık katsayısı türbülansı ifade eden büyüklüklerdir. Bunun yanında, standart sapma esaslarına bağlı olarak risk ve güvenilirlik hesaplamaları da yapılabilmektedir (Şahin, 2004).

Weibull şekil parametresi rüzgâr şiddeti kararlılığı ile doğrudan ilgilidir. Şekil parametresinin yüksek değerleri için rüzgâr şiddeti kararlılığı yüksek, düşük değerleri için rüzgâr şiddeti kararlılığı düşüktür.

2.6.2 Rüzgar Gülü:

Rüzgâr gülü, belirli kesimlerdeki rüzgârın esme sıklığını gösterir. Rüzgâr gülü, aynı zamanda her bir kesimin ortalama rüzgâr hızına katkısının ne kadar olduğunu gösterir. Bir rüzgâr gülü farklı kesimlerdeki oransal rüzgâr hızları bilgisini verir. Rüzgâr gülleri yerden yere değişiklik gösterir. Yakın yerlerde ise, özellikle baskın yön açısından rüzgâr gülleri birbirine yakınlık gösterir. Bu durumlarda pratikte interpolasyon veya korelasyon güvenle yapılabilir. Eğer dağ ve vadilerden oluşan karmaşık bir arazi var ise, bu yerler ile kıyı bölgeleri arasında önemli yön değişiklikleri olur. Bu durumlarda tahminde bulunmak genellikle güvenilir değildir. Rüzgâr gülü yalnızca rüzgâr yönlü, türbin yerleşiminde son derece önemlidir. Eğer türbinleri bu yönde yerleştirmek gerekiyorsa, örneğin baskın enerji yönü kuzey ise doğu ve batı yönlerindeki engeller çok önemli değildir. Çünkü bu yönlerden herhangi bir rüzgâr gücü gelmez. Bunun yanında, rüzgârın şekli ve enerji içeriği yıldan yıla yaklaşık %10 değişir. Bu nedenle birkaç yıllık gözlemler sağlıklı yaklaşımlar için iyi sonuçlar verir. Genelde geniş rüzgâr parkı planlamacıları bir yıllık yerel ölçümlere güvenirler. Bu ölçümlerle, yakın ve uzun dönemli meteorolojik gözlemlerden yararlanarak uzun dönemli güvenilir veri elde ederler (Kaymak, 2007)

2.7 Rüzgâr Türbini

2.7.1 Rüzgâr Türbinleri için Yer Seçimi

Bir bölgedeki rüzgârın şiddeti ve diğer karakteristikleri üzerinde meteorolojik ve topografik özelliklerin etkisi büyüktür.

Rüzgar türbini kurmak için uygun yerler; yuvarlak kenarlı tepeler, kuvvetli rüzgar alanları, kuvvetli basınç farkı, hakim rüzgar yönüne paralel vadiler, yüksek ova ve platolar, sürekli inici akım bölgeleri, tepe ve dağ zirveleri, termal fark oluşan sahil bölgeleridir.

Rüzgâr türbini kurmak için uygun olmayan yerler; dik kenarlı tepeler, sivri tepeler,

zayıf rüzgar alanları, hakim rüzgar yönüne dik vadiler, engebelerle gölgelenmiş arazi

kısa, dar vadi veya kanyonlar, pürüzlülük yüksekliğinin büyük olduğu alanlardır. (Kaymak, 2008).

2.7.2 Rüzgâr Türbinlerinde Aerodinamik Verim

Bilindiği gibi rüzgâr türbinindeki verim Betz Teoremine göre en fazla %59 dur.

$$P_{\max} = 0.5 \times C_p \times \rho \times A \times u^3 \quad \textbf{(2.14)}$$

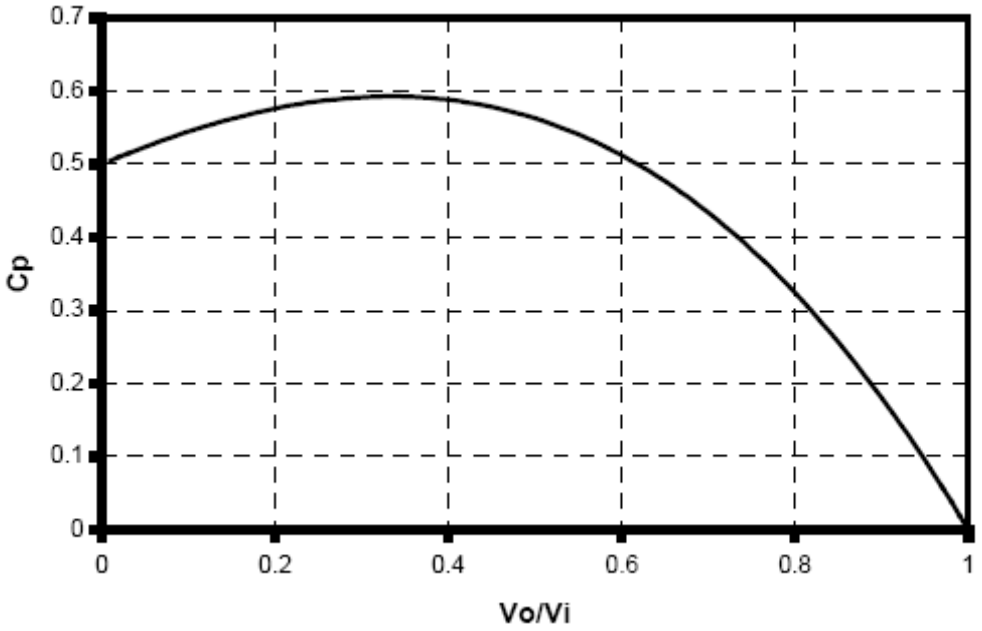
Maksimum güç eşitliği ile Cp, maksimum güç katsayısı yani maksimum kapasite faktörü bulunur. Buradan teorik olarak en yüksek oran 16/27 yani 0.59 dur. Bu yüzden bir rüzgar türbinin üretebileceği enerjinin gelen rüzgar enerjisine oranı %59' dur (Şekil 2.1). Modern rüzgâr türbinleri teoride %50'lik bir verime ulaşmaktadır. Bir türbinin üreteceği enerji bu denkleme göre;

$$P_{\lim it} = 0.25 \times \rho \times A \times u^3 \quad \textbf{(2.15)}$$

Rüzgâr türbinlerinin performans değerlendirmeleri kapasite faktörü, C_p ile belirlenmekte olup bu ifade kısaca;

$$C_P = \frac{\text{Üretilen güç toplamı}}{\text{Nominal hızda üretilen güç toplamı}} \quad \textbf{(2.16)}$$

şeklindedir. Dünyadaki birçok saha uygulamasında türbinlerin kapasite faktörleri %25 civarındadır. Ülkemizde ise rüzgâr şiddetinin yüksek olmasından dolayı ortalama bu oran %30'a yaklaşmaktadır.



Şekil 2.1: Cp, Maksimum Güç Katsayısı Grafiği

Betz katsayısına önemli bir eleştiri ve yeni bir öneri Şen (2002) tarafından getirilmiştir.

2.7.3 Rüzgâr Türbininin Güç Eğrisi

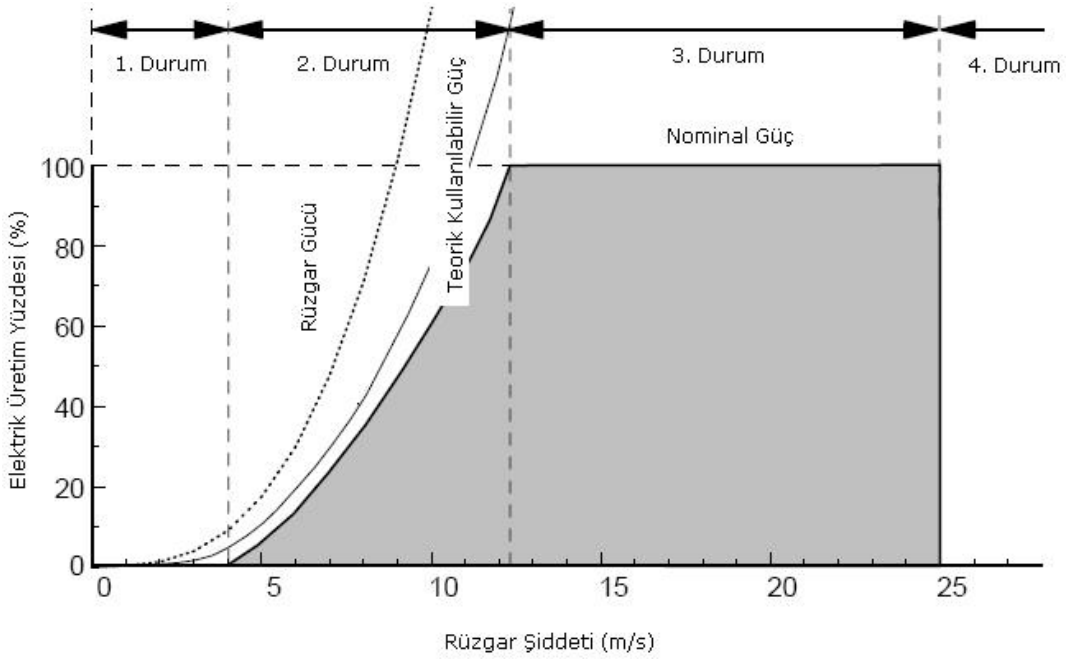
Bir türbinin güç eğrisi ortalaması ile üretebileceği güç hesaplanabilir. Güç eğrisi ortalama gücün ortalama rüzgâr şiddetine bağlılığını gösterir. Böylece 4 durum teşekkül eder (Şekil 2.2).

Birinci durum; ortalama rüzgâr şiddeti başlama (cut-in) hızından düşükse elektrik üretilmez. Türbin enerji üretmeden hareketsiz kalır.

İkinci durum; ortalama rüzgâr şiddeti başlama hızından fazla ise sistem elektrik üretmeye başlar. Ancak türbinin üreteceği maksimum elektrik için gerekli hız sistem tarafından ayarlanmaya çalışır.

Üçüncü durum; ortalama rüzgar şiddeti en uygun elektrik üretilecek şiddeti yani nominal şiddeti geçerse türbin içindeki fren sistemi vb. araçlarla kanatların dönüş hızı en uygun hıza düşürülür.

Dördüncü durum; ortalama rüzgâr şiddeti türbinin tasarlandığı en yüksek (cut-off) hızı aşarsa sistem mutlaka kapatılmalıdır aksi takdirde türbinde hasarlar meydana gelir. Bu durumda enerji üretilemez (Kaltschmitt, 2007).



Şekil 2.2: Rüzgâr Türbininin Güç Eğrisi

2.8 Dünya'da Rüzgâr Enerjisi

1960'lı yıllarda rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ekonomik nedenlerle azalma göstermiştir. Daha ucuz olan fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğalgaz vb.) kullanılarak yapılan termik santraller revaçta olmaya başlamıştır. Fakat 1973 yılındaki enerji krizinden sonra yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ortaya çıkmıştır. Yapılan hesaplara göre petrol rezervleri 2040, doğal gaz 2060 kömür ise 2150 yılında yüksek bir ihtimalle tükenecektir. Ayrıca fosil yakıtlarının oluşturduğu asit yağmuru, sera etkisi, çevre kirliliği, küresel iklim değişikliği gibi etkileri dünyanın geleceği açısından tehlike oluşturmaktadır (Polat, 2000).

Rüzgar türbinleri gelişiminde kısa zamanda büyük mesafeler kat edilmiş olup günümüzde rüzgar santralleri, enterkonnekte şebeke ile bağlantılı ve birden fazla

türbin içeren rüzgar çiftlikleri biçimindedir. Kule yükseklikleri 30 ila 90 m., rotor çapları 30 ila 80 m. arasında değişebilen bu türbinler yatay eksenli iki yada üç kanatlı olup makine güçleri 4MW üzerinde olanlar test aşamasındadır (Şahin, 2004).

