

T. C.

**ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
EKONOMETRİ ANABİLİM DALI
YÖNEYLEM BİLİM DALI**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDAN RÜZGAR İLE ÜRETİLEN
ENERJİNİN EKONOMİK DEĞERİNİN MARKOV ZİNCİRİ İLE
MODELLENMESİ VE YALOVA İLİNDE BİR UYGULAMA**

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

Selin KARATEPE

BURSA 2011

**T. C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
EKONOMETRİ ANABİLİM DALI
YÖNEYLEM BİLİM DALI**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDAN RÜZGAR İLE ÜRETİLEN
ENERJİNİN EKONOMİK DEĞERİNİN MARKOV ZİNCİRİ İLE
MODELLENMESİ VE YALOVA İLİNDE BİR UYGULAMA**

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

Selin KARATEPE

Danışman

Prof. Dr. Ahmet ÖZTÜRK

BURSA 2011

T. C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Ekonometri Anabilim/Anasanat Dalı,
Eneylem Bilim Dalı'nda 700717003 numaralı
Jelin KARATEPE'nin hazırladığı "Yüksek Lisans Enerji Kaynakları ve
Küresel ile Üretim Enerjisinin Ekonomik Depo'nun Markov Zinciri ile Modellenmesi" konulu
Yüksek Lisans (Yüksek Lisans/Doktora/Sanatta Yeterlik Tezi/Çalışması) ile ilgili tez savunma sınavı, 20/01/2011 günü 14.00 - 15.00 saatleri arasında yapılmış, sorulan sorulara alınan cevaplar sonunda adayın tezinin/çalışmasının başarılı (başarılı/başarısız) olduğuna oybirliği (oybirliği/oy çokluğu) ile karar verilmiştir.


Üye (Tez Danışmanı ve Sınav Komisyonu Başkanı)

Akademik Unvanı, Adı Soyadı

Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Öztürk
Uludağ Üniversitesi


Üye

Akademik Unvanı, Adı Soyadı

Üniversitesi

Doc. Dr. Ayşe ÖZÜRLAR
Uludağ Üniversitesi


Üye

Akademik Unvanı, Adı Soyadı

Üniversitesi

Doc. Dr. Ahmet Duran Sahin
İstanbul Teknik Üniversitesi

Üye

Akademik Unvanı, Adı Soyadı

Üniversitesi

Üye

Akademik Unvanı, Adı Soyadı

Üniversitesi

...../...../ 20.....

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
EKONOMETRİ ANABİLİM DALI
YÖNEYLEM BİLİM DALI

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDAN RÜZGÂR İLE ÜRETİLEN
ENERJİNİN EKONOMİK DEĞERİNİN MARKOV ZİNCİRİ İLE
MODELLENMESİ VE YALOVA İLİNDE BİR UYGULAMA**

Selin Karatepe

(Yüksek Lisans Tezi)

Enerji, ekonominin temel girdilerinden biri, sosyal ve ekonomik kalkınmanın vazgeçilmez bir unsurudur. Dengeli ve sürdürülebilir bir kalkınma ucuz, yeterli ve güvenilir enerji kaynaklarına sahip olmakla ve bu kaynakların yönetiminde kalitenin ve etkinliğin sağlanmasıyla yakından ilgilidir. Türkiye, enerji ithalatçısı bir ülke konumunda olup enerjiye olan ihtiyacın artmasına paralel olarak ülkenin enerjide dışa bağımlılık oranı da artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından avantajlı bir konumda olan Türkiye’de bu kaynakların kullanımının artması, dışa bağımlılığın azaltılmasında önemli bir araç olarak belirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en gelişmiş ve ticari açıdan en uygunu, çevre sorunlarına neden olmadığı gibi, güneş var olduğu sürece tükenmeyecek olan, rüzgâr enerjisidir. Son yıllarda, özellikle rüzgâr enerjisine yönelik yasal düzenlemeler ve yatırım teşvikleri ile bu alandaki yatırımların artması neticesinde 2009 yılında Türkiye, rüzgâr enerjisi kurulu kapasitesini önceki yıla göre en fazla arttıran ikinci ülke konumuna gelmiştir. Rüzgâr gücünden elde edilebilecek enerji miktarının hesaplanmasında kullanılan en önemli veri rüzgâr hızıdır. Doğru ölçümler ve modellemeler ile rüzgârdan elde edilebilecek enerji miktarını küçük sapmalarla hesaplamak mümkündür. Bu çalışmada, Yalova ili Süpürgelik mevkiinde bir yıllık süre için ölçülmüş saatlik ortalama rüzgâr hızı değerlerine bağlı olarak üretilebilecek elektrik enerjisinin ekonomik değerlerinin modellenmesinde Markov zincirinin geçiş matrisi yaklaşımı kullanılmıştır. Ekonomik değer zaman serisi, ortalama ve standart sapmalarına göre türbin güç eğrisi yaklaşımı ile farklı durumlara ayrılarak 16x16 boyutunda bir geçiş matrisi elde edilmiştir. Modelin geçerliliği doğrulanırsa, model istenilen herhangi bir süre için farklı uzunluklarda sentetik veriler üretmede kullanılabilir. Gerçek veriler ile sentetik verilerin karşılaştırılması, istatistikî parametrelerinin güvenilir biçimde yeniden üretilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Enerji, Markov Zinciri, Markov Zinciri Monte Carlo Simülasyonu, Rüzgâr Enerjisi Modellemesi,

ULUDAG UNIVERSITY
ECONOMETRICS MAIN SCIENCE BRANCH
OPERATIONS RESEARCH SCIENCE BRANCH

**MODELING THE ECONOMIC VALUE OF RENEWABLE WIND ENERGY
WITH MARKOV CHAIN METHOD: AN APPLICATION IN YALOVA,
TURKEY**

Selin Karatepe

(Master Thesis)

Energy is one of the main inputs of economy, and essential for economic and social development. Establishing a balanced and sustainable development is strictly related to cheap, sufficient, and reliable energy sources, as well as the quality of resource management. Turkey is an energy importing country. As the demand for energy increases, its dependence on foreign sources increases, as well. Turkey has some advantages in terms of renewable energy sources, and increasing the share of these sources could be an important tool for decreasing the dependency on foreign sources. When the resource is locally available, the most developed and commercially viable renewable source of energy today seems to be wind energy which has no damaging impacts on the environment. As a result of recent legal regulations and investment incentives for wind energy, installed wind power capacity started to increase in Turkey. Wind speed is the most important variable for determining the wind energy potential. It is possible to predict the amount of energy potential with slight deviations by using field measurements and accurate modeling. In this study, hourly average wind speeds which were measured for one year period in Süpürgelik region of Yalova were used to predict the economic value of the electrical energy from wind. The economic value time series were generated by using the transition matrix approach of the first order Markov chain method. For this purpose, the economic value time series were divided into states based on the means and standard deviations, employing the turbine power curve. A 16x16 transition probability matrix was obtained. Once the model is validated, it can then be used for generating synthetic series of various lengths of any desired durations. The comparisons between the actual data and simulations showed that the statistical characteristics were satisfactorily reproduced.

Key Words: Renewable Energy, Markov Chain, Markov Chain Monte Carlo Simulation, Wind Energy Modeling.

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bana olan güvenini ve inancını dile getirerek motivasyonumu sürekli kılan danışman hocam, Prof. Dr. Ahmet ÖZTÜRK'e desteği ve yardımlarından dolayı içtenlikle teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Emeğini ve zamanını ayırarak tez çalışmamı katkılarıyla yönlendiren ve çalışmamda kullandığım verileri sağlayarak bir anlamda bu çalışmayı mümkün kılan değerli hocam Doç. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN'e rehberliği, tavsiyeleri ve desteğinden dolayı en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışmamın modelleme aşamasında yazılım konusunda ihtiyaç duyduğum noktalarda bilgi ve desteklerini esirgemeyen Bilgisayar Mühendisi Özlem KARADENİZ'e ve Yalova Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Hüseyin SAVRAN'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak, bilgeliğiyle hayatıma ışık tutan dedem Süleyman YILDIZ'a; Annem'e, Babam'a ve kardeşim Selim'e, hayatımda daima sevgi ile var oldukları için, bir an bile desteklerinden yoksun hissetmemin olanaksızlığının farkında olarak teşekkür ederim.

Bursa 2011

Selin KARATEPE

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAY SAYFASI.....	II
ÖZET.....	III
ABSTRACT.....	IV
ÖNSÖZ	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
KISALTMALAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	XI
TABLolar.....	XIII
SEMBOLLER.....	XIV
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

ENERJİ, YENİLENEBİLİR ENERJİ VE TÜRKİYE

1. ENERJİYE GENEL BAKIŞ VE YENİLENEBİLİR ENERJİNİN ÖNEMİ	3
1.1. Dünya enerji tüketimi	5
1.1.1. Birincil enerji kaynakları.....	10
1.1.1.1. Fosil yakıtlar	11
1.1.1.2. Nükleer	14
1.1.1.3. Yenilenebilir	18
1.1.2. Küresel iklim değişimi ve enerji tüketimi ilişkisi	21
1.1.3. Sosyoekonomik gelişmeler ve enerji tüketimi ilişkisi	28
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI.....	36
2.1. Güneş	36
2.2. Rüzgâr	40
2.3. Hidroelektrik	44
2.4. Jeotermal	46

2.5.	Biyokütle.....	48
2.6.	Denizsel	49
2.7.	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Uygulanan Teşvik Sistemleri	51
3.	TÜRKİYE’ DE YENİLENEBİLİR ENERJİ	55
3.1.	Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli Ve Kullanımı	58
3.2.	Türkiye’de Yenilenebilir Enerjiye İlişkin Yasal Düzenlemeler Ve Uygulamadaki Teşvikler	62

İKİNCİ BÖLÜM

YENİLENEBİLİR BİR KAYNAK OLARAK RÜZGÂR ENERJİSİ VE MODELLENMESİNDE MARKOV ZİNCİRİ YAKLAŞIMI

1.	RÜZGÂR ENERJİSİ.....	68
1.1.	Rüzgâr Enerjisinden Yararlanmanın Tarihçesi.....	68
1.2.	Dünya Rüzgâr Potansiyeli Ve Kullanımı.....	70
1.3.	Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi.....	76
1.4.	Rüzgârın Oluşumu	81
1.5.	Rüzgârın Ölçülmesi Ve Değerlendirilmesi.....	82
1.6.	Rüzgârın Enerji Formülasyonu.....	86
1.7.	Rüzgâr Türbinleri.....	89
1.7.1.	Rüzgâr türbinleri için yer seçimi.....	91
1.7.2.	Türbin güç eğrisi ve türbinlerde rüzgâr şiddetine bağlı enerji üretimi.....	93
1.8.	Ekonomik Açıdan Rüzgâr Enerjisi	95
1.8.1.	Rüzgâr türbinlerinin kurulum ve işletim maliyetleri	100
1.8.2.	Rüzgâr enerjisi tahminlerinin elektrik piyasasındaki ekonomik yorumu	103
1.9.	Rüzgâr enerjisinin tahmininde ve modellenmesinde kullanılan teknikler.....	106
2.	MARKOV ZİNCİRLERİNİN KURAMSAL ALT YAPISI.....	110
2.1.	Markov Süreçleri Ve Markov Özelliği	110
2.2.	Stokastik Süreç Ve Markov Zincirleri	111
2.3.	Geçiş Olasılıkları Ve Geçiş Matrisi	113

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDEN ÜRETİLEN ELEKTRİK ENERJİSİNİN EKONOMİK DEĞERİNİN MARKOV ZİNCİRLERİ İLE MODELLENMESİ: YALOVA İLİ ÖRNEĞİ

1. BÖLGENİN COĞRAFİ VE METEOROLOJİK ÖZELLİKLERİ.....	117
2. VERİLERİN VE KULLANILAN RÜZGÂR TÜRBİNİNİN ÖZELLİKLERİ	118
2.1. Rüzgâr Hızı Verileri.....	118
2.2. Nordex N90 (2300 kW) Rüzgâr Türbini.....	122
2.2.1. Türbin güç eğrisi denkleminin tahmini ve ekonomik değer zaman serisinin elde edilmesi	122
3. EKONOMİK DEĞERLERİN MARKOV ZİNCİRİ İLE MODELLENMESİ	126
3.1. Birinci Derece Geçiş Matrisinin Oluşturulması.....	127
3.2. Kümülatif Geçiş Matrisi Ve Sentetik Verilerin Üretilmesi	132
4. SENTETİK VERİLER İLE GERÇEK VERİLERİN İSTATİSTİKİ ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI VE BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	137
SONUÇ	140
KAYNAKLAR	146
EKLER	157
Ek I: Rüzgar Hızı Verilerinin Markov Zinciri İle Modellenmesi.....	157
Ek II: Nordex N90 (2300 kW) Rüzgar Türbininin Teknik Özellikleri.....	160
ÖZGEÇMİŞ	163

KISALTMALAR

A.G.E. :	Adı Geçen Eser
A.G.T. :	Adı Geçen Tez
AB:	Avrupa Birliği
ABD:	Amerika Birleşik Devletleri
AC:	Alternative Current
ARMA:	Auto Regressive Moving Avarage
ARMAX:	Auto Regressive Moving Avarage with exogenous inputs
BP:	British Petroleum
CFC:	Chlorofluorocarbon
CH_4 :	Metan
CO:	Karbonmonoksit
CO_2 :	Karbondioksit
DC:	Direct Current
DMÖ:	Dünya Meteoroloji Örgütü
ECM:	Error Correction Model
EİE:	Elektrik işleri Etüd İdaresi
ETKB:	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EU:	European Union
GSYİH:	Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
GWe:	Gigawatt Electrical
GWEC:	Global Wind Energy Council
GWh:	Gigawatt/ Hour
HAWS:	Hourly Avarage Wind Speed
IAEA:	International Atomic Energy Agency
IEA:	International Energy Agency
IPCC:	Intergovernmental Panel on Climate Change
İTÜ:	İstanbul Teknik Üniversitesi
KW:	Kilowatt
MC:	Markov Chain
MCMC:	Markov Chain Monte Carlo
MENR:	Ministry of Ecology and Natural Resources
MW:	Megawatt
MWe:	Megawatt Electrical
MWp:	Megawatt Peak
N ₂ O:	Diazotmonoksit
NEA:	Nuclear Energy Agency
NO:	Nitrikoksit

NOAA:	National Oceanic and Atmospheric Administration
NO_x :	Azotoksitler
O_3 :	Ozon
OECD:	Organisation for Economic Co-operation and Development
PDF:	Probability Density Function
PPM:	Parts Per Million
PV:	Photovoltaic
SO_x :	Kükürtoksitler
TEP:	Ton Eşdeğeri Petrol
TET:	Ton Eşdeğeri Taşkömürü
TMMOB:	Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
TPES:	Total Primary Energy Supply
TUBİTAK:	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
TWh:	Terrawatt/Hour
V.D:	Ve Diğerleri
VECM:	Vector Error Correction Model
WEC:	World Energy Council
WEO:	World Energy Outlook
WWEA:	World Wind Energy Association

ŞEKİLLER

Şekil 1: 1973 ve 2007 Yılları Dünya Birincil Enerji Tüketiminin Yakıt türlerine göre Yüzde Dağılımı	7
Şekil 2: Dünya Elektrik Tüketiminin Tarihsel Gelişimi (1945- 2009)	8
Şekil 3: Yakıt Türlerinin Elektrik Üretimindeki Yüzdeler Payları	10
Şekil 4: Dünya Kömür Rezervlerinin Bölgelere Göre Dağılımı	13
Şekil 5: Dünya Petrol Rezervlerinin Bölgelere Göre Dağılımı	13
Şekil 6: Dünya Doğal Gaz Rezervlerinin Bölgelere Göre Dağılımı	14
Şekil 7: Dünyadaki Nükleer Reaktör Sayıları ve Üretim Kapasiteleri (1965-2008).....	17
Şekil 8: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının 1971- 2004 Yılları Arasındaki Büyüme Oranları..	19
Şekil 9: Sera Etkisi	22
Şekil 10: Atmosferdeki Karbondioksit Miktarı ve Sıcaklık Artışının Tarihsel Seyri	25
Şekil 11: Sera Gazlarının Küresel Emisyon İçindeki Payları	27
Şekil 12: Dünya Fotovoltaik Enerji Potansiyeli	40
Şekil 13: Dünya Güneş Enerjisi Potansiyeli	40
Şekil 14: 1996- 2009 Yılları Arasında Küresel Kurulu Rüzgâr Kapasitesinin Kümülatif ve Yıllık Değişimi	42
Şekil 15: Dünya Rüzgâr Potansiyeli (Onshore)	43
Şekil 16: Dünya Rüzgâr Potansiyeli (Offshore).....	43
Şekil 17 : Dünya Hidroelektrik Potansiyeli	46
Şekil 18: Dünya Jeotermal Enerji Potansiyeli.....	47
Şekil 19: Birincil Enerji Kaynakları Üretimi (2000- 2008)	56
Şekil 20: Enerjide Dışa Bağımlılık Oranı (2000- 2008)	57
Şekil 21: Barajlı Üretim Kurulu Gücü Hariç Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücünün Toplam Kurulu Güç İçindeki Payı (%).....	58
Şekil 22: Dünya’da Teknik Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Kıtalaraya göre Dağılımı.....	71
Şekil 23: Dünya Rüzgâr Gücü Kurulu Kapasitesi (2001-2010).....	72
Şekil 24: Rüzgâr Enerjisi Kurulu Kapasitesi Büyüme Oranları (1998- 2009).....	73
Şekil 25: Rüzgâr Enerjisi Kurulu Kapasite Artışlarının Ülkelere Göre Dağılımı	74
Şekil 26: Toplam Kurulu Rüzgâr Gücü Kapasitesinin Ülkelere Göre Dağılımı (2009)	75
Şekil 27: Türkiye Rüzgâr Atlası.....	77
Şekil 28: Weibull Dağılımı	84
Şekil 29: Rayleigh Dağılımına Şekil Parametresinin Etkisi.....	86
Şekil 30: Eksenlerine Göre Rüzgâr Türbinleri.....	90
Şekil 31: Rüzgâr Türbininin Güç Eğrisi.....	94
Şekil 32 : İzmir’de kurulan 15MW’lık Rüzgâr Tarlasının Genel Bütçesi.....	101
Şekil 33: Ölçüm Yapılan Bölgenin Genel Görünümü	119
Şekil 34: Seçilen bölgedeki rüzgâr hızı verisinin frekans diyagramı	121
Şekil 35: Nordex N90 (2.3 MW) Rüzgâr Türbininin Türbin Güç Eğrisi	122

Şekil 36: Türbin Güç Eğrisinde Cut-in ve Nominal Hızı Arasında Kalan Eğrinin Tahmin Denklemi.....	124
Şekil 37: Geçiş Frekansları Matrisi.....	129
Şekil 38: Elde Edilen Geçiş Matrisi ve Geçiş Olasılıkları	131
Şekil 39: Kümülatif Geçiş Matrisi ve Kümülatif Geçiş Olasılıkları	135
Şekil 40: Sentetik veriler için geçiş matrisi.....	136
Şekil 41: Gerçek veriler ile sentetik verilere ilişkin sıklık diyagramları.....	138

TABLÖLAR

Tablo 1: Nükleer Enerji Kurulu Kapasitesinin Ülkelere Göre Dağılımı.....	17
Tablo 2: Sera Gazlarının Değişim Oranları ve Kaynaklar	23
Tablo 3: Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme İlişkisinin tespitine yönelik bazı çalışmalara genel bakış.....	30
Tablo 4: 2007 Yılı Sonu İtibariyle Dünya Güneş Pili Kurulu Kapasitesinin Kıtalara göre Dağılımı	39
Tablo 5: Hidroelektrik Üretiminde İlk 10 Üretici Ülkenin Durumu (2007)	45
Tablo 6: Jeotermal Enerji: 2007 Yılı Kurulu Kapasite ve Üretim Miktarları	48
Tablo 7: Bölgelere Göre Ortalama Rüzgâr Gücü Yoğunluğu.....	60
Tablo 8: Çeşitli ülkelerde rüzgâr elektriği için uygulanan minimum alım fiyatları.....	79
Tablo 9: Çeşitli Enerji Kaynaklarının Maliyetleri.....	97
Tablo 10: Ses basıncı düzeyi örnekleri	99
Tablo 11: İngiltere'deki Rüzgâr Çiftliklerinde Gözlenen Kuş Çarpmaları	99
Tablo 12: Elektrik Santrallerinin Kuruluş Maliyetleri	100
Tablo 13: Rüzgâr Çiftliği İçin Yatırım Maliyeti Bileşenleri ve Toplam Maliyet İçindeki Payları	101
Tablo 14: Süpürgelik/Yalova Rüzgâr Ölçüm İstasyonu Rüzgâr Şiddeti Verilerinin İstatistiksel Parametreleri	120
Tablo 15: Süpürgelik/Yalova Rüzgâr Ölçüm İstasyonu Rüzgâr Şiddeti Verilerinin 2.3 MW'lık Türbinden Üretilebilecek Elektriğin Ekonomik Değer Karşılığının İstatistiksel Parametreleri	125
Tablo 16: 16 Durumun Sınır Değerleri	127
Tablo 17: Elde Edilen Ekonomik Değerlerin İstatistiksel Parametreleri	133
Tablo 18: Gerçek Veriler ile Sentetik Verilerin İstatistikî Parametreleri.....	139

SEMBOLLER

- $f(V)$: Weibull dağılımının sıklık yoğunluk fonksiyonu
 c : Ölçek parametresi
 k : Şekil parametresi
 σ : Standart sapma
 m : Kütle
 V : Rüzgar Hızı
 E : Enerji
 v : Hacim
 ρ : Havanın yoğunluğu
 A : Birim alan
 l : Uzunluk
 t : Zaman
 C_p : Maksimum kapasite faktörü
 V_0 : Rüzgar türbininin enerji üretimine başlama hızı, cut-in
 $V_{ü}$: Rüzgar türbininin enerji üretebileceği hız üst limit, cut-out
 t_n : Zaman değişkeni
 ξ_{t_n} : t_n anındaki rassal değişken
 x_n : t_n anındaki durum olasılığı
 Z_{t_n} : t_n anındaki rassal değişken
 X_t : Rassal değişkenler kümesi
 a_i, a_j : Markov zincirindeki i. ve j. durum
 p_{ij} : Geçiş olasılığı matrisinin i. satır, j. sütun elemanı
 \mathbf{P} : Geçiş olasılığı matrisi
 \mathbf{Q} : Markov zinciri için başlangıç olasılık dağılım vektörü
 \mathbf{P}^n : n- adımda geçiş olasılığı matrisi

GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı, yaşamın her alanında giderek artan bir öneme sahip enerji konusunu, sürdürülebilirlik kavramı çerçevesinde temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları açısından ve rüzgâr enerjisinin yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki yerini ve önemini vurgulayarak incelemeye ve rüzgâr gücü ile üretilen elektriğin ekonomik değer zaman serisinin simülasyonunda Markov zinciri modelinin birinci derece geçiş matrisi yaklaşımının kullanımının uygunluğunu göstermeye yöneliktir.

Bu amaçla çalışmanın birinci bölümünde, dünya enerji talebinin karşılanmasında kullanılan birincil enerji kaynakları tanıtarak bunlar arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının görece önemi vurgulanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç ve enerjide yenilenebilir kaynaklara yönelişin faydaları hem çevresel hem de ekonomik bakımdan açıklanmıştır. Mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarının neler olduğu, potansiyelleri ve kullanım düzeyleri ile bunlara yönelik olarak uygulanan teşvik sistemleri dünya genelinde ve Türkiye özelinde incelenmiştir.

İkinci bölümde, son yıllardaki teknolojik gelişmeler neticesinde gerçekleşen maliyet düşüşleri ve konvansiyonel enerji kaynaklarının yarattığı önemli çevre sorunları nedeniyle, dünya enerji arzında önemli bir yer edinmekte olan yenilenebilir bir kaynak olarak rüzgâr enerjisi çeşitli yönleriyle incelenmiştir. Rüzgârın değişken doğası dolayısıyla rüzgârdan elde edilebilecek enerji miktarının öngörülebilmesinin yatırımcılar, üreticiler, düzenleyici kurullar ve serbest elektrik piyasası açısından önemi vurgulanarak rüzgâr hızı ve rüzgâr hızına bağlı olan enerji üretim düzeyi gibi büyüklüklerin modellenmesinde uygun bir teknik olarak kullanılmakta olan Markov zinciri modelinin teorik alt yapısı açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde ise Markov zinciri modelinin birinci derece geçiş matrisi yaklaşımını kullanarak Yalova ili Süpürgelik mevkiinde bir yıllık süre için ölçülmüş saatlik ortalama rüzgâr hızı verilerine bağlı olarak üretilebilecek elektrik enerjisinin ekonomik değer serisinin simülasyonu amaçlanmıştır. Bu amaçla, geçiş olasılıklarının belirlenmesi için ekonomik değer zaman serisi, ortalama ve standart sapmalarına göre

ve türbin güç eğrisinin özellikleri göz önünde bulundurularak farklı durumlara ayrılmış; 16x16 boyutunda bir geçiş matrisi elde edilmiştir. Durumların belirlenmesinde türbin güç eğrisinin özelliklerine dayalı bir yaklaşımın benimsenmesi literatüre yeni katkılar sağlamıştır. Modelin geçerliliği doğrulandığında, model istenilen herhangi bir süre için farklı uzunluklarda sentetik veriler üretmede kullanılabilir. Gerçek veriler ile sentetik verilerin karşılaştırılması, rüzgâr türbinlerinden üretilen elektriğin ekonomik değer serisinin istatistikî parametrelerinin güvenilir biçimde yeniden üretilebileceğini göstermektedir. Sentetik zaman serilerinden herhangi bir rüzgâr enerjisi sisteminin ekonomik analizlerinde yararlanılabilir.

BİRİNCİ BÖLÜM

ENERJİ, YENİLENEBİLİR ENERJİ VE TÜRKİYE

1. ENERJİYE GENEL BAKIŞ VE YENİLENEBİLİR ENERJİNİN ÖNEMİ

Günümüzde insanlığın ve kurmuş olduğu toplumsal yapının sürdürülmesinde rol oynayan en önemli faktör enerjidir. Dramatik ölçüdeki etkileri tüm dünyayı sarsan 1973 Petrol Krizi ile kritik önemi gözler önüne serilen enerji konusuna ilgi sürekli olarak artmakta olup enerjinin, ekonominin temel girdilerinden biri, sosyal ve ekonomik kalkınmanın vazgeçilmez bir unsuru olduğu tüm dünya tarafından kabul edilmektedir. Dengeli ve sürdürülebilir bir kalkınma ucuz, yeterli ve güvenilir enerji kaynaklarına sahip olmakla ve bu kaynakların yönetiminde kalitenin ve etkinliğin sağlanmasıyla yakından ilgilidir.

Dünya enerji ihtiyacı ve talebi, nüfus artışı, teknolojik ilerlemeler ve ülkelerin gelişmişlik düzeyi ile paralel olarak artmakta bu durum enerji kaynaklarının sonluluğuna ilişkin tartışmaları gündeme getirmektedir. Bugün dünya birincil enerji tüketiminin büyük kısmı fosil yakıt kullanımı ile sağlanmaktadır. Bu durum öncelikle, bilinen fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmekte olduğu gerçeği ve zaten kıt olan bu kaynakların yerküre üzerindeki dengesiz dağılımı ile bağlantılı sorunlar şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Yapılan projeksiyonlara göre, “Yeryüzündeki fosil kökenli yakıtların bilinen rezervleri dikkate alındığında, mevcut tüketim hızıyla petrolün 41, doğalgazın 62 ve kömürün de yaklaşık 230 yıl sonra tükenecek olması, fosil yakıtlar dışında yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunması ve bu kaynakların dünya enerji bilançolarında yer alması gerektiğini ortaya koymaktadır.” (Akova 2008) Diğer yandan, fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan ciddi çevre sorunları, yeryüzündeki canlı hayatını tehlikeye atarak alternatif ve temiz enerji kaynakları ve bunların kullanımına uygun yeni teknolojilerin arayışını zorunlu kılmaktadır.

Termodinamik, enerjinin bilimi olarak tanımlanabilir. Enerjinin ne olduğu hakkında ortak bir kavramsal anlayış bulunmakla birlikte, enerjinin tanımını tam olarak yapmak zordur. Enerji, değişikliklere yol açan etken ya da iş yapabilme yeteneği olarak düşünülebilir. “Termodinamik adı, iki sözcüğün birleşmesinden meydana gelmiştir. Latince “thermos” sıcaklık ve “dynamis” güç anlamı taşımaktadır. Buna göre termodinamik, ısı ile enerjinin biçimleri arasındaki ilişkileri inceleyen bilim dalıdır.” (Acaroğlu 2007) Doğanın en temel yasalarından biri olan “Enerjinin Korunumu İlkesi”ni ifade eden termodinamiğin birinci yasasına göre, bir sistemdeki enerji form değiştirebilir fakat sistemdeki toplam enerji miktarı değişmez. Enerji yaratılmadığı gibi yok da edilemez; ancak bir formdan başka bir forma dönüştürülebilir. Termodinamiğin ikinci yasası, enerjinin niceliğinin yanında niteliğinin de önemini vurgulamakta; kullanılabilir enerji kavramını ve tersinmezlik sonucunu ortaya koymaktadır. Belirli bir miktardaki enerjinin kalitesi veya iş yapma potansiyeli termodinamik yararlılık veya ekserji olarak tanımlanmaktadır. Termodinamiğin ikinci yasası, birinci yasayı kısıtlayarak enerjinin tamamının işe dönüştürülemeyeceğini ve doğadaki hal değişimlerinin enerjinin niteliğinin azaltır yönde gerçekleştiğini vurgular. (Acaroğlu 2007; Eren vd. 2010) Bu açıdan bakıldığında, bir enerji kaynağındaki toplam enerji miktarının yanında bu enerjinin iş yapma potansiyelinin belirlenmesi, ekonomik açıdan önemli bir özellik olup, bu özelliğe kullanılabilirlik adı verilmektedir.

Enerji kaynakları çok değişik biçimlerde (madde hali, depo edilebilirlik, dönüştürülebilirlik, yenilenebilirlik, kullanılabilirlik, güne temelli gibi) sınıflandırılabilir. Daha çok kullanılabilirliğine ve yenilenebilirliğine göre yapılan sınıflandırma yaygındır (Karaosmanoğlu, 2004).

Enerji Kaynaklarının Dönüştürülebilirliğe Göre Sınıflandırılması:

- Birincil (Primer) Enerji Kaynaklar (kömür, petrol, doğal gaz, biyokütle, güneş, rüzgâr, su gücü, nükleer)
- İkincil (Sekonder) Enerji Kaynaklar (elektrik, termik, elektromagnetik gibi)

Enerji Kaynaklarının Kullanılabilirliğine Göre Sınıflandırılması:

- Alışlagelmiş (Klasik-Konvansiyonel) Enerji Kaynaklar (kömür, petrol, doğal gaz, nükleer)
- Yeni (Alternatif) Enerji Kaynaklar : (güneş, rüzgâr, su gücü, biyokütle)

Enerji Kaynaklarının Yenilenebilirliğe Göre Sınıflandırılması:

- Yenilenemeyen (Fosil-Tükenebilir) Enerji Kaynakları : (kömür, petrol, doğalgaz ve nükleer)
- Yenilenebilir (Yeni-Alternatif) Enerji Kaynakları: Potansiyeli eksilmeyen kaynaklara “yenilenebilir enerji kaynaklar ” denilmektedir (güneş, rüzgâr, biyokütle ve su gücü (hidrolik, jeotermal, deniz enerjisi (dalga enerjisi, sıcaklık gradyan enerjisi, akıntı enerjisi ve gel-git enerjisi) (Karaosmanoğlu 2004).

Enerji kaynaklarına ilişkin bir diğer kümeleme, ekosisteme verdikleri zarara göre yapılmıştır. Buna göre:

- *Kirli Enerji Kaynakları:* Kömür, petrol, doğal gaz, nükleer, büyük barajlı su gücü
- *Temiz Enerji Kaynakları:* Güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle, barajsız su gücü, hidrojen enerjisi, tasarruf enerjisi ve diğer olarak sıralanmaktadır (Gürsoy 2004).

1.1. Dünya enerji tüketimi

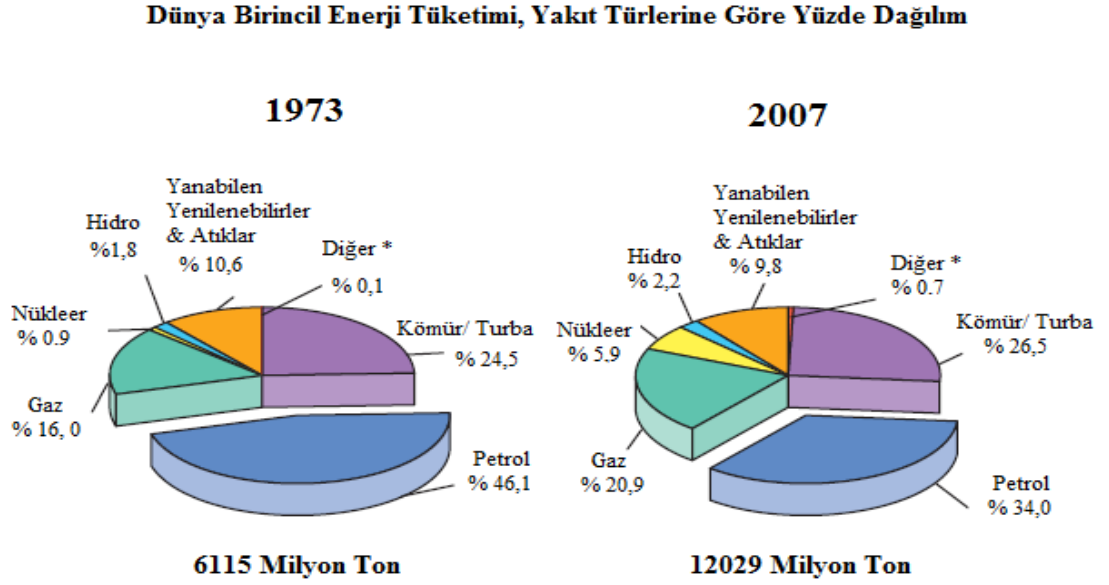
Tüm enerji teknolojilerinin amacı çeşitli kaynaklardan elde edilen enerjinin elektrik, mekanik ya da ısı enerjisi gibi kullanışlı biçimlere dönüştürülmesine yöneliktir. Birincil enerji, herhangi bir dönüşüme tabi tutulmamış enerjidir. Birincil enerjiler, elektrik enerjisi, rafine yakıtlar gibi başka formlara dönüştürüldüklerinde ikincil enerji ya da ‘enerji taşıyıcısı’ olarak adlandırılmaktadır. İkincil enerji; tabi şekildeki birincil

enerjinin çeşitli işlemlerden geçirilerek kullanılabilir bir forma sokulmuş veya farklı bir enerji türüne dönüştürülmüş şekli olarak tanımlanabilir. İkincil enerjiler; birincil enerjiden üretilen ürünler ve yakıtları kapsadığı gibi ısı ve elektrik gibi nihai enerji türlerini de kapsamaktadır (Uyar 2009)

Enerjinin korunumu ilkesinden hareketle, enerji tüketiminden bahsedildiğinde aslında odun, kömür, petrol ya da doğal gaz gibi yakıtlarda depolanan kimyasal enerjinin, atomun çekirdeğindeki enerjinin, hareket halindeki sudaki veya rüzgârdaki kinetik enerjinin veya güneşin ışıma enerjisinin ısı, elektrik, ışık ya da bir aracı hareket ettiren kinetik enerjiye dönüştürülmesinden bahsedilmektedir (Boyle 2004).

Bu açıdan bakıldığında, birincil enerji tüketiminden bahsedildiğinde aslında enerjinin kullanışlı biçimlere dönüştürülmesi ima edilmektedir. Dünya enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılan birincil enerji kaynaklarının, dünya enerji tüketimindeki payları yakıt türlerine göre incelendiğinde, Şekil 1’de de görüldüğü gibi fosil yakıtlar en büyük paya sahiptir.

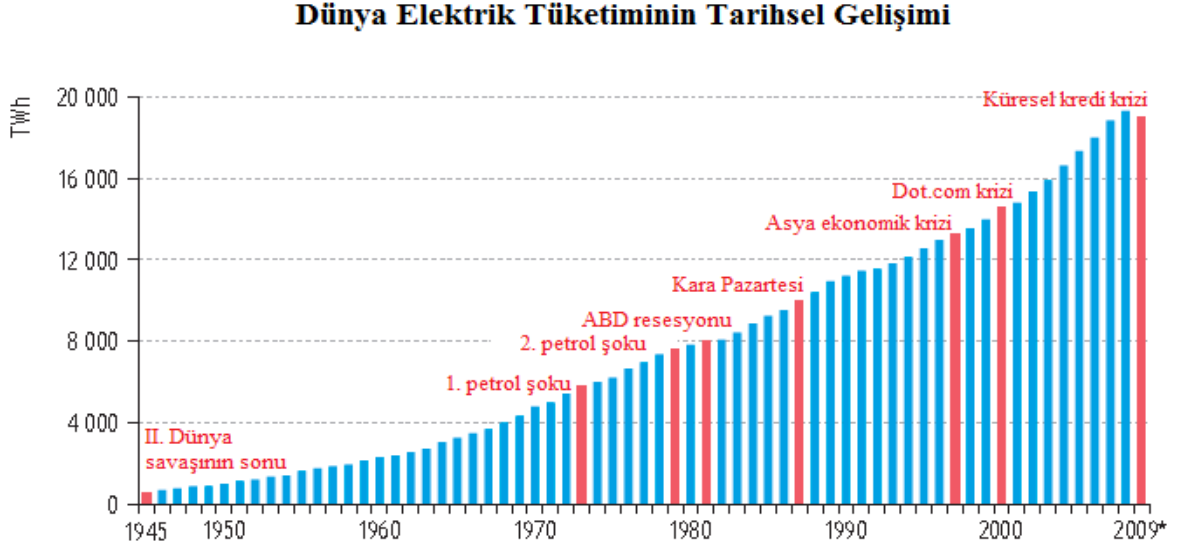
Şekil 1: 1973 ve 2007 Yılları Dünya Birincil Enerji Tüketiminin Yakıt türlerine göre Yüzde Dağılımı



Kaynak: Key World Energy Statistics 2009, OECD/IEA, 2009

Elektrik, birincil enerji kaynaklarının dönüşümü sonucu elde edilen ikincil enerji kaynaklarının en önemlilerinden biridir. “Yirminci yüzyılın ortalarında elektrik şebekesi vasıtası ile enerjinin süratle uzaklara iletilmesi mümkün olmuştur.” (Şen 2002)

Şekil 2: Dünya Elektrik Tüketiminin Tarihsel Gelişimi (1945- 2009)



* IEA tahmini

Kaynak: World Energy Outlook 2009, IEA,2009

II. Dünya savaşı sonrasında elektrik enerjisinin önemi iyice kavranmış ve izlenen Keynesyen politikaların bir sonucu olarak kamu kesiminin, sektördeki altyapı yatırımlarındaki ve elektrik dağıtım ağlarının yaygınlaşmasındaki payı artmış ve bu politikalar, sektörde dikey bütünleşik kamu tekellerinin oluşmasına sebep olmuştur. Bu yapı, 1970’lerde yaşanan iki petrol krizine kadar tüketicilerin elektrik talebinin karşılanmasında aksaklıklar yaşanmadan sorunsuzca devam etmiştir. Ancak 1973 ve 1979 yıllarında yaşanan petrol şokları, petrol fiyatlarının yükselmesi ile neticelenince petrole dayalı elektrik üretimindeki yüksek maliyetlerden kaçış ve alternatif enerji kaynakları ile elektrik üretimine yönelik arayışlar başlamıştır. Bu dönemde Keynesyen politikaların bu sorunları çözmeye yetersiz kalması nedeniyle devletin ekonomideki rolü yeniden tartışılmaya başlamış ve Klasik iktisat tekrar gündeme gelmiştir. Teknolojik ve iktisadi gelişmeler ve kamu yatırımlarının yetersiz kalması, serbest piyasaya geçiş çabalarını hızlandırmıştır. Özellikle 1980’li yıllardan sonra elektrik piyasasında regülasyon, deregülasyon ve özelleştirme yoluyla, mevcut yapıyı özel sektör ve serbest rekabet lehinde yeniden yapılandırma girişimleri ivme kazanmıştır. Piyasada devletin

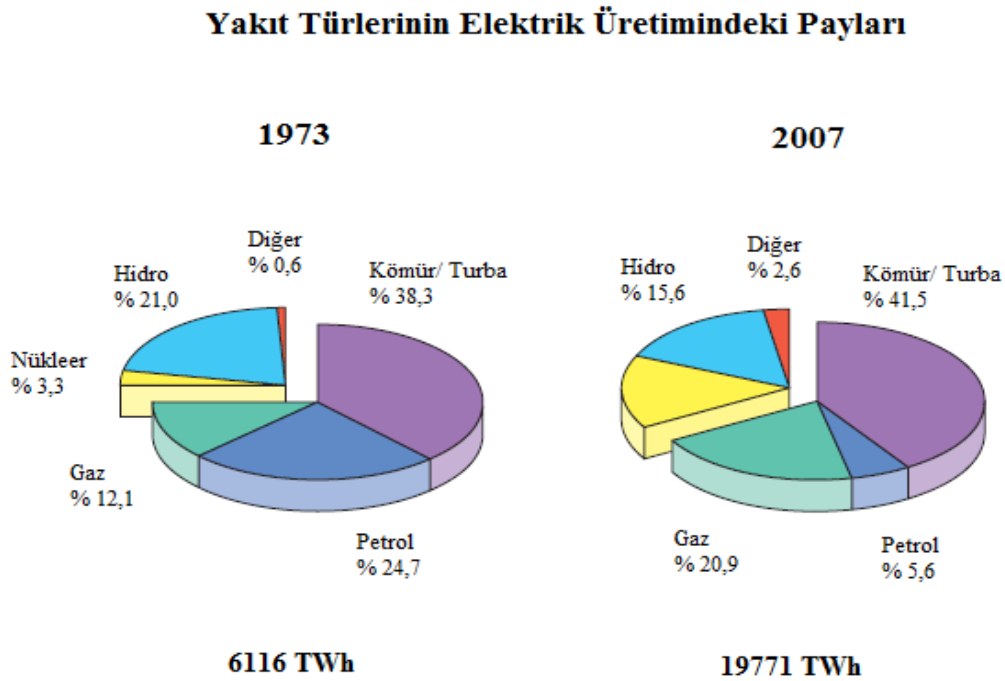
rolünün azaltılması ve piyasanın giderek serbestleştirilmesi ile tüketicilerin elektrik tedarikçilerini seçme özgürlüğüne sahip olması, rekabete dayalı piyasa ortamı dolayısıyla tüketicinin satın aldığı elektrik enerjisinin kalitesinin artırılması ve maliyetinin azaltılması amaçlanmıştır. Elektrik sektöründe yeniden yapılandırma süreci ilk olarak 1978’de ABD’nde, 1990’lı yılların ortalarından itibaren de OECD ülkelerinde başlamıştır. OECD ülkeleri arasında sadece Türkiye’nin elektrik enerjisi piyasasının tamamen serbestleştirilmesi hususunda geride kaldığı görülmektedir (Doğru 2010; Çetintaş ve Çetin 2004; Erol 2007).