Yapılan araştırmalar rüzgâr gücünün şu anda dünyada en hızlı yayılan enerji kaynaklarından biri olduğunu göstermektedir. Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği (EWEA)'nin yaptığı araştırmalara göre Avrupa'daki rüzgâr enerjisi yatırım ivmesi 1998 yılında gerçekleşmiş ve kapasite artırımı 1600 MW olmuştur

Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişimi çeşitli politikalar ve çalışmalar sonucunda başarılmıştır. Avrupa birliğine üye ülkeler arasında bu politika ve çalışmalarda farklılık olsa da genelde uygulanan politika ve çalışmalar iki madde de belirtilmiştir.

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının teknolojik gelişimi için yapılan araştırmalara, geliştirmelere ve denemelere hükümet yatırımları.

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının yayılmasını kolaylaştırmak için hükümet teşviği.

EWEA 2010 yılı hedefi olarak kurulu gücü 80.000 MW belirlemiştir. 2020 yılı hedefi ise 180.000 MW' tır (EWEA, 2003).

Avrupa birliğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması ve geliştirilmesi için ayrılan fonlar ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Son yıllarda özellikle İspanya, Almanya ve Danimarka rüzgâr santrallerinin sayısını hızla artırmışlardır. Tablo 2.1'de çeşitli Avrupa ülkelerinde ve ülkemizde 2007 yılı sonu itibariyle kurulu rüzgâr gücü görülmektedir. Avrupa Birliği üyesi ülkelerin toplam kurulu gücü 56.535 MW' tır (EWEA, 2006).

Türkiye kurulu gücü geçen seneye oranla %100'ün üzerinde bir artış göstermiştir. 2006 yılı sonu itibariyle dünyadaki toplam kurulu rüzgâr gücü 74,328 MW seviyesine gelmiştir. Bu güç 110 milyon insanın ihtiyacını karşılayabilecek seviyededir (Şahin, 2008).

Tablo 2.1: Kurulu Rüzgar Güçleri

ÜLKELER	**KURULU RÜZGÂR GÜCÜ (MW)**
Almanya	22247
İspanya	15145
Danimarka	3125
İtalya	2726
Fransa	2454
İngiltere	2389
Portekiz	2150
Hollanda	1746
Avusturya	982
Yunanistan	871
İrlanda	805
İsveç	788
Norveç	333
Belçika	287
Polonya	276
Türkiye	146
Finlandiya	110
Lüksemburg	35

Tablo 2,1'den görüleceği gibi sadece Avrupa'da değil tüm dünyada rüzgâr enerjisine en büyük yatırım Almanya'da gerçekleşmiştir. Almanya'yı İspanya izlemektedir. Türkiye gibi yarımada özelliği taşıyan İspanya bir anlamda ülkemizde rüzgâr enerjisi konusunda yapılabilecek yatırımlara ışık tutmaktadır. Almanya ve İspanya'yı Danimarka, İtalya, Fransa ve İngiltere izlemektedir. Özellikle nükleer enerjiye büyük önem veren Fransa'nın rüzgâr yatırımlarını hızlandırması dikkatlerden kaçmamaktadır.

Tablo 2.2'de ise Avrupa'da 2001-2005 yılları arasında kurulan farklı enerji kaynaklarının kurulum gücü oranları yüzde cinsinden verilmiştir (EWEA, 2003).

Tablo 2.2: Enerji Kaynakları Oranları

Enerji Kaynakları	**Oran (%)**
Doğal gaz	53
Rüzgâr	30
Kömür	7
Fuel oil	3
Biokütle	2
Nükleer	0
Diğer	5

Tablodan görüleceği gibi yatırım açısından rüzgâr ve doğalgaz rekabet halindedirler. Doğalgaz'ın fosil kaynak olması, rüzgârın ise yenilenebilir olması bu rekabette en önemli faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.9 Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de enerji ihtiyacı büyük ölçüde fosil yakıtlarından sağlanmakta olup doğalgaz ve petrol kaynakları yeterli düzeyde değildir. Özellikle geçmişte petrol krizlerinden dolayı yaşanan elektrik sıkıntıları ve yenilenebilir enerji kaynakları açısından zengin oluşu bu alanda çalışmaları hızlandırmıştır.

Ülkemizde 1940'lı yıllarda sulama ve öğütme amaçlı kullanılan rüzgar milleri 60'lı yılların başında sayı olarak 749'a ulaşmış ve bunlardan 41'i elektrik üretimi için kullanılmakta olup türbin güçleri 1 kW' dan daha düşüktü (Şahin, 2008).

Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarla rüzgâr türbini rotor verimliliği 90'lı yılların ortalarında 48% oranında arttırılmıştır. 21.yüzyılın başında gücü 500-2500 kW arasında değişen türbinler günümüzde yerini 5000 kW gücünde türbinlere bırakmıştır. Rotor çapları 15m'den 90-112m'ye, kule yükseklikleri ise 22m'den 100-120m'ye yükselmiştir. Ülkemizde gücü 1,5-3,0 MW arasında değişen türbinlerin kurulumu yapılmıştır (Şahin, 2008).

Türkiye'nin toplam rüzgâr enerjisi potansiyeli 40.000 ile 80.000 MW düzeyindedir. Devlet meteoroloji istasyonu verilerine göre Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgâr hızı 10 metre yükseklikte 2,54 m/s ve rüzgar gücü yoğunluğu 24 W/m² olarak belirtilmiştir. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli bölgelere göre

değerlendirildiğinde Marmara ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin rüzgâr gücü yoğunluğu bakımından diğer bölgelere göre daha zengin olduğu görülmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr dünya literatüründe ayrıntılı olarak incelenmiştir. Türkiye'de ise bu çalışmalar bazı şahıs ve kurumlara münhasır kalmıştır. Türkiye'deki bu durumun en önemli sebeplerinin başında veri sıkıntısı ve yeni yöntemlerin geliştirilerek Türkiye'ye uyarlanamaması gelmektedir. Rüzgâr şiddeti ve enerjisi ile ilgili olarak yapılan çalışmalar genel yapı itibarı ile verimlilik hesaplaması ve model oluşturulması konularında yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalardan Şahin ve Şen (1997) Batı Anadolu rüzgâr değişkenlerinin alan olarak geçerli normal dağılım grafik modellerini oluşturmuşlardır. Türksoy (1997) rüzgâr enerjisi hesaplamaları için kullanılması gereken verinin zaman aralığına dikkat çekmiştir. Ayrıca Şahin ve ark. (1998) Marmara bölgesi için rüzgâr enerjisi potansiyeli alt yapısını oluşturmuş, Akgün ve Öz (1993) Türkiye rüzgar atlasının oluşturulması için bir çalışma yapmışlardır. Aynı zamanda, Şahin ve Şen (2000) noktasal toplam yarıvaryogram yöntemini istasyonların sekiz yönüne uygulayarak yöne bağlı alansal ilişki fonksiyonları oluşturmuşlardır. Öztopal ve ark. (2000) ise son yıllarda tahmin ve veri tamamlamada sıkça kullanılan yapay sinir ağlarını rüzgâr şiddeti verilerine uygulamışlardır. Alan sınıflandırılması bazında rüzgâr enerjisi çalışması Şen (1999) tarafından yapılarak rüzgâr hız ve topoğrafik yapı ölçümleri göz önünde tutularak farklı 5 sınıf elde edilmiştir. Ayrıca Şen (1997) rüzgâr enerjisi güvenirlik eldesinin istatistiksel tanımlamasını ve Türkiye uygulamasını yapmıştır.

Yapılan çalışmalar ve elde edilen model ve verilerle Türkiye'de rüzgâr enerjisine ilgi son yıllarda hızla artmıştır. Mevcut 146 MW kurulu güce sahip rüzgar santrallerinin kapasite toplamı 2009 yılında 742,11 MW'a ulaşacaktır (TÜREB, 2008).

Rüzgâr enerjisinin araştırılması ve kurulumu ile ilgili çeşitli projeler yürütülmektedir. Bu projelerden Türkiye Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından 2007 yılı başlarında Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) çalışması ile 1 Kasım 2007 tarihinde EİE' ye 78.000 MW gibi eşine az rastlanır bir rüzgâr enerjisi kurulumu başvurusu yapılmıştır.

REPA, küresel atmosferik sirkülasyon modeli, orta-ölçekli sayısal hava analiz modeli ve mikro-ölçekli rüzgar akış modeli kullanılarak üretilen rüzgar kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası'dır. Bu atlas yardımıyla Türkiye

genelinde 30, 50, 70 ve 100 m. yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik, aylık ve günlük rüzgâr hız ortalamaları, 50 ve 100 m. yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik ve aylık rüzgar güç yoğunlukları, 50 m. yükseklikteki yıllık kapasite faktörü, 50 m. yükseklikteki yıllık rüzgar sınıfları, 2 ve 50 m. yüksekliklerdeki aylık sıcaklık değerleri, deniz seviyesinde ve 50 m. yüksekliklerdeki aylık basınç değerleri öğrenilebilecektir (EİE, 2008).

REPA ile denizlerimizde, kıyılarımızda ve yüksek rakımlı bölgelerimizde daha önce ölçemediğimiz yüksek yoğunluklu potansiyeller görünür hale gelmiştir. Rüzgar santralı kurulabilecek alanların belirlenebilmesi için rüzgar kaynak bilgileri ile topografya, akarsular ve göller, yerleşim bölgeleri, orman arazileri, kara ve demir yolları, özel çevre koruma alanları, kuş göç yolları, deniz ve hava limanları, enerji nakil hatları, trafo merkezleri ve elektrik üretim tesisleri gibi tematik haritalar Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile entegre edilmiştir. Rüzgâr kaynak bilgileri, aşağıda belirtilen tematik haritalarla desteklenerek Türkiye geneli, grid, coğrafi bölge, il ve seçilecek herhangi bir alan veya nokta bazında sorgulanabilmektedir. Yatırımcı tarafından belirlenecek türbin tipleri ve yükseklikleri için de yapılarak ideal güç kapasite faktörü tahmini hesaplamaları yapılabilmektedir. Bunun sonucunda ise aylık ortalama kapasite faktörü ve değişkenliği, kapasite faktörünün dağılımı, rüzgâr gücü gülü, kapasite faktörünün günlük karakteristiği, mevsimlik ortalama kapasite faktörü, yıllık ortalama kapasite faktörü ve anormal rüzgâr gücü durumlarına ilişkin harita ve veriler sunulabilmektedir (EİE, 2008). Böylece rüzgâr enerji santralı (RES) kurulabilecek alanlar kolaylıkla belirlenmekte, ön fizibilite çalışmaları yapılabilmekte, rüzgâr kaynağı arama amacıyla yapılan çalışmalar ortadan kaldırılarak tasarruf sağlanmaktadır.

REPA' ya göre, rüzgâr hızı 7,5 m/s'nin üzerine çıktığında yani kapasite faktörünün %30 üzerine çıkıldığında Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli 47 GW olmaktadır. Özellikle ülkenin batısında rüzgâr enerji potansiyelinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Mevcut potansiyele 11 GW offshore rüzgâr potansiyeli de eklendiğinde toplam 58 GW rüzgâr potansiyeli elde edilmektedir (Şahin, 2008).