Gelişmiş ülkeler ile gelişmekte olan ülkelerin özelleştirme uygulamaları arasında farklılıklar mevcuttur. Gelişmiş ülkelerde özelleştirme uygulamaları ile rekabet ortamının oluşturulması, elektrik üretiminde kalitenin artırılıp üretimin ucuzlatılması ve etkinliğin artırılması amaçlanırken gelişmekte olan ülkelerde kamunun elindeki tesislerin özel sektöre devri ve yeni tesislerin özel sektör tarafından kurulması amaçlanmıştır. Neticede özelleştirme uygulamaları ve doğal tekel niteliğindeki tesislerin regülasyona tabi tutulması ile dikey bütünleşik kamu tekeli yapısı bozularak elektrik sektörünün serbestleşmesi sağlanmaya çalışılmış ve sektör özel yatırımcıların faaliyetlerine açılmıştır.

Türkiye’de 24 Ocak 1980 tarihinden sonra serbest piyasa ekonomisi modeli benimsenmiştir. Dönemin liberal ekonomi politikalarının bir sonucu olan serbest piyasa koşulları elektrik enerjisi sektörüne de yansımıştır. Böylece elektrik enerjisi piyasasında özelleştirme süreci başlamış ancak Türkiye’de sektörün rekabete açılması 3 Mart 2001’de yürürlüğe giren 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu (EPK) ile sağlanmıştır. Takip eden süreçte, elektrik, doğalgaz ve petrol piyasalarının yeniden yapılandırılma sürecindeki düzenlemelerinden ve denetlemelerinden sorumlu olan Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) oluşturulmuştur. EPK ile piyasanın liberalizasyonu ve üretim, satış ve dağıtım faaliyetlerinde serbest rekabet ortamının sağlanması adına yapılan en önemli yapısal değişiklik TEAŞ’ın üçe bölünmesidir. Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ), Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) ve Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt A.Ş. (TETAŞ) olmak üzere bölümlere ayrılan TEAŞ ile dikey bütünleşik yapı kırılmış ve devletin üretimdeki rolünün azaltılması süreci fiilen

başlamıştır. Bu kapsamda EPK'nın uygulanabilmesi için Devlet Planlama Teşkilatının hazırladığı ve Yüksek Planlama Kurulu tarafından imzalanan Elektrik Enerjisi Sektörü Reformu ve Özelleştirme Stratejisi Belgesi 2004 yılında ortaya çıkmıştır. 9 Temmuz 2008'de EPK'da değişiklik öngören tasarının kabulü ile elektrik piyasasında arz güvenliği kavramı ilk kez gündeme gelmiştir (Doğru 2010).

Şekil 3: Yakıt Türlerinin Elektrik Üretimindeki Yüzdeler Payları



***jeotermal, güneş, rüzgâr, yanabilen yenilenebilirler & atıklar**

Kaynak: Key World Energy Statistics 2009, OECD/IEA, 2009

1.1.1. Birincil enerji kaynakları

Esas olarak, birincil enerji orijinal kaynaktaki toplam enerji içeriğidir. Birincil enerji kaynaklarındaki enerji içeriği, elektrik enerjisi veya rafine yakıtlar gibi ikincil enerjilere dönüştürülerek kullanılmaktadır. Mevcut birincil enerji kaynaklarımız, fosil yakıtlar (kömür, petrol ve doğal gaz) ve odun, saman, tezek vb. biyo-yakıtlardır. Bunlara, nükleer güç istasyonları, hidroelektrik veya jeotermal santralleri ve güneş veya rüzgâr gibi 'yenilenebilirler' den elde edilen enerji de eklenmektedir (Boyle 2004).

Böylece, birincil enerji kaynaklarını fosil yakıtlar, nükleer ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere üç ana başlık altında toplamak mümkündür.

1.1.1.1. Fosil yakıtlar

Yüz milyonlarca yıl önce yaşamış olan bitki ve hayvanların kalıntıları zaman boyunca kimyasal değişimler geçirerek bugün kullandığımız katı, sıvı ve gaz formundaki fosil yakıtlar haline gelmiştir. Fosil yakıtlar, miktarlarına oranla oldukça fazla miktarda enerjiyi depolama kapasitesine sahip konsantre enerji kaynakları olup bu nitelikleri nedeniyle endüstriyel çağın başlangıcından bu yana ucuz ve verimli enerji kaynakları olarak yaygın biçimde kullanılmışlardır. Günümüzde dünya enerji tüketiminin yaklaşık %80'i hala fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Fosil yakıtların farklı jeolojik koşullar ve kimyasal dönüşümler neticesinde başkalaşmış üç ana türü bulunmaktadır: kömür, petrol ve doğal gaz (Boyle 2004).

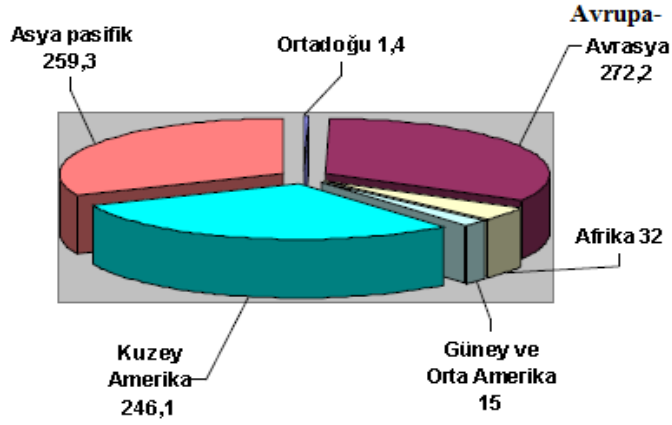
“Kömür çok eski yıllarda karalarda ilk olarak görülmeye başlayan bitkilerin tortul kayaçlarda (sedimentler) zamanla gömülerek sıkışması ve değişime uğrayarak kömür kıvamına gelmesi ile ortaya çıkmıştır.” (Şen 2002) Arkeolojik kalıntılara göre kömür, dünyanın pek çok bölgesinde üç ila dört bin yıldır yakıt olarak kullanılmaktadır (Boyle 2004). Kömürün günümüzdeki konseptte kullanılmaya başlanması ise 19. yüzyılda gerçekleşmiştir. Sanayi devriminin yaratıcısı ve sonrasında yaşanan endüstriyel ve teknolojik gelişmelerin itici gücü kömür olmuştur. “Maden kömürü XIX. yüzyılın sonuna kadar endüstrinin vazgeçilmez maddesi olurken, XIX. yy’ın ortalarında keşfedildikten sonra XX. yüzyılın başından beri kullanımını artan hem ısı, hem enerji hem de ışık kaynağı olarak kullanılabilen ve motor devrinin ortaya çıkmasına neden olan petrol, yine aynı tarihlerde petrolden sonra kullanım alanına giren hidrolik güç ve daha sonra doğalgaz; nihayet 1950’li yıllardan sonra nükleer enerji taş kömürüne rakip olmuştur.” (Akova 2008)

“Özellikle 1980’li yıllardan sonra gündeme gelen “Küresel Isınma” veya “İklim Değişikliği” gibi kavramların esas olarak fosil yakıt kullanımından kaynaklandığına dair yaygın bir kanaat bulunmaktadır. Aslında bu bir kanaatten çok, bilimsel verilerle ortaya

konan bir gerçektir. Çünkü fosil yakıtların enerji üretiminde kullanılmalarıyla ortaya çıkan en önemli çevre sorunu, yanmanın meydana getirdiği ve küresel ısınmaya yol açan karbondioksit (CO₂) emisyonudur. Yanma olayının ortaya çıkardığı ve doğal ekolojik ortamların bozulmasına yol açan atık, sadece CO₂ değildir. Bunun yanı sıra kükürt oksitler (SO_x) ve azot oksitler (NO_x) gibi asit yağmurlarına neden olan ve ozon tabakasını tahrip edici özelliğe sahip diğer zararlı emisyonlar da atmosfere karışmaktadır. İnsanlığın enerji tüketimi bu hızla devam edecek olursa, gezegenimizin sıcaklığının yüzyıl sonunda ortalama 2-5 °C artabileceği bu miktardaki sıcaklık yükselmesinin ise buzulların erimesi, deniz seviyelerinin yükselmesi, kuraklık gibi ciddi çevre sorunlarına neden olabileceği ileri sürülmektedir.” (Akova 2008) Diğer yandan, bilinen fosil yakıt rezervlerinin yakın bir gelecekte tükenecek olmaları yanında bu rezervlerin dünya üzerindeki dağılım dengesizliği de önemli bir başka sorundur. Dünya fosil yakıt rezervlerinin kullanılabilme sürelerinin kıtalara göre dağılımı incelendiğinde, endüstrileşmenin ve enerji tüketiminin yoğun olarak gerçekleştiği Avrupa’da fosil yakıt rezervlerinin azlığı dikkat çekmektedir. Petrol ve doğal gaz rezervlerinin yok denecek kadar az olduğu Avrupa kıtasında rezerv miktarı en fazla olan kömürün bile 160 yıl içinde tüketileceği hesaplanmıştır (Akova 2008). Fosil yakıt rezervlerinin yakıt türlerine göre bölgesel dağılımı aşağıdaki şekillerde özetlenmiştir (Şekil 4-5-6).

Şekil 4: Dünya Kömür Rezervlerinin Bölgelere Göre Dağılımı

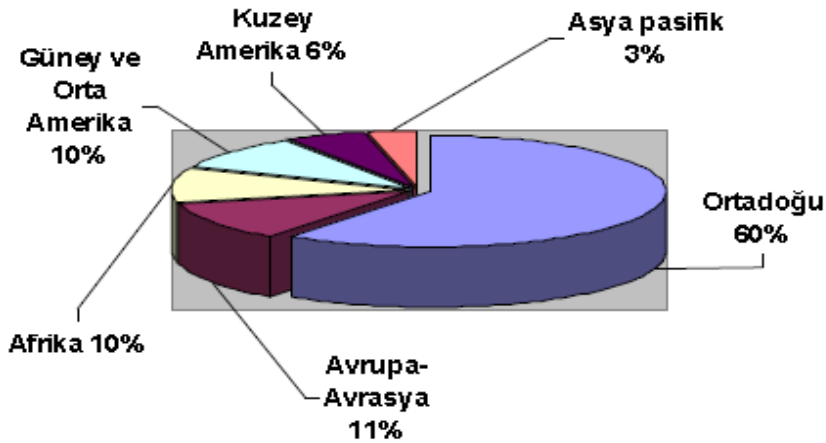
Dünya Kömür Rezervlerinin Bölgelere Göre Dağılımı (Milyar Ton)



Kaynak: BP, Statistical Review of World Energy, Londra, 2009

Şekil 5: Dünya Petrol Rezervlerinin Bölgelere Göre Dağılımı

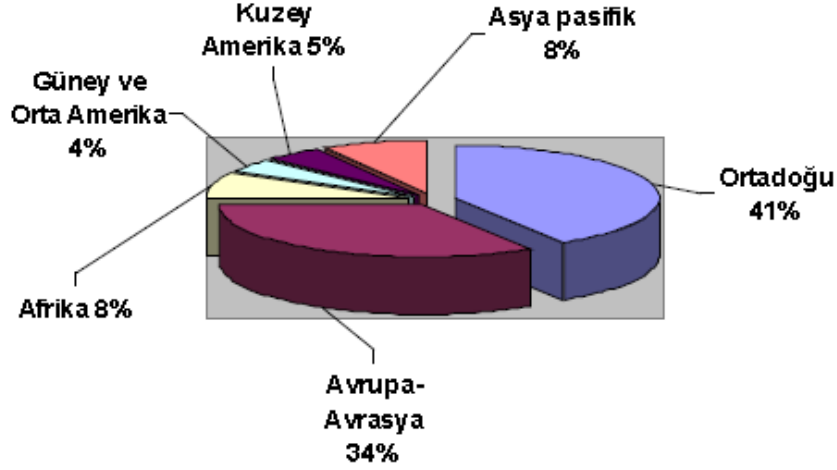
Dünya Petrol Rezervlerinin Bölgelere Göre Dağılımı (%)



Kaynak: BP, Statistical Review of World Energy, Londra, 2009

Şekil 6: Dünya Doğal Gaz Rezervlerinin Bölgelere Göre Dağılımı

Dünya Doğal Gaz Rezervlerinin Bölgelere Göre Dağılımı (%)



Kaynak: BP, Statistical Review of World Energy, Londra, 2009

“Gelişmiş ülkelerin sanayileri için vazgeçilmez ihtiyacı olan enerjinin temin edilmesinden kaynaklanan sorunlar özellikle 1974 yılında yaşanan petrol krizi esnasında bütün yalınlığıyla ortaya çıkmıştır. Gerek petrol üreticisi ülkelere olan bağımlılığın hafifletilmesi, gerek gittikçe azalan petrol rezervleri, gerek fosil yakıtların neden olduğu çevre sorunlarının giderilememesi, gerekse artan petrol fiyatları, öncelikle gelişmiş ülkelerin yeni enerji kaynaklarına yönelmelerinin başlıca nedenlerini oluşturmuştur.” (Akova 2008)

1.1.1.2. Nükleer

Nükleer enerji, belli atomların (uranyum-235 ve plütonyum-239) çekirdeklerinin parçalanmaya zorlanması veya bir başka deyişle ‘fizyon’ işlemi ile açığa çıkan yüksek miktarda enerjinin kullanılması esasına dayanır. Prensipinde bir kilogram uranyum-235’in tam fizyonu, 3000 tondan fazla kömürün yanmasından elde edilen miktara denk miktarda enerji üretir. Pratikte fizyon olayının tam gerçekleşmemesinden kaynaklı kayıplar olsa da nükleer yakıtlar fosil yakıtlardan daha yüksek derecede konsantre enerji kaynaklarıdır (Boyle 2004).

Nükleer reaktörler elektrik üretiminde buhar makineleri ve içten yanmalı motorlarla aynı prensipte çalışmaktadır. Elektrik üretimini sağlayan jeneratörlerin türbinlerini çalıştırmada kullanılan buharı elde etmek için bir sıvının ısıtılarak buharlaştırılması gerekmektedir. Fizyon sonucu elde edilen enerji bu sıvının (genellikle suyun) ısıtılarak buharlaşmasını sağlamak için kullanılır. Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında daha konsantre bir enerji kaynağı olması ve dünya uranyum rezervlerindeki görece bolluk gibi nedenlerle nükleer enerji ucuz bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Ancak, nükleer güç istasyonlarının kurulum, işletim ve bakım masraflarının yüksekliği ve reaktörlerin çalışması esnasında oluşan nükleer atıklar dolayısıyla ortaya çıkan maliyetler nedeniyle nükleer enerji yüksek maliyetli bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmelidir. Diğer yandan nükleer enerjinin avantajlı yönü, nükleer güç istasyonlarının faaliyetleri esnasında CO₂ gibi gazların emisyonunun gerçekleşmemesi olarak görülmekte; ancak faaliyet süreci esnasında zararlı nükleer atık ürünler oluşmakta ve yok edilmemeleri durumunda sera gazlarına kıyasla daha ciddi olan olumsuz etkileri binlerce yıl sürmektedir (Cassedy 1998).

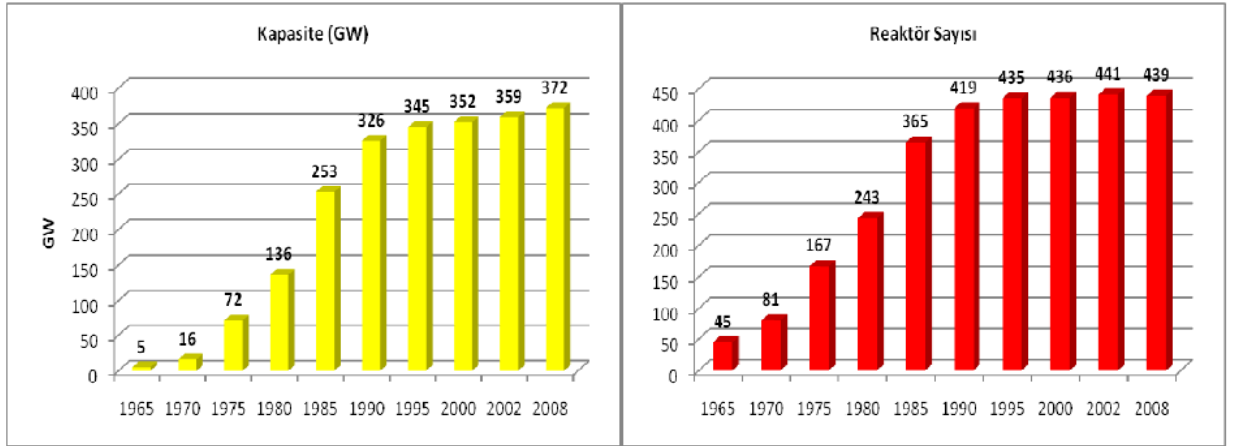
Normal işletim sırasında, kaza olmaksızın nükleer santraller, çevreye radyasyon yaymaktadır (Keskin 1993). Nükleer santrallerden çıkan atıklar çok fazla radyoaktiviteye sahiptir (Ersan 1993). Nükleer santral, çoğu kullanılmış yakıtlarda olmakla beraber radyoaktif fizyon ve aktivite ürünleri vermektedir (Uyar 1993). Atık yakıt, nükleer reaktörlerin işletimi sırasında yakıt çevrimi sonucu ortaya çıkmaktadır. Yaklaşık olarak yüzde 95'inden daha fazlası sıvı formdadır. Daha sonra bu sıvı atığın yüzde 99'u katı atık haline dönüştürülür ve depolanır (Duran 1993). Nükleer enerji, radyoaktif maddelerinin izolasyonu konusunda gerekli koşullar sağlandığı takdirde, hem çevresel etkiler açısından olumlu hem de ucuz kaynak olarak savunulmaktadır. Söz konusu atıkların saklanması, en az reaktörün oluşturulması için kullanılan teknoloji kadar yüksek bir bilimsel düzey gerektirmektedir (Dönmez 1998). Bu konuda hâlihazırda uygulanmakta olan ve uygulanabileceği düşünülen çözümlerin etkinliği tartışmalı ve belirsizdir. "Nükleer enerji üretimindeki baş dertlerden en önemlisi, radyoaktif olan atıkların nasıl ve nerelerde muhafaza edilerek çevre ve özellikle canlı sağlığına zarar vermemesini temin etmektir. Diğer taraftan, nükleer tesislerden çıkan

sıcak suların yakınlardaki göl, dere ve denizler gibi canlı organizmaların yaşadıkları ortama tesir etmesi de zararlar arasında sayılabilir. Yerin derinliklerine gömülebilen bu nükleer atıkların oralardan yer altı suyu akiferlerine (yataklarına) sızarak taşınabilir hale gelmesi ve yer altı suyunu kirletmesi söz konusudur." (Şen 2002) Nükleer santrallerin çevreye yaydığı radyasyon nedeniyle başta kanser olmak üzere birçok hastalığın yaygınlaştığı belirtilmektedir. Nükleer santrallerin civarında yaşayanlarda görülen kanser vakalarındaki yüzde 400'lük artış, genetik mutasyonlar sonucu normal olmayan doğumlar, yaygın lösemi bunun bir bilimsel kanıtı olarak gösterilmiştir (Kılıç 1997). Bununla birlikte, nükleer santrallerin herhangi bir kaza, doğal afet veya tedbirsizlik sonucu çevreye radyasyon yayma ihtimalleri bulunmaktadır. Nükleer bir reaktör kontrolden çıktığında ise etkisi yüzlerce kilometreye kadar yayılabilmekte ve doğadaki etkisi yıllarca sürebilmektedir. Bugüne kadar Amerika, Kanada, Fransa, İngiltere ve Rusya gibi birçok ülkede kullanılan ileri teknolojiye ve üst düzey güvenlik tedbirlerine rağmen nükleer kazalar yaşanmıştır. Diğer yandan, nükleer güç istasyonlarının terörist eylemlere araç olabilmesi riski de nükleer kaynaklı enerji üretimi söz konusu olduğunda dikkat çeken bir başka unsur olarak belirtilmektedir (Cassedy 1998). Tüm bu riskler bir arada değerlendirildiğinde, nükleer enerjinin avantajlarını savunan uzman görüşlerin varlığı, kamuoyunda nükleer enerji karşıtı bir görüş birliği oluşmasına engel olamamaktadır, denilebilir.

Nükleer enerjinin elde edilmesinde kullanılan ana madde uranyum-235'dir. Çekirdek parçalanması işlemi ile enerji elde etmek için uranyum madeni yakıt olarak kullanılmaktadır. Fakat bu maden de sonsuz bir kaynak olmadığı gibi mevcut teknolojiyle parçalanabilecek miktarı da sınırlıdır.

Şekil 7: Dünyadaki Nükleer Reaktör Sayıları ve Üretim Kapasiteleri (1965-2008)

1965- 2008 Yılları Arası Nükleer Reaktör Sayıları ve Kapasiteleri



Kaynak:OECD/NEA

Tablo 1: Nükleer Enerji Kurulu Kapasitesinin Ünelere Göre Dağılımı

	Üretim (TWh)	Dünya genelindeki payı (%)	Yurtiçi elektrik üretimindeki payı (%)
ABD	837	30,8	19,4
Fransa	440	16,2	77,9
Japonya	264	9,7	23,5
Rusya	160	5,9	15,8
Kore	143	5,3	33,6
Almanya	141	5,2	22,3
Kanada	93	3,4	14,6
Ukrayna	93	3,4	47,2
İsveç	67	2,5	45,0
İngiltere	63	2,3	16,1
Diğer	418	15,3	6,6
DÜNYA	2719	100,0	13,8

Kaynak: Key World Energy Statistics 2009, IEA,2009

2007 sonu itibariyle dünya çapında 440 adet nükleer güç istasyonu faaliyet ve 33 adedi de inşa halinde bulunmaktadır. Faaliyet halindeki istasyonlardan 2007 yılında gerçekleştirilen net üretim miktarı 2608.1 TWh' dir (WEC 2009). OECD ülkelerinde tüketilen elektriğin yaklaşık 1/4' i nükleer enerji ile üretilmektedir. Nükleer enerji, dünya genelinde toplam elektrik üretimindeki %16'lık payı ile önemli bir rol oynamakta ancak dünya birincil enerji tüketimi içerisindeki payı % 6' larda kalmaktadır (NEA 2007).

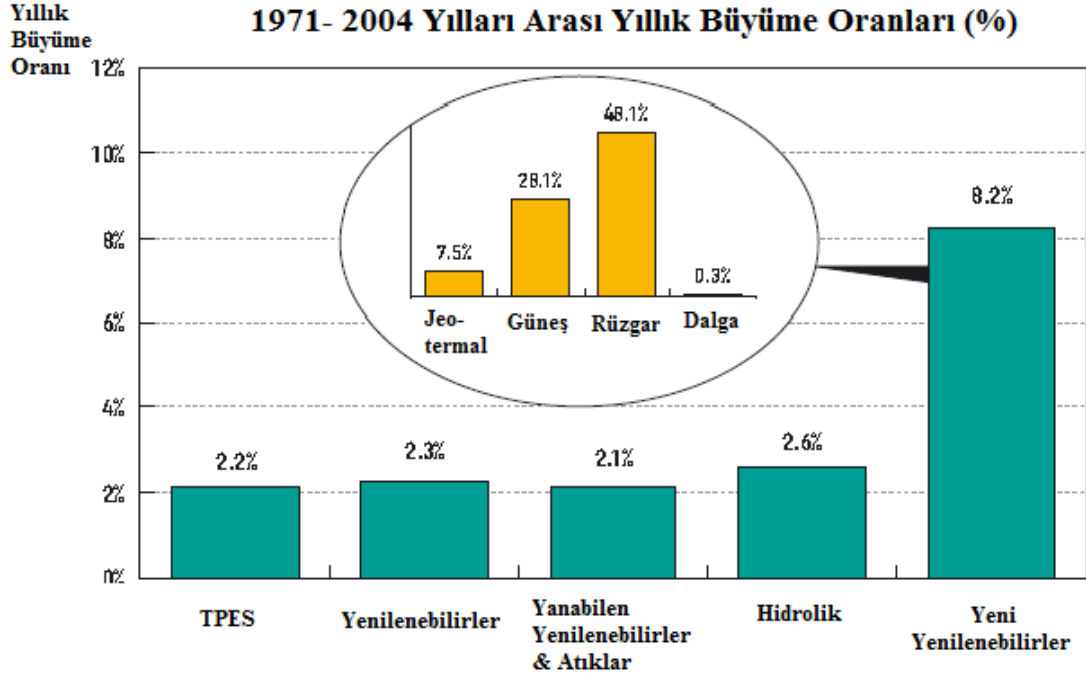
1.1.1.3. Yenilenebilir

Yenilenebilir enerji, doğal süreçlerce devamlı olarak yenilenebilen ve dolayısıyla tükenmez nitelikte olan enerji kaynakları kullanılarak üretilen enerji anlamına gelmektedir.

Dünya Enerji Ajansı'nın (WEA) tanımına göre, "Geniş anlamda 'yenilenebilir enerji kaynakları' terimi hidroenerji, biyokütle enerjisi, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji ve okyanus kökenli enerjileri kapsar. 'Yeni' yenilenebilirler terimi ise yenilenebilir enerji türlerinin modern ve sürdürülebilir türleri üzerinde odaklanır. Bunlar özellikle, modern biyokütle enerjisi, jeotermal ısı ve elektrik, küçük ölçekli hidrolik, düşük- sıcaklık güneş ısıtması, rüzgâr elektriği, güneş kaynaklı fotovoltaik ve yoğunlaştırıcı sistemlerle elektrik ve dalga, gel-git, deniz kökenli biyokütle enerjisi gibi okyanussal enerjilerdir."

Son yirmi otuz yıldır yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında ve gelişiminde hızlı bir artış gerçekleşmektedir. Bunun nedeni, yenilenebilirlerde, fosil ve nükleer enerji kaynaklarının aksine, tükenme tehlikesinin bulunmaması ve aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının küresel iklim değişimine sebep olan sera gazlarının emisyonuna yol açmamasıdır (Boyle 2004).

Şekil 8: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının 1971- 2004 Yılları Arasındaki Büyüme Oranları



Kaynak: Renewables In Global Energy Supply, IEA, 2007

1971'den 2004'e kadar geçen 33 yıl boyunca yenilenebilir enerji arzının yıllık büyüme oranı %2.3 olarak gerçekleşmiştir. Bu değer, toplam birincil enerji arzındaki (TPES) %2.2'lik büyüme oranından marjinal olarak daha yüksektir. Diğer yandan, 'yeni' yenilenebilirlerde yıllık %8.2 ile çok daha yüksek bir büyüme oranı gerçekleşmiştir. Gerçekleşen bu büyümedeki payları itibariyle rüzgâr (%48.1) ve güneş (%28.1) en yüksek üretim artışının sağlandığı yenilenebilir enerji kaynakları olarak ilk iki sırada yer almaktadır (IEA 2007).

“Yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimini mümkün kılan teknolojiler gelişme aşamasında olup kurulum ve işletim maliyetleri bakımından ucuz değildir. Özellikle kurulum maliyetlerinin yüksek oluşu yenilenebilir enerji kaynaklarının geniş çapta kullanılmasının önündeki önemli engellerden biri olarak belirlemektedir. Ancak

teknolojik gelişmelerin maliyet unsurunu azaltıcı etkiye sahip olduğunu da belirtmek gerekir. Artık rüzgâr gücüyle elektrik üreten bir enerji santrali ile yakıtını kömürün oluşturduğu bir termik santralin ilk kurulum maliyetleri birbirine çok yaklaşmış bulunmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının da gelecekteki muhtemel gelişmeler neticesinde ilk kurulum maliyetlerinin kabul edilebilir düzeye geleceği beklenmektedir.” (Akova 2008) Yenilenebilir enerji kaynaklarının en temel problemi süreksizliktir. Yenilenebilirlerdeki süreksizlik problemi, aslında sınırlı depolama özelliğinden kaynaklanmaktadır. Enerjide depolanma kısıdının ortadan kalkması neticesinde yenilenebilir kaynaklarının süreksizlik özelliğinden kaynaklı sorunlar da büyük ölçüde çözülmüş olacaktır (Şahin 2010a). Enerjinin veya ısının depolanabilmesi, kökeni ne olursa olsun, bütün enerji kaynaklarının ortak sorunu olup günümüzde aşılması gereken ciddi bir problemdir. Bu sorunun aşılması yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanmayı maksimum düzeye çıkaracaktır. Süreksizlik problemi, depolanabilme olanağının yaratılması halinde, kaynağın bol ve kesintisiz olduğu dönemlerde ihtiyacın üzerinde üretilen enerjinin depolanması ve kaynağın kesintiye uğradığı dönemde depolanmış enerjinin devreye sokulmasıyla ihtiyacın kesintisiz olarak karşılanması sağlanarak çözülebilecek niteliktedir (Akova 2008).

Fosil yakıtlar esasında enerji depoları, yenilenebilir kaynaklar ise enerji akışlarıdır. Yenilenebilirlerden kesintisiz olarak enerji elde etmek bunların doğaları itibarıyla mümkün olamamaktadır. Bu noktada, depolanabilme olanaklarının önemi yanında yenilenebilirlerden elde edilebilecek enerji miktarının öngörülebilmesine olanak sağlayan tahmin ve öngörü amaçlı modellemelerin önemi de ön plana çıkmaktadır. “Doğru ölçümler ve modellemeler ile yenilenebilirlerden elde edilebilecek enerji miktarını küçük sapmalarla hesaplamak mümkündür.” (Şen 2002)

Klasik enerji kaynakları kullanıldığında atmosfere ciddi oranlarda atık bırakılırken yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımları esnasında çevreye çok az miktarda atık ürün salınır (Akova 2008). Bu nitelikleri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları, ciddi bir küresel sorun olan iklim değişiminin ve dünya üzerindeki yaşamı tehdit eden olumsuz etkilerinin kontrol altına alınmasına yönelik önlem politikalarının yapılandırılmasında kullanılacak önemli bir araçtır. “Yenilenebilir enerji kaynakları,

fosil yakıtların ne kadarlık bir kısmının yerine geçebilirse, o kadar yararlı olur. Arzu edilen, bunların tümünden fosil kaynakların yerini almasıdır. Böyle bir hedef için önce yenilenebilir enerji kaynaklarının sağlayabilecekleri miktarlar göz önünde tutulmalıdır.” (Şen 2002)

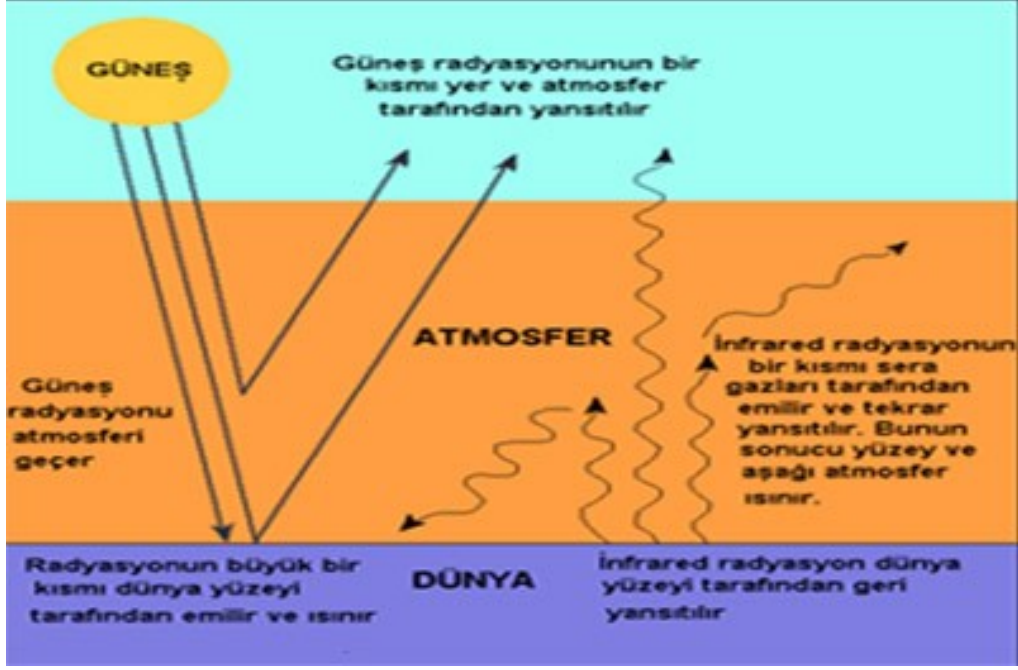
Enerji tüketiminin giderek arttığı günümüzde fosil yakıtların azalmasıyla yaşanan enerji sıkıntıları neticesinde bunların fiyatının ilerleyen yıllarda yükseleceği gerçeği ve teknolojilerindeki gelişmeler neticesinde yenilenebilir enerji üretim cihazlarının maliyetlerindeki önemli düşüşler birlikte düşünüldüğünde yenilenebilirlerin fosil yakıtlarla rekabet edebilecek duruma gelmekte olduğu aşikârdır. Bugün dünyanın birçok ülkesinde artık bu enerji türlerinin kullanılması sürekli olarak gündeme gelmektedir. Ülkemizde ise, özellikle rüzgâr enerjisinin kullanılması ile ilgili birçok başvuru Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına değişik özel ve tüzel kişiler tarafından yapılmaktadır (Şen 2002).

1.1.2. Küresel iklim değişimi ve enerji tüketimi ilişkisi

Güneşten gelen uzun dalga boyu radyasyonun büyük bir bölümü yer yüzeyince soğurular, bir kısmı dünyadan atmosfere yansır. Yeryüzü tarafından soğurulan güneş ışınları ısıya dönüştürülür. Bu ısı, yeryüzündeki atomların titreşimine ve kızılötesi ışımaya yapmalarına neden olur. Kızılötesi ışımalar, oksijen veya azot gazı tarafından soğurulmaz. Ancak havada bulunan CO₂ ve CFC (kloroflorokarbon) gazları, kızılötesi ışımaların bir kısmını soğurarak, atmosferden dışarı çıkmalarını engeller. Bu soğurma olayı, atmosferin ısınmasına yol açar. Bu etkiye, sera etkisi adı verilir.* Küresel ısınma, sera gazlarının atmosferde artışı sonucu Dünya'nın ortalama sıcaklığındaki yükselmedir.

* <http://www.dmi.gov.tr/genel/saglik.aspx?s=123> (Erişim Tarihi: 02,08,10)

Şekil 9: Sera Etkisi



Kaynak: www.dmi.gov.tr

Günümüzde temel sera gazları karbondioksit (CO₂), kloroflorokarbonlar (CFCs) ve halonlar, metan (CH₄), diazotmonoksit (N₂O) ve ozon olarak (O₃) bilinmektedir. Karbonmonoksit (CO) ve nitrik oksit (NO) sera gazlarını dolaylı, ozon ve metan hem doğrudan hem de dolaylı olarak etkilemektedir. Sera gazlarının konsantrasyonuna, uzun dalga boylu radyasyonun emilimi ve atmosferdeki yarılanma ömürleri etkili olmaktadır. Bununla birlikte karbondioksit üretimi, sera etkisinde birinci derecede önemlidir ve CO₂'in atmosferde uzun bir yaşam ömrü vardır.*

Sanayi devriminden bu yana özellikle fosil yakıtların yakılması, ormansızlaşma ve sanayileşme süreçleri gibi insan kaynaklı faaliyetler neticesinde atmosfere salınan sera gazlarının atmosferdeki konsantrasyonları hızla artarak yeryüzünde ve atmosferin alt tabakalarında sıcaklık artışına ve iklim değişimine sebep olmaktadır.

* <http://www.dmi.gov.tr/genel/saglik.aspx?s=123> (Erişim Tarihi: 02,08,10)

Tablo 2: Sera Gazlarının Değişim Oranları ve Kaynaklar

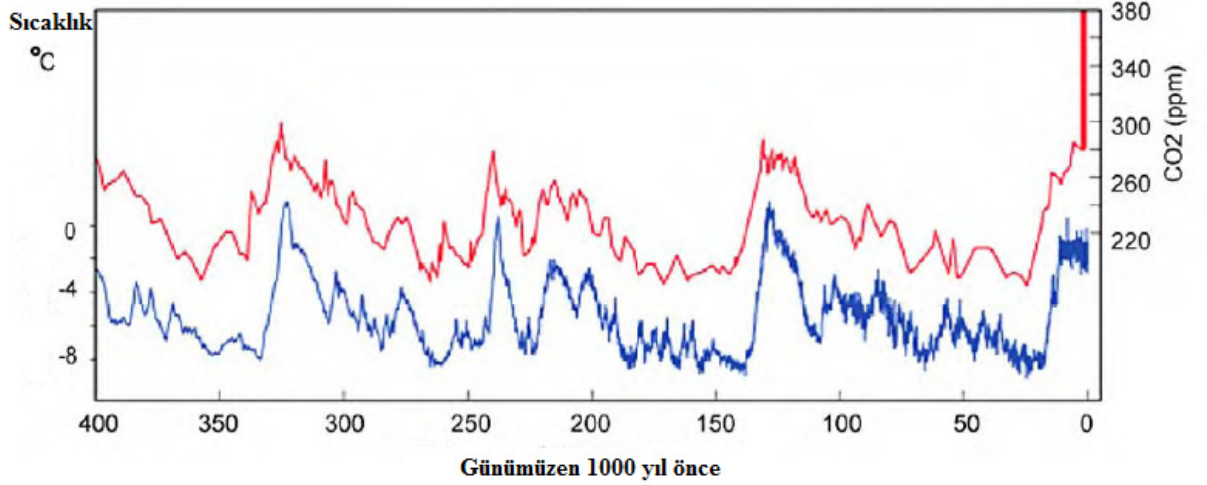
Sera Gazları	Yoğunluk 1750	Yoğunluk 2003	Değişim %	Doğal ve Suni Kaynaklar
Karbondioksit	280 ppm	376 ppm	34	Organik çürüme, orman yangınları, volkanlar, fosil yakıtların yanması, ormanların tahrip edilmesi, yanlış toprak kullanımı.
Metan	0,71 ppm	1,79 ppm	152	Islak alanlar, organik çürüme, termitler, doğal gaz ve petrol çıkartılması, pirinç üretimi
Diazotmonoksit	270 ppb	319 ppb	18	Ormanlar, yeşil alanlar, okyanuslar, toprak işleme, gübreleme, fosil yakıtların yanması.
Kloroflora karbon (CFCs)	0	880 ppt	-	Soğutucular, spreyler, kimyasal çözücüler.

Sera Gazları	Yoğunluk 1750	Yoğunluk 2003	Değişim %	Doğal ve Suni Kaynaklar
Ozon	-	Atmosferde enlemlere ve yükseltiye bağlı olarak değişmektedir.	Stratosfer tabakasında azalmakta, yeryüzüne yakın alanlarda artmaktadır.	Güneş ışınlarının direkt olarak oksijen molekülleri üzerine olan etkisi ile doğal olarak gerçekleşmektedir.

Kaynak: <http://www.dmi.gov.tr/genel/saglik.aspx?s=123> (Erişim Tarihi: 02.08.10)

Son 650.000 yıldır atmosferdeki CO₂ konsantrasyonlarının doğal aralığı milyonda 180 ile 300 parça (ppm) olmuştur. Bu veriler, buz katmanı tetkikleri sırasında binlerce yıl boyunca donan buzun içinde sıkışıp kalan havanın dikkatli şekilde analiz edilmesi sonucunda bulunmuştur. Elde edilen verilere göre, 1950 yılına kadar atmosferdeki CO₂ miktarı, 300 ppm'yi aşmamıştır. Bu değer, merkezi Amerika'da bulunan Ulusal Okyanus ve Atmosfer Araştırmaları Merkezi NOAA'nın aktardığına göre Ocak 2009 itibariyle 387 ppm'dir. Bunun anlamı, insanlığın bugünkü gibi bir bileşime sahip atmosfer yapısı ile daha önce hiç yaşamamış olduğudur.

Şekil 10: Atmosferdeki Karbondioksit Miktarı ve Sıcaklık Artışının Tarihsel Seyri



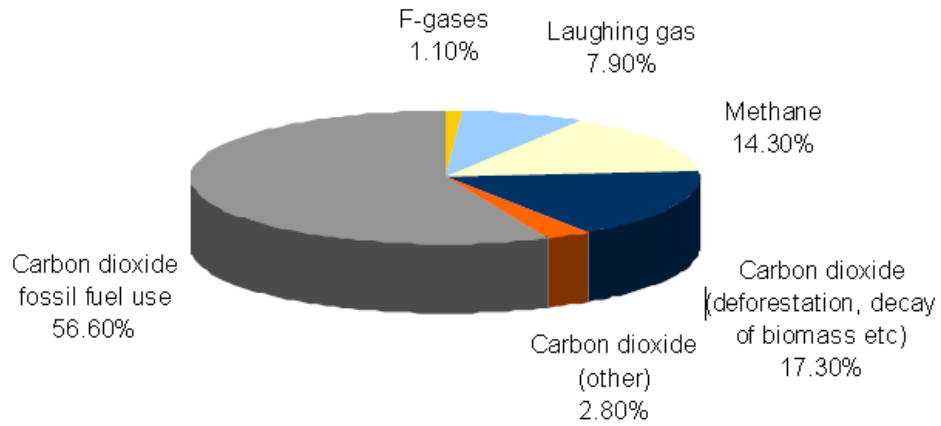
Kaynak: European Climate Change Policy Beyond 2012, WEC, 2009

Günümüzde, atmosferin ortalama sıcaklığı 0.7 derece artmış ve iklim değişikliğinin sonuçları dünya üzerindeki canlı yaşamını etkilemeye başlamıştır (WEC 2009). İklim değişiminin sonuçları uzmanlar tarafından kısa ve uzun vadeli olarak değerlendirilmektedir. Kısa vadede sıcaklık artışı, buzların ana kütlede koparak erimesi, çığ olaylarının artması, sel felaketleri, fırtınalar, kasırgalar, su kaynaklarının kuruması, zirai ürünlerin azalması gibi sonuçlar oluştururken, uzun vadede oluşabilecek sonuçların çok daha ciddi boyutlarda etkileri olacağı öngörülmektedir. Küresel iklim değişimi tartışmalarının bugün geldiği nokta sıcaklık artışını kontrol altına almak için sera gazı emisyonlarının düzeyinin ne kadar olması gerektiği hususudur. Yapılan hesaplamalar neticesinde ekosistemin uyum sağlayabileceği sıcaklık artışının en fazla 2 °C olduğu ileri sürülmektedir. Buna göre devletlerin 2007 yılında Heiligendamm'daki G8 Zirvesi'nde aldıkları karar, 2100 yılına dek ortalama sıcaklık artışının 2 °C'nin üzerine çıkmasını engellemeye yönelik önlemlerin alınması gerektiğidir (WEC 2009).

Uluslar arası (Hükümetler arası) İklim Değişikliği Paneli (IPCC) dünyada iklim değişikliği üzerine çalışan bilimciler, devlet yetkilileri ve sivil toplum kuruluşlarından oluşan bir organizasyondur. Bu panel dünyada iklim değişikliği konusunda yapılan bilimsel yayınları inceleyerek periyodik raporlar hazırlamaktadır. İklim bilimciler

arasındaki fikir birliği IPCC'nin 4. Değerlendirme Raporu'nda belirtilmektedir. Hala, iklim değişimine ilişkin bazı detaylar tam olarak anlaşılmış olmasa da kilit konumdaki çeşitli konularda bir fikir birliği sağlanmış durumdadır. Bu konulardan birisi, atmosferdeki sera gazı emisyonunun endüstri-öncesi dönemden beri, söz gelimi 1750'den beri artmakta olduğudur (WEC 2009). IPCC'nin 4. Değerlendirme Raporu'na göre, her bir sera gazının küresel ısınma üzerinde farklı etkileri bulunmakla birlikte 20. yüzyılın ortalarından itibaren gözlemlenen ortalama sıcaklık artışının %90'ından fazlası sera gazlarına bağlı olarak gerçekleşmektedir. 4. Değerlendirme Raporu'nda sunulan araştırma sonuçlarına göre, 2 °C hedefi atmosferdeki sera gazı konsantrasyonunun 450 ppm'den (milyon parçacıkta 450) daha düşük bir düzeyde kalmasının sağlanmasına bağlıdır. IPCC'nin temel tahmini eğer atmosferdeki karbon dioksit miktarı 450 ppm'i bulacak olursa sıcaklıkların 2 derecenin altında kalması %50 ihtimalle mümkündür, yönündedir. Atmosferdeki sera gazı konsantrasyonunun cari düzeyi kabaca 380 ppm olup (NOAA'nın açıkladığı Ocak 2009 değerı 387 ppm'dir) yıllık artış hızı ise 2,8 ppm olarak gerçekleşmektedir. Buna göre, söz konusu 450 ppm düzeyine yaklaşık 25 yıl içinde ulaşılacağı tahmin edilmektedir. Diğer yandan, 450 ppm düzeyinin aşılmaması hedefine yönelik olarak 3 farklı azaltım politikası belirlenmiştir. Bunların her birinde, küresel emisyon miktarının zaman içindeki seyri betimlenmekle birlikte, hepsindeki ortak öngörü önümüzdeki birkaç yıl boyunca toplam emisyon miktarının artabileceği ancak uzun dönemde ciddi bir şekilde düşüşe geçeceği şeklindedir. Bununla birlikte, sera gazı emisyonları bugün tamamen kesilse bile, birikmiş emisyon miktarına bağlı olarak gerçekleşmekte olan iklim değişimlerinin durdurulamayacağı da belirtilmektedir. Bunun anlamı, bugün alınan azaltım önlemlerinin etkisinin ancak onlarca yıl sonra gözlemlenebileceğidir. şekil 11, 6 "Kyoto- Gazı"nın küresel emisyon miktarı içindeki paylarını göstermektedir. Buna göre, karbondioksit gazı küresel emisyonun 3/4' ünü oluşturmakta ve CO₂ emisyonunun temel kaynağını da fosil yakıt kullanımı oluşturmaktadır. İkinci sırada yer alan ve CO₂' den daha güçlü bir sera gazı olan metan ise özellikle tarımsal faaliyetler neticesinde oluşmaktadır.

Şekil 11: Sera Gazlarının Küresel Emisyon İçindeki Payları



Kaynak: European Climate Change Policy Beyond 2012, WEC, 2009

Dünya Enerji Konseyinin 2009 yılı iklim değişimi raporuna göre, 2004 yılında dünyanın enerji gereksinimini karşılamaya yönelik faaliyetler sonucunda atmosfere salınan sera gazı miktarı toplam sera gazı emisyonunun dörtte birinden biraz fazlasını oluşturmaktadır. Ayrıca, adı geçen raporda, 2006 yılında Avrupa'daki sera gazı emisyonunun %61'lik kısmının enerji üretimi ve kullanımına ilişkin faaliyetler neticesinde gerçekleştiğinin altı çizilmektedir. IEA 2009 raporunda ise, enerji, küresel iklim değişimi sorununun kalbinde yer almaktadır- dünya sera gazı emisyonlarının %65'inden sorumlu olduğu için- dolayısıyla çözümün de kalbinde yer almalıdır, denilmektedir. Ayrıca, fosil yakıt kullanımına bağlı CO₂ emisyonu toplam sera gazı emisyonu içinde %56,60'lık pay ile ilk sırada yer almaktadır (Şekil 11). Neticede, enerji kaynaklı CO₂ emisyonunun azaltılması söz konusu 450 ppm ve buna bağlı olarak 2 °C hedefinin başarılmasında oldukça önemli bir role sahiptir. Buradan hareketle, enerji gereksiniminin karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmanın söz konusu hedeflere ulaşılması yolunda hayati bir öneme sahip olduğu söylenebilir.

1.1.3. Sosyoekonomik gelişmeler ve enerji tüketimi ilişkisi

Enerji, insanoğlunun en temel gereksinimlerinin karşılanmasında ve ülkelerin sosyal ve ekonomik olarak gelişmesinde en önemli unsurlardan biridir. Sosyal ve ekonomik kalkınmanın gerçekleştirilmesinde ülkelerin reel sektör üretimlerinin miktar ve kalitesi önemli rol oynamakta olup üretim sürecinin en önemli girdilerinden birisi de enerjidir. Ülkelerin endüstriyel gelişimine, dünya nüfusuna ve nüfusun gün geçtikçe artan yaşam standartlarına bağlı olarak enerji talebi her geçen gün artmaktadır (Çınar ve Kuyumcu 2010; Mucuk ve Uysal 2009).

Günümüzde özellikle gelişmiş ülkeler tüm faaliyet alanlarında enerjiye ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden enerji stratejik bir değer haline gelmiş ve ülkelerin gelişmişlik düzeyleri enerji üretim ve tüketim miktarlarıyla ölçülür olmuştur. Enerji tüketimi teknolojinin gelişmesiyle birlikte nüfus artışıyla da ilişkilidir. Dünya'daki nüfus ve enerji tüketimi arasındaki ilişkiye bakıldığında; 1900 yılında dünya nüfusu 1.6 milyar, birincil enerji tüketimi yaklaşık 1000 Mtep iken 2000 yılında dünya nüfusu 4 kat artarak yaklaşık 6.6 milyara ulaşırken birincil enerji tüketimi yaklaşık 8 kat artarak 8534 Mtep düzeyine ulaşmıştır (Çetin ve Başaran 2010; BP 2009). 1970'li yıllarda dünya elektrik enerjisi tüketimi 4000-8000 TWh civarlarında iken 2009'da 20000TWh düzeylerine kadar artmıştır (Şekil 2).

Günümüz koşullarında az gelişmişliğin nedenlerini finansal ve reel sermaye yetersizliğine bağlayan yaklaşımlar geçerliliklerini yitirmekte; güncel bilgilere ulaşmadaki ve Ar-Ge faaliyetlerindeki yetersizlikler, bilgi birikimi ve beşeri sermaye eksikliği ve mevcut teknolojiyi kullanamama gibi faktörler az gelişmişliğin öncelikli nedenleri arasında sayılmaktadır (Mucuk ve Uysal 2009).

Enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki ilişki hem gelişmekte olan hem de gelişmiş ekonomiler için taşıdığı önem itibariyle özellikle son 20 yıldır enerji ekonomisi alanındaki en temel araştırma konularından biridir. Söz konusu ilişkinin tanımlanması ülkelerin enerji politikalarının geliştirilmesinde stratejik bir öneme sahip görünmektedir. Bu ilişkinin tespitine yönelik çalışmalar, Granger nedensellik testleri,

eşbütünleşme analizleri ve hata düzeltme modelleri (ECM- VECM) çerçevesinde pek çok çalışmada incelenmiştir. Tablo 3’de özetlenen bilgiler, ekonomik büyüme ve enerji tüketimi arasındaki ilişkinin dönemden döneme, ülkeden ülkeye ve uygulanan analiz yöntemine göre farklılaştığını göstermektedir. Bazı çalışmalarda nedenselliğin yönü, enerji tüketiminden ekonomik büyümeye ya da tersi olarak tespit edilirken bazı çalışmalarda da enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi bulunmuş ve bazı çalışmalarda ise herhangi bir yönde nedensellik ilişkisi bulunmadığını ifade eden yokluk hipotezini destekler yönde sonuçlar elde edilmiştir. Bu çeşitlilik nedeniyle elde edilen sonuçların ekonomik anlamları dikkatlice incelenmelidir. Eğer ekonomi ile enerji arasında çift yönlü bir ilişki tespit edilmişse genel çıkarım, enerji kullanımındaki sınırlamaların ekonomik büyümeyi engelleyici etki yapacağı yönündedir. Nedenselliğin ekonomiden enerjiye doğru olması durumunda, enerji tasarrufu uygulamalarının ekonomik kalkınma riske atılmaksızın gerçekleştirilebileceği söylenebilir. Benzer şekilde, analiz bulguları bu iki değişken arasında nedensellik ilişkisi olmadığı yönünde ise ekonomik büyümenin enerji tüketimi projeksiyonlarından bağımsız olarak sürdürülebileceği veya ekonomik büyüme enerji tüketimine etkilemediği için enerji tasarrufuna yönelik politikaların ekonomik büyümeye zarar vermeksizin uygulanabileceği gibi sonuçlara ulaşılabilir (Zachariadis 2006, Çevirgen 2008).

Toman ve Jemelkova (2003) enerji kalkınması (ulaşılabilirlik, kalite ve enerji kaynaklarının kullanımını ifade etmek üzere) ile ekonomik kalkınma arasındaki ilişkiyi benzer kapsamda ancak farklı bir bakış açısıyla, özellikle düşük gelir düzeyine sahip ülkelere odaklanarak incelemiştirler. Bulguları, kadınların evde geçirdiği zaman dilimi, elektrikleendirme oranları ya da eğitimin üretkenliği gibi ilave parametreler yardımıyla yorumlamaya çalışarak, enerji kalkınmasının geniş anlamda kalkınmanın önemli bir bileşeni olduğu sonucuna ulaşmış; enerji- ekonomi etkileşimin çok daha derinlemesine analiz edilmesi gerekliliğini vurgulamışlardır. Stern (2004)’ e göre, ekonomi ve enerji arasındaki ilişki, enerji ve diğer üretim faktörleri arasındaki ikame olasılıkları ve teknik gelişmelerden kaynaklı sınırlılıklar çerçevesinde incelenmelidir.

Tablo 3: Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme İlişkisinin tespitine yönelik bazı çalışmalara genel bakış

Yazarlar	Yöntem	Dönem	Bölge	Sonuç
Kraft ve Kraft (1978)	Standart Granger Testi	1947- 1974	ABD	Enerji \leftarrow GSYİH
Yu ve Hwang (1984)	Standart Granger Testi	1947- 1979	ABD	Nedensellik Yok
Yu ve Choi (1985)	Standart Granger Testi	1954- 1976	Kore Filipinler ABD, BK,Polonya	Enerji \leftarrow GSYİH Enerji \rightarrow GSYİH Nedensellik Yok
Cheng (1997)	Standart Granger Testi	1963- 1993 1949- 1993 1952- 1993	Brezilya Meksika Venezuela	Enerji \rightarrow GSYİH Nedensellik Yok Nedensellik Yok
Yu ve Jin (1992)	Hata Düzeltme Modeli	1974- 1990	ABD	Eşbütünleşik Değil
Masih ve Masih (1996)	Hata Düzeltme Modeli	1955- 1990	Malezya, Singapur, Filipinler Hindistan Endonezya Pakistan	Eşbütünleşik Değil Enerji \rightarrow GSYİH Enerji \leftarrow GSYİH Enerji \leftrightarrow GSYİH

Yazarlar	Yöntem	Dönem	Bölge	Sonuç
Hondroyiannis vd. (2002)	Hata Düzeltme Modeli	1960- 1996	Yunanistan	Enerji \leftrightarrow GSYİH
Soytaş ve Sarı (2003)	Hata Düzeltme Modeli	1950- 1992	Arjantin Kore Türkiye Endonezya, Filipinler	Enerji \leftrightarrow GSYİH Enerji \leftarrow GSYİH Enerji \rightarrow GSYİH Eşbütünleşik Değil
Yemane (2004)	Standart Granger Testi	1952- 1999	Şanghay	Enerji \rightarrow GSYİH
Oh ve Lee (2004)	Hata Düzeltme Modeli	1970- 1999	Kore	Enerji \leftrightarrow GSYİH
Lee (2005)	Panel VECM	1975- 2001	18 Gelişmekte Olan Ülke	Enerji \rightarrow GSYİH
Hwang ve Gum (1992)	Standart Granger Testi	1955- 1993	Tayvan	Enerji \leftrightarrow GSYİH
Cheng ve Lai (1997)	Hsiao Granger nedensellik Testi	1955- 1993	Tayvan	Enerji \leftarrow GSYİH
Yang (2000)	Hsiao Granger nedensellik Testi	1954- 1997	Tayvan	Enerji \leftrightarrow GSYİH
Chiou-Wei vd (2008)	Doğrusal olmayan Granger Nedensellik Testi		ABD, Tayland, Güney Kore Filipinler, Singapur	Nedensellik Yok Enerji \leftrightarrow GSYİH

Not: Enerji \rightarrow GSYİH nedenselliğın yönünün enerji tüketiminden ekonomik büyümeye; Enerji \leftarrow GSYİH nedenselliğın yönünün ekonomik büyümeden enerji tüketimine ve Enerji \leftrightarrow GSYİH ise enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi olduğu anlamındadır. Kaynak: Chiou-Wei (2008)

Türkiye ekonomisi açısından da büyük önem taşıyan enerji ekonomi ilişkisinin tespitine yönelik ampirik çalışmalar özellikle 2000'li yıllarda ivme kazanmıştır. Türkiye'de enerjinin durumuna yönelik çalışmalara çok yönlü bir ihtiyaç söz konusudur. Bu ihtiyaç ilk olarak Türkiye'nin Avrupa Birliği üyeliğine adaylığından ve üyelik hazırlıklarının Türk ekonomisindeki dengeleyici rolünden, ikinci olarak da Türkiye'nin doğalgaz ve petrol hatlarının geçişine ilişkin stratejik konumundan kaynaklanmaktadır (Lise ve Van Montfort 2007).

Türkiye'de ekonomi ve enerji ilişkisi üzerine yapılmış bazı çalışmalar ve bulguları şöyledir:

Soytaş vd. (2001) enerji tüketimi ve GSYİH ilişkisini 1960- 1995 verileri ile analiz ederek enerji tüketiminde meydana gelen geçmişteki şimdiki değişimlerin gelirdeki değişimler üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır.

Soytaş ve Sarı (2003), 1950- 1992 verileri için vektör hata düzeltme modelini kullanarak Türkiye için enerji tüketiminden ekonomik büyümeye doğru tek yönlü nedensellik ilişkisi tespit etmişlerdir.

Altınay ve Karagöl (2005) 1950- 2000 verilerini Granger nedensellik testi ve Dolado- Lütkepohl testi yardımıyla analiz etmişler ve Türkiye'de elektrik tüketiminden GSYİH' ya doğru bir nedensellik ilişkisinin varlığını tespit etmişlerdir.

Şengül ve Tuncer (2006), ticari enerji kullanımı, reel enerji fiyatları endeksi ve GSYİH arasındaki nedensellik ilişkilerini Türkiye'nin 1960- 2000 dönemi yıllık verilerini kullanarak incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, ticari enerji kullanımından GSYİH'ya doğru tek yönlü nedensellik ilişkisi, reel enerji fiyatları ile GSYİH arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi ve reel enerji fiyatları endeksinden ticari enerji kullanımına doğru tek yönlü nedensellik ilişkisi tespit edilmiştir.

Ulusoy (2006), enerji talebi ve büyüme arasındaki ilişkiyi Granger nedensellik testini kullanarak araştırmıştır. Çalışmada petrol, doğalgaz ve elektrik bazında sektörel tüketimle ekonomik büyüme arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Bulgular, her bir enerji kaynağının büyümeyi doğrudan değil de yatırımların milli hasıla içindeki payını arttırmak yoluyla etkilediğini ve ekonomik büyümenin de enerji tüketimini arttırdığı yönündedir.

Jobert ve Karanfil (2007), Türkiye’de enerji tüketimi ve gelir ilişkisini 1960-2003 verileriyle hem genel hem de endüstri sektörü bazında araştırmışlardır. Johansen eşbütünleşme testi bulgularına göre hem reel GSMH ile enerji tüketimi arasında hem de endüstriyel katma değer ile endüstriyel enerji tüketimi arasında uzun dönemde herhangi bir ilişkinin bulunmadığı yönündedir.

Karagöl vd. (2007), Türkiye’de, 1974- 2004 dönemi için ekonomik büyüme ve elektrik tüketimi ilişkisi sınır Testi Yaklaşımı ile analiz etmişlerdir. Analiz bulguları, seriler arasında eşbütünleşme ilişkisinin varlığını doğrulamakta ve kısa dönemli ilişkinin pozitif yönlü ancak uzun dönemli ilişkinin ise ters yönlü olduğunu göstermektedir.

Lise ve Van Montfort (2007), enerji tüketimi ile GSYİH arasındaki ilişkiyi 1970- 2003 dönemine ait yıllık verileri kullanarak analiz etmişlerdir. Eşbütünleşme ve vektör hata düzeltme modeli bulgularına göre değişkenler uzun dönemde birlikte hareket etmekte yani eşbütünleşik olup nedenselliğin yönü GSYİH’dan enerji tüketimine doğrudur.

Erdal vd. (2008), Türkiye’nin 1970- 2006 dönemi reel GSMH ve enerji tüketimi verilerini Johansen eşbütünleşme ve Pair-wise Granger nedensellik testlerini kullanarak analiz etmişler ve değişkenler arasında çift yönlü bir ilişkinin varlığını tespit etmişlerdir.

Kar ve Kınık (2008), Türkiye’nin 1975- 2005 dönemine ilişkin toplam elektrik tüketimi, sanayi elektrik tüketimi ve mesken elektrik tüketimi ile ekonomik büyüme verilerini kullanarak analiz etmişlerdir. Johansen eşbütünleşme testi toplam, sanayi ve mesken elektrik tüketimleri ile ekonomik büyüme serileri arasında uzun dönemli bir ilişki olduğunu Vektör Hata Düzeltme Modeli ise nedenselliğin yönünün elektrik tüketimlerinden ekonomik büyümeye doğru olduğunu göstermiştir. Sadece mesken elektrik tüketimi ile ekonomik büyüme arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi tespit edilmiştir.

Mucuk ve Uysal (2009), Enerji tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi, 1960- 2006 verilerini kullanarak eşbütünleşme ve Granger nedensellik testleri ile analiz etmişlerdir. Analiz bulguları, serilerin uzun dönemde eşbütünleşik olduğunu yani birlikte hareket ettiklerini ve nedensellik ilişkisinin yönünün enerji tüketiminden

ekonomik büyüme doğru olduğunu yani enerji tüketiminin ekonomik büyüme pozitif yönde etkilediğini göstermiştir.

Yukarıdaki çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde her ne kadar bulgular örneklem dönemine ve kullanılan yöntemlere göre farklılıklar gösterse de Türkiye için söz konusu ilişkinin enerji tüketiminden ekonomik büyüme doğru gerçekleştiği yani Türkiye’de enerji sektöründe hem üretici hem de tüketici açısından maliyetleri azaltıcı politikaların geliştirilmesinin ve uygulanmasının Türkiye’nin ekonomik büyümesine olumlu yönde etki edeceği sonucuna ulaşılabılır. Aslında bu sonuç, Türkiye’nin enerji ithalatçısı bir ülke konumunda olduğu gerçeği ile birlikte değerlendirildiğinde, ülkenin atıl ulusal kaynaklarının enerji üretimi sürecine dahil edilmesi ve mevcut kaynakların kullanımında etkinliğin ve verimliliğin sağlanmasının ülke ekonomisi için muazzam öneme sahip olduğunun da kanıtıdır. Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynakları açısından barındırdığı potansiyelin, bu anlamda hem enerjide dışa bağımlılığın azaltılmasında ve enerji arz güvenliğinin sağlanmasında hem de ülkenin ulusal kaynaklarının kullanımının (1) uzun dönemde maliyetleri azaltıcı etkisi (2) milli gelir içinde yatırımların payını artırıcı etkisi nedeniyle, ekonomiyi canlandırıcı ve büyüme tetikleyici rolü göz ardı edilmemelidir. Diğer yandan, Türkiye’nin atıl durumdaki yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile zaman içerisinde ülkenin fosil yakıtlara olan bağımlılığının azaltılabileceği ve böylece hem fosil yakıt fiyatlarındaki artışlara ve rezervlerindeki azalışlara bağlı risklerin hem de kullanımları neticesinde meydana gelen sera gazı emisyonlarına bağlı risklerin minimize edilebileceği açıktır.

Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkinin tespitine yönelik çalışmalar yeni olup nicelik bakımından da azdır. Diğer yandan, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji sektörünün kaynak kompozisyonunda edindikleri yer de yeni sayılabileceği gibi gelişme aşamasındadır. Apergis ve Payne (2010a) yenilenebilir enerji tüketimi ile büyüme arasındaki ilişkiyi 1992- 2007 yılları verileriyle Avrasya bölgesi (13 ülke) için araştırmışlardır. Panel Hata Düzeltme Modeli bulgularına göre, reel GSYİH ile yenilenebilir enerji tüketimi arasında uzun dönemli denge ilişkisi mevcuttur. Değişkenler arasında hem kısa dönemde hem de uzun dönemde geribildirim hipotezini destekler nitelikte çift yönlü nedensel ilişkiye

rastlanmıştır. Bu sonuç, Sadorsky (2009)'nin 18 gelişmekte olan piyasa ekonomisi için; Apergis ve Payne (2010b)'nin 20 OECD ülkesi için ve Apergis ve Payne'nin 6 Orta Amerika ülkesi için yaptıkları çalışmaların sonuçları ile de uyum içindedir. Apergis ve Payne (2010a), hem yenilenebilir enerji kaynaklarının teknolojilerine yönelik araştırmaların hem de yenilenebilir enerji kaynaklarının piyasaya girişinin kolaylaştırılmasının, yenilenebilir enerji sektörünün devamlılığı açısından önemini yenilenebilir enerji sektörünün gelişmesiyle ekonomik büyümeye arasında tespit edilen karşılıklı geribildirim ilişkisi çerçevesinde vurgulamaktadır.

Menegaki (2010) 1997-2007 döneminin verileri ile 27 Avrupa ülkesi için rassal etki modelini kullanarak büyüme ile yenilenebilir enerji ilişkisini araştırmıştır. GSYİH ile yenilenebilir enerji tüketimi, CO₂ emisyonu ve istihdam arasındaki uzun dönem ilişkisi model çerçevesinde analiz edilmiştir. Analiz bulgularına göre, sera gazı emisyonlarındaki %1'lik artış GSYİH üzerinde yenilenebilir enerji kaynaklarındaki artışın etkisine oranla daha büyük bir etkiye yol açmakta; bunun nedeni de çalışmada yenilenebilir enerji yatırımlarının karşı karşıya olduğu yüksek maliyetler sebebiyle bir GSYİH faktörü olarak sera gazı emisyonlarına göre daha az rekabetçi konumda olması olarak açıklanmaktadır. Diğer yandan, Panel Hata Düzeltme Modeli hem kısa hem de uzun dönemde yenilenebilir enerji tüketiminden büyümeye doğru bir nedenselliği tespit etmemesi ilişkinin yokluğuna yönelik bir kanıt olarak yorumlanmış ve sera gazı emisyonları ile GSYİH arasında çift yönlü nedensel ilişki bulunmuştur. GSYİH ve yenilenebilir enerji tüketimi arasında ilişki bulunamamış olması ise yenilenebilir enerji kullanımının gelişiminin ve piyasada yaygınlaşmasının erken aşamalarında bulunmasına bağlanmıştır. Bu iki değişken arasında ilişki bulunmamış olması sonucunun yanıltıcı olabileceği çünkü sonuçların, geçmişin bir çıkarımı olduğu ve Avrupa'nın yenilenebilir enerji hedefleri düşüldüğünde geleceğe yönelik bir öngörü olamayacağı vurgulanmıştır.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

2.1. Güneş

“Güneş, yeryüzündeki canlı hayatının temel enerji kaynağı olduğu gibi, bütün enerji türleri doğrudan veya dolaylı olarak güneş enerjisine bağlı olarak meydana gelmiştir.” (Akova 2008)

Dış yüzey sıcaklığı 6000°K olarak kabul edilen güneşte, hidrojenin helyuma dönüştüğü füzyon reaksiyonları sürekli olarak gerçekleşmekte ve neticede oluşan kütle farkı ısı enerjisine dönüşerek uzaya yayılmaktadır. Güneşten yayılan bu ışınımın bir kısmı atmosfere girmeden yansımakta; bir kısmı da atmosferdeki karbondioksit, su buharı, ozon gibi gazlar tarafından absorbe edilmektedir.

Güneşten dünyaya gelen enerjinin yoğunluğu, atmosferin üzerinde m^2 başına 1.35 kW kadardır. Bu yoğunlukta dünya çapının kapladığı alana gelen güneş gücü $178 \cdot 10^9$ MW düzeyindedir. Dünyanın tüm yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi, $1.22 \cdot 10^{14}$ TET (Ton Eşdeğeri Taşkömürü) ya da $0.814 \cdot 10^{14}$ TEP* gibi görkemli boyuttadır. Bir başka anlatımla, bir yılda gelen güneş enerjisi miktarı, bilinen kömür rezervinin 50 katı ve bilinen petrol rezervinin 800 katı kadardır (Güneş 1999). “Yeryüzündeki karasal alanların %0.16’sının, etkinliği %10 olan güneş enerjisi dönüşüm sistemleri ile kaplanması durumunda, dünyadaki fosil yakıtların tüketim oranının yaklaşık iki katı değerine karşılık gelen 20TW güç sağlanabilir.” (Öztürk vd. 2010)

Güneşin günlük ve mevsimlik hareketleri, enerjisinin kesikli ve değişken olmasının temel nedenidir. Güneş radyasyonunun süresi ve şiddeti esas olarak atmosferik koşullarla belirlenmektedir. Bütün bu özelliklerinden ötürü bazı güneş enerjisi uygulamaları enerji depolanmasını ve yedek enerji sistemlerinin kullanılmasını gerektirmekte ancak bu konuda aşılması gereken bazı sorunlar bulunmaktadır (Akova 2008).

Dünyanın çeşitli bölgelerinde güneş ışınlarından optimum şekilde yararlanabilecek uygun bölgeler seçilerek güneş enerjisi toplama çiftlikleri

kurulmaktadır. Buradaki en büyük sorun diğer enerji kaynaklarında olduğu gibi enerjinin depolanamaması ve istenildiği zaman kullanılamamasıdır (Fairman vd. 2007).

Bilinen enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında güneş enerjisinin yaygın olması nedeniyle, yüksek derecede sıcaklık elde etmek için yoğunlaştırılması gerekmektedir. Güneş enerjisini mekanik ve elektrik enerjisine uygun bir verimlilik oranıyla çevirmek mümkündür. Ayrıca güneş enerjisi fotosentetik ve fotokimyasal tepkimeleri başlatmak için gereken özelliklere de sahiptir. Yarı iletkenlerde fotoelektrik ve termoelektrik etkileri kullanılarak güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme de imkân dahilindedir (Akova 2008).

Güneş enerjisinden yararlanmada kullanılan yöntem, malzeme ve teknolojik çeşitlilik bulunmakla birlikte bu sistemleri üç ana grupta toplamak mümkündür. Bunların birincisi güneş enerjisinden düşük sıcaklık elde edilmesinde kullanılan sistemler, ikincisi güneş ışınlarını yoğunlaştırarak elektrik üreten sistemler ve üçüncüsü de güneş ışınlarından doğrudan elektrik üreten sistemlerdir (Akova 2008).

Güneş enerjisinden düşük sıcaklıklar elde etmeye yönelik sistemler, güneş enerjisinden yararlanmak üzere geliştirilmiş en eski sistemlerdir. Bu sistemler kullanım amaçlarına göre farklılıklar göstermekle birlikte en yaygın olarak kullanılan tür “Güneş Kolektörleri” olarak adlandırılmaktadır. Güneş kolektörlerinin, güneş ışınlarının ulaştığı bir yere konumlandırılmasıyla 70 °C sıcak su elde etmek mümkündür. Diğer yandan güneş enerjisinin, binaların ısıtılmasında ve soğutulmasında kullanılması amacıyla binaların dizaynında güneş mimarisi kullanılmaktadır. Binaların, güneşin mevsimsel hareketine uygun olarak konumlandırılması yoluyla tasarlanan sistemler pasif sistemler olarak adlandırılırken aktif sistemler, güneş enerjisinin ısıttığı sıvının binaların çeşitli yerlerine aktarılmasını sağlayacak şekilde tasarlanır. Güneş enerjisinin, düşük sıcaklıklar elde etmeye yönelik kullanım alanları arasında ayrıca seraların ısıtılması ve tarımsal ürünlerin ve seramik, kâğıt, deri vb. bazı sanayi ürünlerinin kurutulması gibi uygulamalar da geçmişten beri yoğun olarak kullanılmaktadır (Akova 2008, Şen 2002).

Güneş enerjisinin elektrik üretimi amacıyla kullanımı, güneş enerjisinden yüksek sıcaklıkların elde edilmesini sağlayan sistemler ile mümkün olmaktadır. Bu sistemler, güneş ışınlarının yoğunlaştırılması yoluyla dolaylı veya güneş pillerinin (fotovoltaik sistemler) kullanımıyla doğrudan elektrik enerjisi üretilmesi esaslarına dayanır. Yoğunlaştırıcı sistemlerde, güneş ışınları yoğunlaştırılarak elde edilen kızgın buhardan geleneksel yöntemlerle elektrik üretimi söz konusudur. Güneş termal enerji santralleri, birincil enerji kaynağı olarak güneş enerjisini kullanan elektrik üretim sistemleridir. Bu sistemler temelde aynı yöntemle çalışmakla birlikte, güneş enerjisini toplama yöntemleri bakımından farklılık gösterirler (Akova 2008).

Termik güç santrallerinin temel teknolojisi, bir akışkanın güneş radyasyonu ile ısıtarak buharlaştırılması ve buharın bir turbo-jeneratör vasıtasıyla elektrik üretilmesi esasına dayanmaktadır (Akova 2008).

Güneş pilleri ya da fotovoltaik sistemlerde; güneş pili üzerine düşen güneş ışınları doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülerek depolanır. Güneş pilleri yüzeylerine düşen güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddeler içerir.

Gelişmekte olan ülkelerde kurulan fotovoltaik sistemler genellikle evlerde ve kamu binalarında kurulmaktadır. Gelişmiş ülkelerde ise; güvenlik, cadde ve tünel aydınlatması gibi daha özel uygulama alanları bulmaktadır. Günümüzde gelişmiş ülkelerde giderek yaygınlaşan uygulama ise şebeke bağlantılı sistemlerdir. Bu tür sistemlerde güneş pilleri ile üretilen elektriğin fazlası elektrik şebekesine satılır, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Böyle bir sistemde enerji depolaması yapmaya gerek yoktur. Yalnızca üretilen DC elektriğin, AC elektriğe çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterlidir. Depolama maliyetini ortadan kaldırdığı için bu sistemlerden üretilen enerji nispeten daha ucuzdur. Fakat konvansiyonel kaynaklarla karşılaştırıldığında halen pahalıdır (Karamanav 2007).

Güneş kurulu kapasitesinin kıtalara göre dağılımı incelendiğinde Avrupa ve Asya ilk ilki sırada gelmekte ve Kuzey Amerika kıtası bunları izlemektedir. Ancak

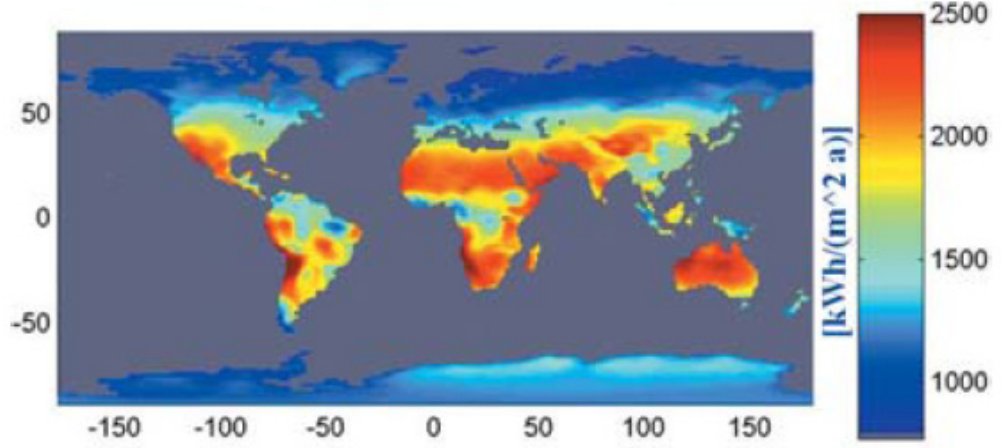
hemen belirtilmesi gereken önemli bir özellik de Asya Kıtasının toplam güneş pili kapasitesinin %87'sinin Japonya'ya ait olduğu, Avrupa Kıtasında ise %83'lük payla Almanya'nın, Kuzey Amerika Kıtasında ise %93 gibi çok yüksek bir oranla ABD' nin ilk sırayı aldıklarıdır (Akova 2008).

Tablo 4: 2007 Yılı Sonu İtibariyle Dünya Güneş Pili Kurulu Kapasitesinin Kıtalaraya göre Dağılımı

	Kurulu Kapasite (MWp)
Afrika	5.2
Kuzey Amerika	877.0
Asya	2216.5
Avrupa	5182.5
Orta Doğu	1.8
Okyanusya	82.5
DÜNYA TOPLAMI	8365.5

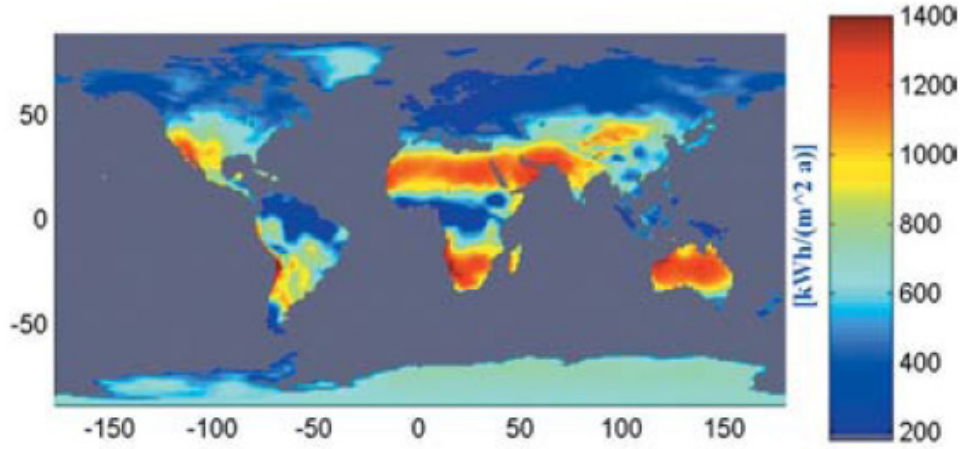
Kaynak: Survey of Energy Resources 2009, WEC, 2009

Şekil 12: Dünya Fotovoltaik Enerji Potansiyeli



Kaynak:Renewables For Power Generation, IEA, 2003

Şekil 13: Dünya Güneş Enerjisi Potansiyeli



Kaynak:Renewables For Power Generation, IEA, 2003

2.2. Rüzgâr

Güneş ışınları atmosfere girdiğinde, dünyanın şeklinden dolayı atmosferin farklı bölgeleri farklı yoğunlukta ısınmaktadır. Havanın daha sıcak bölgelerden daha soğuk bölgelere doğru hareket etme eğilimi nedeniyle gerçekleşen hava akımları rüzgârları oluşturmaktadır. Rüzgâr, kaynağını güneşten aldığından dolayı güneş gibi tükenmez ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Güneş ışınımının binde 2'lik bir kısmı rüzgâr ve

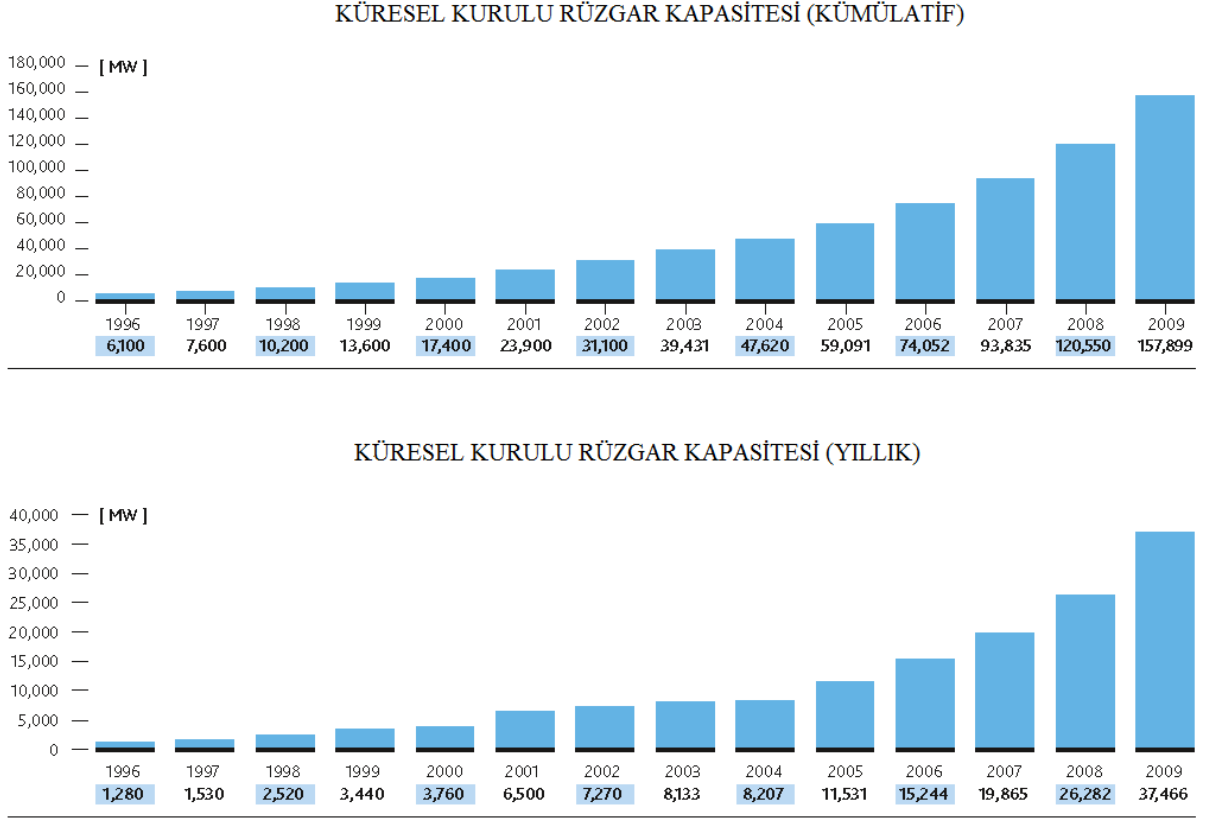
okyanus dalgaları için harcanır (Şen 2002). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en gelişmiş ve ticari açıdan en uygunu, çevre sorunlarına neden olmadığı gibi, güneş var olduğu sürece tükenmeyecek olan, rüzgâr enerjisidir (Akova 2008).

Rüzgâr gücü ile enerji üretiminde rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinleri rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye ardından da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir rüzgâr türbini, esas olarak çevredeki engellerin rüzgârı kesemeyeceği yükseklikte bir kule, bunun üzerine yerleştirilmiş bir gövde ve rotordan meydana gelmektedir. Rotorların konumlarına (şaft eksenlerine) göre türbinler, yatay eksenli veya düşey eksenli şeklinde sınıflandırılırlar. Modern rüzgâr türbinlerinin çoğunluğu yatay eksenlidir. Esen rüzgârın gücü, kanatlar vasıtasıyla jeneratöre aktarılır ve rüzgârın kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi gerçekleştirilir (Akova 2008). Rüzgâr gücünden yararlanarak enerji üretiminde en önemli değişken faktör rüzgâr hızıdır. Rüzgârın gücü, rüzgârın hızı ile doğru orantılı olarak artmakta ve türbinler vasıtasıyla üretilen elektrik miktarını olumlu yönde etkilemektedir.

Rüzgâr enerjisi üretmeye elverişli olan bir yere rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilecek türbin kurulmasıyla ortaya çıkan sahaya rüzgâr çiftliği denir. Rüzgâr çiftlikleri, kurulmasına sakınca olmayan yerlere yaklaşık 100-200 [m] aralıkla türbin yerleştirilmesiyle yapılır. Rüzgâr çiftliklerinin ana elemanı, rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisiye çeviren rüzgâr türbinidir (Şen, 2002).

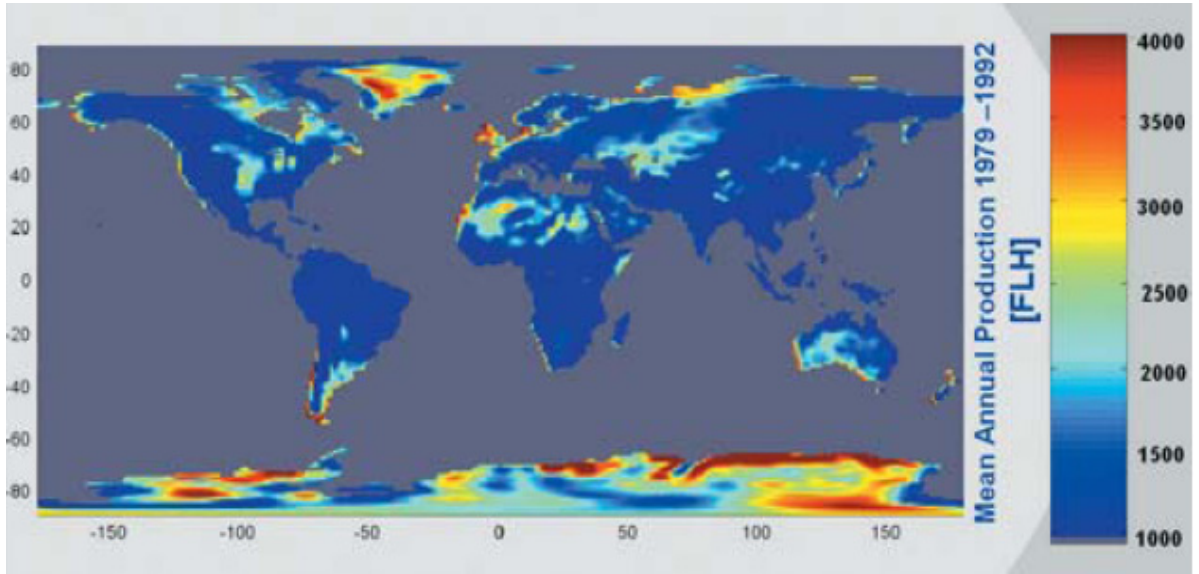
Rüzgâr enerjisinden yararlanmanın tarihi, yelkenli gemilerin ve yel değirmenlerinin hareketini sağlayan enerji kaynağı olarak kullanılmasına dayanır. Rüzgâr enerjisinin elektrik üretiminde kullanılmasına ilk olarak 19.yy. sonlarında Danimarka'da başlanmıştır. Her ne kadar günümüzde dünya elektrik gereksiniminin %1'lik kısmı rüzgâr gücünden sağlanıyor olsa bile, tüketim artış hızı en yüksek olan enerji kaynağı olarak dikkat çekmekte ve ortalama yıllık artış hızı %30 düzeyinde gerçekleşmektedir (Akova 2008). Dünya Enerji Konseyinin 2009 raporuna göre, 2007 yılında rüzgâr gücü ile üretilen elektrik enerjisi miktarı 172.145 GWh olarak gerçekleşmiştir. Dünya rüzgâr gücü kurulu kapasitesi özellikle 2004 yılından itibaren önemli ölçüde artış göstermektedir (Şekil 14).