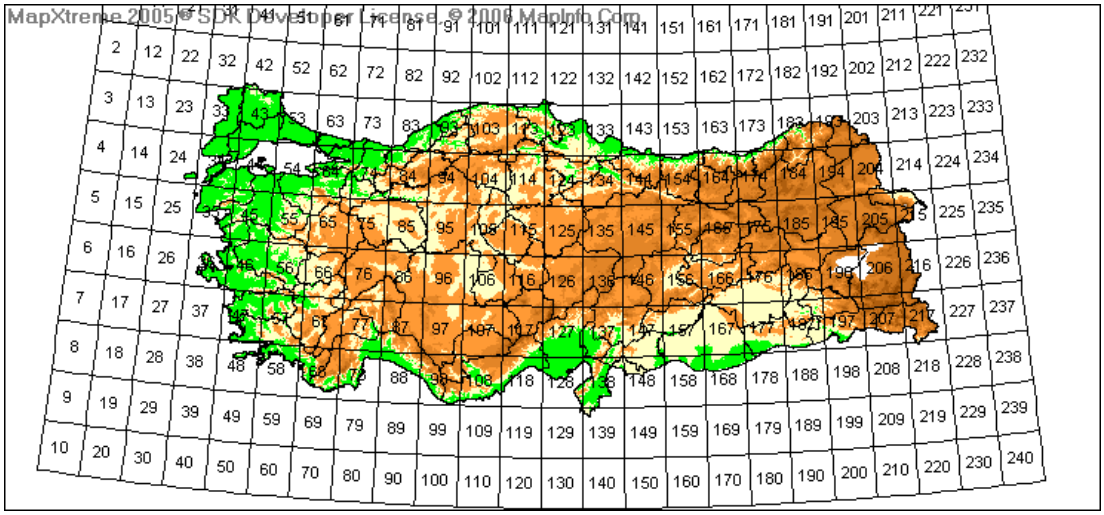
REPA' dan da görüleceği gibi, rüzgâr enerjisi konusunda Türkiye'de potansiyeli en yüksek il Balıkesir'dir. Şehirde toplam 5.531 MW rüzgâr santrali ile elektrik üretilebilir (EİE, 2008). Balıkesir sınırları içerisinde 6 santralin Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'ndan (EPDK) alınmış 201 MW'lık üretim lisansı bulunmaktadır.

Potansiyel konusunda ikinci sırada 5.205 MW ile Çanakkale gelmektedir. İlde 10.2 MW'lık rüzgâr santrali ile elektrik üretilmekte, ayrıca 79.7 MW'lık lisans alınmış durumdadır. Şahin ve Şen (1995) yoğunluk değişimine bağlı olarak Çanakkale ili için verimlilik çalışması yapmışlardır.

İl potansiyeli açısından üçüncü sırada İzmir gelmektedir. Şehrin 4.742 MW rüzgâr enerjisi potansiyeli bulunmaktadır. Ayrıca İzmir, Türkiye'deki ilk iki rüzgâr santralinin kurulduğu il olma özelliğini taşımaktadır.

Özellikle Marmara ve Ege bölgeleri rüzgâr potansiyelleri açısından yatırımcıların ilgisini çekse de aslında Türkiye'nin pek çok ili yüksek rüzgâr potansiyeline sahiptir. Bunlardan biri olan Samsun 2.089 MW'lık rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olmasına rağmen henüz bu ilde alınmış lisans bulunmamaktadır (EİE, 2008).

Türkiye'nin coğrafi avantajı olan doğudan batıya doğru uzanmış olması meteorolojik sistemlerin ülkeye batıdan girip doğudan çıkmasına olanak sağlamaktadır. Enine uzunluk fazla olduğundan sistem doğudan çıkana kadar batıdan yeni bir sistem giriş yapmaktadır. Rüzgâr santralleri kurulumu ülkenin bütününe yayılırsa arz güvenliği açısından büyük bir avantaj sağlayacaktır.



Şekil 2.3: Türkiye Rüzgar Potansiyeli Atlası

Diğer bir proje ise Avrupa Birliği tarafından desteklenen IRESMED (Integration of Renewable Energies into Electricity Network) projesi olup EIE İdaresi IRESMED projesine "Dağıtım Şebekesine Bağlı Elektrik Üretimi İçin Rüzgâr Gücünün

Entegrasyonu" kapsamında katılmıştır. Projenin amacı Güney Akdeniz ülkelerindeki kırsal bölgelerde dağıtım şebekesine bağlı üretim çerçevesinde küçük şehirler ve köylerin elektrik ihtiyacını sağlamak amacıyla büyük ölçekli rüzgâr gücünün kullanılmasıdır. Bu proje kapsamında;

- Rüzgâr gücü için alan özellikleri ve rüzgâr kaynağının analizi
- Şebeke bağlantı konularında teknolojik hususlar
- Ekonomik hususlar ve çevresel faydaları içeren fayda/maliyet analizleri
- Pazar geliştirme konuları ve kurumsal beklentiler
- Finansal planların analizi ve özel sektör katılımı

çalışmaları gerçekleştirilmektedir (Polat, 2000).

Ülkemizde yürütülmekte olan bir başka proje ise MED 2010 projesi olup bu proje ile AB'ye üye Akdeniz Ülkeleri ve Güney Akdeniz Ülkeleri rüzgâr ve güneşten elde edilecek elektrik enerjisinin Avrupa Birliği ülkelerine büyük ölçekli entegrasyonunu sağlama yolları araştırılmaktadır. Yapılması planlanan entegrasyon ile Avrupa Birliği Komisyonu'nun yenilenebilir enerji konusundaki 2010 yılı için %12' lik yenilenebilir enerji kullanımı ve Kyoto Protokolunun Avrupa Birliği Ülkeleri'nde 2010 yılında CO_2 emisyonlarının 1990 yılı baz alınarak %8 azaltılması hedeflerine ulaşılması sağlanacaktır. MED 2010 projesine EİE İdaresi Genel Müdürlüğü rüzgâr enerjisi konusunda katılmıştır. MED 2010 Projesi; rüzgâr kaynaklarının analizi ve yer seçimi, pazar gelişimi, finansal planlar, proje yönetimi ve sonuçları olmak üzere dört ana çalışma grubu altında yürütülmektedir (EİE, 2008).

3. MALİYET

3.1 Maliyet Analizi

3.1.1 Maliyet Analizi Kriterleri

Liberal ekonomilerde mevcut risklerden biri de ticari şirketlerin yalnızca kendi gelir ve giderleri ile ilgilenmesi, dolayısıyla çevrelerine veya bulundukları sektöre verdikleri zararları göz önüne almamalarıdır. Bu bağlamda hükümetlerin üstlendikleri rolün getirdiği sorumluluk kesinlikle geçmişteki karar verip, uygulayan taraf rolünden daha az değildir. Liberal ekonomilerdeki bu başıboşluk riskini, tarafsız ve objektif bir oyuncu olarak devletin bertaraf etmesi, diğer bir deyişle ekonomik faaliyetlerdeki bütün ilgili tarafların ne oran ve ne şekilde zarar veya fayda gördüğünün belirlenerek maksimum fayda sağlayacak faaliyetlerin desteklenmesi ve bu faaliyetlerin kurallarının koyulması beklenmektedir.

Mevcut kaynakların elektrik enerjisine dönüştürülmesi için gereken masrafları dört ana başlık altında toplayabiliriz (EWEA, 2003).

- Sermaye ve Sermayenin Maliyeti: Mevcut teknolojiye göre tesis edilmesi gereken santralin ve bu santralin inşası için gerekli olan finansmanın fiyatı (faizi, geri ödeme planı, vadesi vb.)

- İşlenecek Kaynağın Maliyeti: Enerji kaynağının erişilebilirliğine, kullanıma uygun hale getirilebilmesi bağlı olarak değişen giderler.

- İşletme Maliyeti: Mevcut tesislerin bakım, onarım ve işletmesi için karşılanacak giderler.

– Dış Maliyetler: Doğrudan üretim veya tesisle ilgisi olmayıp çevreye ve/veya enerji sektörüne veya diğer sektörlere verilen zararlar ile ilgili masraflar.

3.1.2 Muhtelif Enerji Kaynaklarının Maliyet Analizleri

Maliyet analizlerinin ekonomik istikrarın sağlandığı ve dolayısıyla finansman paketlerinin tutarlı ve istikrarlı olduğu ülkeler dikkate alınarak yapılmasında büyük fayda vardır. Aksi takdirde bu gün için yapılan maliyet analizinin ileriye dönük bir

planlama için kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu bağlamda Avrupa Birliği üyesi ülkelerdeki maliyet analizlerinin dikkate alınması kanaatimizce daha sağlıklı neticeler verecektir.

Avrupa Birliği genelinde kömür, gaz, hidrolik, linyit ve petrolden elde edilen elektrik enerjisi üretim fiyatları çok çeşitlilik arz etmektedir. Herhangi bir enerji kaynağı için tek bir fiyat verebilmek mümkün değildir. Termik ve hidrolik kaynaklardan elde edilen enerji fiyatlarını sıkça belirleyen en önemli faktörler olan faiz oranları ve amortisman süreleri kurumsal oluşumlara göre değişmesine rağmen tesis ve kullanılacak yakıtın maliyeti de önemli bir rol oynamaktadır. Nükleer ve kömür endüstrilerine sağlanan devlet desteği gerçek üretim maliyetlerinin gözüktüğünden daha fazla olduğunu göstermektedir. Örneğin, Almanya'da kömürün ocak çıkış fiyatı dünya piyasasındaki fiyatın üç katıdır, dolayısıyla kömürden sağlanan enerji üretiminin gerçek fiyatı 9 c€/kWh daha fazladır. Ancak üretim tesisleri bu yüksek fiyatı ödememekte ve kömür endüstrisine vergi mükelleflerinin parasıyla yıllık 3,5 milyar € destek yapılmaktadır. Bu "gizli" veya "dış" maliyet örneğidir. Büyük kombine-dönüşümlü gaz türbinleri maliyetleri İngiltere ve diğer yerlerde yoğun rekabet sonucu düşmektedir. Ancak gaz fiyatları artmaktadır. İleride bütün kömür santralleri desülfürizasyon gaz bacası santralleri ile donatılacak ve emisyonlar üzerine getirilen artan orandaki kısıtlamalar tesis maliyetlerini artıracaktır. "Temiz Kömür" teknolojisi ilerlemektedir ancak kısa vadede üretim fiyatlarında büyük değişiklikler beklenmemektedir.

Nükleer enerji fiyatı ve maliyeti uzun zamandan beri tartışma konusu olmuştur. Fransa dışında, nükleer santral "üretim akışları" pek görülmemektedir. Dolayısıyla nükleer enerjiden elektrik enerjisi üretim fiyatları çok büyük farklılıklar göstermekte ve 1995 yılındaki İngiliz Hükümeti verilerine göre 5.2-8.5 c€/kWh olmaktadır (1990 yılı fiyat seviyesine göre). Nükleer enerji fiyatları, kaza riski gibi devletler tarafından üstlenilen ve tesisleri sigorta primi ödemekten kurtaran, gizli dış maliyetleri içermemektedir (EWEA, 2003).

3.1.3 Rüzgâr Enerjisi Maliyet Analizi

Rüzgâr Enerjisi mevcut üretim teknolojileri ile kW başına yüksek sermaye gerektiren ancak yakıt ve işletme maliyeti en düşük olan bir enerji kaynağıdır. Yoğun sermaye gerektiren her yatırımda olduğu gibi rüzgâr enerjisi santrallerinin karlılığı sermayenin fiyatına, yani tesislerin öz sermaye ve kredi finansman koşullarına bağlıdır. Örneğin faiz, geri ödeme planı ve vade gibi unsurlar kredi finansmanının maliyetini belirlediği gibi tesis amortisman dönemi ile geri ödeme süresi de finansmanının maliyetini etkilemektedir. Avrupa Komisyonunun hazırladığı rapora göre Avrupa Birliğine üye ülkelerin Rüzgar Enerjisi için finansman koşulları kimi zaman uygulamaya konan kanunlar ile çok büyük değişiklikler gösterebilmektedir. Örneğin tesislerin amortisman dönemi İngiltere'de Fosil Yakıt Olmayan Yakıtlar Yükümlülüğünün (Non Fossil Fuel Obligation – NFFO) kabulünden sonra uzatılmıştır. Dolayısıyla işletme maliyeti önemli ölçüde düşürülmüştür.