Şekil 14: 1996- 2009 Yılları Arasında Küresel Kurulu Rüzgâr Kapasitesinin Kümülatif ve Yıllık Değişimi



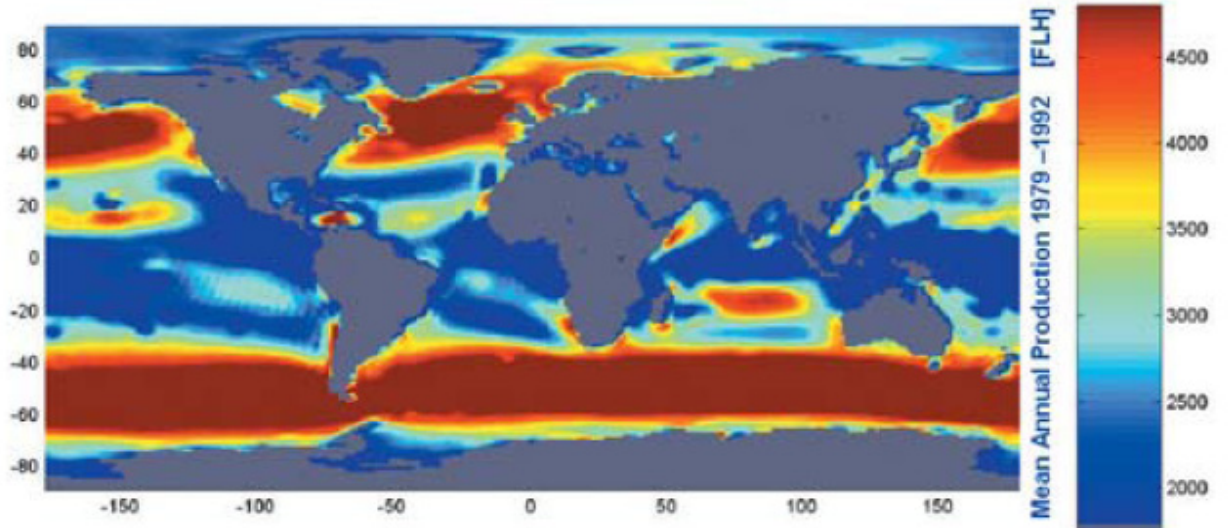
Kaynak: Global Wind Energy Council (GWEC), 2009

Şekil 15: Dünya Rüzgâr Potansiyeli (Onshore)



Kaynak:Renewables For Power Generation, IEA, 2003

Şekil 16: Dünya Rüzgâr Potansiyeli (Offshore)



Kaynak:Renewables For Power Generation, IEA, 2003

2.3. Hidroelektrik

Hidroelektrik gücünün orijinal kaynağı yeryüzündeki okyanusları ısıtarak suyun buharlaşmasını sağlayan güneş enerjisidir. Atmosferde bulut olarak şekillenen nem eninde sonunda yeryüzüne yağmur veya kar olarak düşer. Yağmurun dağlardan aşağıya akarsu ve nehirler biçimindeki akışından, su çarkları veya türbinleri vasıtasıyla güç üretilir (Boyle 2004). Diğer bir ifade ile hidroelektrik (hidrolik) enerjisi hareket halindeki sudaki kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Suyun biriktirildiği baraj göllerinden alçakta kurulan hidroelektrik santrallerinin çalışma prensibi, baraj kapaklarının açılmasıyla düşüşe geçen sudaki kinetik enerjinin türbine bağlı jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanır. Sistemde üretilen enerjinin miktarı suyun debisi ve suyun düşüş miktarı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle modern hidrolik tesisler devasa barajları ve geniş alanlara yayılan baraj göllerini içeren büyük ölçekli yapılar olarak inşa edilirler (Boyle 2004). Ancak günümüzde büyük barajlı hidrolik tesislerin çevresel ve sosyal etkileri tartışılmakta ve bazı kaynaklarda bu yolla üretilen enerji yenilenebilir enerji olarak değerlendirilmemektedir. Büyük hidrolik santraller, geniş alanlara yayıldıklarından, o bölgelerde yaşayan insanların tahliyesini gerektirebilir ve istenmeyen ekolojik ve sosyal etkilere sebebiyet verebilir. Bu özellikleri nedeniyle bazıları tarafından yenilenemeyen bir kaynak olarak değerlendirilir. Küçük ölçekli hidrolik tesislerde genelde böyle sorunlara rastlanmaz (Assmann vd. 2006). Yerleşim yerlerinin tahliyesinin yanı sıra büyük hidrolik tesislerin balıklar ve diğer vahşi yaşam formları üzerinde de negatif etkileri olabilmektedir. Su ürünlerindeki azalma, su kaynaklı hastalıklarda artış ve nadir olmakla birlikte barajların yıkılmasından kaynaklı felaketler bu tip negatif etkiler arasında sayılabilir. Büyük barajların bir başka negatif etkisi, ağaçların ve diğer bitkilerin baraj kapaklarının açılması sonucu baraj göllerinin suları altında kalmaları ve anaerobik (oksijensiz ortamda) olarak çürümeleridir. Bu süreç, ağacın oksijen varlığında normal olarak çürümesi sonucu açığa çıkan CO₂'den daha güçlü bir sera gazı olan metan gazının üretilmesine neden olur (Boyle 2004). Buna rağmen, dünya birincil enerji tüketiminin %80'inin sağlandığı fosil yakıtların çevresel etkileriyle kıyaslandığında hidrolik gücü

temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Hidrolik santraller, termik santrallere ve doğal gaz santrallerine göre çevresel faktörler ve dünyadaki eğilimler karşılaştırıldığında daha avantajlıdır (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu 2004). Yüzeysel su akışı bol olan ülkeler hidroelektrik enerjiyi sıkça kullanmaktadırlar.

Dünya enerji ihtiyacının yaklaşık %20'ye yakın bölümü hidroelektrik enerjiden karşılanmaktadır (Tanwar 2007). Hidrolik gücü dünya birincil enerji tüketiminde %2,3'lük bir paya sahiptir. 2000 yılında su gücü kullanılarak dünya elektrik tüketiminin %17'lik kısmı karşılanmıştır (Boyle 2004).

Tablo 5: Hidroelektrik Üretiminde İlk 10 Üretici Ülkenin Durumu (2007)

	Üretim (TWh)	Dünya genelindeki payı (%)	Yurtiçi elektrik üretimindeki payı (%)
Çin	485	15,3	14,8
Brezilya	374	11,7	84,0
Kanada	369	11,7	57,6
ABD	276	8,7	6,3
Rusya	179	5,7	17,6
Norveç	135	4,3	98,2
Hindistan	124	3,9	15,4
Japonya	84	2,7	7,4
Venezüella	83	2,6	72,3
İsveç	66	2,1	44,5
Diğer	987	31,3	13,5
DÜNYA	3162	100,0	15,9

Kaynak: Key World Energy Statistics 2009, IEA, 2009

Şekil 17 : Dünya Hidroelektrik Potansiyeli



Kaynak:Renewables For Power Generation, IEA, 2003

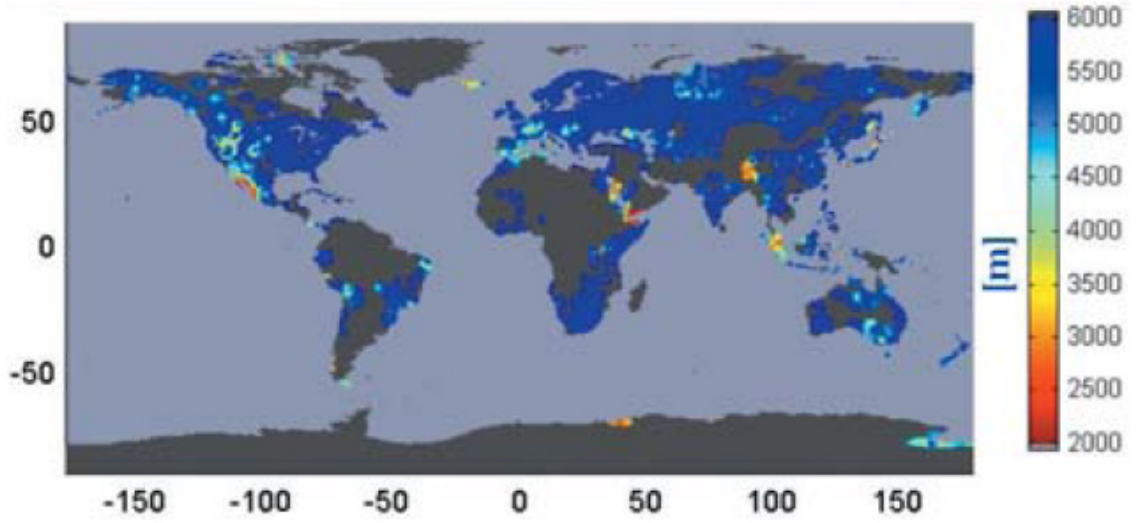
2.4. Jeotermal

“Jeotermal enerji; yerkabuğunun derinliklerinde mevcut yeraltı ısısının oluşturduğu, sıcaklığı sürekli olarak bölgesel atmosferik sıcaklığın üzerinde olan ve bileşimlerinde, çevresindeki normal yer altı ve yerüstü sularına oranla daha fazla erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar içeren sıcak su veya buhar olarak tanımlanabilir.” (Akova 2008)

Yeraltı suyunun ısısı olan jeotermal enerjinin ekonomik olarak kullanılabilmesi için başka enerji türlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Jeotermal enerji ile elektrik üretimi konusundaki çalışmalar petrol krizinden sonra yoğunlaştırılmıştır. Dünyada 1995–2000 arası dönemde elektrik elde etmek amacıyla jeotermal enerji kullanımı %17, mesken ısıtması ve termal turizm gibi diğer amaçlarla kullanımı ise %87 artmıştır (Mertoğlu 2002). Jeotermal enerjinin mesken ısıtması ve turizm gibi amaçlarla kullanılması bu enerji türünün sıvı formunun doğrudan kullanıldığı sistemleri içermektedir. Elektrik üretimi amacıyla kullanımında ise çeşitli teknolojilerle bu enerji türünün buhar formundan yararlanma söz konusudur.

Ekonomik değer taşıyan jeotermal kaynaklar yerin 3000 m derinliğine kadar olan mesafe içinde suyun sıcaklığı 20-230 °C'ler arasında değişen sistemler olup sıcak su sistemi, kuru buhar sistemi ve sıcak kuru kaya sistemi olarak üç ana grupta değerlendirilebilirler (Akova 2008). Jeotermal kaynağın türü, kaynaktan faydalanım biçimini belirlemektedir. Orta ve düşük sıcaklıktaki kaynaklar (ılık sudan sıcak suya kadar) doğrudan kullanım için uygun iken yüksek sıcaklıktaki kaynaklardan (kuru buhar/ sıcak akışkan) elektrik enerjisi üretiminde yararlanılabilir (Gupta vd. 2007). Dünya genelinde, 24 ülkenin sahip olduğu jeotermal kaynak elektrik enerjisi üretimine olanak sağlayacak derecede sıcaktır (WEC 2009).

Şekil 18: Dünya Jeotermal Enerji Potansiyeli



Kaynak:Renewables For Power Generation, IEA, 2003

Tablo 6: Jeotermal Enerji: 2007 Yılı Kurulu Kapasite ve Üretim Miktarları

	Kurulu kapasite (MWe)	Yıllık üretim (GWh)	Yıllık kapasite faktörü
Afrika	136	911	0.77
Kuzey Amerika	4 422	25 376	0.67
Asya	3 563	18573	0.62
Avrupa	1 401	9 077	0.78
Okyanusya	517	3 523	0.82
DÜNYA TOPLAMI	10 039	57 460	0.67

Kaynak: Kaynak: Key World Energy Statistics 2009, IEA, 2009

2.5. Biyokütle

Dünya'nın pek çok bölgesinde biyokütle (biyomas) ucuz bir enerji kaynağı olarak kullanılmakta; dünya nüfusunun 1/3' i orman ürünleri, hayvan dışkıları gibi organik maddeleri yakarak ısınma ihtiyacını karşılamaktadır. Biyokütle enerji kaynaklarının ısı ve ışık ihtiyacını karşılamak için geleneksel yöntemlerle değerlendirilmesi tarih öncesi zamanlardan beri var olagelmiş bir uygulamadır. Günümüzde biyokütle enerji kaynaklarının, elektrik ve yakıt üretimi gibi daha etkin amaçlarla kullanımı yaygınlaşmakta ve biyokütle fosil yakıtlara ikame olabilecek bir kaynak olarak göze çarpmaktadır.

Biyokütle enerjisinin kaynağı, güneş enerjisinin bitkiler tarafından fotosentez işlemiyle dönüştürülerek organik karbon olarak depolanmasıdır. Dolayısıyla, tüm bitkisel kökenli yakıtlar biyokütle enerji kaynakları içinde değerlendirilirler. Günümüzde biyokütle enerji kaynakları iki gruba ayrılmaktadır. Klasik biyokütle enerji kaynakları odun, bitki ve hayvan atıklarından oluşur. Modern biyokütle terimi, enerji ormanlarından elde edilen tüm orman ürünlerini; enerji üretimi amacıyla özel olarak yetiştirilen mısır, şeker kamışı, buğday vb. bitkileri; algleri; tüm tarımsal yan ürünleri;

ağaç endüstrisi ve gıda sanayi atıkları ile kentsel atıklar gibi her türlü organik atıkları kapsar. Bu iki grup arasındaki temel fark, klasik biyokütle enerji kaynakları değişik yöntemlerle olsa bile doğrudan yakma esasına dayanırken, modern biyokütle uygulamaları belirtilen biyokütle maddelerinden azami yarar elde edebilmek için, bu maddelerin planlı olarak yetiştirilmesinden yakıt elde etmek amaçlı işlenmesinden kaynaklanmaktadır (Akova 2008). Biyokütle elde etmek amacıyla enerji ormancılığı ve enerji tarımı yapılmaktadır. Enerji ormancılığı, hızlı büyüyen ağaç türlerinin yetiştirilmesi yoluyla odun elde etmek esasına dayanır. Enerji tarımı ise enerji üretiminin gerçekleştirilebileceği alkol verimi yüksek bitkilerin yetiştirilmesi esasına dayanır. Gerek amaca yönelik olarak yetiştirilen gerekse kentsel ve endüstriyel organik atıklardan elden edilen biyokütle enerji kaynakları çeşitli yöntemlerle ısı, elektrik ve akaryakıt gibi kullanışlı enerji türlerine dönüştürülebilmektedir.

Biyokütle yenilenebilir, her yerde yetiştirilebilen, sosyo-ekonomik gelişme sağlayan, çevre dostu, elektrik üretilebilen, taşıtlar için yakıt elde edilebilen stratejik bir enerji kaynağıdır. Biyokütle doğrudan yakılarak veya çeşitli süreçlerle yakıt kalitesi artırılıp, mevcut yakıtlara eşdeğer özelliklerde alternatif biyoyakıtlar (kolay taşınabilir, depolanabilir ve kullanılabilir yakıtlar) üretilerek enerji teknolojisinde değerlendirilmektedir (Karaosmanoğlu 2006).

2.6. Denizsel

Deniz kökenli enerji kaynakları üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlardan birincisi gel-git olayının yarattığı hareketin; ikincisi dalgaların hareketinin ve üçüncüsü de okyanusların bazı bölgelerindeki yüksek sıcaklık farkının kullanımına dayanan sistemlerdir.

Denizlerdeki dalgalar temelde üç etki sonucu oluşmaktadır. Bunlar; denizlerde oluşan depremlerin ve deniz dibi çökmelerinin yol açtığı dalgalar, rüzgârların ve fırtınaların oluşturduğu dalgalar ve gelgit olayı sonucu oluşan dalgalardır (Özdamar, 2000).

“Gel-git olayı kaynaklı dalgalar, güneşin ve ayın dünyaya göre konumuna bağlı olarak şekillenir. Bilindiği gibi, iki cisim arasındaki kütle çekim kuvveti bu cisimlerin kütleleriyle doğru, aralarındaki mesafenin karesi ile ters orantılıdır. Ayın med-cezir oluşturma etkisi ayın çekim gücünün Dünyanın merkezindeki değeri ile yeryüzü arasındaki farkın, yer yüzeyi boyunca değişmesinden kaynaklanmaktadır. Ayın kütle çekim kuvveti Dünyaya Güneşten daha yakın olması nedeniyle, Güneşin kütle çekim kuvvetinden 2,225 kat daha fazladır. Diğer bir ifadeyle Dünyada yaşanan Med Cezir olayını yaratan gücün %68’i Ay’dan ve %32’si de Güneşten kaynaklanmaktadır.” Med Cezir hareketinden elektrik üretimi, baraj, med cezir çiti ve med cezir türbini olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleştirilmektedir (Akova 2008).

Dünyanın en büyük gel-git enerjisi tesisi Fransa’da bulunan, 240 MW kapasitesiyle La Rance’dır. Kanada, Rusya ve Çin’i de içeren başka bölgelerde de daha küçük kapasitede tesisler bulunmaktadır. İngiltere’de, Severn Estuary bölgesi dünyanın en iyi gelgit potansiyeline sahiptir. Burada kurulacak bir tesisin 8600 MW civarında kapasite ile İngiltere’nin cari elektrik talebinin %6’sını karşılayabileceği düşünülmektedir (Boyle 2004). Bir diğer deniz kökenli enerji kaynağı olan dalga gücü, dalga hareketinin kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Dalga hareketinden elektrik üretilmesine yönelik çalışmalar 1970’lerde başlamış ancak verimli sonuçların elde edilmesi 1980’lerin sonu ile 1990’ların başında gerçekleşmiştir. Günümüzde dalga enerjisi teknolojisi rüzgâr enerjisi ya da güneş pilleri ile elektrik üretimine yönelik teknolojiler kadar gelişmiş olmamakla birlikte Avustralya, Çin, Danimarka, Hindistan, Japonya, Norveç, Portekiz, İsveç, İngiltere ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkelerde kurulu pilot tesisler çalışmaktadır. Dünyada dalga enerjisi araştırmaları en fazla Japonya, Norveç, İngiltere, Çin ve Hindistan’da yapılmaktadır (Şen 2002). Denizlerden enerji üretilmesi sürecinde yararlanılabilecek bir diğer imkân da, özellikle derin denizlerde bulunan suların sıcaklık farkından yararlanarak, enerji üretiminin gerçekleştirilmesidir. Okyanuslarda sıcaklık farkının 20 °C veya daha fazla olması durumunda bir eşanjör yardımıyla elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir (Akova 2008). Bu konudaki çalışmalar henüz araştırma

boyutunda olmasına rağmen bu enerji kaynağının diğer yenilenebilirlerin aksine enerji üretiminin kesintisiz olarak sürmesine olanak tanınması önemli bir avantaj olarak belirtilmektedir.

Denizlerin sahip olduğu potansiyel kinetik enerjini, insanlığın ihtiyaç duyduğu her hangi bir enerji türüne dönüştürülmesi mümkün, fakat maliyetleri çok fazla olduğu gibi, enerji dönüştürme teknolojilerinin gelişme sürecinin başında bulunduğu gerçeği dikkate alındığında, yakın gelecekte denizlerin sahip olduğu güçten, insanların yararlanabileceği türden enerji üretimini beklememek gerekmektedir (Akova 2008).

2.7. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Uygulanan Teşvik Sistemleri

“Yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin konvansiyonel enerjiler ile rekabet edebilmeleri için öncelikle teşvik mekanizmalarının belirli bir süreliğine işletilmesi zorunludur. Yenilenebilir enerjiler 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.” (Şahin 2010b)

Yenilenebilir enerji kaynakları ile bağlantılı olarak dünyada ve Avrupa Birliği’nde uygulanan teşvikler şöyledir: (Gökçınar 2008).

Pazar 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 yenilenebilir enerji sistemlerinin desteğe ihtiyacı kalmayacağı Avrupa Birliği Enerji Komisyonu raporunda yer almaktadır. (EWEA, 2004)

Komisyunun 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 €/KW 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.

Ödeme Mekanizmaları:

Vergilendirme sisteminin işlememesi üzerine üretici destekleme üzerine yapılan çalışmalarla yenilenebilir enerjilerin 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 yenilenebilir kaynağın rekabet noktasında yaşayacağı zorlukları aşmasında yardımcı olmaktadır. Bu uygulamaların amacı yenilenebilir enerji sistemlerinin teknoloji açısından gelişmelerini ve dolayısıyla üretim maliyetlerinin düşürülmesini teşvik etmektir.

Gönüllü Sistem ve Yeşil Pazar:

Teorik olarak düşünüldüğünde yenilenebilir enerjilerin 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 yenilenebilir enerji kullanımının gelişimine etkisi olmadığı uygulamalardan görülmektedir.

Sabit Tarife Sistemi:

Üreticiye ödenecek fiyat aralığı üretim sisteminin kurulacağı alana göre değişmektedir. Bu fiyatlandırma yüksek potansiyelli bölgelerde düşük iken, düşük potansiyelli bölgelerde yüksek olmaktadır.

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 dağıtımıcılara elektrik satmamaktadır. Bu sistemin uygulandığı ülkeler; Almanya, Portekiz, İspanya ve Yunanistan'dır.

Sabit Üretim Sistemi:

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

Yenilenebilir 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 imkânını da bulabilmektedir. Hollanda, Danimarka ve İtalya'da uygulanmaktadır.

Yatırım Teşviki:

Yenilenebilir enerji yatırımlarının ilk yıllarında üreticiye verilen teşvik kurulacak santralin kW cinsinden kapasitesine göre verilirdi. Bunun sonucunda potansiyelin düşük olduğu bölgelerde kapasitenin üzerinde güce sahip sistemler kullanıldığından enerji üretim verimi düşmüş, maliyetler yükselmiştir. Zaman içinde bu teşvik hem kapasiteye hem de üretilen enerji verimine bağlı olarak düzenlenmeye başlanmıştır.

Karbon Ticareti ve Vergisi :

AB'de her ülkenin sera gazı azaltım tahsisini Komisyon belirlemektedir. Ülkeler de firmaların yıllık sera gazı azaltım miktarlarını tespit etmektedir. Kendine tahsis edilen sera gazı indirimini yapamayan şirketler, kendi tahsisini aşan şirketlerden karbon satın almaktadırlar. Amaç atmosferde küresel karbon azaltımını sağlamaktır. Yani 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. 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, 2006).

3. TÜRKİYE' DE YENİLENEBİLİR ENERJİ

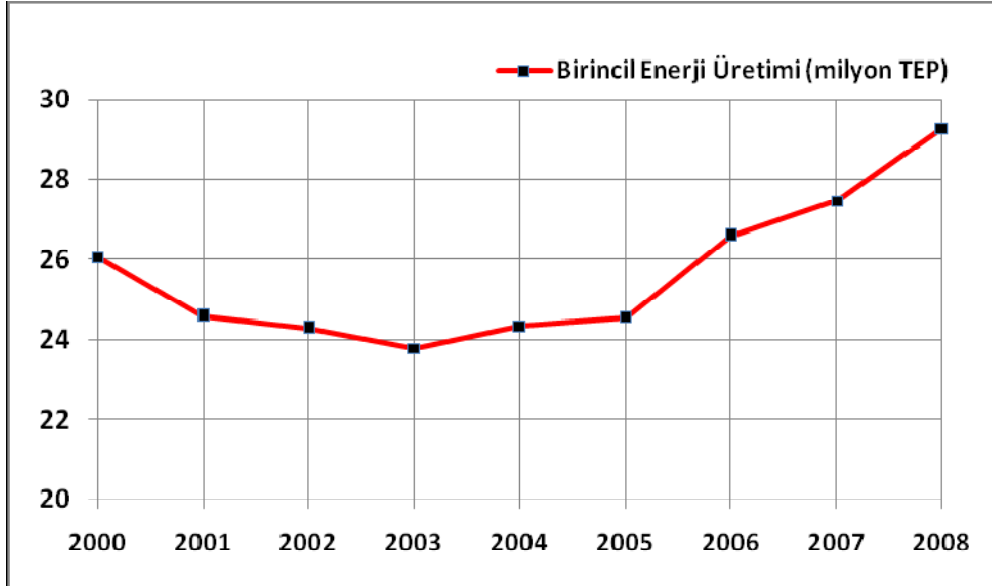
Ülkemizin temel enerji kaynakları hidrolik ve linyittir. Türkiye petrol ve doğal gaz rezervlerine sahip değildir. Bunların önemli bir bölümü ithal edilmektedir. Türkiye'de elektrik; linyit, kömür, doğal gaz, fuel oil ve hidrolik güçten üretilmektedir (Oğulata 2002).

Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından Türkiye önemli bir potansiyele sahiptir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı her geçen gün artmaktadır (Kaygusuz 1999). Türkiye bir yandan, bilinen, hidroelektrik ve linyit gibi önemli enerji kaynaklarını tam anlamıyla değerlendirememenin, diğer yandan arama çalışmalarıyla yeni kaynaklar bulamamanın sıkıntılarını yaşamaktadır (Ünalın 2003). Türkiye'de, ekonomik büyümeye paralel olarak enerji talebi de artmakta; artan bu talep ise büyük ölçüde enerji ithalatı yoluyla karşılanmaktadır. Enerji ihtiyacına olan talebin her geçen gün artmasının sonucunda yenilenebilir enerji kaynaklarına eğilim tüm dünyada ve ülkemizde artmaktadır. Bunun nedeni, fosil yakıtlara göre avantajlarının çok daha fazla olmasından, çevreyi kirletmemesinden ve kendini sürekli yenilemesinden kaynaklanmaktadır (Ülgen ve Hepbaşı 2002). Enerjide yüksek oranda dışa bağımlı, enerji ithalatçısı bir ülke olarak Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması, dışa bağımlılığın azaltılmasında önemli bir araç olarak belirlemektedir.

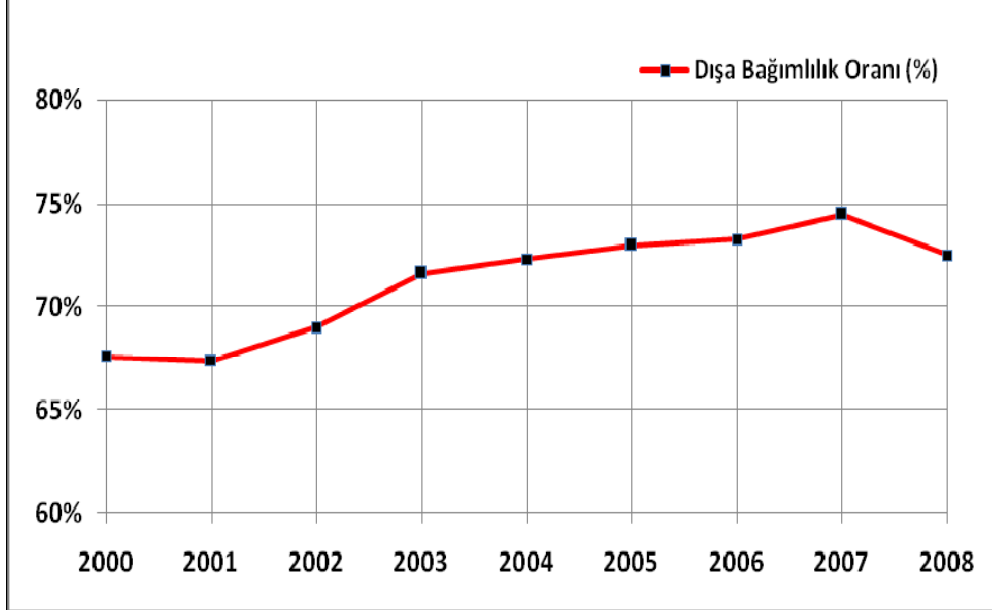
Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 2010- 2014 yıllarını kapsayan stratejik planındaki ilk amaç maddesi “Enerji talebinin karşılanmasına ilişkin uzun vadeli plan çalışmalarımızda, Cumhuriyetimizin yüzüncü yılı olan 2023 yılında yerli kaynaklarımızın tamamının, yenilenebilir enerji kaynaklarının ise azami ölçüde kullanılması, enerji arzında çeşitlendirmenin artırılması ve nükleer enerjinin 2020 yılına kadar olan dönemde elektrik enerjisi üretim kompozisyonuna dahil edilmesi, bu suretle bugüne kadar üç temel sütun üzerine (kömür, doğalgaz ve hidrolik) oturtulmuş olan enerji sektörümüzün mimarisinin yeniden dizayn edilmesi, böylelikle dışa bağımlılığın ve ithalat faturasının azaltılması hedeflenmiştir.” şeklinde ifade edilmiştir.

2008 yılında ülkemizin toplam birincil enerji tüketimi yaklaşık 108 milyon Ton Eşdeğeri Petrol (TEP), üretimi ise 29 milyon TEP olarak gerçekleşmiştir. Ülkemizin 2000-2008 dönemine ilişkin birincil enerji kaynakları üretimi ve birincil enerji talebinin ithalat ile karşılanma oranını gösteren grafikler aşağıda yer almaktadır. (ETKB Stratejik Plan)

Şekil 19: Birincil Enerji Kaynakları Üretimi (2000- 2008)



Şekil 20: Enerjide Dışa Bağımlılık Oranı (2000- 2008)

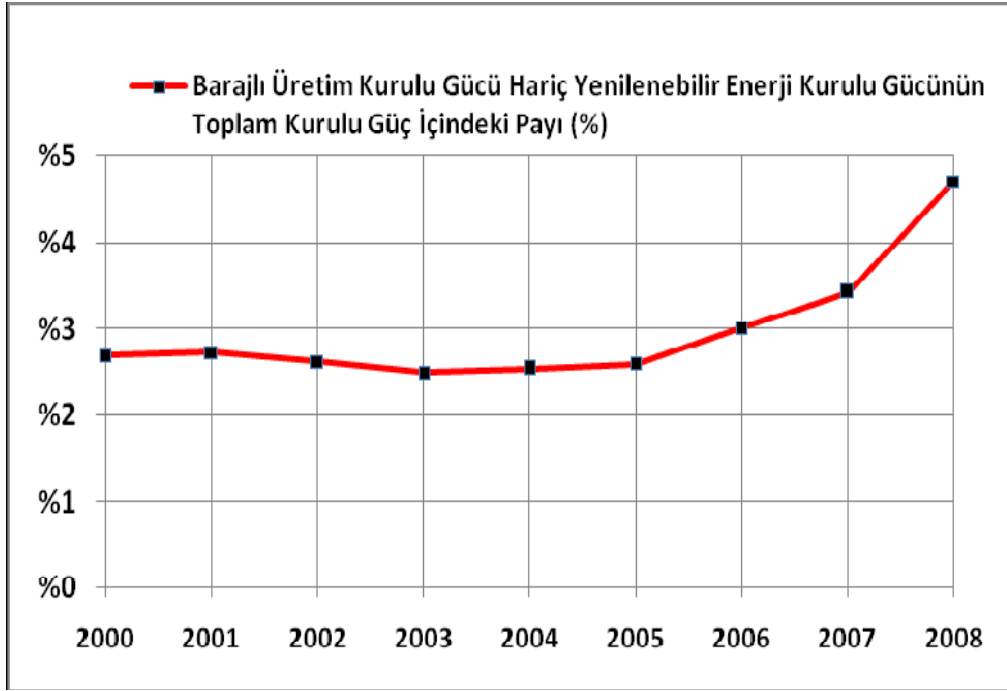


Kaynak: ETKB Stratejik Planı (2010-2014)

ETKB Stratejik planının 2. amaç maddesinde ise “2005 yılında yürürlüğe giren Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanılmasına İlişkin Kanun ile özel sektör marifetiyle yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretilmesi imkânı sağlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına ilişkin temel hedefimiz, bu kaynakların elektrik enerjisi üretimi içerisindeki payının 2023 yılında en az %30 düzeyinde olmasının sağlanmasıdır.” ifadesi yer almaktadır.

Hidroelektrik enerji dışındaki, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından olan jeotermal, güneş ve rüzgâr enerjisi yönüyle şanslı ülkelerden biri olmamıza rağmen, bu kaynakların toplam birincil enerji üretimimiz içindeki payı henüz %5 seviyesini aşamamıştır (Ünalın 2003). Ancak 2005 yılından itibaren yenilenebilir enerji kurulu gücü artma eğilimindedir (Şekil 21).

Şekil 21: Barajlı Üretim Kurulu Gücü Hariç Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücünün Toplam Kurulu Güç İçindeki Payı (%)



Kaynak: ETKB Stratejik Planı (2010-2014)

3.1. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli Ve Kullanımı

Türkiye coğrafik konumu itibariyle yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğunun geniş çaplı kullanımına yönelik çeşitli avantajlara sahiptir. Hidroelektrik üretimi, biyokütle yakımı, tarımsal ürünlerin kurutulması ve sıcak su ısıtması amacıyla güneş enerjisi ve jeotermal enerji ülkede pek çok yıldan beri kullanılmaktadır (Kaygusuz 2002).

Türkiye, 36 ° ve 42 ° enlemleri arasında bulunmasından dolayı ülkenin önemli bir bölümü güneş enerjisinden yararlanmak için uygundur. Aktif güneş sistemlerinin kullanıldığı başlıca alan yerel su ısıtma sistemleridir. Türkiye’de 1980’den beri yaklaşık olarak 30 000 su ısıtma sistemi kurulmuştur. Bu, toplam potansiyelin çok küçük bir bölümüdür. Konutların yaklaşık %50’si su ısıtma sistemlerinin kurulmasına uygundur. Bu potansiyelin değerlendirilmesi, 2025 yılına kadar yaklaşık olarak 5 milyon sistemin

kurulumunu gerektirecektir. Böylece, tahmini olarak, yıllık 30PJ (9.0 TWh) petrol, kömür ve gaz ve yıllık 2.0 TWh elektrik tasarrufu sağlanabilecek; CO₂ emisyonu yıllık 5.0 milyon ton ya da cari düzeyinin %1 i kadar azaltılabilecektir (Kaygusuz 2002).

Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2609 saat olup bu, yılın %29,8'ini oluşturmaktadır (Acaroğlu 2007). Bu düzey, termal güneş enerjisi uygulamaları için yeterli miktarda enerjiyi sağlamaktadır. Türkiye'de güneş enerjisi potansiyeli bir yılda 36 milyon ton kömüre eşdeğerdir. Ülkemizde güneş enerjisi yaygın olarak evlerin sıcak su gereksiniminin karşılanmasında kullanılmaktadır. Ülkemizin özellikle Güney ve Ege kıyıları başta olmak üzere tüm bölgelerinde güneş enerjisi kolektörleri yoğun olarak su ısıtmak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca güneş mimarisi ve elektrik üretiminde güneş pillerinin kullanımı da yaygınlaşmaktadır.

Güneş enerjisi üretiminin yok denecek kadar az olduğu Karadeniz bölgesi dışında yılda birim metre kareden 1100 kW saat enerji üretilebilir ve toplam güneşli saat miktarı ise 2500 saattir. Buna göre Türkiye'de toplam olarak yıllık alınan enerji miktarı ise yaklaşık 1015 kW saat kadardır (Şen 2002). Ülkenin güneşlenme potansiyeli ve güneş çiftliklerinin kurulumuna uygun geniş alanların varlığı nedeniyle Türkiye fotovoltaik (PV) piyasası potansiyeli oldukça yüksektir. Güneş enerjisinden elde edilecek elektriğin, şebekeden sağlanandan daha ekonomik olacağı 30000'in üzerinde küçük yerleşim alanı vardır. Bir diğer PV piyasası potansiyeli ise uzun kıyı şeridi üzerindeki tatil köyleridir (Kaygusuz 2002). Güneş enerjisi bakımından ülkemiz oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Gerekli yatırımların yapılması halinde Türkiye yılda birim metre karesinden ortalama olarak 1500 kW saatlik güneş enerjisi üretebilir (Şen 2002).

“Türkiye coğrafi konumu ve hüküm süren iklim koşulları itibarı ile rüzgâr enerjisi bakımından, teorik olarak elektrik enerjisinin tamamını karşılayabilecek seviyededir. Ülkemiz; toplam 8000 km²'yi bulan ve bunun büyük bir kısmında rüzgâr enerjisi kullanılabilir durumda bulunan sahil şeridinde sahiptir. Türkiye'nin teorik olarak hesaplanan rüzgâr enerjisi potansiyeli 83.000 MW'dır” (Yayla vd. 2010). Türkiye' de rüzgâr çalışmaları tam anlamıyla 1990'lı yıllardan sonra başlamış; Türkiye'nin rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi için yapılan ilk çalışma 1998 yılında

TÜSİAD'ın "21. yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi" başlıklı raporunda açıklanmıştır. Buna göre, Türkiye karasal alanlarda 20000 MW ve denizlerde 15000 MW olmak üzere kullanılabilir rüzgâr gücü potansiyeline sahiptir (Öztopal vd. 2010; Güçlü ve Uyumaz 2010). Türkiye'de kurulan ilk rüzgâr santrali, Alize A.Ş.,1998 yılında 1.5 MW kurulu güç ile Çeşme'de kurulmuştur. Yine 1998 yılında 7.2 MW kurulu güç ile ARES A.Ş. devreye girmiş ve ARES'i 2000 yılında 10.2 MW kurulu güç ile devreye giren BORES A.Ş. izlemiştir. Türkiye' nin kurulu rüzgâr gücü 2008 yılı sonunda 419.15 MW'a; 2009 yılı sonunda 806,65 MW'a ve 2010 yılı Temmuz ayı itibariyle de 1142.35 MW' a ulaşmıştır (Şenkal ve Çetin 2010).

Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin yaptığı sınıflandırmaya göre, rüzgâr enerjisinden yararlanılacak yükseklikteki ortalama rüzgâr hızları, 6,5 m/s için 'iyiye yakın'; 7,5 m/s için 'iyi' ve 8,5 m/s için 'çok iyi' olarak belirtilmektedir. Buna göre Ege ve Marmara Bölgeleri ile Batı Karadeniz ve Hatay civarında rüzgâr enerjisinden yüksek verimle yararlanılabileceği açıktır (Yamak 2006).

Tablo 7: Bölgelere Göre Ortalama Rüzgâr Gücü Yoğunluğu

Bölge	Ort. Rüzgâr Gücü Yoğunluğu (W/m ²)
Marmara Bölgesi	51,91
Güneydoğu Anadolu	29,33
Ege	23,47
Akdeniz	21,36
Karadeniz	21,31
İç Anadolu	20,14
Doğu Anadolu	13,19

Kaynak: Akkaya, S., 2007, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Açısından Önemi ve Bir Rüzgâr Enerjisi Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü, Elazığ, Türkiye

Konum olarak Türkiye dünyanın genç tektonik kuşağı içinde yer aldığından doğal olarak fazla miktarda da jeotermal enerji kaynaklarına sahip olması beklenir. Yapılan çalışmalardan şimdiye kadar 600 civarında irili ufaklı ve sıcaklıkları 20 °C ile 100 °C arasında değişen jeotermal kaynak bulunmuştur. Bu kaynaklar genel olarak kuzey Anadolu fay hattının yakınlarında, deprem yörelerinde ve son zaman volkanlarının bulunduğu yerlerdedir. Türkiye'nin başlıca jeotermal kaynağı olan yerleri Ankara Kızılcahamam, Erzurum Pasinler, Bursa, Eskişehir, Kayseri Kozanlı ve Acıgöl, Erciş, Nemrut dağı, Afyon, Gediz, Sındırgı, Bergama, Sandıklı, Pamukkale, Germencik, Kızıldere'dir. Bunlara Türkiye'nin kaplıcaları da denir. Kaynakların çoğu batı Anadolu'da bulunmaktadır. Denizli- Kızıldere yöresindeki sıcak sular 100 °C civarındadır. İlk sondajlar 1968 yılında yapılmış ve iki adet sıcak su haznesinin bulunduğu sonucuna varılmıştır. Bu derin sondajların verdikleri su sıcaklıkları bir haznede 198 °C iken diğerinde 212 °C ye ulaşmıştır (Şen 2002).

Türkiye hem yüzölçümü bakımından hem de tarım ülkesi olması nedeniyle büyük bir biyokütle üretim potansiyeline sahiptir. Türkiye'deki mevcut tarımsal ve hayvansal atık miktarının, Türkiye'nin enerji tüketiminin ortalama %25'ini karşılayabileceği hesaplanmıştır (Tolay vd. 2010).

Türkiye'nin toplam tarımsal alanı yaklaşık 26 milyon 350 bin hektardır. Bunun % 38.4'ü ekili alan %44.1'i orman, % 10.4'ü nadas alanı ve %7.1'i meyve sebze ekili alandır. Türkiye'de yıllık toplam tarımsal atık miktarı yaklaşık olarak 50-65 Mtep'dur. Türkiye'de tarımsal üretim sonucu ortaya çıkan başlıca atıklardan, hayvan çiftliklerinden oluşan toplam geri kazanılabilir biyo-enerji potansiyelinin yaklaşık 16.92 Mtep olduğu tahmin edilmektedir. (Tolay vd. 2010). Türkiye'nin 2005 yılındaki doğalgaz tüketimi yaklaşık 274 TWh'dir. Ekim alanlarının %20'sinde biyogaz üretimi amacıyla enerji bitkisi üretildiği varsayımı altında toplam biyogaz'dan enerji kazanımının 241,9 TWh olabileceği ve bu hesaba göre Türkiye'nin, 2005 yılı doğalgaz ithalatının %88'ini ulusal kaynaklardan karşılayabilme gücüne sahip olduğu görülmektedir (Gürel 2010).

Türkiye'de toplam arazinin işlenmeyen kısmı içinde tarıma uygun % 3'lük bir alan mevcuttur. Bu alanın enerji tarımında, özellikle C4 bitkileri (seker kamışı, tatlı

darı, mısır gibi) ve yağlı tohum bitkileri tarımında kullanılması tarım kesimine yön verecek, istihdam yaratacak ve ulusal gelir artacaktır. Biyodizel ve biyoetanol üretiminin yan ürün olarak, ülkemiz için önemli oranda yem potansiyeli oluşturacağı da unutulmamalıdır. GAP, Yeşilirmak Havza Projesi gibi projeler kapsamında biyokütle enerji teknolojisi plan ve uygulamaları mutlaka yer almalıdır. Enerji tarımı için, tarım birlik ve kooperatiflerine öncü rol almaları için gerekli teşvik ve destekler verilmelidir (Karaosmanoğlu 2006).

3.2. Türkiye’de Yenilenebilir Enerjiye İlişkin Yasal Düzenlemeler Ve Uygulamadaki Teşvikler

Ülkemizde enerji politikaları son yıllarda sıklıkla tartışılan konular arasında yer almaktadır. Bunun nedenleri arasında; başta ülkemizin enerji alanındaki uluslararası düzeydeki gelişmelere ayak uyduramaması olmak üzere, ülkemizdeki enerji sisteminin kararlı ve oturmuş bir yapıda olmaması, enerji politikalarının zayıflıklarının ve eksikliklerinin bulunması, hükümetten hükümete değişen stratejiler, alınan karar ve programlara üniversitelerin ve diğer AR-GE kuruluşlarının yeterince entegre olmaması ve katkıda bulunmaması sayılabilir (Güner ve Albostan 2007).