Rüzgar enerji maliyetini belirleyen etkenler şu şekilde sıralanabilir.

- Yatırım giderleri (kurulum alanı, şebeke bağlantısı dahil)
- İşletme ve bakım giderleri
- Kapasite faktörü
- Türbin çalışma ömrü
- Kredi ödemeleri

Özellikle yatırım giderleri ve kapasite faktörü ekonomik verimlilik açısından kritik önem taşımaktadır.

Kapasite faktörü, tesisin kurulacağı alanın, yapılan rüzgâr ölçümleri ile belirlenen yıllık ortalama rüzgâr hızında üretilen elektrik enerjisinin türbinin maksimum gücüne ulaştığı rüzgar hızında üreteceği elektrik enerjisine bölünmesinden elde edilen "%" cinsinden değerdir. Genelde rüzgâr santrallerinde kapasite faktörü %20-%45 arasında değişmekte olduğundan üretilen enerji için yatırım maliyetini etkilemektedir (EİE, 2008).

Kapasite faktörünü etkileyen önemli unsurlardan birisi de seçilecek bölgedeki topografyanın yapısıdır. Karmaşık yapıya sahip bir topografyada türbülansın yüksek olmasından dolayı kapasite faktörü hem düşecek hem de türbinin çalışma ömrünü azaltacaktır (Şahin, 2008).

Son yıllardaki türbin teknolojisindeki gelişmeler, daha yüksek, daha hafif kanatlı ve yüksek kapasiteli türbinlerle birim maliyetleri düşürmektedir. 1990 yılında 200 kW güç üreten türbinler günümüzde yerini 4MW üretim kapasitesine sahip modern türbinlere bırakmıştır. En çok tercih edilen türbinler ise 1500–3000 kW üretim gücüne sahip türbinler olmaktadır.

Elektrik üretimi verimliliği kanatların birim zamanda taradığı alana bağlı olup, kanat yapısında yapılan yenilikler ile mevcut rüzgârın kullanım verimliliği arttırılmış, kule yüksekliği de artırılarak aynı rüzgâr çiftliğinde daha şiddetli rüzgârlardan faydalanılarak üretimin yükseltilmesi imkanı doğmuştur.

Kurulum aşamasında sonra işletme giderleri maliyetleri etkilemektedir. İşletme giderleri içinde sigorta, periyodik bakım, tamir ve yedek parça giderlerini sayabiliriz. Sigorta ve periyodik bakım giderleri türbin ömrü bazında belirlenmektedir. Ancak yedek parça ve tamir giderlerinin kurulum aşamasında belirlenmesi güçtür.

İşletme giderleri yeni bir türbinde üretilen birim kW enerji başı %10-15 arasında değişmekte olup, türbin yaşı ilerledikçe maliyetler içindeki payı %35 düzeyine kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle üreticiler daha nadir bakım ihtiyacı duyan yeni dizayn türbin oluşturmak için çalışmaktadırlar.

İşletme giderleri türbin kapasitesine ve yaşına bağlıdır. Tablo 3.1'de 55 kW ve 150 kW'lık iki türbinin işletme giderleri görülmektedir. Buna göre üç yıllık 55 kW türbinin işletme gideri 3.5 c€/kWh iken aynı yaşta 150 kW türbinin işletme gideri 2 c€/kWh daha azdır. Aynı yaştaki iki türbinden kapasitesi yüksek olanın birim işletme maliyeti daha düşük olmaktadır (EWEA, 2003).

Tablo 3.1: Santral İşletme Giderleri

	3 Yaşındaki Santral		10 Yaşındaki Santral	
İşletme Giderler	55kW (c€/kWh)	150kW (c€/kWh)	55kW (c€/kWh)	150kW (c€/kWh)
Tamir	1,1	0,3	2,6	0,5
Servis	0,9	0,4	0,7	0,6
Sigorta	0,5	0,4	0,7	0,4
Muamele	0,2	0,3	0,3	0,2
Diğer	0,7	0,2	0,1	0,2

Tablo 3.2'de maliyeti belirleyen etkenlerinin yüzde cinsinden değerleri belirtilmiştir.

Tablo 3.2: Maliyet etki oranları

Maliyetler	Etki oranı %
Türbin fiyatı	74-82
İnşaat maliyeti	1-6
Elektrik bağlantısı	1-9
Şebeke bağlantısı	2-9
Başvuru giderleri	5-10
Arazi maliyeti	1-3
Finansman giderleri	1-5
Yol bağlantısı	1-5

Rüzgâr enerjisi üretim maliyetinin %75 ini kurulum giderleri (alan, türbin, şebeke bağlantısı) oluşturmakta olup, maliyetin %40-%60 arasında işletme giderlerinin oluşturduğu konvansiyonel kömür fosil teknolojilerine göre kurulum eksenli bir sistemdir. Özellikle yatırım aşamasında alınan kredi geri ödemelerinde yapılacak uygulama değişiklikleri rüzgâr enerji maliyetlerini oldukça azaltacaktır (EWEA, 2003).

3.2 Rüzgâr Enerjisi Maliyet Değişimi

Gelişen türbin, kanat teknolojisi sayesinde üretim maliyetlerinin azalmasında 20 yıllık süreçte önemli gelişmeler sağlanmıştır. Rüzgâr türbinlerinin enerji üretim birim maliyetleri ülkelere göre değişiklik göstermekte olup, genellikle 900 €/kW ile 1.150 €/kW arasındadır

Yapılan incelemelerle 1985 yılında kurulan 95 kW gücündeki türbin ile 2000 yılında kurulan 1000 kW gücündeki türbin maliyetleri karşılaştırılmış, 95 kW'lık türbinde üretilen elektriğin maliyeti 8.8 c€/kWh iken 1000 kW'lık türbinden üretilen elektriğin maliyeti 4,1c€/kWh civarındadır. Aradan geçen 15 yıllık zamanda maliyetlerde %50'nin üzerinde bir düşüş kaydedilmiştir. Günümüzde toplam rüzgâr

enerji kapasitesi her 3 yılda ikiye katlanmaktadır. Türbin teknolojisi ve kapasitesi arttıkça maliyetler ileride daha da düşecektir

Enerji kaynaklarının maliyet karşılaştırmaları yapılacak yatırımlar açısından büyük önem taşımaktadır. Aşağıda verilen Tablo 3,3'de muhtelif enerji kaynaklarından elektrik üretim maliyetleri sunulmuştur. Rüzgâr santralleri gaz santralleriyle aynı koşullarda finanse edilebilse maliyetlerin %40 oranında düşebileceği hesaplanmıştır (AWEA, 2004).

Tablo 3.3: Enerji Üretim Maliyetleri

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

Yukarıdaki açıklamalardan da görüldüğü gibi iyi finansman ve uygun alan koşullarıyla rüzgâr enerjisi santralleri, gaz, hidrolik, kömür, biokütle ve nükleer enerji santrallerine göre dış maliyetler göz önüne alınmasa bile çok daha ucuzdur. Ayrıca rüzgâr enerjisi sektöründeki teknolojik gelişmelerin mevcut hızıyla devam etmesi halinde ileride rüzgâr enerjisi santrallerinin maliyetlerinin önemli ölçüde düşmesi beklenmektedir.

3.3 Dış Maliyetler

Dış maliyetler üretim veya tesisle doğrudan ilgisi olmayan, çevreye, enerji sektörüne veya diğer sektörlere verilen zararların maliyeti olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda mevcut dış maliyetlerini iki ana başlık altında toplayabiliriz.

3.3.1 İnşaat Alanı

Genellikle rüzgâr enerjisi santralleri, rüzgârın çokluğu sebebiyle çıplak ve yüksek tepe ve tepeciklere kurulmaktadır. Bu tepeler ancak küçük ekonomik faaliyetler, hayvancılık veya tarımsal faaliyetler için kullanılabilen yerlerdir. Genel olarak rüzgâr

enerjisi santralleri için dikilen türbinlerin her biri en fazla 100 m²'lik bir alan kaplamaktadırlar. Her bir türbinin birbirlerinden uzaklıkları ise kanat çapına ve rüzgâr rejimine bağlı olarak 50 ila 400 m. arasında değişmektedir. Rüzgâr türbinleri arasında kalan arazinin ise başka faaliyetler için kullanılmasında hiçbir sakınca yoktur. Nitekim yurt dışında bu alanların tarımsal ve hayvancılık faaliyetleri için sıkça kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca dünya genelinde rüzgâr santrallerinin deniz üstünde kurulan (Offshore) tipleri oldukça yaygınlaşmaktadır. Bu durumda santral inşaatı için alan kaybı olmamaktadır. İnşaat sürecinde karşılaşılan sorunlardan birisi türbinlerin alana taşınımı için uygun yol yapılmasıdır. Özellikle dağlık bölgelerdeki santral kurulumlarında yapılacak yol çalışmaları maliyetleri artırmaktadır.

Hidroelektrik santrallerin barajlı tiplerinde ise gövde önünde oluşturulan yapay göl yüzünden ne kadar büyük bir alanın kaybedildiği herkesçe bilinmektedir. Bu alanda daha önceden yapılan ekonomik faaliyetler ve varsa yerleşim yerleri hatta tarihi değeri sebebiyle paha biçilemeyen arkeolojik varlıklar da tamamen baraj gölünün altında kalmakta ve çok büyük bir dış maliyet ile karşılaşılmaktadır (Wagner, 1999). Bu alanların başkaca ekonomik faaliyetler için kullanılması gibi bir alternatif de ortadan kalkmaktadır. Maalesef hidroelektrik santrallerin inşaat maliyetinde bu husus genellikle dikkate alınmamaktadır.

Termik veya Nükleer enerji santrallerinde ise genellikle inşaat alanının kaynağın bulunduğu yere yakın olması veya inşaat konusunda kolaylık sağlayabilecek alanların seçimine dikkat edilmektedir. Bu aşamada da söz konusu yerlerde daha önceden yapılan faaliyetler ile bu alanların başka amaçlarla daha faydalı kullanımı olabileceği konusu pek dikkate alınmamaktadır (AWEA, 2004).

3.3.2 Çevresel Etkiler

Konvansiyonel enerji kaynaklarıyla çalışan elektrik santrallerinde kullanılan teknolojiye göre, düzenli olarak çevreye bırakılan atık miktarı değişebilmektedir.

Tablo 3.4'de farklı enerji kaynaklarının belirli kapasite ve çalışma saatleri için salınım miktarları verilmiştir.

Tablo 3.4: Santral Gaz Salınımları

Yakıt cinsi	Kapasite (MW)	Çalışma saati (Full load)	Gaz salınımı (m^3/h)
Kömür	400	5000	1,500.000
Linyit	800	7000	3,000.000
Fuel oil	200	2000	750.000
Doğal gaz	400	5000	750.000

Tablo 3.5'de ise Avrupa ve Türkiye'de elektrik üretilen fosil enerji kaynaklarının kullanım oranları karşılaştırılmıştır

Tablo 3.5: Fosil Enerji Kaynağı Kullanımı

	Avrupa Birliği	Türkiye
Kömür	%18	%5
Linyit	%12	%25
Fuel oil	%10	%10
Doğal gaz	%15	%30
Diğer fosil yakıtları	%45	%30

Küresel iklim değişikliği ve çevre kirliliğinin tehlikeli boyutlara ulaşmasıyla sera etkisi doğuran gaz salınımlarının azaltılması için yapılan rüzgar enerjisi yatırımları neticesinde 2000 yılı itibariyle kurulu rüzgar enerjisi santralleri ile engellenen CO_2, SO_2 ve NOx salınımlarının ülkelere göre karşılaştırmalı miktarları aşağıdaki Tablo 3.6'dadır. Günümüzde artan rüzgâr santrali kurulu gücü ile bu değerler daha da artmıştır.

Tablo 3.6: Gaz Salınım Miktarları

Ülke	CO_2 (g/kWh)	SO_2 (g/kWh)	NO_x (g/kWh)
Fransa	420	2	1,5
Almanya	670	1	0,4
İspanya	780	6	2,2
İngiltere	500	2	1,2
Türkiye	590	4	1,8

Yukarıda bahsedilen emisyon miktarları ile dış maliyetleri toplamının kWh için sosyal maliyetini hesaplamak güçtür. Bu aşamada gelişmiş ülkelerin dış maliyetler için kurumlara ek vergiler getirilmiştir. Örneğin Avrupa Birliğine üye ülkelerde kömür santrallerinden 1.6 c€/kWh, gaz ile çalışanlardan 0.8 c€/kWh ve nükleer enerji ile çalışan santrallerden de 0.7 c€/kWh ek vergi alınmaktadır (EWEA, 2004). Tablo 3.7'de kömür, gaz ve rüzgar enerjisi için iç ve dış ortalama maliyetler karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi rüzgar enerjisi dış maliyetler göz önüne alındığında en avantajlı enerji kaynağı olmaktadır.

Tablo 3.7: İç ve Dış Maliyetler

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

Gaz salınımları dışında gürültü kirliliği de enerji sistemlerinin çevreye verdiği zararlardandır. Rüzgâr türbininin kurulumu sırasında ve enerji üretimi aşamasında pervanelerin, jeneratörün ve vitesin çıkardığı gürültüler çevreye zarar verebilmektedir. Ancak rüzgâr enerjisi santralleri, rüzgar rejimine bağlı olarak, genelde yerleşimin olmadığı veya rakım farklılıkları sebebiyle gürültünün etkilerinin daha az hissedildiği yerlerde kurulmaktadır. Diğer yandan türbin teknolojisindeki gelişmeler doğrultusunda gürültü emisyonları gün geçtikçe azalmakta ve hatta türbinlerden 150 – 200 metre uzaklıkta 40 dB (Fısıltı seviyesi)'nin altına inmiş durumdadır. Termik santrallerde ise kömür arama safhasında bitki ve toprak örtüsü tahrip olmakta, bunu yanında topografya değişmekte, sondaj çamuru havuzu ve makina gürültüsü gibi etkiler oluşabilmektedir.

4. TEŞVİKLER

Rüzgâr enerjisinden elde edilen elektrik maliyetinin tamamı satış fiyatına yansıtılmamaktadır. Bu giderler vergi mükellefleri ve toplum tarafından sağlık giderleri ve iklim değişikliklerinden doğan giderler şeklinde olmaktadır. Rüzgâr enerjisi hızlı bir şekilde diğer enerji üretim sistemleriyle rekabet edebilecek duruma gelse de yakın gelecek için en azından çevresel etki maliyetlerini ve dolaylı giderleri ele almaksızın teknoloji ve kapasite açısından kömür ve gazla rekabet edebilecek seviyeye gelene kadar teşvik noktasında düzenlemelere ihtiyaç duymaktadır.

4.1 Enerji Pazarı Teşvikleri

AB üye ülkelerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının desteklenmesi 5 ana uygulama şekli ile yapılmaktadır. Bunlar; araştırma desteği, sabit fiyatlandırma uygulaması, sabit prim uygulaması, artırmalı fiyat uygulaması ve sertifikasyon uygulaması şeklindedir. Tüm bu uygulamaların amacı çevresel etki maliyetleri ihmal edilerek mevcut rekabet olumsuzluklarının aşılmasını sağlamaktır.

Enerji üretiminde çevresel etki maliyetleri enerji satış fiyatlarına yansıtıldığı takdirde rüzgâr enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji sistemlerinin desteğe ihtiyacı kalmayacağı Avrupa Birliği Enerji Komisyonu raporunda yer almaktadır. (EWEA, 2004)

Komisyonun raporuna göre çevresel etki maliyetleri ve sağlık giderleri gibi dolaylı maliyetler enerji fiyatlarına yansıtıldığında kömür ve petrol kaynaklı enerji üretim maliyetleri iki katına, gaz kaynaklı enerji üretim maliyetleri %30 oranında artacaktır. Şu anki Avrupa Birliği ülkelerinde enerji üretim maliyeti 0,04 €/kWh olup, yapılan araştırmalar dolaylı giderlerin Avrupa Birliği gayrisafi milli hâsılası içerisinde 85-170 milyar €'luk ek maliyet oluşturduğunu, bu giderlerin içerisinde iklim değişikliği maliyetinin de bulunmadığını belirtmektedir.

Avrupa Birliği enerji vergilerinin, dolaylı giderlerin belirlenmesinde ve yenilenebilir ile konvansiyonel enerji sistemleri için daha adil bir rekabet ortamının sağlanması noktasında etkin olacağını düşünerek 2001 yılında gündemine almış ve 2004 yılında 0,5 €/MWh- 1 €/MWh arasında değişen vergilendirme yürürlüğe girmiş ancak çok düşük seviyede kaldığı için amacına ulaşamamıştır.

4.2 Ödeme Mekanizmaları

Vergilendirme sisteminin işlememesi üzerine üretici destekleme üzerine yapılan çalışmalarla rüzgâr enerjisinin enerji üretimi içerisindeki payının artırılması hedeflenmiştir.

Bu çerçevede üç ana teşviklendirme uygulaması geliştirilmiştir (EWEA, 2004).

- Enerjinin miktarının ve fiyatının pazar tarafından belirlendiği gönüllü uygulama sistemi (yeşil pazar)
- Üreticiye ödenecek üretim bedelinin devlet tarafından belirlendiği, üretilecek enerji miktarının pazar tarafından belirlendiği sistem (sabit fiyat sistemi)
- Üretim miktarının devlet tarafından belirlendiği, fiyatın pazar tarafından belirlendiği sistem (sabit üretim sistemi)

Sabit fiyat ve sabit üretim sistemleri korumalı bir pazar ortamı oluşturarak pazara yeni giren rüzgâr enerjisinin rekabet noktasında yaşayacağı zorlukları aşmasında yardımcı olmaktadır.

Bu uygulamaların amacı rüzgâr ve diğer yenilenebilir enerji sistemlerinin teknoloji açısından gelişimlerini ve dolayısıyla üretim maliyetlerinin düşürülmesini teşvik etmektir. Buradaki temel hedef, gelecekte konvansiyonel enerji sistemlerine temiz ve ucuz bir alternatif sunulmasıdır.

4.2.1 Gönüllü Sistem ve Yeşil Pazar

Teorik olarak düşünüldüğünde rüzgâr enerjisinin gönüllü kullanım talebi ve hükümet politikasından bağımsız bir pazar oluşturulabilmesi mümkün görünse de, yeşil pazar ve gönüllü sistem uygulamaları ile daha fazla ödeyerek temiz enerji kullanılması düşüncesinin rüzgâr enerjisi gelişimine etkisi olmadığı uygulamalardan görülmektedir.

4.2.2 Sabit Tarife Sistemi

Üreticiye ödenecek fiyat aralığı türbin sisteminin kurulacağı alana göre değişmektedir. Bu fiyatlandırma yüksek rüzgârlı bölgelerde düşük iken, düşük rüzgârlı bölgelerde yüksek olmaktadır. Böylece üreticinin yüksek rüzgârlı belirli bir alanda yoğunlaşması engellenmektedir.

Üretim tesislerinde üretilen elektriğin satış fiyatı için üst sınır getirilmesi, yenilenebilir enerji sektörünün serbest piyasa koşullarında gelişmesini önleyici, yatırımları caydırıcı bir unsur olmaktadır. Ortalama satış fiyatının serbest piyasa koşullarında yükselerek belirlenen fiyatı aşması durumunda, dağıtım şirketleri piyasadaki doğalgaz, kömür vb. santrallerden daha yüksek fiyatla elektrik satın almak mecburiyetinde kalmakta ve oluşan tavan fiyat nedeniyle üreticiler serbest piyasa fiyatından dağıtımcılara elektrik satamamaktadır. Bu sistemin uygulandığı ülkeler; Almanya, Portekiz, İspanya ve Yunanistan'dır.

4.2.3 Sabit Üretim Sistemi

Üretilmesi istenen enerji miktarının hükümetin koyduğu kota ile sınırlandırılarak enerji fiyatının pazar tarafından belirlendiği bir sistemdir.

Rüzgâr enerji pazarında iki çeşit sabit üretim uygulaması vardır:

- ihale uygulaması
- yeşil enerji sertifika uygulaması

İhale uygulamasında; yatırımcılar ihaleye davet edilerek belirlenen zaman aralığında istenen enerji üretimi için teklif alınır. En düşük teklif sahibi ile sözleşme yapılarak yatırım çalışmalarına başlanır. İhale sisteminde elektrik fiyatı hükümet tarafından değil pazar içerisinde oluşmaktadır. Sistemin uygulandığı ülkeler; İngiltere ve İrlanda'dır.

Yeşil enerji sertifikası, üretimini yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayan kuruluşlara proje bazında verilen bir belgedir. Üretici firma, yatırımını yeşil sertifika sistemine dahil etmekle uluslararası sertifika ticareti yaparak mevcut üretiminden

kWh başına ilave gelir kazanma imkanını da bulabilmektedir. Hollanda, Danimarka ve İtalya'da uygulanmaktadır.

4.3 Yatırım Teşviği

Rüzgâr enerjisi yatırımlarının ilk yıllarında üreticiye verilen teşvik kurulacak türbinin kW cinsinden kapasitesine göre verilirdi. Bunun sonucunda rüzgâr şiddeti düşük bölgelerde kapasitenin üzerinde güce sahip türbinler kullanıldığından enerji üretim verimi düşmüş, maliyetler yükselmiştir. Zaman içinde bu teşvik hem kapasiteye hem de üretilen enerji verimine bağlı olarak düzenlenmeye başlanmıştır.

4.4 Karbon Vergisi

Elektrik santrallerinin karbon salınım oranlarının düşürülerek çevreye etkilerini azaltmaya yönelik uygulanan vergilendirme modelidir. Karbon vergilerinden elde edilecek gelir potansiyeli oldukça yüksektir. Birleşmiş Milletler tarafından yapılan bir çalışma, bir ton karbon başına alınacak 21 $'lık global bir verginin (1 galon benzin başına 0,48 $'a eşdeğer) yılda 125 milyar $ gelir getirebileceğini göstermektedir (UN, 2001). Öte yandan, karbon vergisini uygulayan ülkelerdeki tecrübeler bu vergilerde çok düşük (1 cent'ten daha az) bir tahsil masrafının olduğunu ortaya koymaktadır. Karbon vergisinin uygulandığı bazı ülkeler şunlardır: Finlandiya, İsveç, İngiltere, Danimarka, Yeni Zelanda, Amerika ve Kanada (EWEA, 2004).

4.5 Avrupa'da ve Türkiye'de Uygulanan Teşvikler

Avrupa'da uygulanan teşvikler ülkeden ülkeye değişim göstermektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir (EWEA, 2006), (Durak, 2004), (Akalın, 2004).

Almanya:

- Rüzgâr enerjisinden elde edilen elektriğin fiyatı 9 c€/kWh'dır.
- Bazı bankalar rüzgâr elektrik santrallerine normal ticari krediden daha cazip imkânlarla finansman temin etmektedir.
- Toplam yatırımın %25'ini geçmeyecek şekilde devlet sübvansesi

Belçika:

- Rüzgâr enerjisi yatırımlarında %15'e kadar devlet desteği sağlanmaktadır.
- Yeşil elektrik üreticilerine 2,449 c€/kWh doğrudan destek ödemesi.