Kyoto Protokolü, dünyanın içinde bulunduğu küresel iklim değişikliği ve küresel ısınma sorunlarına karşı uluslar arası bir savunma mekanizması oluşturabilmek amacıyla 1997’de imzalanmıştır. Kyoto Protokolü’nün imzalanması ile yürürlük kazanması arasında sekiz seneden fazla bir süre geçmiştir, Protokol 11 Aralık 1997 yılında imzalanmasına rağmen ancak 16 Şubat 2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Bunda yürürlük şartlarının tamamlanamaması etkili olmuştur. ABD, Avustralya ve Türkiye Kyoto Protokolü’nü uzun yıllar onaylamayan ülkeler olagelmıştır. Aralık 2007’de Avustralya’nın da protokole imza atması ile birlikte protokolü kabul etmeyen önemli ülkeler olarak ABD ve Türkiye kalmış, ancak TBMM 2009 yılının şubat ayı içerisinde kabul ettiği bir kanun ile Türkiye’nin de Protokol’e katılmasını uygun bulmuştur. TBMM’nin 5 Mayıs 2009 tarihinde kabul ettiği 5836 sayılı “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine Yönelik Kyoto Protokolüne Katılmamızın Uygun

Bulunduğuna Dair Kanun”un 17 Şubat 2009 tarihli Resmi Gazetede yayımlanması ile bu protokole taraf haline gelerek Türkiye için elbette ki önemli bir adım atılmıştır.

Türkiye'nin enerji politikaları; maliyet, zaman ve miktar yönünden enerjinin tüketiciler için erişilebilir olması, dışa bağımlılığın azaltılması, enerji alanında ülkemizin bölgesel ve küresel etkinliğinin artırılması, yenilenebilir kaynakların azami oranda kullanılmasının sağlanması, enerji ve tabii kaynakların üretiminde ve kullanımında çevre üzerindeki olumsuz etkilerin en aza indirilmesi şeklinde özetlenebilir. Ülkemizde bu enerji politikalarını gerçekleştirmek amacıyla bazı kanun ve yönetmelikler çıkmıştır (ETKB). Bunlar:

1. 4628 sayılı ‘Elektrik Piyasası Kanunu’

Bu yönetmelik kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisi kurmak üzere lisans almak için başvuruda bulunan tüzel kişilerin yararlanacağı bazı teşvikler vardır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisi kurmak üzere lisans almak için başvuruda bulunan tüzel kişilerden lisans alma bedelinin %1’i dışında kalan tutarı tahsil edilmemekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisleri için ilgili lisanslara kaydedilen tesis tanımlanma tarihini izleyen ilk sekiz yıl süresince yıllık lisans bedeli alınmamaktadır.

2. 5346 sayılı ‘Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun’

Kanunun amacı; yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımının yaygınlaştırılması, bu kaynakların güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılması, kaynak çeşitliliğinin artırılmasıdır.

Bu Kanun kapsamındaki yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretim ve ticaretinde, lisans sahibi tüzel kişiler aşağıdaki uygulama esaslarına tâbidirler:

a)Perakende satış lisansı sahibi tüzel kişiler, bu Kanun kapsamındaki yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üreten YEK Belgeli tesislerin

işletmede on yılını tamamlamamış olanlarından, bu maddede belirlenen esaslara göre elektrik enerjisi satın alırlar.

b)Bu Kanun kapsamındaki uygulamalardan yararlanabilecek YEK Belgeli elektrik enerjisi miktarına ilişkin bilgiler her yıl EPDK tarafından yayınlanır. Perakende satış lisansı sahibi tüzel kişilerin her biri, bir önceki takvim yılında sattıkları elektrik enerjisi miktarının ülkede sattıkları toplam elektrik enerjisi miktarına oranı kadar, YEK Belgeli elektrik enerjisinden satın alırlar.

c)Bu Kanun kapsamında satın alınacak elektrik enerjisi için uygulanacak fiyat; her yıl için, EPDK' nın belirlediği bir önceki yıla ait Türkiye ortalama elektrik toptan satış fiyatıdır. Ancak uygulanacak bu fiyat 5 Euro Cent/kWh karşılığı Türk Lirasından az, 5,5 Euro Cent/kWh karşılığı Türk Lirasından fazla olamaz. Ancak 5,5 Euro Cent/kWh sınırının üzerinde serbest piyasada satış imkânı bulan yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı lisans sahibi tüzel kişiler bu imkândan yararlanırlar.

3. Enerji Verimliliği Kanunu (2007)

Bu Kanun ile enerjinin etkin kullanılması, israfının önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılması amaçlanmıştır.

Bu kanun; enerjinin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim aşamalarında, endüstriyel işletmelerde, binalarda, elektrik enerjisi üretim tesislerinde, iletim ve dağıtım şebekeleri ile ulaşımda enerji verimliliğinin artırılmasına ve desteklenmesine, toplum genelinde enerji bilincinin geliştirilmesine, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmasına yönelik uygulanacak usul ve esasları kapsar.

4. Enerji Kaynaklarının Ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik (2008)

Bu yönetmelik ile enerjinin etkin kullanılması, enerji israfının önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasına ilişkin usûl ve esasları amaçlanmıştır. Aynı zamanda bu yönetmelik enerji verimliliğine yönelik hizmetler ile çalışmaların yönlendirilmesi ve yaygınlaştırılmasında üniversitelerin,

meslek odalarının ve enerji verimliliği danışmanlık şirketlerinin yetkilendirilmesine, enerji yönetimi uygulamalarına, enerji yöneticileri ile enerji yönetim birimlerinin görev ve sorumluluklarına, enerji verimliliği ile ilgili eğitim ve sertifikalandırma faaliyetlerine, enerji etütleri ve verimlilik artırıcı projelere, endüstriyel işletmelerde verimlilik artırıcı projelerin desteklenmesine ve gönüllü anlaşmalara, talep tarafı yönetimine, elektrik enerjisi üretiminde, iletiminde, dağıtımında ve tüketiminde enerji verimliliğinin artırılmasına, termik santrallerin atık ısılarından yararlanılmasına, açık alan aydınlatmalarına, biyoyakıt ve hidrojen gibi alternatif yakıt kullanımının özendirilmesine ve idarî yaptırımlara ilişkin usûl ve esasları kapsar.

Dünya'nın çeşitli ülkelerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ilişkin yasal çerçeveler yapılandırılırken devlet yatırım teşvikleri, hükümet destekli krediler, vergi muafiyetleri veya satın alım garantileri gibi, yatırımcılar için maliyetleri düşürücü ve yatırımı özendirici etkiye sahip uygulamalar da düzenlenmektedir. "Türkiye'de de yenilenebilir enerjinin yaygınlaştırılmasına ilişkin 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun'u ve 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu çerçevesinde; yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilecek elektriğin lisans süreleri ve lisans bedellerinden muafiyet, satış fiyatları ve elektrik alabilme olanağı, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik alım zorunluluğu, Yatırımlarda Devlet Yardımları Hakkında Kararın Uygulanmasına İlişkin Tebliği'nde teşvik belgelerine sağlanacak destekler; gümrük vergisi muafiyeti, KDV istisnası, Ar-Ge ve çevre yatırımları için faiz desteği olarak sıralanmıştır." (Yelmen 2010)

29/12/2010 tarihinde TBMM Genel Kurulunda kabul edilerek yasalaşan "Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile İlgili Kanun Değişikliği Teklifi" ne kadar elektrik piyasası lisans yönetmeliği ile ülkemizde uygulanan teşvikler şunlardı:

- Uygulanacak fiyat her yıl için EPDK' nın belirlediği bir yıl önceki Türkiye Ortalama Toptan Satış Fiyatıdır.

- 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 yenilenebilir 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.

Söz konusu değişikliklerle birlikte yasa, yenilenebilir kaynaklara dayalı elektrik üretiminin teşvikini amaçlamakta ve elektrik enerjisine yönelik kaynak alanlarının, ilgili kurum ve kuruluşların görüşü alınarak belirlenmesi, derecelendirilmesi, kullanılmasına ilişkin usul ve esaslar yönetmelikle düzenlenmesini; belirlenen yenilenebilir kaynak alanları, imar planlarına resen işlenmek üzere Bakanlık tarafından ilgili mercilere bildirilmesini öngörmektedir.

Yasayla, yenilenebilir enerji kaynağına dayalı üretim tesisleri için uygulanacak fiyatlar "Euro sent" yerine "dolar sent" olarak belirlenmiştir. Buna göre, yenilenebilir enerji kaynaklarından (YEK) elektrik üreten tesisler için "YEK destekleme mekanizmasında" belirlenen fiyatlar şöyledir:

- Hidroelektrik üretim tesisi için 7.3 dolar sent,
- Rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisi için 7.3 dolar sent,
- Jeotermal enerjisine dayalı üretim tesisi için 10.5 dolar sent,
- Biyokütleyle dayalı üretim tesisi için (çöp gazı dahil) 13.3 dolar sent,
- Güneş enerjisine dayalı üretim tesisi için 13.3 dolar sent.

Kanunun yürürlüğe girdiği 18 Mayıs 2005 tarihinden 31 Aralık 2015 tarihine kadar işletmeye girmiş ya da girecek YEK destekleme mekanizmasına tabi üretim lisansı sahipleri için bu fiyatlar 10 yıl süreyle uygulanacaktır. 31 Aralık 2015 tarihinde

itibaren işletmeye girecek olan yenilenebilir enerji kaynağı üretim tesisleri için uygulanacak fiyatlar, bu fiyatları geçmeyecek şekilde Bakanlar Kurulunca belirlenecektir. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile birlikte yenilenebilir olmayan diğer enerji kaynaklarını kullanarak enerji üreten hibrit üretim tesisleri de bu destekleme kapsamında olacaktır. Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi (PMUM), her fatura dönemi için YEK toplam bedelini ilan edecek ve tüketiciye elektrik enerjisi sağlayan tedarikçilerin ödeme yükümlülüğünü belirleyecektir.

İKİNCİ BÖLÜM

YENİLENEBİLİR BİR KAYNAK OLARAK RÜZGÂR ENERJİSİ VE MODELLENMESİNDE MARKOV ZİNCİRİ YAKLAŞIMI

1. RÜZGÂR ENERJİSİ

Güneş ışınları atmosfere girdiğinde, dünyanın şeklinden dolayı atmosferin farklı bölgeleri farklı yoğunlukta ısınmaktadır. Havanın daha sıcak bölgelerden daha soğuk bölgelere doğru hareket etme eğilimi nedeniyle gerçekleşen hava akımları rüzgârları oluşturmaktadır. Rüzgâr, kaynağını güneşten aldığından dolayı güneş gibi tükenmez ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en gelişmiş ve ticari açıdan en uygunu, çevre sorunlarına neden olmadığı gibi, güneş var olduğu sürece tükenmeyecek olan, rüzgâr enerjisidir (Akova 2008).

1.1. Rüzgâr Enerjisinden Yararlanmanın Tarihçesi

Rüzgâr milleri, en az 3000 yıldır tahılları öğütmek ve su pompalamak için kullanılırken yelkenli gemileri yözürmek için rüzgâr, asli bir güç kaynağı olarak çok daha eski zamanlardan beri kullanılmaktadır (Burton 2008). Eski Yunanlılar ve onları takiben Romalılar zamanında her ne kadar gemilerin yelkenler vasıtasıyla yözdürülmesi mümkün olmuşsa da, toplumun diğer faaliyetlerinde rüzgâr gücünden yararlanma yoluna gidişler onlar tarafından yapılmamıştır. Nitekim daha ziyade kara topluluklarında gelişen ve dairesel hareketli yel değirmenlerinden güç kaynağı olarak yararlanmak, Orta ve Batı Asya ülkelerinde başlamıştır (Kazıcı 2009). Rüzgâr enerjisinden yararlanmaya yönelik girişimlerin M.Ö. 2800'li yıllarda Orta Doğu'da başladığı bilinmektedir. Mezopotamya bölgesinde ilk olarak M.Ö. 17. yüzyılda Babil'de Hammurabi'nin krallık döneminde sulama amacıyla kullanılan rüzgâr enerjisinin, aynı dönemde Çin'de de kullanıldığı çeşitli kaynaklarda belirtilmektedir. Yel değirmenleri ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. Türklerin ve

İranlıların ilk yel değirmenlerini M.S. 7. yüzyılda kullanmaya başlamalarına karşın, Avrupalılar yel değirmenlerini ilk olarak haçlı seferleri sırasında görmüşlerdir. Fransa ve İngiltere’de yel değirmenlerin kullanılmaya başlanması ise, 12. yüzyılda olmuştur (Toraman 2008). Fransa ve İngiltere’den sonra Hollanda’da da kullanılmaya başlayan yel değirmenleri, Avrupa’da Endüstri Devrimi’ne kadar hızla yayılmış ve tahılların öğütülmesi, kuyulardaki suyun yüzeye pompalanması gibi amaçlarla yaygın olarak kullanılmıştır. 18. yüzyılda Endüstri Devrimi ve buhar makinelerinin kullanılmaya başlanmasıyla, enerji gereksinimini karşılamada odun, kömür gibi yakıtların kullanılmasına dayalı tekniklerin de geliştirilmesi sonucu rüzgâr enerjisi önemini yitirmeye başlamıştır. Rüzgâr gücünün elektrik üretiminde kullanılmaya başlanmasına yönelik çalışmalar 19. yüzyılın sonlarında başlamıştır. Danimarka’da Paul La Cour’un araştırmaları ve yel değirmenlerinden elektrik üretmeyi başaran deneysel çalışmaları ile ABD’de Charles F. Brush’ın dünyanın ilk otomatik rüzgâr türbini olarak bilinen 12 kW DC gücündeki rüzgâr mili jeneratörünü üretmesi bu girişimlerin en önemlileri olarak kabul edilmektedir. 1918 yılında Danimarka’da elektrik üretimi gerçekleştiren ve güçleri 20- 35 kW arasında değişen 120 tane rüzgâr türbini bulunmaktaydı. 20. yüzyılın ilk yarısında bu alandaki en çarpıcı gelişme, 1941 yılında ABD’de 1250 kW lık kapasitesi ve 53 m. rotor çapı ile dönemin en büyük makinesi olan Smith-Putnam rüzgâr türbininin üretilmesi olmuştur. Bu rüzgâr türbini kanatlarından birinin kopması sonucu arızalanmış olmasına rağmen rüzgâr türbini teknolojisindeki devrimsel niteliğini kaybetmemiştir (Burton 2008).

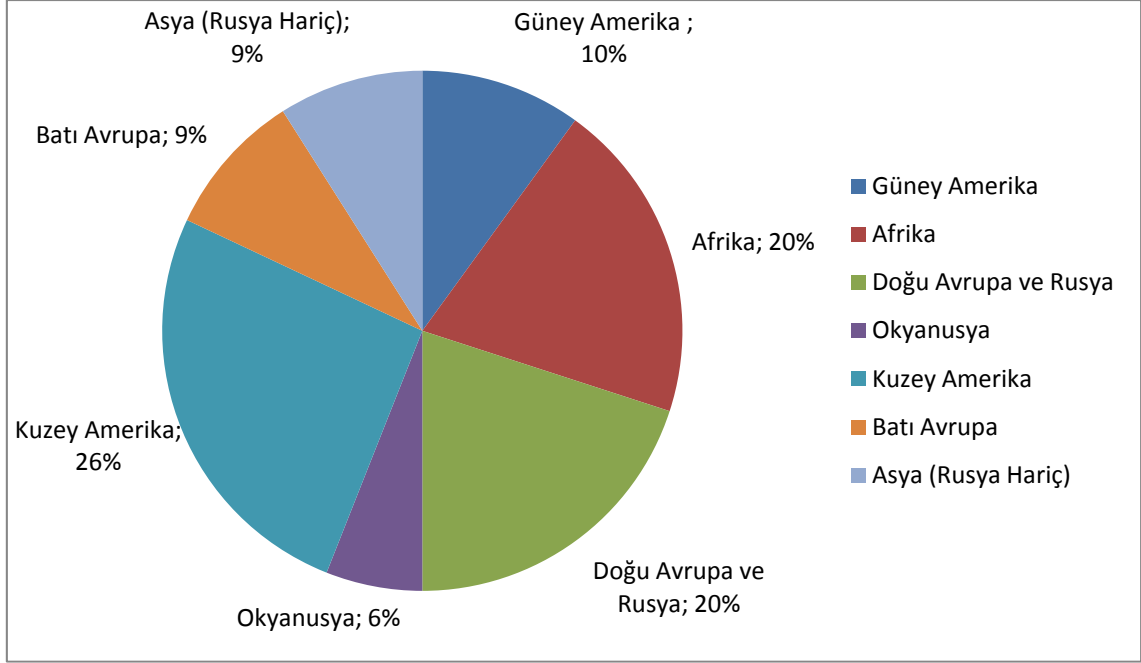
İkinci dünya savaşından sonra 1950’lerin başında İngiltere’de 100kW gücündeki üç kanatlı Andrea Enfield türbini üretilmiştir. Daha sonra 1956’ da Danimarka’da inşa edilen 200kW gücünde, üç kanada ve 24 m rotor çapına sahip Gedser makinesi 1958 ve 1967 yılları arasında %20 kapasite ile çalışmıştır. 1950’ler ve 1960’larda Almanya’da Profesör Hutter bir dizi yenilikçi türbin tasarımı geliştirmiş ve Hutter’ın bu yüksek hızlı, hafif tasarımları daha sonraları Almanya’daki rüzgâr türbini araştırmalarına yön vermiştir. 1973’te petrol fiyatlarındaki ani yükselişle birlikte rüzgâr türbinlerine olan ilgi tetiklenmiş; böylece devlet destekli araştırma, geliştirme ve kurulum fonları ile ABD’de, İngiltere’de, Almanya’da ve İsveç’te farklı özelliklere sahip bir dizi prototip

türbin üretimi gerçekleşmiştir. Rüzgâr enerjisinin gelişimine, 1980'li yıllarda Uluslararası Enerji Ajansı eşgüdümünde yürütülen araştırma geliştirme çalışmalarının büyük etkisi olmuştur (Toraman 2008). Bütün bu gelişmelerin bir sonucu olarak rüzgâr gücü, şebekeye bağlı üretim gerçekleştirilen büyük ölçekli rüzgâr çiftlikleri ile elektrik gereksiniminin karşılanmasında kullanılan önemli bir seçenek haline gelmiştir. Bugün dünyada yıllık büyüme oranı en yüksek gerçekleşen yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisinin kullanımı yılda ortalama %30'luk artış göstermektedir. 1973'te rüzgâr enerjisinin gelişimini tetikleyen ana unsur petrol fiyatları ve sınırlı fosil yakıt rezervlerine ilişkin endişeler iken bugün, rüzgâr türbinleri ile elektrik üretiminin itici gücü çok düşük CO₂ emisyonuna (üretim, kurulum, işletim ve kullanımdan kaldırma aşamalarının tümünde) sebebiyet vermeleri ve rüzgâr enerjisi kullanımının iklim değişiminin etkilerini sınırlamadaki potansiyel katkısıdır (Burton 2008).

1.2. Dünya Rüzgâr Potansiyeli Ve Kullanımı

Uluslararası enerji ajansının çalışmalarına göre dünya ölçeğinde hızı 5,1 m/s'den fazla esen rüzgâr varlığı değerlendirildiğinde yılda 53000 TWh elektrik üretilebilecek kadar rüzgâr gücü bulunmaktadır. Ekonomik, görsel ve fiziksel planlama limitleri dikkate alındığında kabaca bu potansiyelin üçte birinin gerçekleşebileceği hesaplanmaktadır (Akova 2008). Bu çalışmalarda dikkate alınmayan 4-5m/sn hızlı bölgeler de ayrıca ciddi bir potansiyeldir. Sadece Almanya'da bu potansiyelin 90 TWh/yıl olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu hesaplamalar sadece karasal bölgeler için yapılmıştır, dikkate alınmaya denizsel (offshore) bölgelerin de ihmal edilemeyecek ciddi bir potansiyeli mevcuttur. (Toraman 2008) Belirtilen teknik (teorik) potansiyelin kıtalara göre dağılımı grafikte gösterilmiştir (Şekil 22). Buna göre, Kuzey Amerika kıtası %26'lık pay ile en yüksek potansiyele sahiptir.

Şekil 22: Dünya’da Teknik Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Kıtalarla göre Dağılımı

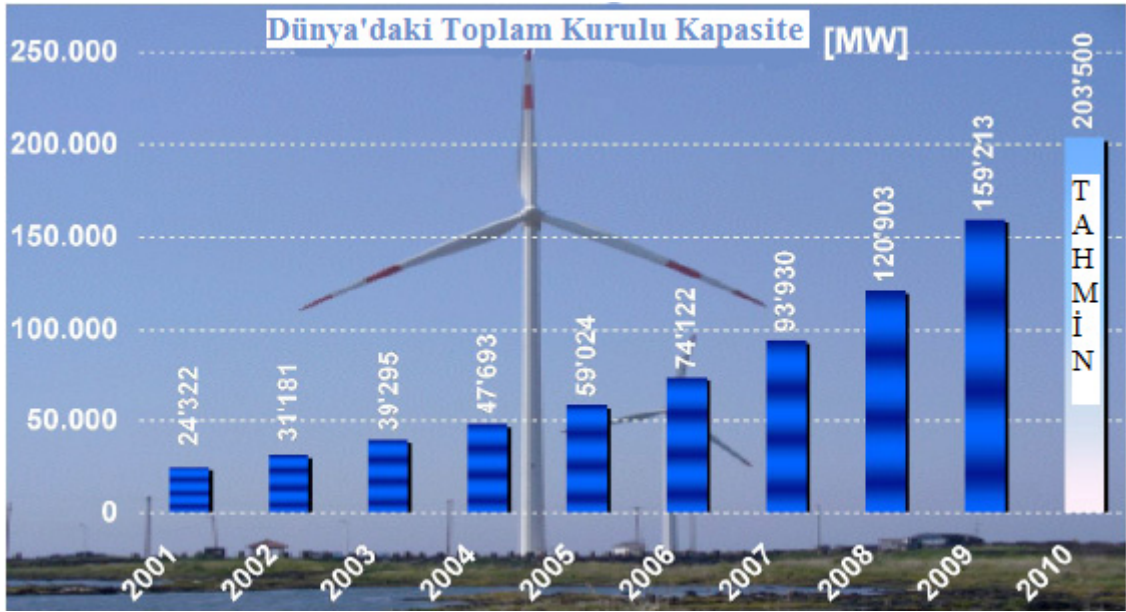


Kaynak: Mehel, N., 2009, Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli, Kullanımı ve Almanya-Türkiye Karşılaştırması, Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Maliye ABD, Aydın, Türkiye

Rüzgâr enerjisi bakımından, denizler karasal alanlara göre daha büyük zenginlik göstermektedir. 1990-1995 yılları arasında Avrupa Birliğinde, kıydan uzaklığa ve su derinliğine bağlı olarak deniz üstü rüzgâr türbini kurulması durumuna göre potansiyel belirleme çalışması yapılmıştır. Kıydan 10 km açıklıkta ve su derinliğinin 10 m’ye kadar olduğu alanların potansiyeli 750 TWh/yıl iken, kıydan uzaklığı 30 Km ve su derinliğinin 40 m’ye kadar ulaşması durumunda üretilebilecek enerji 3500 TWh/yıl düzeyine yükselmektedir (Akova 2008). Bu değerler dünya enerji tüketimine ilişkin verilerle birlikte değerlendirildiğinde rüzgâr gücünün enerji potansiyelinin önemi açıkça görülmektedir. Ancak, bu değerler teknik nitelikte olup mevcut teknolojik imkânlar dahilinde ulaşılabilir görünmemektedir. Normal şebekeler üzerinde yapılan çalışmalarda ve çok sayıdaki değerlendirmelerde, rüzgâr enerjisi kapasitesinin, şebekeye %20 düzeyine kadar girişinde, hiçbir teknik sorun yaratmadığı tespit edilmiştir (Toraman

2008). Fakat enerjiye duyulan ihtiyacın şiddetlenmesi durumunda bu teknik sorunların üstesinden gelinerek, daha yüksek oranlarda yararlanmanın önünün açılması da beklenebilir (Akova 2008).

Şekil 23: Dünya Rüzgâr Gücü Kurulu Kapasitesi (2001-2010)



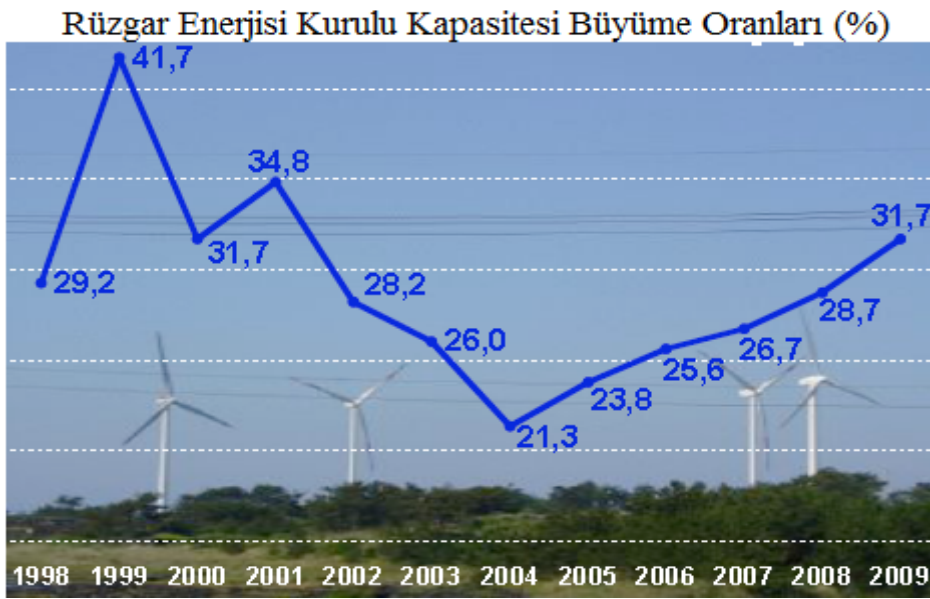
Kaynak: World Wind Energy Report 2009, WWEA, 2010

Dünya üzerinde rüzgâr gücünden elektrik üretiminin kurulu kapasitesi son 10 yıllık dönemde ciddi miktarda artış göstermiştir. Özellikle 2004' ten sonra çok ciddi kapasite artışları gerçekleşmiştir (Şekil 23). 2009 yılında küresel kurulu kapasite miktarı 2008 yılına göre %31,7' lik artış ile 159'213 MW düzeyine ulaşmıştır. 2010 yılı sonunda ulaşılması beklenen kapasite miktarı 200'000 MW dolaylarında tahmin edilmektedir. WWEA kurulu kapasitede gerçekleşen bu hızlı artışa bağlı olarak küresel kurulu kapasitenin 2020 yılında 1'900'000 MW düzeyine ulaşmasının mümkün olabileceğini öngörmektedir.

Büyüme oranı, yeni kurulan rüzgâr gücü kapasitesi ile geçen yılın kurulu kapasitesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Rüzgâr enerjisinde yıllık büyüme oranları yaklaşık olarak %30 düzeylerinde gerçekleşmektedir. Bu oran diğer enerji

kaynaklarının büyüme oranları ile karşılaştırıldığında yüksek kabul edilebilecek bir değerdir. Rüzgâr gücü kurulu kapasitesi yıllık büyüme oranları 2004 yılından itibaren sürekli olarak artmıştır. 2001 yılı sonrasında gerçekleşen en yüksek büyüme oranı %31,7 olarak 2009 yılında gerçekleşmiştir (Şekil 24).

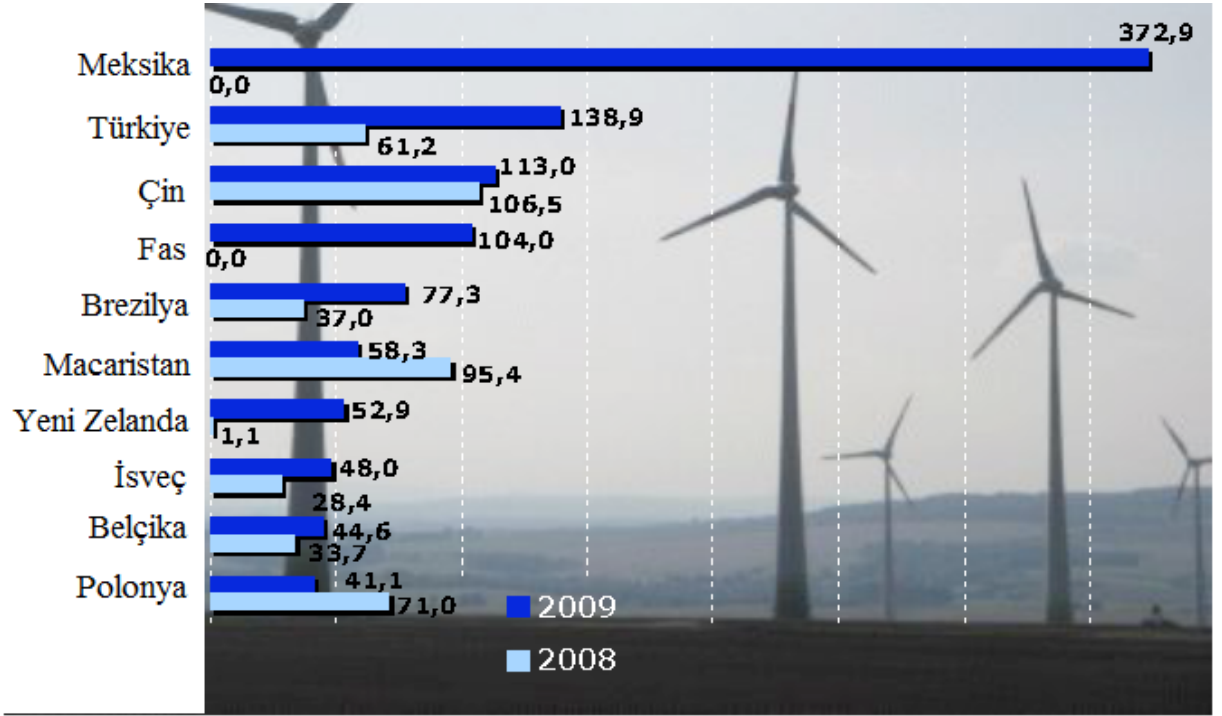
Şekil 24: Rüzgâr Enerjisi Kurulu Kapasitesi Büyüme Oranları (1998- 2009)



Kaynak: World Wind Energy Report 2009, WWEA, 2010

Söz konusu kapasite artışlarının ülkelere göre dağılımı incelendiğinde, Meksika kurulu kapasite miktarını geçen yıla göre dörde katlayan bir büyüme oranı yakalayarak ilk sırada yer almakta; Türkiye ise geçen yıla göre % 132’lik kurulu kapasite artışı ile ikinci sırada bulunmaktadır. Çin %113 ve Fas %104’lük oranlar ile bunları takip etmektedir (Şekil 25). Burada dikkat çeken önemli bir unsur, en yüksek kapasite artışlarının gerçekleştiği ilk dört ülkeden üçünün –Çin hariç- rüzgâr gücünün ticari kullanımına yönelik istatistiklerde “dünyanın geri kalanı” ya da “diğer” olarak ifade edilen grupta yer almasıdır.

Şekil 25: Rüzgâr Enerjisi Kurulu Kapasite Artışlarının Ükelere Göre Dağılımı

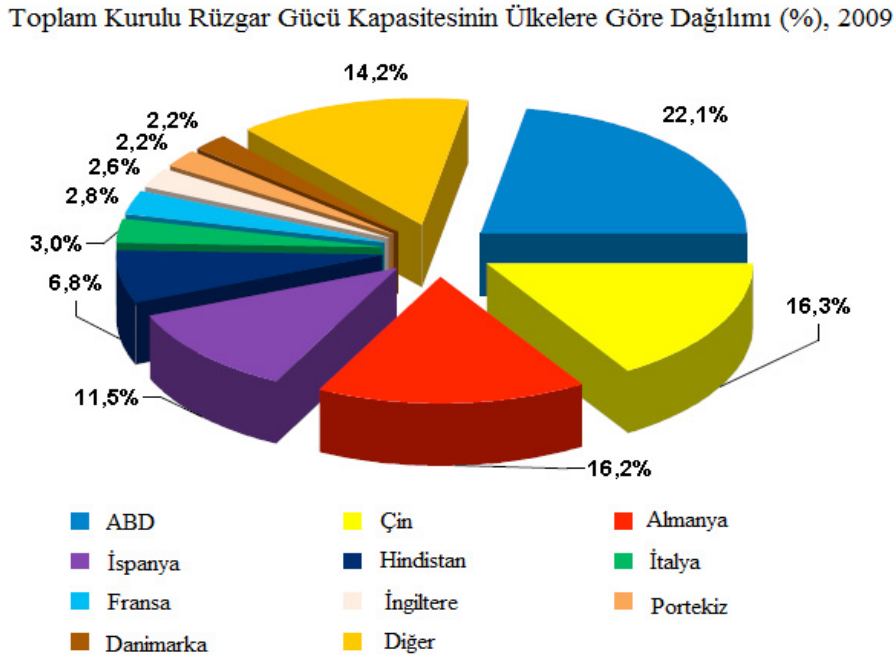


Kaynak: World Wind Energy Report 2009, WWEA, 2010

2009 yılında gerçekleşen kapasite artışlarının kıtalara göre dağılımı incelendiğinde Asya Kıtası % 40,4' lük pay ile ilk sırada; Kuzey Amerika %28,4' lük pay ile ikinci ve Avrupa %27,3' lük pay ile üçüncü sırada yer almaktadır. Ancak burada belirtilmesi gereken husus rüzgâr gücünden enerji üretimi söz konusu olduğunda dünya rüzgâr enerjisi pazarının öncü ülkelerinin Avrupa'da bulunduğudır. Rüzgâr enerjisi kurulu kapasitesinin kıtalara göre dağılımı incelendiğinde, 2002 yılı itibariyle Avrupa kıtasının %75'lik pay ile ilk sırayı aldığı, Kuzey Amerika kıtasının %16'lık pay ile ikinci sırayı ve Asya kıtasının ise %3'lük pay ile üçüncü sırayı aldığı görülmektedir. Dünyanın geri kalanının payı ise %1'dir (WWEA 2009). Avrupa ülkeleri arasında ise Almanya ve İspanya ilk iki sırada yer almaktadır. Rüzgâr enerjisi için en başarılı pazarlar arasında sayılan Danimarka, Almanya ve İspanya gibi ülkelerde rüzgâr gücü elektrik üretiminde kullanılan en önemli kaynak olarak belirmektedir. Bu ülkelerden Danimarka hali hazırda elektrik üretiminin %20'lik kısmını rüzgâr gücünden

sağlamaktadır. Danimarka'yı takiben Portekiz %15, İspanya %14 ve Almanya %9'luk pay ile elektrik üretiminde rüzgâr gücünün önemli bir kaynak olarak kullanılmakta olduğu pazarın diğer öncü ülkeleridir (WWEA 2009).

Şekil 26: Toplam Kurulu Rüzgâr Gücü Kapasitesinin Ükelere Göre Dağılımı (2009, %)



Kaynak: World Wind Energy Report 2009, WWEA, 2010

WWEA 2009 Raporuna göre 2009 yılı sonundaki küresel kurulu rüzgâr gücü kapasitesinin dünya elektrik üretimine katkısı 340 TWh olarak gerçekleşmiştir ki bu miktar küresel elektrik talebinin %2'lik kısmına tekabül etmektedir. Bu enerji miktarı, aynı zamanda, 60 milyonluk nüfusu ile dünyanın yedinci büyük ekonomisi konumundaki İtalya'nın enerji ihtiyacına eşittir. Yine aynı rapora göre, rüzgâr sektörünün 2008 yılında 40 milyar Euro olan cirosu ekonomik krize rağmen 2009 yılında 50 milyar Euro (70 milyar \$) olarak gerçekleşmiş ve bu sektörde dünya

genelinde 550.000 kişiye istihdam sağlanmıştır. 2012 yılında rüzgâr endüstrisinin 1 milyon iş olanağı yaratması beklenmektedir.

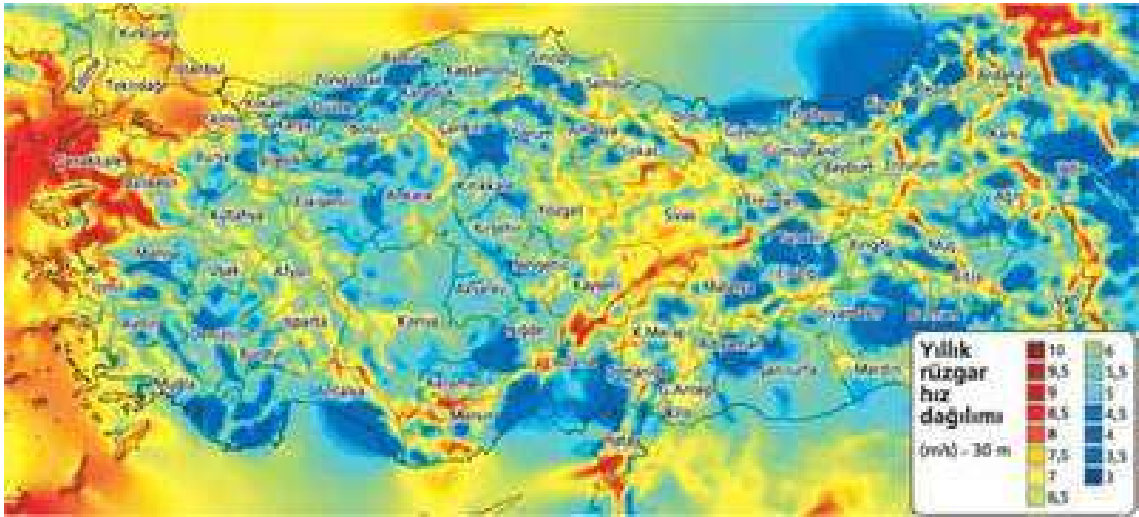
1.3. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi, Türkiye Cumhuriyeti’nin bugün kapladığı coğrafi alanın ve Anadolu’nun tarihi ve ekonomik gelişiminde önemli rol oynamıştır. Bu ifadenin ilk belgelenmiş kanıtları Troya (Truva) antik kentine kadar uzanmaktadır. Dünyanın pek çok yerinde olduğu gibi Türkiye’de de rüzgâr milleri ilk olarak sulama ve öğütme gibi amaçlarla kullanılmıştır (Şahin 2004). 1940’lı yıllarda bazı küçük köylerin elektrikleştirilmesinde rüzgâr enerjisinin kullanıldığı bilinmektedir. Daha sonra yedek parça sorunu olduğu için bu faaliyetler önemini kaybetmiştir. Ancak, 1961 yılında yapılan bir envanter çalışması Türkiye’de 718’i kuyudan su çekmek ve 41’i ise elektrik üretmek için toplam 859 adet rüzgâr türbininin kullanıldığını göstermiştir (Şen 2002). 1960’lardan bu yana, birçok üniversitede rüzgâr enerjisi üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) Marmara Araştırma Merkezi, 1980’den bu yana Türkiye için bir rüzgâr atlası geliştirme yönündeki çalışmalara başlamıştır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel müdürlüğü (EİE) Genel Müdürlüğü bazı rüzgâr ölçümleri yapmıştır (Şahin 2004). Türkiye’de rüzgâr çalışmaları tam anlamıyla 1990’lı yıllardan sonra başlamış; Türkiye’nin rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi için yapılan ilk çalışma 1998 yılında TÜSİAD’ın “21. yüzyıla Girerken Türkiye’nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi” başlıklı raporunda açıklanmıştır. Buna göre, Türkiye karasal alanlarda 20000 MW ve denizlerde 15000 MW olmak üzere kullanılabilir rüzgâr gücü potansiyeline sahiptir (Öztopal vd. 2010; Güçlü ve Uyumaz 2010). Rüzgârdan elektrik üretilmesi, Türkiye’de rüzgâr enerjisinin gelişmesi, 1998’de ülkenin çeşitli yerlerinde birkaç rüzgâr tesisi kurulduğunda başladı. 1998’in Ocak ayında, ETKB’de rüzgâr enerjisi projesi için kayıtlı 25 başvuru vardı (Şahin 2004). Türkiye’de kurulan ilk rüzgâr santrali, Alize A.Ş., 1998 yılında 1.5 MW kurulu güç ile Çeşme’de kurulmuştur. Yine 1998 yılında 7.2 MW kurulu güç ile ARES A.Ş. devreye girmiş ve ARES’i 2000 yılında 10.2 MW kurulu güç ile devreye giren BORES A.Ş. izlemiştir. 2002 yılında Devlet Meteoroloji İşleri ve Elektrik İşleri Etüt

İdaresi tarafından hazırlanan Türkiye Rüzgâr Atlası yayınlanmıştır. Türkiye' nin kurulu rüzgâr gücü 2008 yılı sonunda 419.15 MW'a; 2009 yılı sonunda 806,65 MW'a ve 2010 yılı Temmuz ayı itibariyle de 1142.35 MW' a ulaşmıştır (Şenkal ve Çetin 2010).

“Türkiye coğrafi konumu ve hüküm süren iklim koşulları itibarı ile rüzgâr enerjisi bakımından, teorik olarak elektrik enerjisinin tamamını karşılayabilecek seviyededir. Ülkemiz; toplam 8000 km'yi bulan ve bunun büyük bir kısmında rüzgâr enerjisi kullanılabilir durumda bulunan sahil şeridinde sahiptir. Türkiye'nin teorik olarak hesaplanan rüzgâr enerjisi potansiyeli 83.000 MW'dır.” (Yayla vd. 2010). Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin yaptığı sınıflandırmaya göre, rüzgâr enerjisinden yararlanılacak yükseklikteki ortalama rüzgâr hızları, 6,5 m/s için 'iyiye yakın'; 7,5 m/s için 'iyi' ve 8,5 m/s için 'çok iyi' olarak belirtilmektedir. Buna göre Ege ve Marmara Bölgeleri ile Batı Karadeniz ve Hatay civarında rüzgâr enerjisinden yüksek verimle yararlanılabileceği açıktır (Yamak 2006).

Şekil 27: Türkiye Rüzgâr Atlası



Kaynak: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE) Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası;
Not:30 metre yükseklik için

Ülkemizde 80.000 MW ile 100.000 MW arasında rüzgâr enerjisi teknik potansiyelinin bulunduğu değişik kişi ve kuruluşlar tarafından tahmin edilmektedir (Şen 2002). Ekonomik potansiyelin ise teknik koşullara bağlı olarak yaklaşık 10.000 MW düzeyinde olduğu tahmin edilmekle birlikte toplam kurulu kapasite bu düzeyin oldukça altındadır (Kaygusuz 2010). Türkiye’de elektrik üretiminin sadece %0,05’i rüzgâr enerjisinden sağlanmaktadır. Söz konusu oran hidrolik tesisler için % 33,25 iken, konvansiyonel yakıtlar ile üretim için % 66,70 olup bunun da yaklaşık yarısı yakıtı doğalgaz olan tesislere ilişkindir. Dünya’da elektrik üretiminde gazın payı % 19,2 iken Türkiye’ de bu oran 2000 yılı için %34; 2005 yılı için ise %43’tür. Türkiye’nin elektrik üretiminde yakıt olarak kullanılan bu yüksek miktarlardaki doğal gazın ithal edildiği gerçeği ekonomik açıdan kritik bir noktadır (Güler, 2009). Mevcut durumun nedenleri ekonomik açıdan incelenirken Türkiye’nin enerji politikası kapsamında, yenilenebilir kaynaklar için uygulanmakta olan yasal düzenlemeler ve teşvik politikalarının yeterliliği ile Türkiye’deki tüm rüzgâr türbinlerinin ithalat yoluyla satın alındığı hususlarına dikkat verilmelidir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında özellikle rüzgârın, elektrik üretim tesislerinin yatırım ve işletim maliyetleri küresel ölçekte giderek azalarak konvansiyonel yakıtlar ile rekabet edebilecek düzeye doğru gerilemektedir. Yenilenebilir enerjiler 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 (Şahin 2010b).

Tablo 8: Çeşitli ülkelerde rüzgâr elektriği için uygulanan minimum alım fiyatları

Ülke	Minimum Fiyat (Euro cent/kWh)
Almanya	6.2- 8.5
Fransa	8.4
Portekiz	7.5- 7.9
Avusturya	7.8
İspanya	6.3- 7.5
Yunanistan	6.4
Hollanda	9.6- 9.9
Türkiye	5- 6

Kaynak: Güler 2009; Akdağ ve Güler 2010

Not: 29/12/2010 tarihinde kabul edilen yasa değişikliği ile rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisi için söz konusu fiyat 7.3 dolar sent olarak belirlenmiştir.

Türkiye’de rüzgâr enerjisinin gelişimini engelleyen önemli faktörler şöyle özetlenebilir: (Erdoğan 2009)

- Kurumlar, kuruluşlar, ajanslar ve diğer paydaşlar arasında daha yüksek düzeyde koordinasyon ve işbirliğini gerektiren etkin bir kurumsal yapının eksikliği,
- Rüzgâr gücü kullanımının mevcut ve muhtemel maliyetleri hakkındaki erişilebilir bilginin yetersizliği
- Türkiye’nin rüzgâr kaynağına ilişkin veri bankası eksikliği
- Yetersiz kredi imkânları (özellikle küçük ölçekli projeler için)
- Yerel düzeyde altyapı ve yönetim bilgisi desteği ihtiyacı
- Özel sektörün yetersiz katılımı
- Yeterli düzeyde bilgiye sahip teknik eleman ihtiyacı
- Planlama, fizibilite ve proje kontrol aşamalarında karşılaşılan zorluklar
- Sektördeki politika araçlarının yetersizliği
- Halkın kabulü ve istekliliği

- Teknolojik riskler (Bazı teknolojilerin geçerliliği kanıtlanmışken, bazılarının hala araştırma, geliştirme veya yapılandırma safhasında olması bazı yatırımcılar için risk olarak görülebilir).

Diğer yandan, Türkiye’de bulunan rüzgâr türbinlerinin tamamı ithal edilmiştir. Bu durum da ülkemizde rüzgâr enerjisinin kullanımının hızla yaygınlaşmasının önündeki engellerden biridir. Türkiye’de rüzgâr türbinlerinin ve ilgili alt endüstrilerin kurulması ile tesislerin kurulum aşamasındaki maliyetlerin önemli ölçüde düşeceği öngörülebilir. Ayrıca, yerli rüzgâr türbini üretimi, doğrudan ve dolaylı olarak iş imkânları ve vergi gelirleri de sağlayabilir. Bu nedenle, rüzgâr türbini endüstrisinin oluşum ve gelişim aşamalarında da devlet politikaları ve destek mekanizmaları oldukça önemli faktörlerdir.

Bunların yanı sıra, Türkiye öncelikle akılcı ve tutarlı bir enerji politikası ve kısa, orta ve uzun vadeli hedefleri, eylemleri ve sonuçlarını içeren bir eylem planı geliştirmeli ve yayınlamalıdır. Ardından, yenilenebilir enerji kaynaklarının, Türkiye’nin enerji politikasındaki yeri bu plan içinde spesifik olarak belirtilmelidir. Rüzgâr gücüne ilişkin mevcut yasalar AB yönergelerine uygun olarak yeniden düzenlenmelidir. Mevcut yasal düzenlemeler, rüzgâr gücüyle elektrik üretimini teşvik etmeye yeterli ancak uygulamada yetersizdir (Erdoğan, 2009). Bu aşamada düzenleyici kurulların özellikle EPDK’nın rolü önemlidir. İspanya’da bundan 10 yıl önce GW’larla ölçülen kurulu rüzgâr kapasitesinden bahsetmek tam anlamıyla gerçekdışı görülmekteydi. Bunun nedenlerinin en başında da sistemin o kadar fazla rüzgâr gücü kullanımıyla başa çıkamayacağı, çıksa bile maliyetlerin çok fazla olacağı gösterilmekteydi. Ancak, İspanya’da bugün, sistemde herhangi bir problem yaşanmaksızın 15 GW kurulu kapasite mevcuttur. Hatta 2020 yılı için 40 GW hedefi artık gerçekdışı görünmemektedir. İspanya’nın bu başarısında, düzenleyici kurulun ve YEK operatörlerinin, yenilenebilir enerji kaynaklarının- özellikle de rüzgârın- sisteme hem teknik hem de ekonomik entegrasyonunun sağlanmasına yönelik çalışmalarının payı büyüktür (Abbad 2010) .

1.4. Rüzgârın Oluşumu

Dünya'nın küresel şekli, dönme eksenin eğimi ve dünya yüzeyinin homojen olmayan yapısı neticesinde güneşten gelen enerji, yeryüzünün farklı bölgelerinin farklı miktarlarda ısınmasına; meydana gelen bu basınç ve sıcaklık farkları da rüzgârların oluşmasına neden olur.

Atmosferin toplam enerjisi, kinetik ve potansiyel enerji olarak ikiye bölünmüştür. Rüzgârlar, atmosferde potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümünün sonucu; esas olarak basınç kuvvetlerinin bir ürünüdür. Güneş enerjisi yeryüzüne ulaştığı zaman büyük ölçekli atmosfer hareketleri oluşur, aynı zamanda çeşitli etkilerle de yerel değişiklikler meydana gelir. Yıllık ortalamalar dikkate alındığında, gelen güneş radyasyonu, giden güneş radyasyonuna eşittir. Fakat tropiklerde net bir enerji kazancı oluşurken, kutuplarda ise net bir enerji kaybı oluşur. Bu dengesizliği ortadan kaldırmak için atmosfer, sıcak havayı kutuplara, soğuk havayı ise ekvatora iletir.* Ekvator civarında hava ile temas halinde bulunan sıcak ve nemli hava konveksiyonla yükselir, yükseldikçe soğur, belli bir seviyeye yükseldikten sonra daha soğuk olan kuzey enlemlere doğru yönelir ve 30° kuzey enlemlerine yaklaşıncaya kadar tekrar yer yüzeyine doğru alçalır. Burada nispeten daha soğuk ve kuru olan hava ekvatora doğru yönelir. Buna "Hadley Sirkülasyonu" denir. Dünyanın dönüşü sebebi ile meydana gelen Coriolis Kuvveti nedeniyle havanın hareketi, hareket yönünden sağına doğru saptırıldığından 0° – 30° enlemleri arasında yer yüzeyinde oluşan rüzgârlar temel olarak Kuzey-Doğu karakterli olurlar. Hakim rüzgârlar Coriolis kuvvetinin neticesidir (Türksoy 2001).

Karaların ve denizlerin farklı ısınmaları da hava akımlarına neden olurlar. Yeryüzünün topografik yapısı, binalar ve ağaçlar, rüzgârın farklı şiddette olmasına neden olurlar. Bu bilgiler doğrultusunda kuvvetli ve zayıf rüzgâr alanlarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

Kuvvetli rüzgâr alanları;

1- Kuvvetli basınç gradyanının bulunduğu bölgeler,

*İTÜ meteoroloji mühendisliği bölümü yayınlanmamış bitirme tezinden alıntıdır.

- 2- Yüksek ova ve platolar,
- 3- Sürekli inici akış bölgeleri,
- 4- Hakim rüzgâr yönüne paralel vadiler,
- 5- Tepe ve dağ zirveleri,
- 6- Jeostrofik rüzgâr ve termal etkileşimlerin meydana geldiği kıyı şeritleri.

Zayıf rüzgâr alanları;

- 1- Hakim rüzgâr yönüne dik vadiler,
- 2- Engebelerle gölgelenmiş arazi,
- 3- Kısa, dar vadi veya kanyonlar,
- 4- Pürüzlülük yüksekliğinin büyük olduğu alanlar.

Herhangi bir bölgedeki rüzgâr potansiyelinin saptanması ve rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerine uygun yer seçilebilmesi için bu kuvvetli ve zayıf rüzgâr alanlarının doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekir.

1.5. Rüzgârın Ölçülmesi Ve Değerlendirilmesi

Varlığını basınç farkına borçlu olan rüzgâr, doğal olarak gün içinde basınçta meydana gelebilecek değişikliklerden de birinci derecede etkilenmektedir. Yaklaşık 6'şar saatlik periyotlarla gerçekleşen basınç şartlarındaki bu değişiklik rüzgârların varlığı ve şiddeti üzerinde de etkili olmaktadır. Ayrıca rüzgâr yönü ve hızının hiçbir zaman sabit olmadığı, sık sık 10-15 derece civarında yön değiştirdiği ve hızının da devamlı olarak azalıp, çoğaldığı bilinmektedir (Akova 2008). Rüzgar, hız ve yön olmak üzere iki değişkenle ölçülür. Rüzgâr gücünden elde edilebilecek enerji miktarının hesaplanmasında kullanılan en önemli veri rüzgâr hızı olup rüzgâr hızı ölçümleri rüzgâr enerji santrallerinin projelendirilmesinde hayati öneme sahiptir. Belirlenen bölgedeki rüzgâr potansiyeline ilişkin rüzgâr hızı, rüzgâr yönü gibi ölçümlerin yapılabilmesi için araziye doğru temsil edebilecek uygun gözlem noktalarına rüzgâr gözlem istasyonları kurulur ve bu istasyonlardaki bir direğin üzerine yerleştirilmiş ölçüm aletleri ile ilgili

veriler toplanır. Rüzgâr hızı ve yönünü belirlemek amacıyla yapılan ölçümler, ölçüm amacına göre değişmektedir. Meteorolojik amaçlı (klimatolojik, sinoptik, hava kirliliği v.) yerel rüzgârların ölçümleri Dünya Meteoroloji Örgütü (DMÖ) kurallarına göre 10 metrede yapılmaktadır. Enerji amaçlı rüzgâr ölçümlerinde ise rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve çevre sıcaklığı gibi parametreler 30 metre ve mümkünse türbin göbek yüksekliğinde, en az bir yıl periyodik olarak (10 dk, 1 saat) ölçülmeli ve bilgisayar ortamında değerlendirilebilecek şekilde veri paketi olarak tespit edilmelidir (Kazıcı 2009). Rüzgâr hızı ölçümleri genellikle analog veya sayısal anemometreler vasıtasıyla yapılmaktadır. Bunlar arasında kupa anemometre, pervane tipli anemometre veya ultrasonik anemometre gibi farklı çeşitler bulunmakla birlikte en yaygın olarak kullanılanı kupa anemometrelerdir.

Rüzgârın hızı hava, topoğrafya ve mevcut engellere bağlı olarak değişmekte bu değişim nedeniyle de taşıdığı enerji miktarı farklılaşmaktadır. Rüzgâr hızının değişkenliğinden dolayı, rüzgâr enerjisi potansiyelinden üretilebilecek enerji, yıllık ortalama hız değerlerinden hesaplanan enerjiden daha fazla olmaktadır. Belli bir bölgede üretilebilecek elektrik enerjisi miktarının hesabında, yıllık ortalama rüzgâr hızından çok, gözlemlenen dağılım veya Weibull dağılımıyla hesaplanmış rüzgâr hızı sıklık dağılımı kullanılmaktadır (Akova 2008). Rüzgâr hızı verilerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesinde Weibull dağılımın yanı sıra Rayleigh dağılımı ve logaritmik normal dağılım gibi teorik dağılımlar da kullanılmaktadır. Ancak rüzgâr hızı veya rüzgâr şiddeti verilerinin temsilinde yaygın olarak kullanılan yöntem Weibull dağılımıdır. Özellikle yeryüzüne yakın yerlerde rüzgâr şiddeti sıklık yoğunluğunun Weibull dağılımına uyduğu şimdiye kadar yapılmış binlerce veri işlem yöntemlerinden ortaya çıkmıştır (Şen 2002). Bu çalışmada sadece Weibull dağılımı ve onun özel bir hali olan Rayleigh dağılımı açıklanacaktır.

Yıllık rüzgâr ölçümleri incelendiğinde genel olarak çok şiddetli rüzgârların nadir, ılımlı ve şiddetli rüzgârların ise daha sık gerçekleştiği görülür. Bir bölge için rüzgâr dağılımı ya ölçülerek ya da ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde Weibull dağılımı ile belirlenir (Gökçınar 2008). Weibull parametreleri kullanılarak

herhangi bir rüzgâr hızının frekansı ile ilgili hassas tahminlerde bulunmak mümkün olabilmektedir (Oral ve Emekçi 2010).

Rüzgâr hızı v olmak üzere iki parametrelili Weibull dağılımının sıklık yoğunluk fonksiyonu,

$$f(V) = \frac{k}{c} \left[\frac{v}{c} \right]^{k-1} \exp \left[- \left[\frac{v}{c} \right]^k \right] \quad v > 0 \quad (1)$$

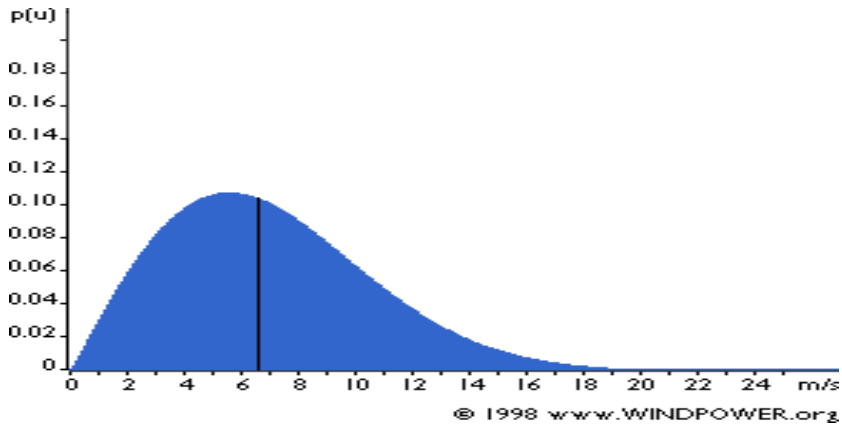
Denklem 1’de integral alarak rüzgâr şiddeti toplam sıklık yoğunluk ifadesi,

$$F(v) = 1 - \exp \left[- \left[\frac{v}{c} \right]^k \right] \quad (2)$$

bulunur. (Şen 2002)

Burada $f(V)$ rüzgâr şiddeti frekansı, V rüzgâr şiddeti (m/sn), c ölçek parametresi, k boyutsuz şekil parametresidir.

Şekil 28: Weibull Dağılımı



Yukarıdaki şekil rüzgâr hızı verilerinin Weibull dağılımını göstermektedir. Yatay ekseninde rüzgâr hızları; dikey ekseninde de bu hız değerlerinin gerçekleşme sıklıklarına (frekanslarına) dayalı gerçekleşme olasılıkları görünmektedir. Weibull dağılım fonksiyonu eğrisinin altında kalan alan 1’e eşittir. Şekil 28’deki eğriye göre

rüzgâr ortalama 7m/s hızla esmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi ılımlı ve düşük şiddetteki rüzgârlar, yüksek şiddetteki rüzgârlara göre daha sık gerçekleşmiştir. 6.6 m/s değeri, rüzgâr hızı verilerinin medyan noktası olup bu noktadan çizilen çizgi eğrinin altındaki alanı iki eşit parçaya bölmektedir. Bunun anlamı, rüzgârın zamanın %50' sinde medyan değeri olan 6.6 m/s' den daha düşük; diğer %50' sinde ise medyandan yüksek hızlarda esmiş olduğudur. *

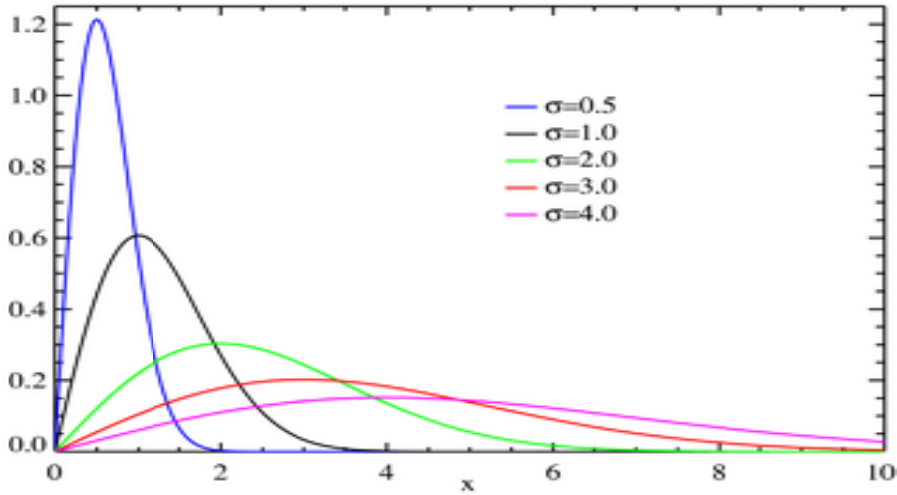
Weibull dağılımı, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirlenir. Şekil ve ölçek parametrelerinin tahmininde rüzgâr şiddetinin ortalaması ve standart sapma değerleri önem taşır. Özellikle standart sapma ve çarpıklık katsayısı türbülansı ifade eden büyüklüklerdir. Bunun yanında standart sapma esaslarına bağlı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

Weibull dağılımının şekli, şekil parametresine bağlı olarak belirlenir. Kuzey Avrupa'da ve dünyanın diğer pek çok bölgesinde şekil parametresinin değeri yaklaşık olarak 2'ye eşittir. Weibull şekil parametresi rüzgâr şiddeti kararlılığı ile yakından ilgilidir. Şekil parametresinin yüksek değerleri için rüzgâr şiddeti kararlılığı yüksek, düşük değerleri için rüzgâr şiddeti kararlılığı düşüktür (Gökçınar 2008). Rüzgâr hızının genel olarak sabit olduğu bölgelerde yani rüzgâr verilerinin medyan etrafındaki değişkenliğinin az olduğu bölgelerde şekil parametresi 3 değerini alırken düşük hızdaki rüzgârlar kadar yüksek hızdaki rüzgârların da var olduğu yani rüzgâr hızı değişkenliğinin yüksek olduğu bölgelerde şekil parametresi 2'nin altında değer almaktadır. Diğer taraftan, k değerinin 2'den olan sapma miktarı, Weibull dağılımının Rayleigh dağılımından olan sapma miktarını verir. Yapılan değişik çalışmalar, yeryüzü yakınlarında bu sapmanın fazla olduğunu ancak yukarılara doğru gidildikçe azaldığını göstermiştir (Şen 2002). Rüzgâr türbini üreticileri makinelerinin standart performans değerlerini belirlerken genellikle bu değeri 2 kabul ederler. Şekil parametresinin 2 değerini almasıyla Weibull dağılımı da Rayleigh dağılımı adını alır. Rayleigh dağılımı türbin tasarımcıları için önemli bir referanstır (Toraman 2008).

* <http://www.reuk.co.uk/Wind-Speed-Distribution-Weibull.htm> (30.07.10)

Weibull dağılımı fonksiyonunda şekil parametresi olan k değeri 2'ye ve ölçek parametresi $c\sqrt{2}\sigma$ 'ya eşitlenirse Rayleigh dağılımı fonksiyonu elde edilir (Şen 2002).

Şekil 29: Rayleigh Dağılımına Şekil Parametresinin Etkisi



Kaynak: www.windpower.org

1.6. Rüzgârın Enerji Formülasyonu

Rüzgârdaki enerji miktarını etkileyen faktörler, gerek rüzgâr türbini tasarımında gerekse rüzgâr enerji santrallerinin projelendirilmesinde kullanılan en önemli araçlardır.

Rüzgâr enerjisi, rüzgârın hızı dolayısıyla taşıdığı kinetik enerjidir. Rüzgârdaki enerji miktarı, rüzgârın hızının ve hareket halindeki havanın kütesinin bir fonksiyonudur. Kütle (m), hız (V) ve enerji (E) arasındaki bu ilişki fizik prensiplerine göre, kinetik enerji eşitliği ile ifade edilir (Burton 2008).

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1)$$

Burada “ m ”, v hacminden V hızıyla geçen ve yoğunluğu ρ olan havanın kütlesi olup doğrudan ölçülememektedir. ρ havanın yoğunluğunu temsil etmek üzere, kütle eşitlik (3)'deki gibi ifade edilebilir.

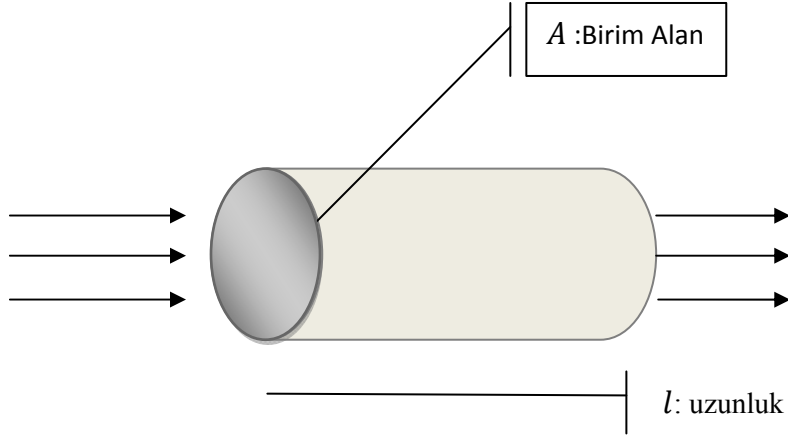
$$\rho = m/v \quad (2)$$

$$m = \rho \cdot v \quad (3)$$

(3) no'lu eşitlik (1)'de yerine koyulursa;

$$E = \frac{1}{2} \rho v V^2 \quad (4)$$

eşitliği elde edilir. Rüzgârın düşey bileşeni yatay bileşeninin yanında çok küçük olduğu için ihmal edilir (Şen 2002). Bu nedenle rüzgârın esme yönüne dik alan A , rüzgâr yönündeki uzunluk da l ile gösterilirse burada hacim, V rüzgâr hızıyla t süresince kat edilecek mesafe, hareket kanunundan yararlanarak bulunabilir.



Şekildeki silindirin hacmi ile birim zamanda silindirin içindeki havanın hacmi birbirine eşit olacağından, v hacim, l silindirin uzunluğu ve A silindirin taban alanını göstermek üzere,

$$v = l \cdot A \quad (5)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Hız kanunundan hareketle, V hız; l yol; t zamanı göstermek üzere,

$$V = \frac{l}{t} \quad (6)$$

V hızındaki hava, t zamanında l kadar yol alır:

$$l = V \cdot t \quad (7)$$

(7) nolu eşitlik (5) de yerine koyulursa,

$$v = V \cdot t \cdot A \quad (8)$$

elde edilir ki bu, A alanından t zamanında V hızıyla geçen havanın hacmidir.

Buradan da (8) no'lu eşitlik (3)'de yerine koyularak havanın kütlesi elde edilir:

$$m = \rho \cdot V \cdot t \cdot A \quad (9)$$

Nihayet, (9) no'lu eşitlik yani hareket halindeki havanın kütlesi, (1) no'lu eşitlikte yani kinetik enerji formülünde yerine konularak,

$$E = \frac{1}{2} \rho V t A V^2$$

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot t \cdot V^3 \quad (10)$$

Rüzgâr Enerjisi Formülü elde edilir. (10) no'lu eşitlik A alanından t zamanında V hızıyla geçen havanın taşıdığı kinetik enerji miktarını ifade etmektedir.

Havanın yoğunluğu, deniz seviyesindeki standart atmosfer koşullarında kabul edilen yoğunluk olup sayısal değeri sabittir.

$$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

Burada t=1 ve A=1 alınırsa, birim zamanda birim alandaki enerji, E_B , yani rüzgârın bir noktadaki enerjisi elde edilir.

$$E = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (11)$$

11 no'lu eşitlik rüzgârdaki kinetik enerjinin, rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı olarak arttığını ima eder. Bu durum hassas rüzgâr ölçümlerinin önemini vurgular. Rüzgâr hızı ölçümlerindeki ufak sayılabilecek hatalar rüzgâr sahasının rüzgâr enerji potansiyelinin belirlenmesinde büyük hatalara sebebiyet verebilir.

Rüzgâr enerjisi hesaplamalarında kullanılan birimler :

$$\rho = [\text{kg} / \text{m}^3]$$

$$E = [\text{Watt} / \text{m}^2]$$

$$V = [\text{m} / \text{s}]$$

$$E = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad [\text{kg} / \text{m}^3 \quad [\text{m}^3 / \text{s}^3]]$$

$$[\text{Watt}] = [\text{kgm}^2 / \text{s}^3] \text{ olduğundan ,}$$

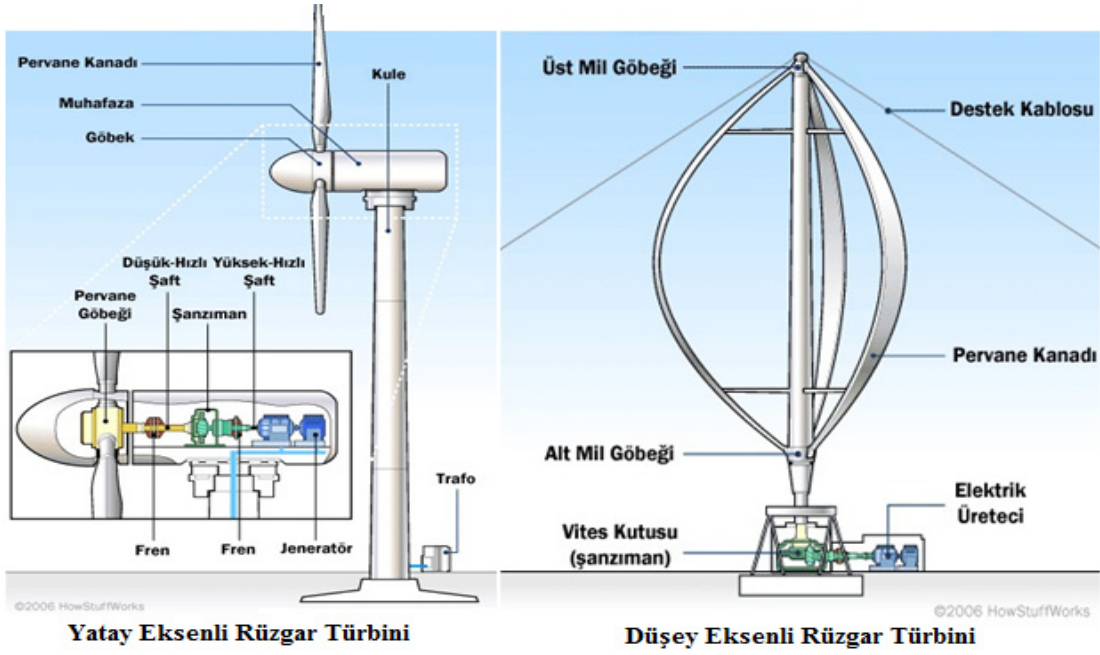
E : [Watt/m²] olarak ifade edilebilir.

1.7. Rüzgâr Türbinleri

“Hava akımları da denilen rüzgâr, önüne bir engel konulması veya sabit bir engelle karşılaşması halinde, onun üzerine bir basınç icra eder. Böyle bir engelin harekete müsait olması durumunda, rüzgâr, o engelin hareket etmesine de sebep olur. İşte bu mantıktan hareketle, bir mil etrafında dönebilecek bir fırıldoğan (türbin) rüzgâr etkisi ile o mil etrafında dönmesi mümkün olabilecektir. Bu fikir günümüzdeki rüzgâr türbinleri ile eski çağlardaki yel değirmenlerinin ilk çalışma ilkelerini teşkil eder.” (Şen 2002) Rüzgâr türbinleri, rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinelerdir. Bu mekanik enerji daha sonra jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bir rüzgâr türbini, esas olarak çevredeki engellerin rüzgârı kesemeyeceği yükseklikte bir kule, bunun üzerine yerleştirilmiş bir gövde ve rotordan meydana gelmektedir (Akova 2008). Kullanımdaki rüzgâr türbinleri boyut ve tip olarak çok çeşitlilik gösterse de genelde türbinler, rotorların konumlarına yani dönme eksenlerine göre sınıflandırılırlar. Rüzgâr türbinleri dönme eksenine göre yatay eksenli ve düşey eksenli olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Her ne kadar türbinler yatay eksenli ve

düsey eksenli türbinler olarak ikiye ayrılırsalar da, her iki tip türbin de aynı aerodinamik prensiplerle çalışırlar (Toraman 2008).

Şekil 30: Eksenlerine Göre Rüzgâr Türbinleri



Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde türbin mili düşey ve rüzgârın geliş yönüne diktir. Değişen rüzgâr yönüne göre dönebildikleri için her yönden gelen rüzgârı kabul edebilirler. Ancak verimleri düşük olduğu için enerji üretiminde tercih edilmezler. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde dönme eksenini rüzgâr yönüne paralel olup kanatlar rüzgâr yönüyle dik açı yaparlar. Enerji üretiminde kullanılan türbinler çoğunlukla rüzgârı önden alacak şekilde tasarlanmış yatay eksenli türbinlerdir. Üretilecek güç, türbinlerin pervane çapına bağlı olmakla birlikte rüzgâr hızına da bağlıdır (Toraman 2008, Güçlü ve Uyumaz 2010). Yüksek hızlarda çalışan yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kanat sayısı arttıkça verim artar. Ancak kanat sayısındaki artış maliyetleri de arttırdığından genel olarak tercih edilen tip 3 kanatlıdır. Bu türbinlerde verim yaklaşık olarak % 40 -45 dolaylarındadır. Diğer yandan, Betz Yasasına göre rüzgâr türbinlerinde aerodinamik verim en fazla %59'dur. Buna göre bir rüzgâr türbinleriyle

rüzgârın tüm enerjisinden faydalanmak imkânsızdır. “Rüzgâr, rüzgâr türbininden, rüzgârdan aldığımız enerji ölçüsünde yavaşlamış olarak çıkar. Eğer rüzgârdaki tüm enerjiyi alabilseydik, rüzgârın türbinden durgun halde çıkması gerekirdi. Fakat bu durumda da türbine rüzgârın diğer taraftan girmesi engellenir ve hiç enerji elde edilemezdi.” (Toraman 2008) Betz yasası ilk olarak alman fizikçi Albert Betz tarafından 1919’da formüle edilmiş olup rüzgârdaki kinetik enerjinin en fazla 16/27’sini (%59,3) rüzgâr türbinleri vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürebileceğini vurgular. Bu oran maksimum güç katsayısı veya maksimum kapasite faktörü olarak adlandırılır ve rüzgâr türbininin rotor performansı bu güç katsayısı ile ifade edilir. Kapasite faktörü, türbinin rüzgâr tayfindaki kullanılabilir enerjiyi ne derecede etkili dönüştürdüğünü yansıtır (Şenkal ve Çetin 2010, Toraman 2008)

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} \approx 0.5926$$

Böylece, rüzgârdan elde edilebilecek teorik enerji miktarı, C_p güç katsayısını ve A türbin pervanelerinin taradığı alanı temsil etmek üzere ve $t=1$ alındığında yani birim zamanda,

$$E = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \text{ biçiminde formüle edilebilir.} \quad (12)$$

Bir türbinin cut-in hızı ne kadar düşük ve cut-out hızı ne kadar yüksek ise kapasite faktörü de o oranda yüksektir (Şenkal ve Çetin 2010). Çağdaş rüzgâr türbinleri için maksimum kapasite faktörü yaklaşık olarak %40’tır. Bunun nedeni hava direnci, rotorun oluşturduğu türbülans ve aktarma organları ile elektrik sistemi gibi noktalardaki kayıplardır. (Fujisawa, 1987)

1.7.1. Rüzgâr türbinleri için yer seçimi

Rüzgâr çiftliklerinin projelendirilmesi süreci, diğer güç istasyonlarınıninkine benzer bir süreç olup rüzgâr kaynağının niteliğinden ileri gelen farklı gereklilikler de mevcuttur. Rüzgâr türbinlerinin, enerji üretiminin maksimize edilebilmesi için yüksek rüzgâr hızlarının gözlemlendiği yerlere kurulması gerekirken boyutları nedeniyle

oluşturdukları görünüm ve benzeri çevresel etkilerin de düşünülmesi gerekmektedir. Bir rüzgâr çiftliği projesi üç temel eleman üzerinde yapılandırılmalıdır: (1) teknik ve ticari konular, (2) çevresel değerlendirmeler ve (3) iletişim ve danışma. Genellikle teknik ve ticari konular daha kolay anlaşılır ve uygulanır ancak projenin başarısında, çevresel etkilerin değerlendirilmesi ile yerel bölge halkı ile iletişime geçme ve planlama uzmanlarına danışma süreçleri kritik bir öneme sahiptir (Burton vd. 2008).

Bir bölgedeki rüzgârın şiddeti ve diğer karakteristikleri, bölgenin meteorolojik ve topografik özellikleri neticesinde şekillenmektedir. Bir bölgede rüzgâr türbinleri kurulmadan önce en az bir yıllık rüzgâr hızı ve yönü ile ilgili ölçüm yapılması gerekmektedir (Çetin ve Başaran 2010). Rüzgâr gücüyle enerji üretiminde en etkili faktör rüzgârın hızı olup enerji üretim santralinin kurulacağı bölgede, ortalama ve saatlik rüzgâr hızı ölçümlerinin enerji üretim hedefine yönelik olarak yapılmış olması önem taşımaktadır. Meteorolojik ölçümler 10 m yükseklikte gerçekleştirilirken enerji üretim hedefine yönelik ölçümlerin 30 m ve mümkünse türbin göbek yüksekliğinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Rüzgârın hızının yanı sıra diğer karakteristikleri ve potansiyel olarak ne kadar enerji üretilebileceği gibi soruların doğru olarak cevaplanabilmesi için, belirlenen araziye temsil edecek nokta veya noktalarda birkaç farklı yükselti kademesinde rüzgâr hızını en az bir yıl süreyle ölçmek gerekmektedir (Akova 2008). Topografik özellikler bakımından rüzgâr enerji santrallerinin kurulumuna uygun yerler genellikle;

- a. Şiddetli basınç gradyanı olan yerler,
- b. Sürekli rüzgârlara paralel, yağışlı ve uzun vadiler,
- c. Şiddetli jeostrofik rüzgâr alanlarındaki yüksek, engebesiz tepe ve platolar,
- d. Şiddetli basınç gradyanlı, düşük eğimli sürekli rüzgâr vadileri,
- e. Şiddetli jeostrofik rüzgâr alanlarındaki tepeler, zirveler,
- f. Şiddetli jeostrofik rüzgâr veya termal gradyan alanlarına maruz kalmış kıyı şeritleri, olarak belirtilebilir (Akova 2008).

Rüzgâr türbini kurmak için uygun olmayan yerler; dik kenarlı tepeler, sivri tepeler, zayıf rüzgâr alanları, hakim rüzgâr yönüne dik vadiler, engebelerle gölgelenmiş

arazi, kısa, dar vadi veya kanyonlar, pürüzsüzlük yüksekliğinin büyük olduğu alanlardır (Gökçınar 2008). Diğer yandan, araziye ulaşılabilirlik, enerji nakil hatlarının durumu ve üretilecek enerjinin ulusal şebekeye entegrasyonu, arazide tarım alanı ya da bitki örtüsü bulunup bulunmadığı gibi arazi özellikleri de değerlendirilmelidir.

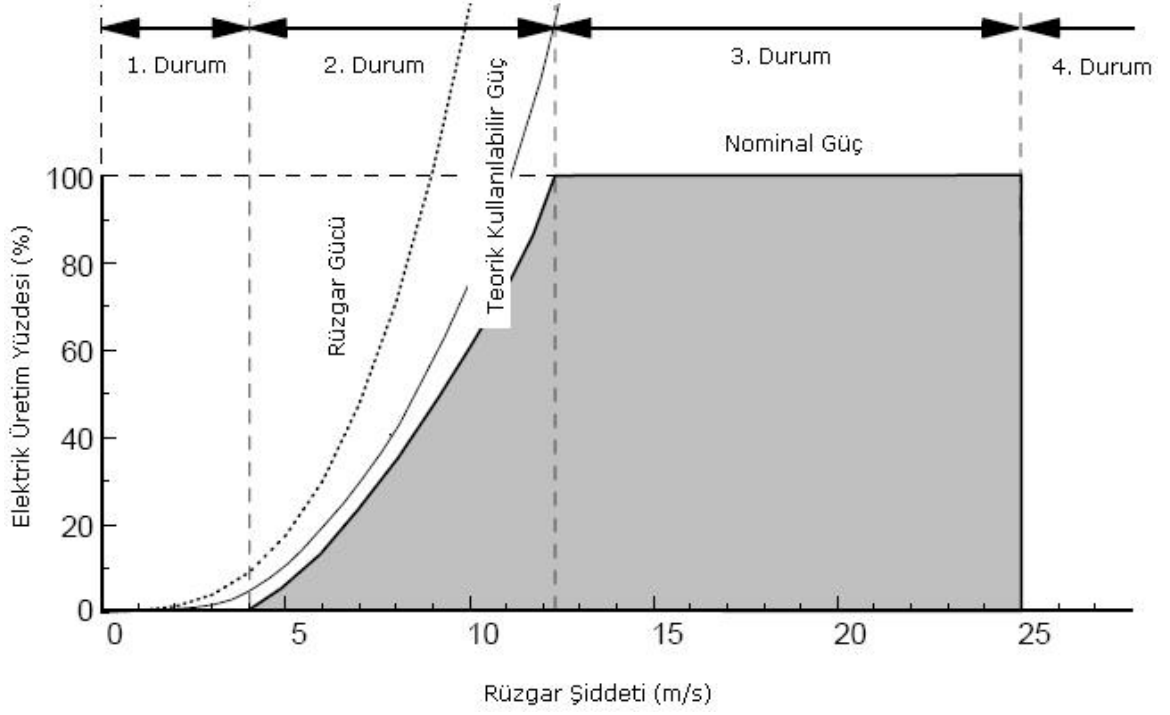
“Rüzgârdan ne kadar elektrik üretilebileceği, santrali kurulacağı yere, rüzgâr hızına ve frekansına bağlı olarak değişmektedir. Teorik olarak bu değer 0-100 arasında olması gerekmesine rağmen, ekstrem verimlerin %20-70 arasında değiştiği, ancak ortalama verimin %25-35 arasında olduğu ve dünya ortalamalarının %30 civarında gerçekleştiği saptanmıştır.” (Akova 2008)

1.7.2. Türbin güç eğrisi ve türbinlerde rüzgâr şiddetine bağlı enerji üretimi

Piyasada mevcut olan türbinlerin çoğu 4m/s’lik rüzgâr hızlarından başlayarak rüzgâr enerjisi üretmeye çalışır. İşte bu ilk hız değerine, rüzgâr türbini enerji üretimine başlama (cut-in) hızı adı verilir. Genel olarak, bu hız V_0 notasyonu ile gösterilir. Bu ilk hız değerinden başlayarak artan rüzgâr hızı ile üretilen enerji miktarı doğru orantılı olarak artar ve birçok çalışmada bu artışın doğrusal olduğu kabulü yapılır veya türbin tasarımı buna göre ayarlanır. Bu doğrusal artış V_1 gibi bir rüzgâr hızına kadar devam eder. Bu hızdan sonra türbinin stabilitesi de göz önünde tutularak hız ne kadar artarsa artsın doygunluğa ulaşan türbin, artık sabit bir seviyede enerji üretmeye $V_{\bar{u}}$ sınırına kadar devam eder. İşte bu üst hız türbin stabilitesi için çok önemlidir. Bu hızdan sonra artık türbinin enerji üretmesine müsaade edilmez. Pratik uygulamalarda üst hız 25m/s’yi pek geçmez (Şen 2002).

Güç eğrisi ortalama gücün ortalama rüzgâr şiddetine bağlılığını gösterir. Böylece 4 durum teşekkül eder (Şekil 31).

Şekil 31: Rüzgâr Türbininin Güç Eğrisi



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 rüzgâr şiddeti en uygun elektrik üretilecek şiddeti yani nominal şiddeti geçerse türbin içindeki fren sistemi vb. araçlarla palaların 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).

1.8. Ekonomik Açıdan Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr türbinlerinden üretilen elektriğin ekonomikliği çeşitli faktörlere bağlı olmakla birlikte maliyetler teknoloji odaklı olup üretim teknolojisindeki değişimlerden etkilenmektedir. Bunun da ötesinde, rüzgârdaki enerji değerine etki eden en önemli faktörler rüzgâr kaynağının ve şebekenin özellikleri ve piyasa koşulları ile ilişkilidir (Erdoğan 2009). Rüzgâr ve diğer enerji kaynaklarından elektrik üretim tekniklerinin yatırım ve üretim maliyetleri karşılaştırıldığında rüzgâr kaynağının da yaygın olarak kullanılan diğer enerji kaynakları kadar ekonomik olduğu görülebilir (Tablo 9 ve Tablo 12).

Rüzgâr kaynağının elektrik enerjisine dönüştürülmesi sürecinde karşılaşılan maliyetler altı ana başlık altında incelenebilir:

1. Rüzgâr Kaynağının Maliyeti: Kaynağın erişilebilirliğine, kullanıma uygun haldeki kaynağın miktarına ve kullanılabilir durumdaki kaynağın verimliliğine bağlı olarak değişmektedir. Maliyetlerdeki en temel faktör rüzgâr şiddetidir. Rüzgârdaki enerji içeriği, rüzgâr yoğunluğunun küpü ile doğru orantılı olarak değişmekte olduğundan dünyadaki üretim düzeyleri yüksek santraller ortalama rüzgâr yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde bulunanlardır. Rüzgâr kaynağının verimini gösteren bir ölçü olarak kapasite faktörü ise günümüz rüzgâr türbinleri için ortalama olarak net % 30- 40 düzeyindedir.

2. Teknoloji: Rüzgâr türbini teknolojisindeki gelişmeler yıllar içinde rüzgâr türbinlerinin maliyetlerini önemli ölçüde düşürmüştür. 1981 yılında rotor çapı 10 metre olan bir rüzgâr türbininde kW başına düşen maliyet 2600 \$ iken 2004 yılında rotor çapı 77 metre olan bir türbin için bu miktar 800 \$ olmuştur. Türbinlerin pervaneleri tarafından taranan alanın büyümesinin ve maliyetlerinin de düşmesinin bir sonucu olarak büyük ölçekte elektrik üretiminin gerçekleştirildiği rüzgâr çiftlikleri kurulmuştur (Vaughan 2006). Teknolojik gelişmelerin, rüzgâr kaynağının değişkenliğinden kaynaklanan sorunları ortadan kaldırma yönünde hızla devam etmesi kaynağın kullanılabilirliğini, verimini ve arz güvenliğini arttırmakta ve; hem doğrudan hem de

dolaylı olarak maliyetleri azaltarak rüzgâr enerjisinin ekonomikliğini, konvansiyonel enerji kaynakları ile rekabet edebilir düzeylere çekmektedir.