Danimarka:

- Elektrik dağıtım şirketleri yenilenebilir enerji kullandıkları takdirde 1,5 c€/kWh teşvik almaktadır.
- Dağıtım şirketleri kullandıkları yenilenebilir enerji için 0,18 c€/kWh karbon vergisi iadesi almaktadır.
- Ulusal şebeke bağlantısı rüzgâr santrali sahibi ile dağıtıcı firma tarafından ortak olarak inşa edilmektedir.
- Türbin ithalat kolaylıkları
- Kurulum ve inşa sahası vergi muafiyeti

Fransa:

- Santralin işletildiği ilk 5 yıl elektrik satış fiyatı 9,86 c€/kWh.
- Santral kurulum ekipmanlarının vergi tutarının %25'i alınmamaktadır.

İngiltere:

- Gaz, kömür, linyit enerjisinin ticari ve endüstriyel kullanımında iklim değişimi vergisi uygulanmaktadır. Bu vergi gaz için 0,002 c€/kWh, fosil yakıtlar için 0,001 c€/kWh.
- Elektrik firmalarının yenilenebilir enerji kullanım payının korunmasını zorunlu kılan 'Yenilebilirlerin Zorunluluğu' adında bir uygulama mevcuttur.
- Sabit üretim sistemi ile elektrik fiyatı pazar içerisinde oluşmaktadır.

İspanya:

- Yenilenebilir enerji santrallerinden 5 yıllık alım garantisi verilmekte ve rüzgâr enerjisi projeleri için 6,27c€/kWh fiyat tarifesi uygulanmaktadır.

İsveç:

- Toplam sermaye miktarının %25'ine kadar her kW için 332 € destekleme ödeneği sağlamaktadır.
- Karbon vergilendirmesi 0,15 c€/kWh'dir.

İtalya:

- İlk 8 yıl 0,01 c€/kWh, geri kalan ömürde de 0,05 c€/kWh devlet sübvansesi enerji satış anlaşmalarında yer almaktadır.
- Yatırımların %40'a kadar olan kısmı devlet tarafından sübvanse edilmektedir.
- Rüzgar enerjisi için 5,70 c€/kWh sabit tarife uygulanmaktadır.
- Yeşil enerji sertifika ticareti yapılmaktadır.

Yunanistan:

- Rüzgar santral yatırım tutarının %30'u devlet tarafından sübvanse edilmektedir.
- Rüzgâr enerjisi için 7,32 c€/kWh tarife uygulanmaktadır.

Türkiye:

Elektrik piyasası lisans yönetmeliği ile ülkemizde uygulanan teşvikler şunlardır (Altuntaşoğlu, 2007), (Şahin, 2008).

- Uygulanacak fiyat her yıl için EPDK'nın belirlediği bir yıl önceki Türkiye Ortalama Toptan Satış Fiyatıdır. Bu fiyat 5 c€/kWh karşılığı YTL'den az, 5,5 c€/kWh karşılığı YTL'den fazla olamaz.
- Sabit fiyat tarifesi 31.12.2011 tarihine kadar işletmeye giren tesislerin ilk 10 yılı geçerlidir.
- TEDAŞ ya da lisanslı dağıtıcılar YEK kullanan üretim tesislerinin şebeke bağlantıları için öncelik sağlayacaktır.
- Geliştirilecek projelerde devlete ait araziler yasaklı bölgeler haricinde rüzgâr enerjisi yatırımcılarına tahsis edilecektir.

- 2011 yılı sonuna kadar devreye alınacak bu tesislerden ulaşım yollarından ve şebekeye bağlantı noktasına kadarki enerji nakil hatlarından yatırım ve işletme dönemlerinin ilk 10 yılında izin, kira, irtifak hakkı ve kullanma izin bedellerinde %85 indirim uygulanacaktır.

Tablo 4.1: Türkiye ve Dünyadaki Mevcut Uygulamalar

	Sabit Tarife	Sabit Üretim	Devlet Sübvansesi	Teşvik ödemesi	Karbon iadesi	Yeşil enerji sertifikası	Kurulum ve İnşa sahası
Almanya	9 c€/kWh		max %25	Finansman temini		Var	
Belçika			max %15	2,45 c€/kWh			
Danimarka				1,5 c€/kWh	0,18 c€/kWh	Var	Vergi muafiyeti
Fransa	9,86 c€/kWh						%25 vergi muafiyeti
İngiltere		Var					
İspanya	6,27c€/kWh						
İsveç			max %25		0,15 c€/kWh		
İtalya	5,70 c€/kWh	Var	max %40			Var	
Yunanistan	7,32 c€/kWh		max %30				
Türkiye	5-5,5 c€/kWh						Arazi tahsisi

Bütün bu teşviklerden anlaşılacağı gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına büyük bir yönelme bulunmaktadır. Bu kaynakların en önemli problemi süreksizliktir. Süreksizliğin en aza indirgenmesiyle yapılan teşvikler azalacak ve yatırımlarda verimlilik artacaktır. Süreksizliği indirgemenin yolu hibrit sistemlerin kullanımı olarak görülmektedir. Bu sistemler rüzgâr-güneş, rüzgâr-hidroelektrik, rüzgâr-biokütle, rüzgâr-hidrojen vb. şeklinde kurulabilir. Bu durumda ülkelerin milli kaynakların sürekliliği sağlanarak enerji verimliliği artırılmış olacaktır. Bu tezin 5. Bölümünde Türkiye'de temel kaynaklardan olan hidroelektrik gücün rüzgâr enerjisi ile birlikte kullanımı ele alınarak yeni bir öneri getirilecektir.

5. RÜZGÂR - HİDROELEKTRİK HİBRİT SİSTEMLERİ

Rüzgâr enerjisinin diğer enerji sistemlerine göre birçok avantajları bulunsa da üretilen elektrikte süreklilik henüz sağlanamamıştır. Rüzgârdaki süreksizliğin temel nedenleri alansal ve zamansal olarak düşünülebilir. Topografyanın bazı durumlarda rüzgâr artırıcı etkileri bulunurken bazı durumlarda ise azaltıcı veya türbülansa neden olan etkileri bulunmaktadır. Zamansal süreksizliklerde ise bölgenin belirli periyotlarda etkilendiği meteorolojik sistemler ve mevsimsel etkiler temel rol oynamaktadırlar. Bu süreksizlikler rüzgâr enerjisini tahmini en zor olan değişkenlerden biri yapmaktadır. Buna ilave olarak, Türkiye'de yaşanan kuraklık süreçleri ve bu süreçlerin küresel iklim değişikliği ile beraber artıyor olması hidroelektrik santraller açısından da önemli süreksizlik problemleri ortaya çıkarmaktadır. Özellikle son yıllarda ülkemizde yönelimi fazla olan küçük hidroelektrik santrallerde kuraklık ve küresel iklim değişikli etkilerinin daha çok hissedileceği bilinmektedir. Bu süreksizlikler hem enerji kalitesi hem de yatırım açısından büyük ekonomik sorunlara sebep olmaktadır. Ülkelerin yenilenebilir enerji teşviklerinde hibrit sistemlerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Ülkemizin önemli bir rüzgâr potansiyeline sahip olduğu, son yıllarda yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur. Benzer şekilde hidroelektrik potansiyelimizin önemli bir bölümünü hala kullanabilmiş değiliz. Bu iki kaynağın birlikte kullanımı durumunda yararlanılamayan bu enerjilerden istifade en yüksek seviyede olacaktır. Kurulacak bütünleşik sistemlerle rüzgâr veya hidroelektrik kaynakların herhangi birisinden yeterli elektrik üretilmediği takdirde diğerinden üretilen elektrikle takviye yapılabilmektedir. Böylece enerjide süreklilik sağlanmış olmaktadır.

5.1 Hibrit Sisteminin Türkiye'de Uygulanabilirliği

Türkiye hidroelektrik potansiyeli aşağıdaki haritada belirtilmiş olup REPA ile çakıştırıldığında hibrit sistemlerin kurulabileceği bölgeler hakkında bilgi sağlamaktadır**.** Özellikle Doğu Anadolu ve Karadeniz bölgelerinde uygun bölgelerin tespiti ile hidroelektrik santralleri yakınında kurulacak rüzgâr hibrit sistemler

vasıtasıyla verimlilik artacaktır. Ayrıca Batı Karadeniz ve Akdeniz'de kurulacak hidroelektrik santrallerle bütünleşik sistemlerin Türkiye enerji potansiyeline avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 5.1: Türkiye Hidroelektrik Potansiyeli Atlası

5.2 Karadeniz Bölgesinde Örnek Uygulama

5.2.1 Bölge İklimi ve Yağış Rejimi

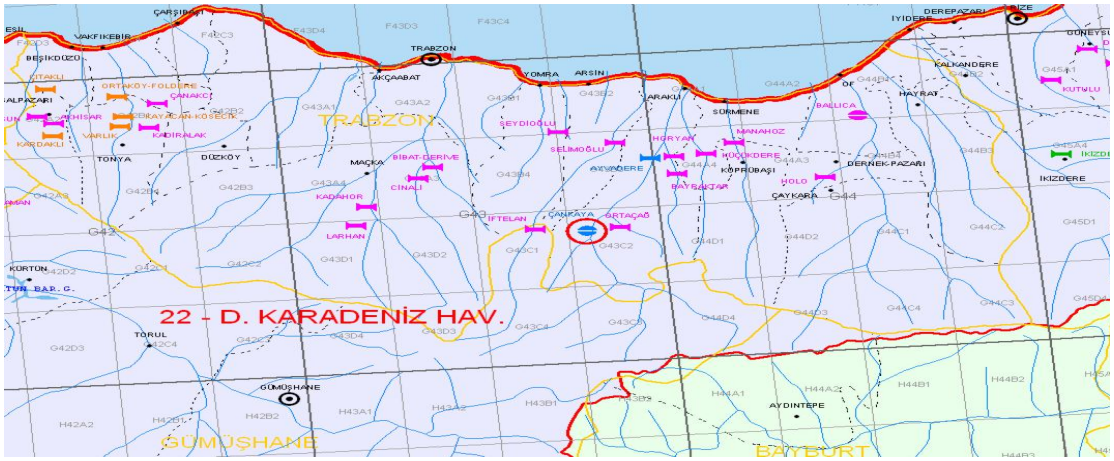
Bölgede her mevsim yağışlı, yazlar serin, kışlar ılık özellik gösteren Karadeniz iklimi görülür. Her mevsim görülen yamaç yağışlarına basınç koşulları ve dağ doğrultusu yol açar. Deniz etkisi nedeniyle yazlar serin, kışlar ılık geçer. Yıllık yağış miktarı 1500 mm kadardır. Kıyıda nem oranı fazla olduğundan yıllık sıcaklık farkları az, yağış fazladır. Maksimum yağış sonbahar mevsimine rastlar. Yağışlar hemen her mevsimde görülür. Yağış rejimi düzenli, maksimum yağış sonbaharda, minimum yağış ilkbaharda görülür.

Bölgenin yeryüzü şekillerini doğu- batı yönündeki Kuzey Anadolu Dağları ile bu dağlar arasındaki oluklar oluşturmaktadır. Karadeniz boyunca uzanan dağların yükseklikleri doğuda 4000 m.'ye kadar çıkmaktadır.

Bölgenin kuzeye bakan yamaçlarında, yamaç yağışları artmıştır. Kıyı kesim ile iç kesim arasında önemli sıcaklık ve basınç farklılıklarından dolayı

rüzgâr şiddeti özellikle bahar aylarında yüksektir. Rüzgâr yönü genellikle iç kesimlerden kıyı kesimlere doğrudur.

Rüzgâr santrali için seçilen bölge dağlık bir alanda bulunup vadi etkileri sonucu rüzgarları toplayan bir topografyaya sahiptir. Bu alan yaklaşık olarak 2-3 km uzunluğunda tepelik bir bölgede bulunmaktadır. Yapılan ön incelemede bölgenin rüzgâr enerjisi açısından uygun olabileceği görülmüştür.