3. Sermaye ve Sermayenin Maliyeti: Mevcut teknolojiye bağlı olarak kurulacak olan santral ve bu santralin inşası için gereken finansmandan kaynaklanan maliyetlerdir. Rüzgârdan elektrik üreten santraller, yoğun sermaye gerektiren yatırımlar olup bunların karlılığı sermayenin fiyatına yani tesislerin öz sermaye ve kredi finansman koşullarına çok duyarlıdır. Geri ödeme planı ve vade gibi unsurlar kredi finansmanının maliyetini; amortisman dönemi ile özsermaye geri ödeme süresi de özsermaye finansmanının maliyetini belirlemektedir (Çınar 2002). Rüzgâr enerjisi için finansman koşulları, ülkelerin yasal düzenlemeleri çerçevesinde büyük değişiklikler göstermektedir. Ülkemizde kullanılan kredi faizleri ve vadelerin hem ABD’de hem de AB’de kullanılan kredilerden daha kötü koşullarla sağlandığı ve bu nedenle Türkiye’deki rüzgâr enerjisi santrallerinin sermaye maliyetinin daha yüksek olacağı açıktır (Çınar 2002). İyi finansman koşulları sağlandığında rüzgâr enerjisi elektrik santralleri, gaz, hidrolik, kömür, biyokülte ve nükleer enerji santrallerine göre daha ucuzdur. Amerikan Rüzgâr Enerjisi Birliği’nin bir çalışmasına göre, rüzgâr santralleri gaz santralleriyle aynı koşullarda finanse edilebilse maliyetlerde % 40 azalış olabileceği hesaplanmıştır (Akyüz 2000). Çeşitli enerji kaynaklarına ilişkin maliyetler ise Amerikan Rüzgâr Enerjisi Birliği’nin yayınladığı rapor kaynak alınarak Tablo 9’da sunulmuştur. 1990’ların başlarında Pasific Gas & Electric ve Electric Power Research Institute yaptığı çalışmalar neticesinde rüzgâr enerjisinin gelecekte elektrik üretimi için en ucuz kaynak olacağını tahmin etmiştir ve bu tahmin neredeyse gerçekleşmek üzeredir (Güçlü ve Uyumaz 2010).

Tablo 9: Çeşitli Enerji Kaynaklarının Maliyetleri

Kaynak	Yeni Kapasite Maliyeti (cent/kWh)
Kömür	4.8- 5.5
Gaz	3.9- 4.4
Hidrolik	5.1- 11.3
Biyokütle	5.8- 11.6
Nükleer	11.1- 14.5
Rüzgâr	4.0- 6.0

4. İşletim ve Bakım-Onarım Maliyeti: Tesislerin bakımı, onarımı ve işletimine ilişkin maliyetlerdir.

Rüzgâr türbinlerinin bakım ve onarım maliyetleri, türbinin çalıştığı süreyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Modern rüzgâr türbinleri için ortalama türbin ömrü çeşitli kaynaklarda 20 yıl ya da 120.000 saat olarak belirtilmektedir ki, bir otomobil motorunun tahmini ömrünün 4000- 6000 saat olduğu düşünüldüğünde söz konusu süre görece uzundur. İşletim ve bakım-onarım maliyetleri, türbinin toplam ömrü boyunca ürettiği elektrik için karada kurulu türbinlerde 1.2- 1.5 c€/ kWh düzeyinde tahmin edilmektedir (EEWA 2009).

5. Rüzgâr Enerjisi Piyasasına Bağlı Maliyetler: Bu tip maliyetler de ülkelerin elektrik enerjisi piyasasına, uyguladıkları teşvik politikalarına ve rüzgâr elektriğinin fiyatına göre değişmektedir.

Ülkemizde 2016 yılına kadar devreye girecek olan yenilenebilir kaynaklı elektrik üretim tesislerinde üretilen elektriğe 10 yıl alım garantisi verilmiştir. Devlet, 2016 yılına kadar işletmeye girecek yenilenebilir enerji tesislerinde üretilecek elektriğin birim fiyatı “Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından bir önceki yıl belirlenen Türkiye ortalama elektrik toptan satış fiyatının altında olmamak” şartıyla yeniden tespit

edilecektir. 2016'dan sonra işletmeye girecek tesisler için de Enerji Üst Kurulu ortalama fiyatı altında olmamak üzere Bakanlar Kurulu yeni teşvikler verebilecektir.

6. Dış Maliyetler: Tesis veya üretim ile doğrudan ilişkisi olmayan ancak çevreye ve/veya enerji sektörüne veya diğer sektörlerimize verilen zararlar ile ilgili olarak açığa çıkan maliyetlerdir.

Küresel iklim değişiminde ve asit yağmurlarının oluşumunda rol oynayan CO₂, SO_x, NO_x gibi kirletici gazların fosil yakıtların kullanımları neticesinde meydana geldiği; bunun yanı sıra Nükleer veya Hidroelektrik Santrallerde doğal felaketler veya ihmal sonucu meydana gelebilecek hasarlar sonucu çevreye verilebilecek zararın büyüklüğü herkesçe çok iyi bilinmektedir. Bu tür bir riskin sigorta şirketlerine yüklenmesi halinde, maliyetlerin ve ödenecek risk primlerinin toplamının kilowatt saat başına ne kadarlık bir maliyet getireceğinin hesaplanması oldukça zordur. Bu aşamada gelişmiş ülkeler bahsedilen emisyon miktarları ve risk primleri için kurumlara ek vergiler getirmeyi düşünmektedir. Rüzgâr veya diğer yenilenebilir enerji kaynakları hariç diğer enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin maliyeti göz önüne alınırken en azından 0.7 ile 1.6 cECU/kWh'lık bir dış maliyetin varlığı göz önüne alınmalı ve yukarıdaki bölümlerde verilen enerji maliyetlerine eklenmelidir. Türkiye şartları dikkate alındığında (yakıt kalitesi ve teknoloji düzeyi) bu dış maliyetin 2-2.5 cECU/kWh'dan az olmaması beklenmelidir (Şahin 2010b).

Rüzgâr enerji santralleri, rüzgâr türbinlerinin gürültülü olması, elektromanyetik girişime neden olması, arazi işgali ve türbinlerin kuş ölümlerine sebebiyet vermesi yönleriyle eleştirilmektedir. Ancak yapılan çalışmalar, bu eleştirilerin, özellikle konvansiyonel enerji kaynaklarının kullanımı neticesinde şekillenen çevresel zararlarla kıyaslandığında, haksız olduğunu ortaya koymuştur. Rüzgâr türbinlerinin yarattığı gürültü (ses basınç düzeyi) miktarının diğer ortam örnekleriyle karşılaştırılması Tablo 10'de; rüzgâr türbinlerinin sebebiyet verdiği kuş ölümlerine ilişkin bilgi ise Tablo 11'de verilmiştir (Burton 2008).

Tablo 10: Ses basınç düzeyi örnekleri

Örnek	Ses basınç düzeyi (dB)
Duyuma eşiği	0
Kırsalda gece vakti	20- 40
Meşgul bir Ofis ortamı	60
Fabrikanın içi	80- 100
100 metredeki jet uçağı	120
350 metredeki rüzgâr çiftliği	35-45

Tablo 11: İngiltere'deki Rüzgâr Çiftliklerinde Gözlenen Kuş Çarpmaları

Rüzgâr Çiftliği	Türbin Sayısı	Kuş Çarpmaları/ Yıl
Burgar Hill, Orkney	3	0,15
Haverigg, Cumbria	5	0
Blyth Harbour, Northumberland	9	1,34
Bryn Titli, Powys	22	0
Cold Northcott, Cornwall	22	0
Mynydd y Cemmaes, Powys	24	0,04

Diğer yandan, rüzgâr enerjisi santrallerinin kurulumu için uygun olan bölgeler rüzgâr yoğunluğunun fazla olduğu, rüzgârı kesen engellerin bulunmadığı çıplak ve yüksek tepelerdir. Buralar, çoğunlukla yerleşim merkezlerinden uzakta; ancak küçük ölçekli ekonomik faaliyetler için kullanılabilen bölgeler olup rüzgâr türbinleri arasında kalan arazi üzerinde tarım ve hayvancılık faaliyetlerinin sürdürülmesinde herhangi bir sakınca bulunmamaktadır.

1.8.1. Rüzgâr türbinlerinin kurulum ve işletim maliyetleri

Rüzgâr çiftliklerinde elektrik üretimini mümkün kılan yakıt bedava olsa da rüzgâr çiftlikleri ilk kurulum maliyetleri yüksek yatırımlardır. Kurulum aşaması sırasında toplam maliyetin %65-75'i, rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren rüzgâr türbini oluşturur (Tablo 13). Projelerde başlangıç yatırımı için maliyet analizleri yapılırken rüzgâr türbini maliyetinin yanı sıra yer, iletim hatları, güç ayar sistemleri, inşa ve nakliye maliyetleri de titizlikle hesaplanmalıdır (Güçlü ve Uyumaz 2010). Rüzgârdan elektrik üretimine ilişkin yatırım maliyeti, teknolojik gelişmelere paralel olarak son 20 yılda önemli ölçüde azalmış, doğalgaz veya kömürle çalışan bir elektrik üretim santralının ilk kurulum maliyeti ile rekabet edebilir düzeylere gerilemiştir. Hızlanan teknolojik ilerlemeler neticesinde rüzgâr türbinlerinin kanat çapları büyümüş, yatırım maliyetleri düşmüştür. 1980'li yıllarda 3000 \$/kW olan yatırım maliyeti günümüzde 1500\$/kW düzeyine gerilemiştir. 1989- 2001 yılları arasında, pervanenin taradığı alan başına düşen maliyet (kWh/m²) % 30 düzeyinde azalmıştır (EWEA 2004).

Tablo 12: Elektrik Santrallerinin Kuruluş Maliyetleri

Santral	Kuruluş Maliyeti
Hidrolik Santraller	750-1200 \$/kW
Linyit Santralleri	1600 \$/kW
İthal Kömür Santralleri	1450 \$/kW
Doğalgaz Santralleri	680 \$/kW
Nükleer Santraller	3500 \$/kW
Rüzgâr Santralleri	700- 1450 \$/kW

Kaynak: Şimşek, 2007

Yatırım maliyetlerindeki bu düşüşler rüzgâr türbinlerinin üretim maliyetlerini de dolaylı olarak düşürmektedir. Türbin fiyatlarının düşmesi bireysel kullanıcılar için de yatırım fırsatları yaratmaktadır. Ülkemizde 09.07.2008 yılında kabul edilen 5784 sayılı

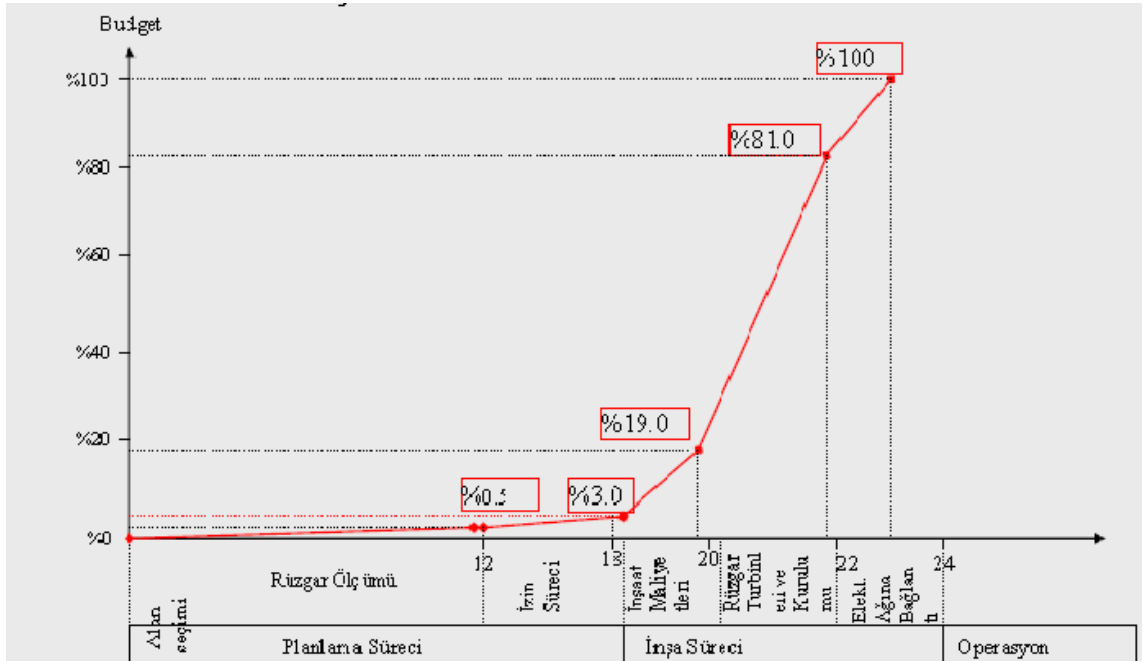
kanuna göre, kurulu gücü azami 500 kW'a kadar olan rüzgâr türbinleri için lisans alma zorunluluğu bulunmamaktadır (Çetin ve Başaran 2010).

Tablo 13: Rüzgâr Çiftliği İçin Yatırım Maliyeti Bileşenleri ve Toplam Maliyet İçindeki Payları

Bileşen	Pay (%)
Rüzgâr Türbini	% 69
İnşa Maliyeti	% 11
Elektrik Altyapısı	% 9
Güç Ayar Sistemleri	% 7
Kuruluş	% 2
Diğer	% 2

Kaynak: Mehel, N., 2009, Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli, Kullanımı ve Almanya-Türkiye Karşılaştırması, Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Maliye ABD, Aydın, Türkiye

Şekil 32 : İzmir’de kurulan 15MW’lık Rüzgâr Tarlasının Genel Bütçesi



Üretilen elektrik enerjisinin türbinden çıkıp tüketicilere ulaştırılmasında iletim hatlarına gereksinim duyulur. İletim esnasında kullanılan trafolar, iletim hatları ve direkler birer maliyettir. İletim maliyetlerini en aza indirmek için rüzgâr türbininin kurulduğu yerin elektrik sağlayacağı bölgeye uzak olmaması gerekir. Uzaklık iletim maliyeti ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

Rüzgâr türbini işletilmeye başlandıktan sonra, ileriki zamanlarda rüzgâr türbininin randımanında düşüşlerle karşılaşılması ve etkin kullanılması için düzenli aralıklarla bakım ve onarımının yapılması gerekmektedir ki bu da ek bir maliyettir. Türbinin bakım ve onarım maliyetleri, türbinin çalıştığı süreyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Bakım ve onarım maliyeti; pervane, alternatör, dişli kutusu, bıçaklar, jeneratör ve kule gibi türbin parçaları ile enerjinin iletimi sırasında kullanılan trafolar, elektrik direkleri, iletim hatlarının bakım ve onarımlarını içerir (Güçlü ve Uyumaz 2010).

Özetle, tüm maliyetler bir arada düşünüldüğünde; 2 MW'lık bir rüzgâr türbini için, sermaye maliyeti 1100- 1400€/kW, yakıt maliyeti 0 €/kWh, işletim ve bakım-onarım maliyeti ise 1.2- 1.5 €/kWh tutarında gerçekleşmektedir (EEWA 2009; Blanco 2009).

Karada kurulu rüzgâr türbinleri için elektrik üretim maliyeti, kapasite faktörüne ve türbin maliyetine bağlı olarak 4.5 – 8.7 ¢cents/kWh arasında değişmektedir. Bu maliyet, deniz üstü rüzgâr türbinlerinde, kıyıya uzaklık, suyun derinliği, şebeke altyapısı ve bağlantısı gibi faktörlere bağlı olarak 6- 11 ¢cents/kwh olarak tahmin edilmektedir (Blanco 2009).

Akdağ ve Güler (2010)'in Türkiye'deki 14 bölge için kapasite faktörlerini dikkate alarak gerçekleştirdikleri maliyet analizi çalışmasının bulgularına göre, kapasite faktörleri %19,7 ile %56, 8 arasında değişirken elektrik üretim maliyetleri 1.73 – 4.99 ¢cent/ kWh aralığında değişmektedir.

1.8.2. Rüzgâr enerjisi tahminlerinin elektrik piyasasındaki ekonomik yorumu

Elektrik piyasaları, 1990'ların başından itibaren elektrik piyasalarının serbestleşmesine yönelik olarak dünya çapında gerçekleştirilen reformlar neticesinde piyasa üzerindeki kısıtlayıcı düzenlemelerin büyük ölçüde kaldırıldığı bir yapı kazanmıştır. Gerçekleştirilen reformların özünde elektrik piyasalarındaki üreticilerin ve dağıtıcıların elektrik alım satımı için fiyat teklifi verebilecekleri türden toptan elektrik piyasalarının yapılandırılması amacı yatmaktadır. Genel olarak bu fiyat teklifleri, elektrik ticareti için bir spot fiyatın belirlendiği merkezi bir takas mekanizması aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Alım satım konu olan metanın karmaşık doğası nedeniyle, bu spot fiyatların dinamikleri kısmen anlaşıldığı için geçerli öngörüler yapmak da zordur. Ancak, fiyat dinamiklerinin anlaşılmasıyla öngörülebilirliğin de artacağı ve bu durumun da tüm piyasa katılımcıları ve düzenleyicilerinin planlama, alım-satım, risk yönetimi ya da piyasa yapılandırması amaçlarına yönelik olarak üstünlük sağlayacağı belirtilmektedir (Jonsson et al. 2010).

Spot fiyatların karmaşık yapısının sayısız nedeni mevcuttur. Elektrik talebi, kısa dönemde oldukça inelastik olup ilk iki momenti kendine özgü karmaşık bir karaktere sahiptir. Elektrik arz fonksiyonu ise süreksiz, dışbükey ve yüksek talep neticesinde hızla artan bir yapıdadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise düşük marjinal maliyetlerinden ve önceliklendirilmelerinden dolayı arz fonksiyonunun şeklinde dalgalanmalara neden olmaktadır. Ayrıca, piyasa yapısı da genellikle karmaşık olup bazı üretim tesisleri için sıkça değişen teşvik uygulamaları nedeniyle de yeniden yapılandırılma söz konusu olmaktadır. Bu faktörlerin bir sonucu olarak elektrik spot fiyatlarının davranışı diğer ticari mallarinkinden farklılaşmakta, fiyat zaman serileri çoğunlukla, mevsimsellik, gün içi ve gün aşırı korelasyonlar, trendler, ortalamalarda geri dönen ani yükselişler, dağılımlarında pozitif çarpıklık ve kalın kuyruklar sergilemektedir. Bunun da ötesinde, dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanılmasındaki artış eğilimi, kısmen de olsa bu kaynakların doğasındaki değişkenlik nedeniyle spot fiyatların daha da karmaşık bir yapı kazanmasına neden olmuştur (Jonsson vd. 2010).

Genellikle, elektrik piyasasında fiyat teklifleri gelecekteki üretim miktarı tahminlerine dayanarak yapılmaktadır. Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretiminde ise söz konusu üretim miktarı rüzgâr şiddetine doğrudan bağlıdır. Bu açıdan bakıldığında rüzgâr şiddetinin veya rüzgâr şiddetine bağlı elektrik üretim düzeyinin küçük sapmalarla tahmin edilebilmesi, serbest elektrik piyasasında bir fiyat düzeyinin oluşmasında doğrudan etkilidir. Rüzgâr söz konusu olduğunda, üretim düzeyinin öngörülebilmesine yönelik çalışmaların önemli ve gelişen bir araştırma alanı olduğu görülmekte ve bu konuda çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Costa et. al 2008). Rüzgâr enerjisi, çoğunlukla küçük veya orta ölçekli elektrik üretim tesislerinin dağıtım sistemi gerilim seviyesinden elektrik şebekesine bağlanmasıyla sisteme dahil edilen ve üretim düzeyi büyük değişkenlikler gösteren bir kaynaktır. Rüzgâr enerjisi üretimindeki süreksizlik, bir gün sonraki üretim düzeyinin tahmin edilmesinde olduğu gibi üreticilerin piyasaya verecekleri fiyat tekliflerin belirlenmesinde de zorluklara neden olmaktadır. Bu nedenle, rüzgâr elektriği üreticileri için elektrik piyasasında işlem yapmak diğer aktörler için olduğundan daha zordur. Üretilen elektriğin önemli miktarı büyük değişkenlikler gösteren kesikli bir üretimden gelmekteyse, böyle bir sistemin düzenleyici güce ihtiyacı da artar. Bu nedenle sistem operatörü üretimdeki öngörülemeyen değişkenliklere hazırlıklı olmalıdır. Bu noktada, rüzgâr enerjisi için iyi çalışan bir öngörü modeli hem üreticiler hem de sistem açısından sorunu hafifletebilir. Bir gün ilerisi için yapılan tahminler güç istasyonlarının çalışma zamanlarının planlanmasında kullanılarak etkinlik artırılabilir ki böylece tesislerin işletim maliyetleri de azaltılabilir (Holttinen 2005). Sistem işleyişinin, farklı seviyelerdeki rüzgâr gücü tahmin hataları için simüle edilmesi, tahmin hatalarının minimize edilmesinin rüzgâr enerjisi tesisinden faydalanım düzeyini artırılabilceğini göstermiştir.

Bir rüzgâr çiftliği için tahmin yapmak yerine daha geniş bir alanı kapsayan onlarca veya yüzlerce rüzgâr çiftliği için tahmin yapmak tahmin hatalarının azaltılmasını sağlayabilir. Böylece, tüm üreticilerin tahminlere dayalı gelirlerinde önemli artışlar olacaktır. Piyasada aktif olan rüzgâr çiftliklerinden çevrimiçi üretim

düzeyi bilgisinin temini bugün için mümkün değilse de gelecekte neler başarılabileceğini vurgulamak açısından önemlidir (Holttinen 2005).

Rüzgâr türbinlerinden üretilen elektriğin spot fiyatlar üzerindeki etkisini araştıran bazı çalışmalar bulunmakla birlikte, bu çalışmaların rüzgâr elektriği üretimi ile spot fiyatlar arasındaki ilişkinin varlığını ispatladığını ancak ortalamalar üzerindeki doğrusal olmayan etkiler ve dağılımların karakteristiklerinin belirlenmesi noktasında eksik kaldığını ve önemli bir diğer eksikliğin de, öngörülerde rüzgâr gücünün fiyat alıcı kabul edilmesi olduğunu ifade eden Jonsson vd. (2010), rüzgâr gücünün kısa dönemde fiyat yapıcı kabul edilmesi durumunda rüzgârın esip esmeyeceğine dair öngörülerin elektrik fiyatları üzerindeki etkisinin nasıl olacağı sorusunu sormaktadır. Çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yoğunluğu (özellikle rüzgâr enerjisi) ve serbest piyasa koşulları açısından gelecekteki elektrik piyasası için temsili bir bölge olması yönüyle önem taşıyan bir bölge olan Batı Danimarka fiyat alanı (DK-1) verilerini kullanarak, rüzgâr enerjisi öngörülerinin piyasa fiyatları üzerindeki etkisini parametrik olmayan bir regresyon modeli ile analiz etmişlerdir. Analiz bulguları, rüzgâr enerjisi tahminlerinin ortalama fiyat üzerinde doğrusal olmayan bir etkiye sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Buna göre, rüzgâr enerjisinin sistemdeki öngörülen payı artarken spot fiyatlar düşmektedir. Olasılık dağılımının şekline yönelik bulgulara göre ise, rüzgâr gücü kullanımı düşükten yükseğe doğru ilerlerken düşük fiyat olasılıklarının artmasına ve yüksek fiyat sıklıklarının azalmasına bağlı olarak dağılım daha az çarpık bir hal almaktadır. Dünya genelinde rüzgâr enerjisinin kullanımı artarken düşük elektrik fiyatları ilk etapta cazip görünse de yeni tesislerin kurulumu noktasında yatırımcıların ilgisini azaltması ihtimali de bulunmaktadır. Bunun yanında, düşük elektrik fiyatları yüksek marjinal maliyetlerle üretim yapılan tesisler için de tehdit oluşturmaktadır. Bu açıdan bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonunda piyasa yapılandırılması sürecinde tahminlerin etkisinin dikkate alınması önemlidir.

1.9. Rüzgâr enerjisinin tahmininde ve modellenmesinde kullanılan teknikler

Rüzgâr enerjisinde kararlı durum- süreklilik oluşmadığından geleceğe yönelik enerji planlamalarında önemli aksaklıklar yaşanabilmektedir. Bu nedenle, bu tür planlamalarda enerji tahminleri yapılarak genel bir bakışın sağlanması zorunluluk haline gelmiştir (İzgi vd. 2010). Rüzgârdaki alan ve zaman bakımından süreksizlik ve düzensizlikler rüzgârın modellenmesini, ileriye yönelik tahminlerini, ölçüm olmayan noktalardaki kestirimlerini ve eksik verilerin tamamlanmasını zorlaştırmaktadır (Öztopal vd. 2010). Bu nedenle doğru ölçümler ve modellemeler rüzgâr enerjisi hesaplamalarında karşılaşılan bu zorlukların aşılmasında büyük önem taşımaktadır.

Rüzgâr kaynağının değişken doğasından ötürü, rüzgâr hızının önceden öngörülebilmesi faydalıdır. Bu tip öngörüler kabaca iki kategoriye ayrılabilir: rüzgâr türbinlerinin ve rüzgâr çiftliklerinin işletimsel kontrolünde kullanılmak üzere saniyeler ve dakikalar biçimindeki zaman skalaları için kısa dönemli türbülans değişimlerinin tahmini ve güç istasyonlarının kurulumuna ilişkin kararlarda yol gösterici olarak kullanılmak üzere saatlik ve günlük zaman periyotları biçimindeki uzun dönemli tahminler. Kısa dönemli tahminler genel olarak istatistikî yöntemlere dayanırken uzun dönemli tahminler meteorolojik yöntemleri içermektedir. Meteorolojik ve istatistikî yöntemlerin bir bileşimi rüzgâr çiftliklerinden elde edilebilecek güç miktarının tahmininde oldukça faydalı bilgiler sunabilmektedir (Burton 2008).

Bir bölgede sağlıklı rüzgâr enerjisi tahmin hesaplamalarında bulunabilmek için gerekli olan iki tür bilgi işlemi vardır. Bunlar:

- (a) Türbin kurulacak olan yerdeki rüzgâr hızının frekans (histogram, sıklık) grafiği ve gerekirse buna en iyi uyabilecek teorik frekans eğrisini (Weibull, Rayleigh veya logaritmik normal) bulmak ve
- (b) Kullanılması tasarlanan türbinin hız-güç grafiğinin bilinmesi. Bu nokta ticari bir konudur (Şen 2002).

Genel olarak yapılan tüm çalışmalarda ortalama rüzgâr hızları göz önünde tutulur. Özellikle ani değişimler göstermeyen yerlerdeki rüzgâr hızları durumunda ortalama daha da geçerlidir (Şen 2002).

Teorik Weibull, Rayleigh, lognormal ya da gamma olasılık dağılım fonksiyonları (pdf) rüzgâr hızı büyüklüğünün tahmin edilmesinde pratikte sıkça kullanılmaktadır (Şahin ve Şen 2001). Ekonometrik modellerin özellikle kısa ve orta dönemli öngörü başarısının yüksek olduğu gözlenmiştir (Jebaraj ve Iniyar 2006).

Otoregresif hareketli ortalama modelleri (ARMA) ve bunun modele bir dışsal değişkenin de katılmasıyla genişletilmiş bir tipi olan ARMAX modelleri, yapay sinir ağları, bulanık mantık ve wavelet (dalgacık dönüşümü) temelli yöntemler (Burton 2008) ve markov zincirleri rüzgâr hızı ve rüzgâr hızına bağlı büyüklüklerin tahmininde ve modellenmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada sadece Markov zincirleri yöntemi üzerinde durulacaktır.

Jones ve Lorenz (1986), olasılık yoğunluk ve otokorelasyon fonksiyonları bağlamında, benzer karakterlerde rassal zaman serileri üretmek için Markov sürecinin kullanımına yönelik bir model sunmuştur. Markov modelinin, bir rüzgâr gücü simülasyonu girdisi olarak rüzgâr hızı zaman serilerinin üretiminde nasıl kullanıldığı gösterilmiştir. Sekiz saatlik ortalamalar için, birinci dereceden Markov zinciri için 11x11 geçiş matrisi kullanılmıştır. Kullanılan Markov zinciri modelinin etkin bir model olduğu bildirilmiştir.

Kaminsky (1991) birinci ve ikinci dereceden markov zinciri yaklaşımı ile markov modelinin yeteri kadar düşük frekanstaki datayı kapsamadığını göstermiştir.

Şahin ve Şen'in (2001) çalışmasında, Türkiye'nin kuzey-batı bölgesine ait saatlik rüzgâr hızı datası, birinci sıra markov zinciri yönteminin geçiş matrisi yaklaşımı kullanılarak simüle edilmiştir. Bunun için, rüzgâr hızı zaman serileri, aritmetik ortalamaları ve standart sapmalarına göre farklı durumlara (state) ayrılmıştır. Saatlik rüzgâr hızı verileri ve 8X8 boyutunda geçiş matrisi kullanmıştır. Kısa periyotlar için, sentetik zaman serilerinden elde edilen parametrik sonuçların ölçülen değerlere yakın

olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada, birinci sıra markov zincirinin, basitliğine rağmen, ele alınan 10 istasyonun çoğu için sentetik rüzgâr hızı zaman serilerindeki istatistiksel parametrelerin %90'ından fazlasını hesapladığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, sonuçlardaki uyumsuzluk, birinci sıra markov zincirinin ilk yaklaştırım olarak kullanılmasından dolayıdır. Saatlik rüzgâr hızı datasına ek olarak birinci sıra otokorelasyon katsayısı kullanıldığı için ikinci ve hatta üçüncü sıra otokorelasyon katsayıları da anlamlıdır. Bu nedenle, gelecekteki saatlik rüzgâr hızı modellenmesinde en azından ikinci veya tercihen üçüncü dereceden geçiş matrislerinin ileriki çalışmalarda denenmesi önerilmiştir.

Ettoumi vd. (2003)' de, üçer saatlik rüzgâr hızı ve yönü datası Markov zinciri yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Birinci dereceden dokuz durumlu Markov zinciri modelinin rüzgâr yönü datası ile birinci dereceden üç durumlu Markov zinciri modelinin ise rüzgâr hızı datası ile iyi uyum sağladığı sonucuna varılmıştır.

Nfaouni vd. (2004) çalışmalarında, Tangiers istasyonuna ait 10 yıllık “saatlik ortalama rüzgâr hızı” zaman serisi (HAWS) datası Markov sürecine uyarlanarak istatistikî bir temelde analiz edilmiştir. Markov zincirinin sınırlayıcı davranışı sınanmış ve gözlemlenen rüzgâr hızına ilişkin histogramla karşılaştırılmıştır. 12X12 boyutunda bir geçiş olasılığı matrisinin kabul edilir düzeyde sentetik zaman serileri üretmek için yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gerçek rüzgâr hızı datasından elde edilen geçiş olasılığı matrisi kullanılarak sentetik rüzgâr hızı zaman serileri üretilmiştir. Gerçek rüzgâr hızı ile sentetik rüzgâr hızının karşılaştırılması, rüzgâr hızının istatistikî parametrelerinin güvenilir biçimde yeniden üretilebileceğini göstermektedir.

Shamshad A. vd. (2005) Markov zinciri sürecine ilişkin 12x12 boyutunda birinci ve ikinci dereceden geçiş matrisi yaklaşımı kullanılarak rüzgâr hızı datasının stokastik üretimi için Malezya'daki iki meteoroloji istasyonuna ait saatlik rüzgâr hızı zaman serisi datası kullanılmıştır. Çalışmada geçiş olasılığı matrislerinden rüzgâr hızı zaman serisi üretmek için gereken algoritma açıklanmaktadır. Ardışık zaman durumları arasındaki ve rüzgâr hızı değer durumları arasındaki geçişler için uniform rastsal sayı üreteçleri

kullanılmıştır. Üretilen hız verileri için istatistikî özelliklerin sürdürülebilirliği gözlemlenenler ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla kullanılan istatistikî özellikler, ortalama, standart sapma, medyan, persantiller, Weibull dağılımı parametreleri, otokorelasyonlar ve rüzgâr hızı değerlerinin spektral yoğunluğudur. Gözlemlenen rüzgâr hızı değerleri ile sentetik olarak üretilenlerin karşılaştırılması sonucunda otokorelasyon katsayılarında zayıf uyum belirlenmiş ancak istatistikî karakteristiklerin tatmin edici düzeyde korunduğu görülmüştür.

Papaefthymiou ve Klöckl (2008) çalışmalarında, MCMC (Markov Zinciri Monte Carlo) yöntemi ile rüzgâr gücüne ilişkin sentetik zaman serilerinin doğrudan üretimi gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları, bu yöntemle üretilen rüzgâr gücü zaman serilerinin olasılık yoğunluk fonksiyonunun ve otokorelasyon fonksiyonunun mükemmel uyum gösterdiğini kanıtlamaktadır.

Brokish (2009) çalışmasında, Markov zincirlerinin rüzgâr modellemesindeki uygun kullanımı açıklanmaya ve uygun olmayan durumların tehlikesi gösterilmeye çalışılmıştır. Markov zincirleri, sentetik rüzgâr hızı verisi üretmede geçerli bir yöntem olarak sunulmakta ancak markov zincirleri ile üretilen rüzgâr hızı otokorelasyon grafiklerinin çoğunlukla geçersiz olduğunu gözlemlenmektedir. Markov zinciri yönteminin, markov zincirinin derecesine ve rüzgâr gücü durumuna bağlı olarak, 15-40 dakikadan daha kısa zaman aralıkları için rüzgâr hızı modellemesinde kullanılmaması önerilmektedir.

2. MARKOV ZİNCİRLERİNİN KURAMSAL ALT YAPISI

2.1. Markov Süreçleri Ve Markov Özelliği

“Karar problemlerinde, sıkça belirsizliklere dayanan olaylara ilişkin karar alma ile yüz yüze geliriz. Bu belirsizlik genelde, doğal olayın belirsizliğinden veya temel değişkenin akla gelmeyen değişim kaynağından ortaya çıkar. Bu değişkenliğe nitel olarak yaklaşmaktan ziyade, onu matematiksel model haline dönüştürerek nicel olarak inceleriz. Doğal olay düzgünlüğün bazı derecesini sergilerse, bu işlem yapılabilir ve onun değişkeni olasılık modeli ile tanımlanabilir.” (Öztürk 2002)

Markov analizi (zinciri) geçmişteki olaylardan bağımsız olarak, sadece mevcut süreç durumuna bağlı kalan sürecin, gelecekte nasıl gelişeceğini içeren olasılıkları bulunduran farklı bir özelliği vardır (Öztürk 2002).

“Markov Analizinin esası 20. yüzyılın başlarında Brownian hareketi olarak bilinen kapalı bir kutu içindeki gaz moleküllerinin yapısını ve davranışlarını A.A. Markov’un matematiksel olarak betimleme denemesine dayanır. Markov sürecinin ilk doğru matematiksel yapısı N. Wiener tarafından 1923 yılında kuruldu. Markov süreçlerinin genel teorisi ise 1930 ve 1940 yıllarında A.N. Kolmogorov, W. Feller, W. Doeblin, P. Levy, L.J. Doob ve diğerlerince geliştirilmiştir.” (Öztürk 2002)

Markov süreçlerinin temel özelliği, belirli bir zaman diliminde çeşitli durumlarda bulunmanın ve bir durumdan diğerine geçişin olasılıklarının göz önüne alınmasıdır. Markov süreçleri, verilen durumdan daha ileri geçiş olasılığı, onun ulaştığı biçime değil, sadece şimdiki durumuna bağlı olma özelliğini bulunduran stokastik bir süreçtir. Buna göre, geçmişteki ve şimdiki faaliyetlerin olasılıklarından faydalanarak onların gelecekteki olasılıklarını belirlemek Markov analizinin temelini oluşturmaktadır (Öztürk 2002).

Markov Süreçleri ileride ortaya çıkması olası durumların gerçekleşme olasılıklarının, geçmiş verilerden değil şu anki verilerden yararlanarak bulunduğu süreçlerdir (Taha 2007, Winston 1994, Revuz 1991). Bir durumdan diğerine geçiş,

sistemin daha önceki durumlarına bağlı olmayıp, yalnızca bir önceki duruma bağlıdır. Söz konusu bu özelliğe Markov Özelliği denir. Markov Özelliği olan bir sistemde bir durumdan diğer duruma geçiş sadece bir önceki duruma bağlı olan şartlı olasılıklarla ifade edilir. Şöyle ki, t_{n-1} anındaki durum olasılığı $p_{x_{n-1}}$, t_n anındaki durum olasılığı p_{x_n} ve ξ_{t_n} ile $\xi_{t_{n-1}}$ rastsal değişkenler olmak üzere, t_n anında x_n de olma olasılığı

$$p_{x_{n-1},x_n} = P(\xi_{t_n} = x_n | \xi_{t_{n-1}} = x_{n-1})$$

koşullu olasılığı ile gösterilir ve bu koşullu olasılık sistemin t_{n-1} anından t_n anına geçişi tanımladığından buna bir adımlı geçiş denir. k adımlı geçiş olasılığı ise ξ_{t_n} rastsal değişken olmak üzere,

$$p_{x_n, x_{n+k}} = P(\xi_{t_{n+k}} = x_{n+k} | \xi_{t_n} = x_n)$$

ile ifade edilir. $t_0 < t_1 < \dots < t_n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) zamana ait noktaları gösteriyorsa $\{\xi_{t_n}\}$ rastsal değişkenler ailesi, $\xi_{t_0}, \xi_{t_1}, \xi_{t_2}, \dots, \xi_{t_n}$ lerin bütün olası değerleri için,

$$P(\xi_{t_n} = x_n | \xi_{t_{n-1}} = x_{n-1}, \dots, \xi_{t_0} = x_0) = P(\xi_{t_n} = x_n | \xi_{t_{n-1}} = x_{n-1})$$

biçiminde verilen Markov özelliğine sahip ise buna bir Markov sürecidir denir.

Markov zincirleri Markov süreçlerinin özel bir halidir. Markov zinciri, belirli stokastik sistemlerin kısa ve uzun dönemli davranışlarını incelemeye kullanılır (Taha 2007).

2.2. Stokastik Süreç Ve Markov Zincirleri

Verilen bir sistemin durumu sabit veya tesadüfi zaman aralıklarında olasılıklı biçimde değişebilirse stokastik süreç vardır (Öztürk 2002). Zaman içerisinde önceden kestirilemeyecek şekilde gelişen süreçlere stokastik (rastgele, rassal) süreç denir. Bu belirsizliğe olayların tutarsızlığından kaynaklanan ve kontrol edilemeyen değişimler neden olur.

Rastgele değişkenlerin bir $\{X(t) : t \geq 0\}$ koleksiyonu stokastik süreç olarak adlandırılır. Stokastik süreç, verilen bir T kümesinden alınan t bir zaman parametresi olmak üzere $\{X_t\}$ rastgele değişkenler kümesi ile tanımlanır (Halaç 2001).

Rastgele değişkenlerin aldığı her bir değere durum denir. Bu yüzden rastgele değişken X_t için durum değişkeni ifadesi kullanılır. X_t t zamanında sistemin bulunduğu durumu göstermek üzere, çoğu durumda X_t t zamanından önce kesin olarak bilinemeyen rassal bir değişkendir.

Rastgele değişkenlerin alabileceği değerlerin tanımlandığı S uzayı, durum uzayı olarak adlandırılır. Durum uzayı S kesikli veya sürekli değerlerden oluşabilir. Buna göre X_t süreci kesikli durumlu stokastik süreç veya sürekli durumlu stokastik süreç olarak adlandırılır. Aynı zamanda T kümesi de kesikli ve sürekli değerler alabilir. T sürekli değerler alabiliyorsa X_t süreci, sürekli zamanlı stokastik süreç; T tamsayılı değerlerle sınırlanmış yani $T=\{0, 1, 2, \dots\}$ ise, $\{X_t\}$ süreci kesikli-zamanlı stokastik süreç olarak adlandırılır. (Kara Harp Okulu Yayınları 2002) Sürekli zaman stokastik süreci, sistemin durumunu sadece zamanın farklı anlarında değil, herhangi bir anında gözleyebilen stokastik bir süreçtir (Öztürk 2002).

Kesikli zaman stokastik sürecin özel bir türü Markov zinciridir. Markov özelliğine sahip stokastik bir $\{X_t\}$ süreci, eşit ve kesikli zaman aralıklarıyla ifade ediliyorsa ($t = 0, 1, 2, 3, \dots$), Markov zinciri olarak adlandırılır (Kara Harp Okulu Yayınları 2002).

Eğer bir stokastik süreç Markov Zinciri ise $t = 0,1,2,\dots$ ve tüm durumlar için,

$$P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t, X_{t-1} = i_{t-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0) = P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t)$$

eşitliği geçerlidir.

Bu eşitlik, sistemin $t+1$ zamanındaki olasılık dağılımının sadece t zamanındaki $t(i_t)$ olasılık dağılımına bağlı olduğunu ve sistemin t zamanındaki i_t durumuna ulaşana

kadarki tüm geçmiş durumlarından bağımsız olduğunu ima eder ki bu özelliğe Markov Özelliği denir.

Markov zincirleri, dinamik ve stokastik sistemlerin analizinde ve özellikle bir sistemin zaman boyunca içinde bulunabileceği farklı durumlar (states) arasında yaptığı hareketlerin incelenmesinde yaygın olarak kullanılan modellerdir. Markov zincirlerinin, sistemin belli bir anda bulunacağı durumu tahmin etme özelliğinin yanında söz konusu sistemin uzun dönemde (denge durumu, steady state) bulunacağını durumu tahmin etme yeteneği de vardır (Winston 1994, Revuz 1991).

2.3. Geçiş Olasılıkları Ve Geçiş Matrisi

Markov sürecini simgeleyen modellerin kurulabilmesi için, incelenen sistemin içinde bulunabileceği farklı durumların ve bu durumlardan birinden diğerine geçiş olasılıklarının bilinmesi gerekir. (Revuz 1991, Taha 2007, Winston 1994)

Markov özelliğine sahip bir sistemin durum uzayı

$S = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ve

$P(\mathbf{X}_{n+1} = a_j | \mathbf{X}_n = a_i) = p_{ij}$ olsun.

Bir başka deyişle n-inci gözlem esnasında a_i durumunda olan sistemin bir sonraki gözlemde a_j durumunda olmasını ifade eden geçiş olasılığı p_{ij} ile ifade edilsin. p_{ij} geçiş olasılıklarını eleman kabul eden

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

matrisine ise geçiş matrisi veya stokastik matris adı verilir. (Cerit ve Yüksel 2004) P geçiş matrisinin i-inci satır ve j-inci sütununda bulunan p_{ij} büyüklüğü, a_i durumundan a_j durumuna bir adımda geçmenin olasılığını verir. Markov zinciri için p_{ij} 'ler geçiş olasılıklarını ifade eder. Gelecek durumun şimdiki duruma bağlı olma olasılığı zaman

içinde değişmez ise durağanlık ifade edilir ki, bu özelliği de Markov zinciri karşılar. Bu tip Markov zincirine durağan Markov zinciri adı verilir (Öztürk 2002).

P geçiş matrisinin özellikleri ise;

1. Kare matris olması,
2. Matristeki her elemanın negatif olmaması,

$$\forall i, j \text{ için} \quad p_{ij} \geq 0$$

3. Her satırda yer alan elemanların toplamının bire eşit olmasıdır. (Öztürk 2002)

$$\forall i, j \text{ için} \quad \sum_{j=1}^{j=n} p_{ij} = 1$$

$\mathbf{Q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]$ Markov zinciri için başlangıç olasılık dağılım vektörüdür. (Öztürk 2002) Bir sistemin başlangıçta, S durum uzayındaki herhangi bir durumda bulunma olasılıklarını yani

$P(\mathbf{X}_0 = a_i) = q_i$ olasılığını verir.

P geçiş matrisi, S durum uzayındaki durumların başlangıç olasılıkları ile birlikte bir Markov zinciri veya Markov süreci tanımlar (Taha 2007).

Markov süreci aşağıdaki koşulları sağladığında sonlu durum birinci dereceli Markov zinciri adı verilir (Öztürk 2002).

1. $1, 2, \dots, n$ gibi sayılandırılan durumların sonlu bir kümesi vardır. Yani olanaklı durumlar kümesi sonludur.
2. Gelecekteki durumun olasılığı sadece kendinden hemen önceki duruma bağlıdır.
3. Geçiş olasılıkları (p_{ij}), zaman içinde değişmez ve ulaşılan duruma bağımsız olduğu varsayılır.