Şekil 5.2: Karadeniz Havzası Hidroelektrik Potansiyeli Atlası

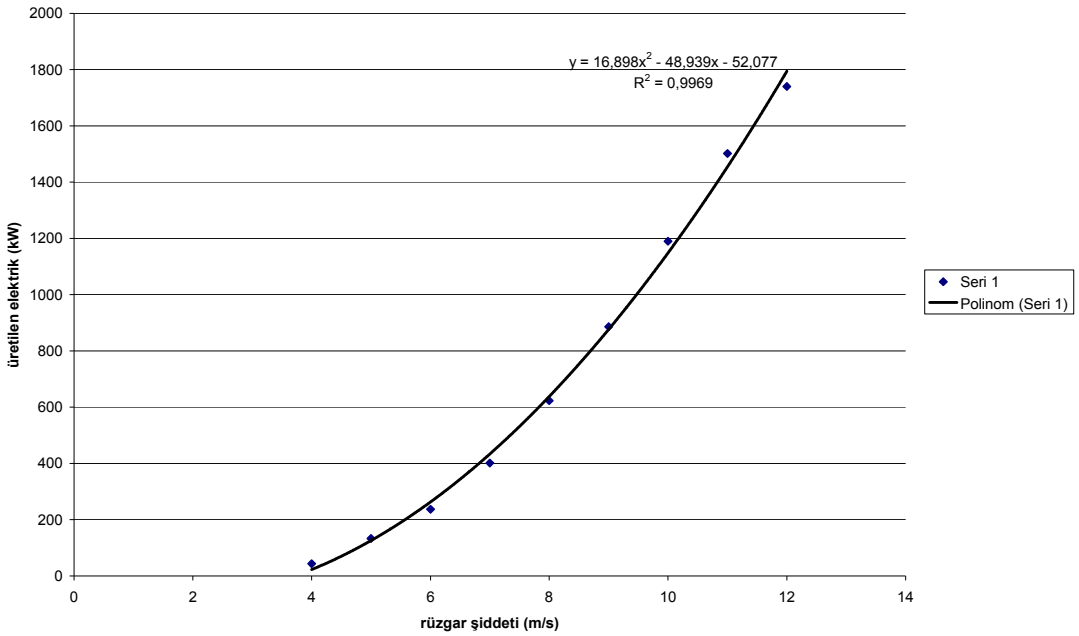
5.2.2 Örnek Uygulama

Karadeniz bölgesi Trabzon ili Çankaya ilçesindeki hidroelektrik santralinin 2004-2005 yılı dönemine ait santral gücü ile bölgeye yakın bir alanda aynı yıllarda 10 metre yükseklikte yapılan rüzgâr şiddeti ölçümleri denklem (2.12) ile türbinlerin kule mesafelerine yükseltilerek seçilen 3 farklı rüzgâr türbini için uyarlanmıştır. Bölgenin dağlık olmasından dolayı hesaplamalarda pürüzlülük yüksekliği (z_o) değeri 0,3 m olarak alınmıştır. Rüzgâr türbinlerinin güç eğrisi özelliklerine göre belirli mesafelere yükseltilen rüzgâr şiddetlerinden üretilecek elektrik miktarı hesapları yapılmıştır. Bu hesaplamalarda bölgemizde yükseltilen rüzgar şiddet değerlerinin en fazla 11m/s'ye yaklaşmasından dolayı sadece güç eğrisinde devreye giriş (cut-in) ve nominal hız arasındaki eğri bölgesi hesaba katılmıştır. Bu aralık için her bir türbinin güç üretim modelleri oluşturulmuş ve ölçülen değerler yerine yerleştirilerek üretilen elektrik güçleri hesaplanmıştır. En düşük belirlilik katsayısı (R^2) değeri 0,993 olarak

belirlenmiştir. (Şekil 5.3-5.5). Bu durum bize oluşturulan denklemleri kullanım olanağı tanımıştır. Buna ilave olarak farklı güçlere sahip rüzgar türbini için elektrik üretim miktarları her bir rüzgar şiddet aralığı için hesaplanmıştır (Tablo 5.4-5.6). Elde edilen güç değerlerinin bölgede kurulacak rüzgâr santralleri ile özellikle Şubat ve Mart aylarında hidroelektrik santrali enerji açığının karşılanabileceği gözlenmiştir.

Tablo 5.1: Türbin Güç Değerleri (Bonus 2000/76)

Türbin Modeli: Bonus 2000/76, Kapasite faktörü : %31, Hub yüksekliği: 60m						
m/s	kW	Üretim (kW)	m/s	kW	m/s	kW
0	0		13	1891	26	0
1	0		14	1962	27	0
2	0		15	1988	28	0
3	0		16	1996	29	0
4	43	22,54	17	1999	30	0
5	133	125,68	18	2000		
6	237	262,62	19	2000		
7	401	433,35	20	2000		
8	623	637,88	21	2000		
9	886	876,21	22	2000		
10	1190	1148,33	23	2000		
11	1502	1454,25	24	2000		
12	1740	1793,97	25	2000		



Şekil 5.3: Türbin Güç Eğrisi (Bonus 2000/76)

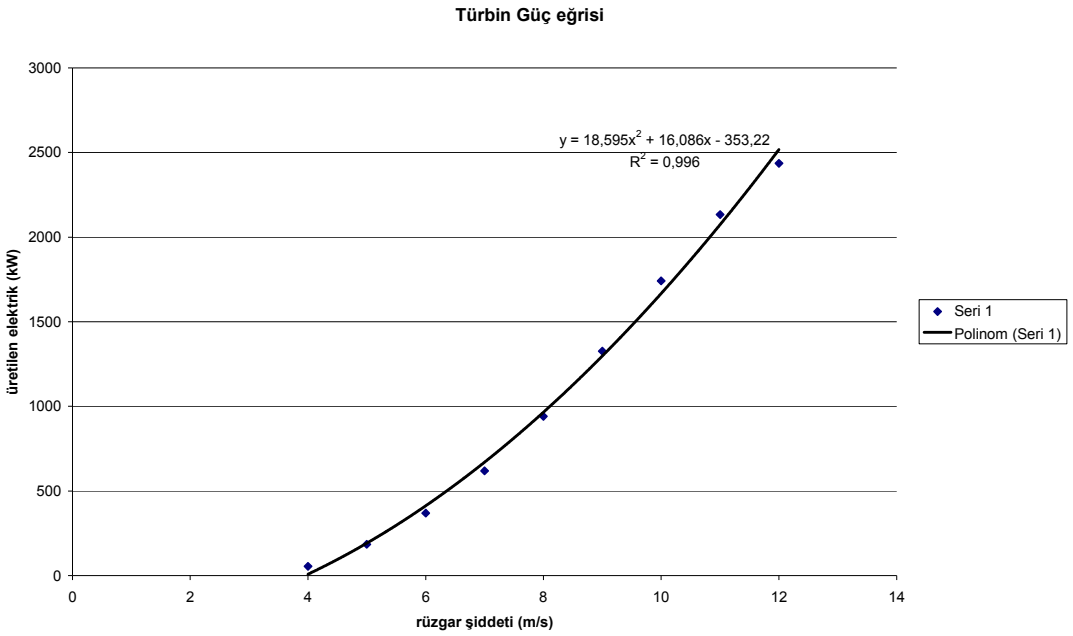
Tablo 5.2: Üretilen Türbin Model Gücü (Bonus 2000/76)

Rüzgar şiddeti (m/s) 10m'de		Rüzgar şiddeti (m/s) 60m'de	Üretilen güç (Model, kW)	Cp, Kapasite Faktörü
Kasım	5,3	8,01	639,69	0,32
Aralık	4,68	7,07	446,83	0,22
Ocak	4,31	6,51	345,86	0,17
Şubat	6,89	10,41	1269,86	0,63
Mart	6,2	9,37	972,43	0,49
Nisan	5,45	8,23	690,81	0,35
Mayıs	3,85	5,82	235,07	0,12
Haziran	3,23	4,88	111,57	0,06
Temmuz	3,13	4,73	94,43	0,05
Ağustos	2,97	4,49	68,60	0,03
Eylül	4,22	6,38	322,90	0,16
Ortalama	**4,57**	**6,90**	**472,55**	**0,24**

Bonus modeli 2000 kW gücünde türbin için elde edilen modelde 60m yükseklik için rüzgâr şiddetine karşı kapasite faktörü ortalaması %24 olup Şubat ve Mart aylarında bu değer ortalamanın çok üstüne çıkmakta ve yüksek verim elde edilmektedir.

Tablo 5.3: Türbin Güç Değerleri (NEG Micon 2750/92)

Türbin Modeli: NEG Micon 2750/92, Kapasite faktörü : %34, Hub yüksekliği: 70m						
m/s	kW	Üretim (kW)	m/s	kW	m/s	kW
0	0		13	2616,9	26	0
1	0		14	2701,8	27	0
2	0		15	2733,8	28	0
3	0		16	2744,1	29	0
4	54,9	8,64	17	2747,2	30	0
5	185,3	192,09	18	2748		
6	369,4	412,72	19	2748,3		
7	618,8	670,54	20	2750		
8	941,4	965,55	21	2750		
9	1326,1	1297,75	22	2750		
10	1741,3	1667,14	23	2750		
11	2132,9	2073,72	24	2750		
12	2435,5	2517,49	25	2750		



Şekil 5.4: Türbin Güç Eğrisi (NEG Micon 2750/92)

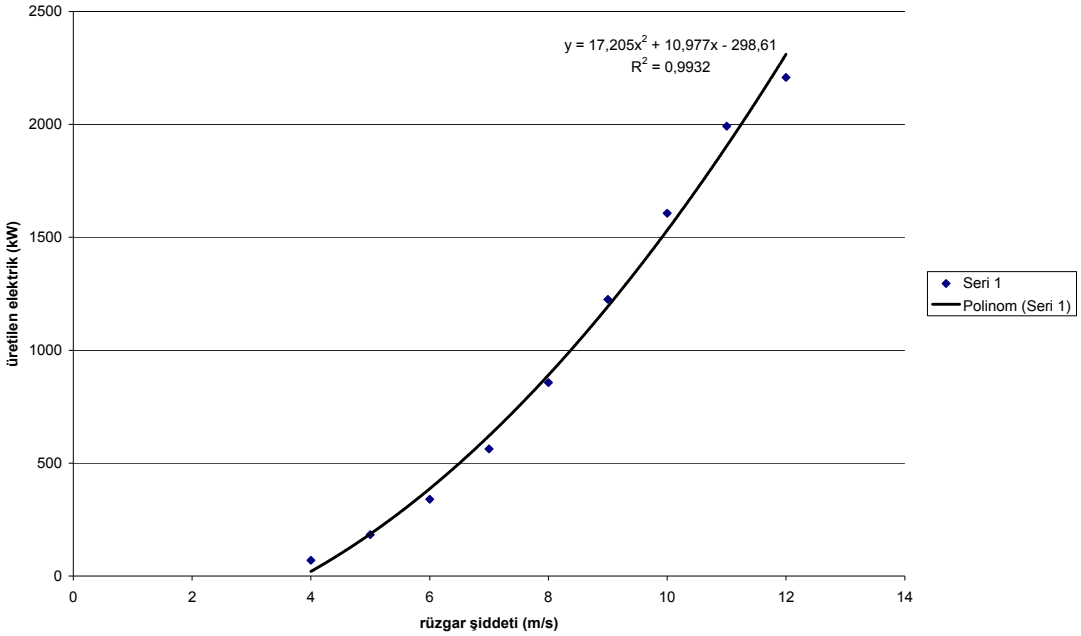
Tablo 5.4: Üretilen Türbin Model Gücü (NEG Micon 2750/92)

Rüzgar şiddeti (m/s) 10m'de		Rüzgar şiddeti (m/s) 70m'de	Üretilen güç (Model, kW)	Cp, Kapasite Faktörü
Kasım	5,3	8,24	1042,26	0,38
Aralık	4,68	7,28	748,56	0,27
Ocak	4,31	6,70	589,75	0,21
Şubat	6,89	10,71	1953,43	0,71
Mart	6,2	9,64	1530,10	0,56
Nisan	5,45	8,47	1118,51	0,41
Mayıs	3,85	5,99	409,49	0,15
Haziran	3,23	5,02	196,63	0,07
Temmuz	3,13	4,87	165,53	0,06
Ağustos	2,97	4,62	117,65	0,04
Eylül	4,22	6,56	552,99	0,20
Ortalama	**4,57**	**7,10**	**765,90**	**0,28**

2750 kW gücündeki NEG Micon türbini için 70m'ye yükseltilen rüzgâr şiddeti değerleri ile yıllık ortalama kapasite faktörü %28 olarak bulunmuş olup, görüleceği gibi türbin gücü ve yüksekliğe bağlı olarak elde edilen aylık güç miktarlarında artış gözlenmektedir.

Tablo 5.5: Türbin Güç Değerleri (Nordex 2300 N90)

Türbin Modeli: Nordex 2300 N90, Kapasite faktörü :%38, Hub yüksekliği:80m						
m/s	kW	Üretim (kW)	m/s	kW	m/s	kW
0	0		13	2300	26	0
1	0		14	2300	27	0
2	0		15	2300	28	0
3	0		16	2300	29	0
4	70	20,58	17	2300	30	0
5	183	186,40	18	2300		
6	340	386,63	19	2300		
7	563	621,27	20	2300		
8	857	890,33	21	2300		
9	1225	1193,79	22	2300		
10	1607	1531,66	23	2300		
11	1992	1903,94	24	2300		
12	2208	2310,63	25	2300		



Şekil 5.5: Türbin Güç Eğrisi (Nordex 2300 N90)

Tablo 5.6: Üretilen Türbin Model Gücü (Nordex 2300 N90)

Rüzgar şiddeti (m/s) 10m'de		Rüzgar şiddeti (m/s) 80m'de	Üretilen güç (Model, kW)	Cp, Kapasite Faktörü
Kasım	5,3	8,44	1020,51	0,44
Aralık	4,68	7,46	739,51	0,32
Ocak	4,31	6,87	587,81	0,26
Şubat	6,89	10,98	1894,56	0,82
Mart	6,2	9,88	1488,14	0,65
Nisan	5,45	8,68	1093,53	0,48
Mayıs	3,85	6,13	415,88	0,18
Haziran	3,23	5,15	213,38	0,09
Temmuz	3,13	4,99	183,87	0,08
Ağustos	2,97	4,73	138,45	0,06
Eylül	4,22	6,72	552,72	0,24
Ortalama	**4,57**	**7,27**	**757,12**	**0,33**

Elde edilen değerler karşılaştırıldığında 2300 kW kapasiteye sahip türbinden elde edilen kapasite faktörünün en yüksek olduğu görülmektedir. Tablo 5.7'de görüleceği gibi hidroelektrik santral bölgesinde uygun araziye kurulacak 10 adet 2300 kW'lık rüzgar elektrik sistemi, Mayıs ayı hariç diğer bütün aylarda hidroelektrik sisteme önemli katkı sağlamaktadır.

Tablo 5.7: Rüzgar Hidroelektrik Hibrit Sistem Modeli

Aylar	Rüzgar Model Gücü (MW)	HES Gücü (MW)	Toplam Güç (MW)	HES Açığı (MW)	Rüzgar HES Açığı Karşılama Oranı (%)
Kasım	10,21	23,83	34,04	64,47	15,84
Aralık	7,4	23,06	30,46	65,24	11,34
Ocak	5,88	23,06	28,94	65,24	9,01
Şubat	18,95	24,65	43,6	63,65	29,77
Mart	14,88	23,06	37,94	65,24	22,81
Nisan	10,94	39,58	50,52	48,72	22,45
Mayıs	4,16	88,3	92,46	0	
Haziran	2,13	74,47	76,6	13,83	15,40
Temmuz	1,84	23,06	24,9	65,24	2,82
Ağustos	1,39	23,06	24,45	65,24	2,13
Eylül	5,53	23,06	29,36	65,24	8,48

6. SONUÇLAR

Rüzgâr Enerjisi, özelliği gereği çevreye en az zarar veren, dolayısıyla dış maliyetleri en düşük enerji kaynağıdır. Rüzgâr Enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren kurulum maliyetleri yüksektir. Ancak yakıt ve işletme giderleri çok düşük seviyededir. Bu aşamada finansman koşullarının iyi olması rüzgâr enerjisinden elde edilecek elektrik enerjisinin diğer bütün bilinen enerji kaynaklarından elde edilen enerjiden çok daha ucuza mal edileceğini göstermektedir. Bu tezde her bir ülkenin rüzgâr enerjisine yönelimi ve teşvikler detaylı olarak ele alınmıştır. Başta Almanya olmak üzere Danimarka, İspanya gibi belli başlı Avrupa Birliğine üye ülkelerin temiz enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisinden daha fazla faydalanılması maksadıyla yatırımları ve araştırma geliştirme faaliyetlerini destekledikleri ve rüzgâr enerjisi santrallerinin de en çok bu ülkelerde tesis edildiği görülmektedir. Genel olarak tüm Avrupa ülkelerindeki uygulamalarda belirli bir enerji politikasının varlığı görülmektedir. Yaptığımız tez çalışması ile Türkiye'de rüzgâr enerjisi konusunda teşvik, süreklilik ve verimlilik açısından yapılması gerekenler şu şekilde belirlenmiştir.

- Sabit tarife, alan tahsisi ve finansman desteği gibi teşviklerin küçük santral sistemler için de uygulanması gerekmektedir.

- Yenilenebilir enerjilerdeki süreksizlik göz önüne alınarak rüzgâr enerjisinde bu sorunu ortadan kaldırmak veya en aza indirgemek için hibrit sistemlerin kullanımı gereği ortaya çıkmaktadır

- Süreksizliği ortadan kaldırmak için hibrit sistem olarak rüzgâr-hidroelektrik enerjisi üzerinde çalışılmış ve Karadeniz bölgesinde Çankaya/Trabzon'da örnek bir uygulama yapılmıştır.

- Bunun sonucunda rüzgâr gücünün incelediğimiz hidroelektrik santraldeki açığı kapatma oranı kış aylarında %16.7, bahar aylarında %22.6, yazın %13.7 olmakta ve enerjide sürekliliğin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

Akalın, A., 2004. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Teşvik ve Desteklenmesi, *Yenilenebilir enerji: Rüzgar Enerjisi Paneli,* ODTÜ Mezunlar Derneği, Ankara, 08 Aralık.

Akgün, N. ve Öz, Ş., 1993. Türkiye rüzgar analizi ve rüzgar atlası çıkarılması *I. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, İstanbul, s. 92-103

Akyüz, O., 2000. Rüzgar enerjisi ve diğer enerji kaynaklarının fiyat/maliyet analizi raporu, Ankara, 11 Mayıs.

Altuntaşoğlu, Z., 2007. YEK Elektrik Direktifi, *Eurosolar Türkiye –Inforse Çalıştayı,* Ankara, 15-16 Aralık

Durak, M., 2004. AB Ülkelerinde Rüzgar Enerji Yatırımlarına Verilen Teşvikler ve Türkiye için öneriler, TMMOB Meteoroloji Mühendisleri Odası Enerji ve Yenilenebilir Enerji Komisyonu Raporu, Ankara.

Hohmeyer, O., 2005. Social Costs of Energy Consumption, North Caroline State University, Academic Press. Inc., San Diego, California, 307 p.

Kaltschmitt, M.Streicher, 2007, Renewable energy technology, Economics and enviroment, Springer, Berlin.

Karakaya, E. ve Özçağ, M., 2004. Sürdürülebilir kalkınma ve iklim değişikliği, *Uygulanabilecek iktisadi araçların analizi,* Ankara.

Kaya, D., 2006. Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli ve çevresel etkilerinin karşılaştırılması, *TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi,* Ankara, 11 Mayıs.

Kaymak M.K. ve Şahin A.D., 2008. İstanbul'da konutlar için rüzgar-güneş hibrit sistemlerinden elektrik üretimi, *4. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu*, s. 112-120, 25-28 Mart 2008, İstanbul.

Kaymak, M.K., 2008. Rüzgar-güneş hibrit sistemlerinde elektrik üretimi, Bitirme ödevi, İTÜ Meteoroloji Müh. Bölümü.

Kırım, S., 2002. Rüzgar Enerjisi ve Uygulamaları, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Metcalf, G.E., 2007, Using a carbon tax to finance payroll tax relief, The Brookings Institution, Washington

Mitchell, C., 2006. Value of Renewable Energy, E.&F. N. Spon limited, London.

Öztopal, A., Kahya, C. ve Şahin, A.D., 2000. Yapay sinir ağları ile rüzgar şiddeti modellemesi. *III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyum,* s. 415-422, 15-17 Kasım, İstanbul.

Polat, U., 2000. Rüzgar Santralleri ve Bağlantılarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Pollard, V., 2005. Life-Cycle Assesment of Wind Energy, John Wileys&Sons Ltd., London

Şahin, A. D ve Şen, Z., 1995. Refined wind energy formulation and its application in Turkey. *The second international conference on new energy systems and conversions.* 31 July-3, August, İstanbul, Turkey.

Şahin, A.D. ve Şen, Z., 1997. Batı Anadolu Bölgesinde rüzgar değişkenlerinin alansal normal dağılım grafik modelleri. *II. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, 6-7 Ocak, 1997, İstanbul.

Şahin, A.D., Gündüz, A. and Şen, Z., 1998. Wind energy potential calculations in the Marmara Region of Turkey. *SWEMP'98*, 18-20 May, pp. 9-12, Ankara-Turkey.

Şahin, A.D. and Şen, Z., 2000. Wind energy directional spatial correlation functions and applications for prediction, *Wind Engin.*, **24**, 3.

Şahin. A.D., 2004, Progress and recent trends in wind energy, *Science Direct,* 29 April 2004.

Şahin. A.D., 2008. A Review on Research and Development on Wind Energy in Turkey,

Şen, Z., 1997. Statistical investigation of wind energy reliability and its application. *Renew. Ener.,* **10**, 71-79.

Şen, Z., 1999. Terrain topograph clasification for wind energy generation. *Renew. Ener.*, **16**, 904-907

Şen, Z., 2000. Rüzgar türbinin tarihi gelişimi süreci, *3. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, s. 375, 15-17 Kasım 2000, İstanbul.

Şen, Z., 2002. Rüzgar enerjisi yeni formülasyonu ve Betz etkisi kıyaslaması, *4. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, s. 401-408, 16-18 Ekim 2002, İstanbul.

Türksoy, F., 1997. Saatlik ve aylık rüzgar verisiyle rüzgar enerjisi modellemesi. *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Wagner, A., 1999. Wind Power and the REFIT model, Wind Rirections.

AWEA, 2004. American Wind Energy Association, *Comperative air emissions of wind and other fuels,* http://www.awea.com.

EİE, 2008. Türkiye Elektrik İşleri Etüt İdaresi, *Rüzgar Enerjisi Çalışması,* http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/ruzgar_potansiyel.html.

EWEA, 2003. European Wind Energy Association, Volume 2, *Cost and prices,* http://www.ewea.org.

EWEA, 2004. European Wind Energy Association, Volume 5, *Market Incentives,* http://www.ewea.org.

EWEA, 2006. European Wind Energy Association, *2006 Annual Report*, http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/ewea-report2006.pdf.

TÜREB, 2008. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği,

http://www.ruzgarenerjisibirligi.org.tr.

ÖZGEÇMİŞ

25 Nisan 1982 tarihinde İstanbul'da doğan Receb Enes GÖKÇINAR lise öğrenimini 2001 yılında Kadıköy Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisans öğrenimine başlamış olup, halen eğitimine devam etmektedir.