P geçiş matrisi ise P^2 de bir geçiş matrisidir. P^2 nin i-inci satır ve j-inci sütununda bulunan büyüklük, a_i durumundan a_j durumuna iki adımda geçişin olasılığını verir. Benzeri şekilde, $P^3, P^4, \dots, P^n, \dots$, nin de geçiş matrisi olduğunu söyleyebiliriz. (Cerit ve Yüksel 2004)

n adımlı geçişlerin olasılığı $p_{ij}^{(n)}$ 'dir. Bu geçiş olasılığı, i durumunda olan sürecin, n dönem sonra j durumunda olma olasılığının belirlenmesinde yararlı olur. (Öztürk 2002)

Bu olasılık da m' den bağımsız olacağı için,

$$P(\mathbf{X}_{m+n}=j | \mathbf{X}_m = i) = P(\mathbf{X}_n = j | \mathbf{X}_0 = i) = p_{ij}^{(n)}$$

burada $p_{ij}^{(n)}$ i. durumdan j. duruma **n-adımda geçiş olasılığıdır.**

Chapman-Kolmogorov denklemi bu n adımda geçiş olasılıklarının hesaplanması için bir yöntemi sağlar;

$$p_{ij}^{(n)} = \sum_{k=0}^M p_{ik}^{(m)} p_{kj}^{(n-m)} \quad \text{tüm } i, j, n \text{ ve } 0 \leq m \leq n$$

Bu denklemin sağ tarafı aslında bir matris çarpımı işlemidir. Buna göre aynı denklem matris şeklinde ifade edilebilir.

$$P^{(n)} = P^{(n-m)} P^{(m)}$$

Burada $P^{(n)}$, n-adımda geçiş olasılıklarından oluşan bir matristir. Yukarıdaki denklemler Chapman-Kolmogorov denkleminin genel halidir. (Kara Harp Okulu Yayınları 2002; Öztürk 2002)

n=2 ve m = 1 için bu ifade

$$p_{ij}^2 = \sum_{k=0}^M p_{ik} p_{kj} \quad \text{tüm } i \text{ ve } j \text{ için}$$

Dikkat edilirse p_{ij}^2 , P^2 matrisinin elemanlarıdır. Bu elemanlar tek adımlı geçiş olasılıkları matrisinin kendisiyle çarpılarak elde edilir. Bu anlamda,

$$P^{(2)} = P \cdot P = P^2$$

Genelleştirirsek, n geçişli olasılıklar matrisi aşağıdaki ifadeden elde edilebilir. (Öztürk 2002)

$$P^{(n)} = P \cdot P \dots P = P^n$$

$$= P \cdot P^{n-1} = P^{n-1} P$$

P^n : Çoklu adım geçiş olasılık matrisidir.

n-adımda geçiş olasılığı matrisi P^n geçiş olasılığı matrisi P ' nin n'inci kuvveti hesaplanarak bulunur. Bundan da, i durumundan j durumuna- n-adımda geçiş olasılığı $p_{ij}^{(n)} = P^n$ matrisinin (i,j) nci elemanı olarak elde edilir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDEN ÜRETİLEN ELEKTRİK ENERJİSİNİN EKONOMİK DEĞERİNİN MARKOV ZİNCİRLERİ İLE MODELLENMESİ: YALOVA İLİ ÖRNEĞİ

1. BÖLGENİN COĞRAFİ VE METEOROLOJİK ÖZELLİKLERİ

Yalova Türkiye'nin kuzeybatısında, Marmara Bölgesi'nin güneydoğu kesiminde yer almaktadır. İlin kuzeyinde ve batısında Marmara Denizi, doğusunda Kocaeli, güneyinde Bursa ve Gemlik körfezi yer almaktadır. Yalova doğu kıyılarındaki düzlükler dışında, dağlık bir araziye sahiptir. Yalova bölgesi, bölgenin güneyi, batıdan doğuya doğru İzmit, Sapanca arasında Kocaeli sıradağları ile birleşen samanlı dağları ile kaplanmış durumdadır. İlin bitki örtüsünü makiler ve ormanlar oluşturmaktadır. Güneydeki dik yamaçlar tümüyle gür bir orman örtüsü ile kaplıdır.*

Yalova 28° 45' ve 29° 35' Doğu boylamları, 40° 28' ve 40° 45' Kuzey enlemleri arasında yer almakta olup, şehir merkezinin denizden yüksekliği 2m, İl sınırları içerisindeki en yüksek nokta 921m'dir. İlin güney tarafı Samanlı Dağları tarafından kaplanmıştır. Gemlik körfezi ve Yalova arasında batı-doğu doğrultusunda uzanan dağlık alan içinde derelerin yatakları doğrultusunda uzanan küçük vadiler bulunmaktadır. Bunların içinde en önemli yere sahip olan ise Sellimandıra vadisidir. Genellikle tüm vadiler birbirine paralel olarak uzanmaktadır. Sellimandıra vadisi Gökçedere yöresinde tabanını genişletir ve Marmara Denizi'ne açılır. Bu çeşitli vadecikler arasında küçük tepeciklerle birbirinden ayrılan ovalar bulunmaktadır.†

Marmara Bölgesi'nin doğusunda yer alan Yalova ilinin iklimi, Makro - klima tipi olarak; Akdeniz ve Karadeniz iklimleri arasında bir geçiş niteliği taşır. Yalova

* <http://www.yalovakultur.gov.tr/Genel/BelgeGoster.aspx?F6E10F8892433CFFD52DD97CAAFACAC8C022CBCFC7BD3FB8>

† Yalova Valiliği.: "Yalova İl Çevre Durum Raporu", İl Çevre ve OrmanMüdürlüğü, Yalova, (2003)

iklimi, kimi dönemlerde karasal iklim özelliklerini yansıtmaktadır. Yalova bölgesinde kuzeyden ve güneyden gelenler, sakin nitelikli olmak üzere başlıca üç tür hava akımı egemendir. İlde yazlar sıcak ve kurak, kışlar ılık ve bol yağışlıdır.*

Yalova İli için 2004 yılına ait kaydedilen yıllık ortalama sıcaklık 15 °C, yıllık ortalama basınç 1015,7 (Mb), yıllık ortalama nem %68, yıllık ortalama yağış miktarı 65,6 (mm) ve hakim rüzgâr yönü SSE'dir. Sıcaklık ortalamasının yüksek olduğu aylar Temmuz ve Ağustos, sıcaklık ortalamasının en düşük olduğu aylar ise Ocak ve Şubat'tır. En fazla yağış alan ay 118,2 mm ile Ekim, en az yağış alan ay 4,6 mm ile Temmuz'dur. Nem oranının en fazla olduğu ay %73,7 ile Ekim, en az olduğu ay %63,7 ile Mayıs'tır.†

2. VERİLERİN VE KULLANILAN RÜZGÂR TÜRBİNİNİN ÖZELLİKLERİ

2.1. Rüzgâr Hızı Verileri

Bu çalışmada, Yalova ili Süpürgelik mevkiinde bir yıllık zaman dilimi için 30 m'de ölçülmüş saatlik ortalama rüzgâr hızı değerleri ele alınmıştır. Yalova ili ve çevresi ılıman iklim özelliklerine sahip olup özellikle Kuzeydoğulu rüzgârlar yanında günün belirli saatlerinde meltemler etkilidirler. Sahil şeridi dışında karmaşık bir topografyaya sahip olan bölgede meltemlere ilave olarak vadi rüzgârları etkili olmakta ve bunun sonucunda yüksek şiddete rüzgârlar gözlemlenmektedir. Bu çalışmada kullanılan veri rüzgâr, enerji amaçlı kurulan bir istasyondan alınmıştır. Kurulan rüzgâr ölçüm direği süpürgelik denilen vadi çıkış ağzında yer almaktadır (Şekil 33).

* <http://www.yalovakultur.gov.tr/Genel/BelgeGoster.aspx?F6E10F8892433CFFD52DD97CAAFACAC867806BF441E779C9> 18.09.2010

† Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü "Yalova Meteoroloji İstasyonu ve Göztepe Meteoroloji İstasyonuna ait Meteorolojik parametreleri", (2004-2005)

Şekil 33: Ölçüm Yapılan Bölgenin Genel Görünümü



Bahsi geçen bölgede ölçülen rüzgârların istatistiksel parametreleri Tablo 14’de verilmiştir.

Serideki gözlem değerlerinin belirli bir orijine göre çeşitli derecelerden kuvvetlerinin ortalamalarına moment denilmektedir. Serideki tüm gözlem değerlerinin toplanarak serideki birim sayısına bölünmesiyle elde edilen aritmetik ortalama değeri, serinin odak noktasını veya orijine göre birinci momentini verir. 6,11 değeri, rüzgar hızı (şiddeti) serisindeki gözlem değerlerinin toplandığı odak noktadır. Serideki birimlerin veya gözlem değerlerinin aritmetik ortalamadan sapmalarının toplamı yani serinin ortalamaya göre birinci momenti sıfıra eşittir. Bir serideki gözlem değerlerinin belli bir odak nokta etrafındaki dağılımının bir ölçüsünü ifade eden varyans değeri ise serinin ortalamaya göre ikinci momenti olup serideki değerlerin değişkenliğini gösterir. Buna göre, küçük varyans değeri daha homojen bir seriye işaret ederken büyük varyans değeri daha heterojen bir seriye karşı karşıya olduğuna işaret eder. Varyans değeri serideki her bir gözlem değerinden, tüm gözlem değerlerinin aritmetik ortalaması olan değer çıkarılıp kareleri alınarak toplanması ve serideki birim sayısının bir eksiğine bölünmesi ile elde edilir. Varyans değerinin kare kökü alınarak hesaplanan standart sapma ise serideki gözlem değerlerinin, odak noktadan (aritmetik ortalamadan) sapmasının bir ölçüsüdür. Medyan ise, serideki değerler küçükten büyüğe doğru sıralandığında tam

ortada bulunan değerdir. 5,63 olarak hesaplanan medyan değerinin anlamı serideki tüm gözlemlerin yarısının 5,63'ten küçük; diğer yarısının ise 5,63'ten büyük olduğudur. Bir seride en sık tekrarlanan değer anlamına gelen mod değeri rüzgar hızı verileri için sıfır olarak hesaplanmıştır. Momentler ile asimetri (çarpıklık) ölçüsü hesaplanırken ortalamaya göre üçüncü moment, ortalamaya göre ikinci momentin 3/2. kuvvetine bölünerek çarpıklık katsayısı elde edilir ki bu katsayının sıfıra eşit olması serideki gözlem değerlerinin dağılımının ortalamaya göre simetrik olduğu anlamına gelir. Çarpıklık katsayısının sıfırdan küçük olması halinde dağılım soldan (negatif yönde) çarpık; sıfırdan büyük olması halinde dağılım sağdan (pozitif yönde) çarpıktır. Dağılımın sağdan çarpık olması durumunda sağdaki kuyruk daha uzun olup dağılımın kütlesi grafiğin sol tarafında yoğunlaşmıştır. Rüzgar hızı serisi için hesaplanan 0,73 sayısı, sağdan çarpık bir dağılıma işaret etmekte, serideki gözlem değerlerinin grafiğin sol tarafında yoğunlaştığı yani düşük değerlerin, büyük değerlere göre seride daha fazla yer kapladığı anlamına gelmektedir (Şekil 34).

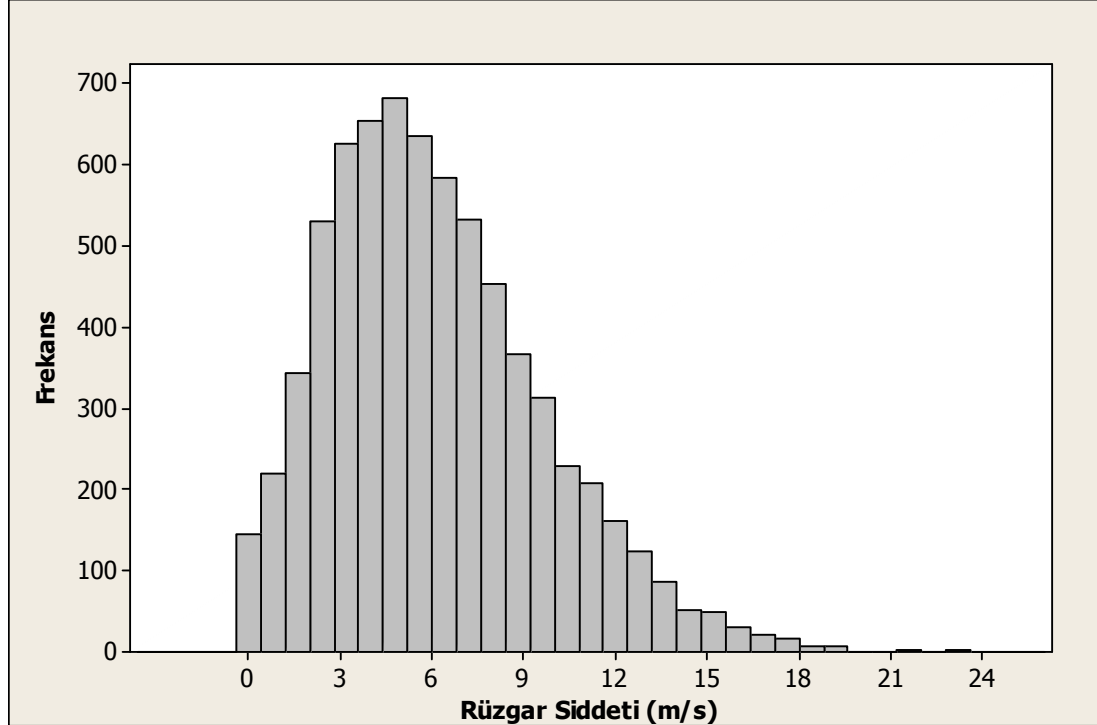
Tablo 14: Süpürgelik/Yalova rüzgâr ölçüm istasyonu rüzgâr şiddeti verilerinin istatistiksel parametreleri

Rüzgâr Parametresi	Değer
Ortalama	6,11
Standart sapma	3,53
Varyans	12,48
Medyan	5,63
Mod	0
Çarpıklık	0,73
En Küçük Değer	0
En Büyük Değer	23,23
Weibull Şekil Parametresi	1,73
Weibull Ölçek Parametresi	7,91

Rüzgâr hızının genel olarak sabit olduğu bölgelerde yani rüzgâr verilerinin medyan etrafındaki değişkenliğinin az olduğu bölgelerde şekil parametresi 3 değerini alırken düşük hızdaki rüzgârlar kadar yüksek hızdaki rüzgârların da var olduğu yani rüzgâr hızı değişkenliğinin yüksek olduğu bölgelerde şekil parametresi 2'nin altında değer almaktadır. Rüzgar hızı serisi için hesaplanan Weibull dağılımı şekil parametresinin 1,73 olması bölgede rüzgar hızı kararlılığının düşük olduğunu ima etmektedir.

Rüzgar ölçümün yapıldığı bölgenin en önemli özelliklerinden bir tanesi düşük şiddetteki rüzgâr verilerinin en fazla tekrarlanan değerlere sahip olmasıdır. Bu durum modellemede düşük şiddetli rüzgârlar yönünde taraflılığa yol açmaktadır. Bölgede ölçülen rüzgâr şiddetlerinin frekans diyagramı Şekil 34'de verilmiştir.

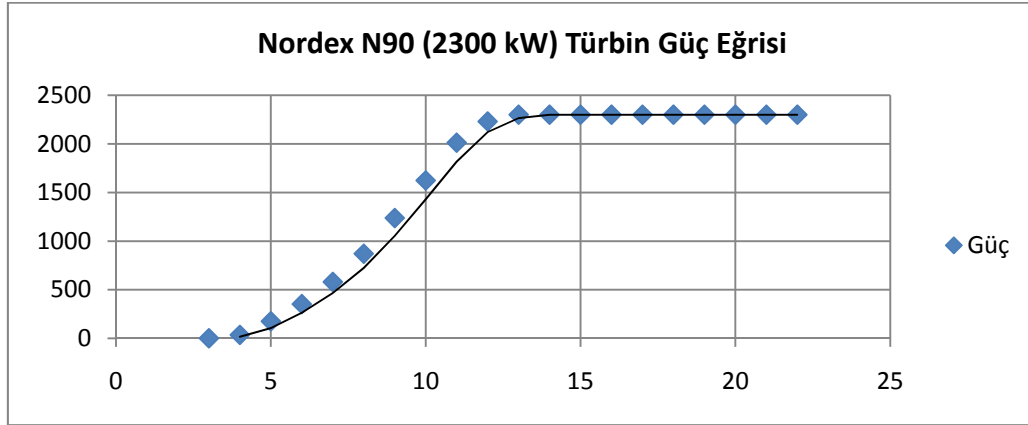
Şekil 34: Seçilen bölgedeki rüzgâr hızı verisinin frekans diyagramı



2.2. Nordex N90 (2300 Kw) Rüzgâr Türbini

Bu çalışmada rüzgâr şiddetlerinden ziyade rüzgâr türbininden üretilen elektriğin ekonomik değeri üzerinde durulacaktır. Ekonomik değerin elde edilebilmesi için öncelikle bir rüzgâr türbinine ve türbin güç eğrisine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çerçevede 2.3 MW'lık Nordex N90 rüzgar türbinine ait katalog verileri kullanılarak oluşturulan türbin güç eğrisi Şekil 35'de verilmiştir (Nordex N90 model türbinin teknik özellikleri için bkz. EK II). Türbin güç eğrisi, belli şiddetteki rüzgarlara karşılık gelen elektrik üretim miktarlarını (üretilen güçleri) göstermektedir. Nordex N90 (2.3 MW) model rüzgar türbininin elektrik üretimine başlama (cut- in) hızı 3 m/s; üretebileceği maksimum gücü üretmeye başladığı nominal hız denilen hız değeri 13 m/s ve üretimin durduğu (cut-out) hız değeri ise 25 m/s'dir.

Şekil 35: Nordex N90 (2.3 MW) Rüzgar Türbininin Türbin Güç Eğrisi



2.2.1. Türbin güç eğrisi denkleminin tahmini ve ekonomik değer zaman serisinin elde edilmesi

Türbin güç eğrisinin, cut-in rüzgâr hızı ile nominal güç hızı arasındaki eğrisel kısmı ikinci dereceden bir denklem ile; ve nominal güç hızı ile cut-out hızı arasındaki doğrusal kısmı ise başka bir denklem ile ifade edilmiştir (Denklem 1 ve Denklem 2). Eğrisel kısım için tahmin edilen regresyon parametreleri istatistiki bakımdan anlamlı

olup regresyon modelinin açıklama gücünü ifade eden regresyon denklemindeki açıklayıcı değişken sayısına göre düzeltilmiş determinasyon katsayısı ($_{adj}R^2$) % 99,2'dir. Bunun anlamı, tahmin edilen denklemindeki açıklayıcı değişkenlerin yani rüzgar hızı (şiddeti) ve rüzgar hızının karesinin, bağımlı değişkendeki yani türbinde üretilen elektrik enerjisinin miktarındaki değişimlerin % 99,2'sini açıkladığıdır (Denklem 1). Doğrusal bir denklemle ifade edilen, nominal hız (13 m/s) ile cut-out hızı (25 m/s) arasında kalan kısımda ise türbinde üretilen elektrik enerjisinin miktarı, söz konusu hız değerleri arasındaki değişkenliğe bağlı olmayıp 2300 kW değeri ile sabittir (Denklem 2).

Denklem 1: Türbin Güç Eğrisinde Cut-in ve Nominal Hızı Arasında Kalan Eğrinin Tahmin Denklemi

$$Y = -410,9 + 37,99 X + 15,84 X^2$$

Y: Türbinde üretilen elektrik enerjisi (kW)

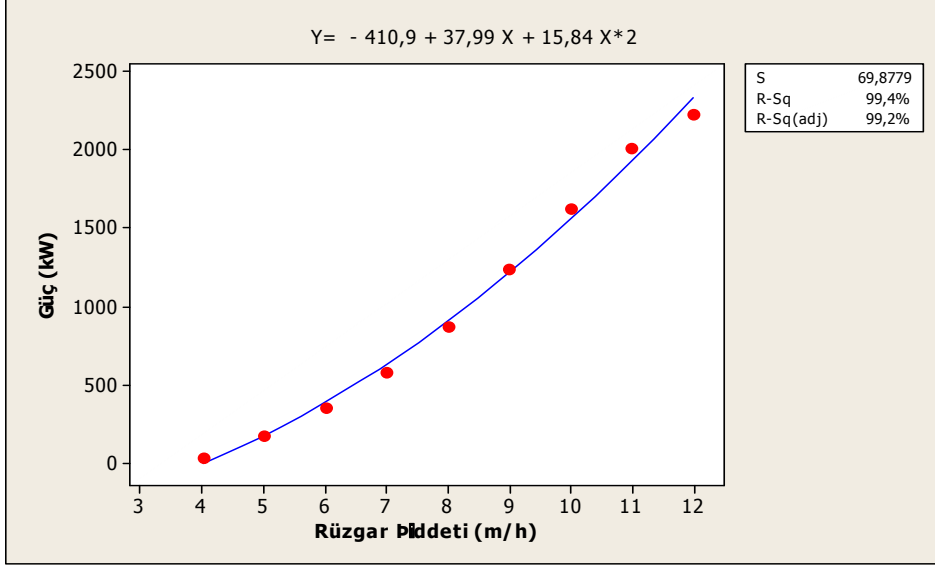
X: Rüzgar hızı (m/s)

$$_{adj}R^2 = \% 99,2$$

Denklem 2: Türbin Güç Eğrisinde Nominal Hız ile Cut-out hızı arasındaki doğrusal kısmın denklemi

$$Y = 2300$$

Şekil 36: Türbin Güç Eğrisinde Cut-in ve Nominal Hızı Arasında Kalan Eğrinin Tahmin Denklemini



Belirlenen bu denklemlerde rüzgâr hızı değerleri yerlerine konularak üretilebilecek elektrik enerjisi miktarları (güçler) bulunmuştur. Cut-in hızından küçük ve cut- out hızından büyük hızlarda türbin elektrik üretmediğinden dolayı söz konusu güç değerleri sıfır alınmıştır. Bulunan bu güç değerleri elektrik kW tarifesi 16,510 kuruş'tan olmak üzere ekonomik değer karşılıklarına çevrilmiştir. Bu aşamada düşünülen türbinin ürettiği elektriğin parasal karşılığı olan verilerin istatistiksel parametreleri Tablo 15'de verilmiştir. Burada özellikle cut-in değerinden önce ve cut-out değerinden sonra elektrik üretilemediğinden dolayı parametreler anlamında rüzgâr şiddeti ile paralellik görülmeyecektir.

Tablo 15: Süpürgelik/Yalova rüzgâr ölçüm istasyonu rüzgâr şiddeti verilerinin 2.3 MW'lık türbinden üretilebilecek elektriğin ekonomik değer karşılığının istatistiksel parametreleri

Parametre	Değer
Ortalama	99,46324
Standart sapma	119,2233
Varyans	14214,19
Mod	0
Medyan	50,77595
Çarpıklık	1,168027
En Küçük Değer	0
En Büyük Değer	379,7396

Burada, aritmetik ortalama değeri olan 99,5'in anlamı, bir yıllık zaman diliminde üretilen elektriğin ekonomik değerinin saatlik ortalamasının yaklaşık 99 Türk Lirası olduğudur. Burada özellikle varyans ve standart sapma değerlerinin büyüklüğü dikkat çekmektedir. Bilindiği gibi rüzgardaki teorik enerji miktarı rüzgar hızının küpü ile doğru oranlıdır. Ekonomik değer serisi ise bu enerji değerlerinin belli bir birim fiyat ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Enerji değerlerine bağlı olarak hesaplanan ekonomik değer serisindeki değişkenliğin büyüklüğünü bu bağlamda açıklamak mümkündür. Örneğin, rüzgar hızı 2 m/s' den 5 m/s'ye 3 birim değişirken, enerji değeri 8 Watt/m²'den 125 Watt/m² 'ye 117 birim değişmektedir. Rüzgar hızı serisinin gözlem değerlerinin değişim aralığı [0- 23,23] m/s iken ekonomik değer serisine ilişkin değişim aralığı [0- 379,73] TL'dir. Medyan değeri olan 50,77'nin anlamı bir yıllık zaman diliminin yarısında saatlik yaklaşık 50 TL değerinin altında, diğer yarısında ise bu değer üzerinde elektrik enerjisi üretildiğidir. Çarpıklık katsayısı sıfırdan büyük olup

sağdan (pozitif yönde) çarpık bir dağılıma işaret etmekte ve gözlem değerlerinin frekans dağılımının düşük değerlerde yoğunlaştığını göstermektedir.

3. EKONOMİK DEĞERLERİN MARKOV ZİNCİRİ İLE MODELLENMESİ

Ekonomik değerlerin Markov zincirinin birinci derece geçiş matrisi yaklaşımı ile modellenebilmesi için öncelikle Markov zincirindeki durumlarının tanımlanması gerekmektedir. Durumların tanımlanmasında türbin güç eğrisinin özellikleri ile rüzgar hızı verilerinin frekans dağılımına göre hareket edilerek 16 durum tanımlanmıştır. Buna göre türbin güç eğrisinde,

- cut-in hızına kadar olan 0- 3 m/s arasındaki hızlarda üretim olmadığı için bu bölgede tek durum,
- 4- 9 m/s arasında kalan bölge türbin güç eğrisinde yukarı bükey artan bir fonksiyon olduğu ve rüzgar hızı verileri bu bölgede yoğunlaştığı için bu bölgede 10 durum,
- 9- 13 m/s arasında kalan bölge türbin güç eğrisinde aşağı bükey artan bir fonksiyon olduğu için ve rüzgar hızı verilerinin bu bölgedeki frekans yoğunluğu daha az olduğu için 4 durum ve
- 13 -25 m/s arasında kalan bölge türbin güç eğrisinde doğrusal bir fonksiyon olduğu için ve bu bölgede rüzgar hızı ne olursa olsun türbinin ürettiği elektrik enerjisi miktarı sabit olduğu için tek durum tanımlanmıştır.

Modelde kullanılacak olan 16 durum için rüzgar hızı cinsinden tanımlanan sınır değerlerine karşılık gelen ekonomik değerler tespit edilerek ekonomik değer zaman serisi için 16 farklı alt küme elde edilmiştir.

Tablo 16: 16 durumun sınır değerleri

Durum	Alt Sınır	Üst Sınır
1	0	3,40
2	3,40	15
3	15	33
4	33	47
5	47	65
6	65	85
7	85	105
8	105	125
9	125	148
10	148	170
11	170	211
12	211	247
13	247	289
14	289	311
15	311	347
16	347	380

3.1. Birinci Derece Geçiş Matrisinin Oluşturulması

Markov zincirinin birinci derece geçiş matrisinde durumların belirlenmesi için güç eğrisinin özelliklerine göre hareket edilmiş ve 16 farklı alt küme oluşturulmuştur. Bu alt kümelerin güç eğrilerine dayalı yapılması çalışmaya ayrı bir yaklaşım katmıştır.

Ekonomik değer zaman serisi, 16 farklı duruma ayrılarak 16x16 boyutunda bir geçiş olasılığı matrisi elde edilmiştir (şekil 38).

Geçiş matrisinin oluşturulmasına izlenen adımlar şoyledir:

- Başlangıç gözlem değerinin, tanımlı 16 durumdan hangisinin sınır değerleri içinde bulunduğuna bakılır; örneğin ekonomik değer zaman serisindeki ilk gözlem değeri 3. (üçüncü) durumda bulunmaktadır.
- Takip eden verinin tanımlı 16 durumdan hangisinin sınır değerleri içinde bulunduğuna bakılır; örneğin takip eden gözlem değeri 5. durumda bulunuyorsa 16x16 boyutundaki frekanslar matrisinin a_{35} hücreesine 3. durumdan 5. duruma tek adımda bir geçişin gerçekleştiğini ifade eden bir frekans yazılır. Genelleştirecek olursak i satır j sütunu göstermek üzere a_{ij} hücreesine kaydedilen frekans, i . durumdan j . duruma tek adımda bir geçişin olduğu anlamındadır. Geçişlerin yönü satırdan sütuna doğrudur.
- Bir sonraki geçişin hangi durumdan hangi duruma gerçekleştiğini bulmak için aynı adımlar tekrarlanır ancak bu kez başlangıç durumu, bir önceki geçişin gerçekleştiği durumdur. Örneğin, önceki adımda 5. duruma geçen sistem, bir sonraki adımda da 5. durumda bulunuyorsa frekanslar matrisinde a_{55} hücreesine kaydedilen frekans 5. durumdan 5. duruma tek adımda bir geçişin gerçekleştiği anlamındadır.
- Bu adımlar ardışık olarak tekrarlanarak ekonomik değer zaman serisindeki tüm gözlem değerlerinin söz konusu 16 durum arasındaki tek adımlı geçişlerinin frekans matrisi oluşturulur (şekil 37).

Şekil 37: Geçiş Frekansları Matrisi

Durumlar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Satır Toplamı
1	1745	143	143	58	40	30	13	8	5	2	2	1	1	1	0	0	2192
2	159	63	67	35	20	23	4	5	0	0	3	0	0	0	0	1	380
3	127	76	109	71	57	30	18	16	7	4	4	2	0	0	0	0	521
4	40	38	64	59	64	43	20	14	10	3	2	2	0	0	0	0	359
5	45	19	67	51	66	72	44	20	16	2	7	1	0	1	0	0	411
6	26	16	26	35	76	71	58	36	27	20	12	2	3	1	1	1	411
7	17	8	14	23	35	44	57	45	39	24	19	3	0	0	0	2	330
8	9	6	8	11	26	36	48	45	39	25	29	10	3	0	1	1	297
9	8	2	9	9	7	29	23	49	43	48	41	17	9	0	2	2	298
10	7	2	4	2	7	9	11	21	40	30	61	26	13	4	3	4	244
11	5	3	5	2	6	14	17	22	34	42	88	56	37	7	8	9	355
12	2	2	3	2	2	5	9	8	16	17	42	49	50	13	11	16	247
13	1	0	2	0	4	3	5	4	10	15	23	38	42	18	24	30	219
14	0	1	0	1	0	0	1	3	1	2	7	9	19	10	14	30	98
15	1	0	0	0	1	0	0	1	6	4	7	11	21	18	28	43	141
16	0	1	0	0	0	2	2	0	5	6	8	20	21	25	49	440	579

Frekans matrisindeki a_{46} hücresindeki 43 değerinin anlamı 4. geçiş bölgesinden yani tanımlanan 4. durumdan 3. geçiş bölgesine yani tanımlanan 3. duruma 43 defa geçiş gerekleştiiğidir. Benzer şekilde a_{29} hücresindeki 0 değeri, t zamanında 2. durumda bulunan sistemin t+1 zamanında 9. duruma tek adımda geçişinin hiç gerçekleşmediğini ifade eder. Frekans matrisinde en yüksek sayılar diyagonalde gözlenmektedir. Bunun anlamı a_{11} hücresinde olduğu gibi, t zamanında i. durumda bulunan sistemin t+1 zamanında da i. durumda bulunma eğiliminde olduğudur. a_{11} hücresindeki 1745 değerinin anlamı 1. geçiş bölgesinden 1. geçiş bölgesine tek adımda 1745 geçişin gerekleştiiğidir.

Frekans matrisinin her bir hücresi, bulunduğu satırdaki tüm frekansların toplamına bölünerek hücrenin temsil ettiği geçiş bölgesine ilişkin tek adımda geçiş olasılığı değerleri hesaplanır. Bu yolla elde edilen ve hücrelerinde söz konusu geçiş olasılığı değerlerini bulunduran 16x16 boyutundaki matrise birinci derece geçiş matrisi denir.

Birinci derece geçiş matrisinin a_{ij} hücresinde bulunan ve 0 ile 1 arasında değişen değer, t zamanında i. durumda bulunan sistemin t+1 zamanında j. durumda bulunma olasılığını gösterir. Örneğin a_{11} hücresindeki 0,79 değerinin anlamı, t zamanında 1. durumda bulunan sistemin takip eden saatte yine 1. durumda bulunma olasılığının %79 olduğudur. Benzer şekilde, a_{29} hücresindeki 0 değeri, t zamanında 2. durumda bulunan sistemin takip eden saatte 9. durumda bulunma olasılığının olmadığıdır. Ancak $a_{2,11}$ hücresinde görüldüğu gibi, t zamanında 2. durumda bulunan sistem takip eden saatte % 0,78 olasılıkla 11. durumda bulunmaktadır.

Geçiş matrisindeki olasılık değerleri incelendiğinde en yüksek olasılıkların diyagonalde gerekleştiiği görülmektedir. Bunun anlamı, t zamanında i. durumda bulunan sistemin t+1 zamanında da i. durumda bulunma olasılığının yüksek olduğudur.

Şekil 38: Elde Edilen Geçiş Matrisi ve Geçiş Olaslıkları

Durumlar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Satır Toplamı
1	0,796077	0,065237	0,065237	0,02646	0,018248	0,013686	0,005931	0,00365	0,002281	0,000912	0,000912	0,000456	0,000456	0,000456	0	0	1
2	0,418421	0,165789	0,176316	0,092105	0,052632	0,060526	0,010526	0,013158	0	0	0,007895	0	0	0	0	0,002632	1
3	0,243762	0,145873	0,209213	0,136276	0,109405	0,057582	0,034549	0,03071	0,013436	0,007678	0,007678	0,003839	0	0	0	0	1
4	0,111421	0,10585	0,178273	0,164345	0,178273	0,119777	0,05571	0,038997	0,027855	0,008357	0,005571	0,005571	0	0	0	0	1
5	0,109489	0,046229	0,163017	0,124088	0,160584	0,175182	0,107056	0,048662	0,038929	0,004866	0,017032	0,002433	0	0,002433	0	0	1
6	0,06326	0,038929	0,06326	0,085158	0,184915	0,172749	0,141119	0,087591	0,065693	0,048662	0,029197	0,004866	0,007299	0,002433	0,002433	0,002433	1
7	0,051515	0,024242	0,042424	0,069697	0,106061	0,133333	0,172727	0,136364	0,118182	0,072727	0,057576	0,009091	0	0	0	0,006061	1
8	0,030303	0,020202	0,026936	0,037037	0,087542	0,121212	0,161616	0,151515	0,131313	0,084175	0,097643	0,03367	0,010101	0	0,003367	0,003367	1
9	0,026846	0,006711	0,030201	0,030201	0,02349	0,097315	0,077181	0,16443	0,144295	0,161074	0,137584	0,057047	0,030201	0	0,006711	0,006711	1
10	0,028689	0,008197	0,016393	0,008197	0,028689	0,036885	0,045082	0,086066	0,163934	0,122951	0,25	0,106557	0,053279	0,016393	0,012295	0,016393	1
11	0,014085	0,008451	0,014085	0,005634	0,016901	0,039437	0,047887	0,061972	0,095775	0,11831	0,247887	0,157746	0,104225	0,019718	0,022535	0,025352	1
12	0,008097	0,008097	0,012146	0,008097	0,008097	0,020243	0,036437	0,032389	0,064777	0,068826	0,17004	0,198381	0,202429	0,052632	0,044534	0,064777	1
13	0,004566	0	0,009132	0	0,018265	0,013699	0,022831	0,018265	0,045662	0,068493	0,105023	0,173516	0,191781	0,082192	0,109589	0,136986	1
14	0	0,010204	0	0,010204	0	0	0,010204	0,030612	0,010204	0,020408	0,071429	0,091837	0,193878	0,102041	0,142857	0,306122	1
15	0,007092	0	0	0	0,007092	0	0	0,007092	0,042553	0,028369	0,049645	0,078014	0,148936	0,12766	0,198582	0,304965	1
16	0	0,001727	0	0	0	0,003454	0,003454	0	0,008636	0,010363	0,013817	0,034542	0,036269	0,043178	0,084629	0,759931	1

3.2. Kümülatif geçiş matrisi ve sentetik verilerin üretilmesi

Kümülatif geçiş matrisi, P_C , geçiş matrisindeki olabilirlik sayılarının her satır için ardışık toplamlarının alınmasıyla oluşturulmuştur (Şekil 39).

$$P_{ik} = \sum_{j=1}^k p_{ij}$$

Rassal sayılar (Z_i) uniform (tekdüze) dağılıma uygun olarak üretilmiş olup 0 ile 1 arasında değişmektedir. Sentetik serilerin üretilmesinde kümülatif geçiş olasılıkları matrisi ve uniform dağılılan rassal sayıların kullanımında aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

1. Başlangıç durumu (i) rassal olarak belirlenir.
2. Rassal sayı, Z_i , kümülatif matrisin i. satırında aranır.
3. Takip eden durum, rassal sayının önceki durumun kümülatif olasılığından büyük ve sonraki durumun kümülatif olasılığından küçük veya eşit olduğu yerde bulunur.
4. Bu işlem döngüsü üretilen tüm rassal sayılar için tekrarlanır.

Örneğin başlangıç durumu 3 olarak belirlendiyse ve ilk rassal sayı 0,76 ise, 0,76 değeri kümülatif geçiş matrisinin 3. satırında aranır. 0,76 değeri üçüncü satır ve 4. sütunun kesiştiği hücredeki 0,73 değerinden büyük ve üçüncü satır ile 5. sütunun kesiştiği hücredeki 0,84 değerinden küçük olduğu için, geçişin gerçekleştiği durum beşinci durumdur. Bir sonraki rassal sayı kümülatif geçiş matrisinin 5. satırında aynı prensiple aranır. Örneğin ikinci rassal sayı 0,09 beşinci satırın birinci sütun ile kesiştiği hücreye tekabül ettiği için 5. durumdan 1. duruma bir geçişin olduğu kabul edilir. Bir sonraki rassal sayı artık birinci satırda aranacaktır. Birinci satırda aranacak olan bu rassal sayı kümülatif geçiş matrisinin a_{11} hücresindeki 0,79 değerinden büyük bir değer olana kadar bu ardışık işlem döngüsü kümülatif matrisin birinci satırında tekrarlanmak zorunda kalmaktadır. Ekonomik değer zaman serisinde sıfır değerlerinin açıklanan sebeplerle sıkça tekrarlanmasından dolayı birinci satıra gelindiğinde buradan başka bir satıra geçiş, işlem pek çok sefer tekrarlandıktan sonra gerçekleşmektedir. Rassal sayılar, kümülatif geçiş matrisinde karşılık buldukları durumun sınır değerlerine bağlı olarak

sentetik verilere dönüştürülmektedir. Bu nedenle birinci geçiş satırında yoğunlaşan rassal sayılar birinci durumun sınır değerleri kullanılarak sentetik verilere dönüştürülmüş, bu durum da üretilen sentetik verilerin fazla sayıda düşük değerler içermesine neden olmuştur.

Yeni ekonomik değer serisi, uniform dağılıma bağlı olarak üretilen rassal sayıların kümülâtif geçiş matrisinde karşılık bulduğu duruma göre aşağıdaki eşitliğe dayalı olarak belirlenmiştir.

$$V_{Ekonomik,Yeni} = V_{Alt Sınır} + Z_i (V_{Üst Sınır} - V_{Alt Sınır})$$

Burada $V_{Alt Sınır}$ ve $V_{Üst Sınır}$ söz konusu 16 duruma ilişkin durum sınır değerlerini ve Z_i ise rastgele sayıları ifade etmektedir. Bu eşitliğe dayalı olarak elde edilen yeni ekonomik değerlerin istatistiksel parametreleri Tablo 17’de verilmiştir.

Tablo 17: Elde edilen ekonomik değerlerin istatistiksel parametreleri

Parametre	Değer
Ortalama	75,72
Standart sapma	82,90
Varyans	6872,98
Medyan	46,21
Çarpıklık	2,03
En Küçük Değer	0,0007
En Büyük Değer	379,98

Rassal sayılar ve orijinal verilerden elde edilen kümülâtif geçiş matrisi kullanılarak elde edilen yeni geçiş matrisi Şekil 40’da verilmiştir. Orijinal geçiş matrisinde olduğu gibi bu geçiş matrisinde de en yüksek olasılıklar diyagonalde gerçekleşmektedir. Ancak, rassal sayılara ilişkin bu geçiş matrisinin a_{11} hücresinde görüldüğü gibi birinci durumdan birinci duruma tek adımda geçiş olasılığı %90’lar

civarında hesaplanmıştır. Bunun nedeni kümülatif geçiş matrisinin birinci satırındaki dögüsel sorun ve sonucu ise birinci geçiş bölgesi lehinde sentetik verilerin üretilmesidir.

Şekil 39: Kümülatif Geçiş Matrisi ve Kümülatif Geçiş Olasılıkları

Durumlar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,796077	0,861314	0,926551	0,953011	0,971259	0,984945	0,990876	0,994526	0,996807	0,997719	0,998631	0,999088	0,999544	1	1	1
2	0,418421	0,584211	0,760526	0,852632	0,905263	0,965789	0,976316	0,989474	0,989474	0,989474	0,997368	0,997368	0,997368	0,997368	0,997368	1
3	0,243762	0,389635	0,598848	0,735125	0,84453	0,902111	0,93666	0,96737	0,980806	0,988484	0,996161	1	1	1	1	1
4	0,111421	0,21727	0,395543	0,559889	0,738162	0,857939	0,913649	0,952646	0,980501	0,988858	0,994429	1	1	1	1	1
5	0,109489	0,155718	0,318735	0,442822	0,603406	0,778589	0,885645	0,934307	0,973236	0,978102	0,995134	0,997567	0,997567	1	1	1
6	0,06326	0,10219	0,16545	0,250608	0,435523	0,608273	0,749392	0,836983	0,902676	0,951338	0,980535	0,985401	0,992701	0,995134	0,997567	1
7	0,051515	0,075758	0,118182	0,187879	0,293939	0,427273	0,6	0,736364	0,854545	0,927273	0,984848	0,993939	0,993939	0,993939	0,993939	1
8	0,030303	0,050505	0,077441	0,114478	0,20202	0,323232	0,484848	0,636364	0,767677	0,851852	0,949495	0,983165	0,993266	0,993266	0,996633	1
9	0,026846	0,033557	0,063758	0,09396	0,11745	0,214765	0,291946	0,456376	0,600671	0,761745	0,899329	0,956376	0,986577	0,986577	0,993289	1
10	0,028689	0,036885	0,053279	0,061475	0,090164	0,127049	0,172131	0,258197	0,422131	0,545082	0,795082	0,901639	0,954918	0,971311	0,983607	1
11	0,014085	0,022535	0,03662	0,042254	0,059155	0,098592	0,146479	0,208451	0,304225	0,422535	0,670423	0,828169	0,932394	0,952113	0,974648	1
12	0,008097	0,016194	0,02834	0,036437	0,044534	0,064777	0,101215	0,133603	0,198381	0,267206	0,437247	0,635628	0,838057	0,890688	0,935223	1
13	0,004566	0,004566	0,013699	0,013699	0,031963	0,045662	0,068493	0,086758	0,13242	0,200913	0,305936	0,479452	0,671233	0,753425	0,863014	1
14	0	0,010204	0,010204	0,020408	0,020408	0,020408	0,030612	0,061224	0,071429	0,091837	0,163265	0,255102	0,44898	0,55102	0,693878	1
15	0,007092	0,007092	0,007092	0,007092	0,014184	0,014184	0,014184	0,021277	0,06383	0,092199	0,141844	0,219858	0,368794	0,496454	0,695035	1
16	0	0,001727	0,001727	0,001727	0,001727	0,005181	0,008636	0,008636	0,017271	0,027634	0,041451	0,075993	0,112263	0,15544	0,240069	1

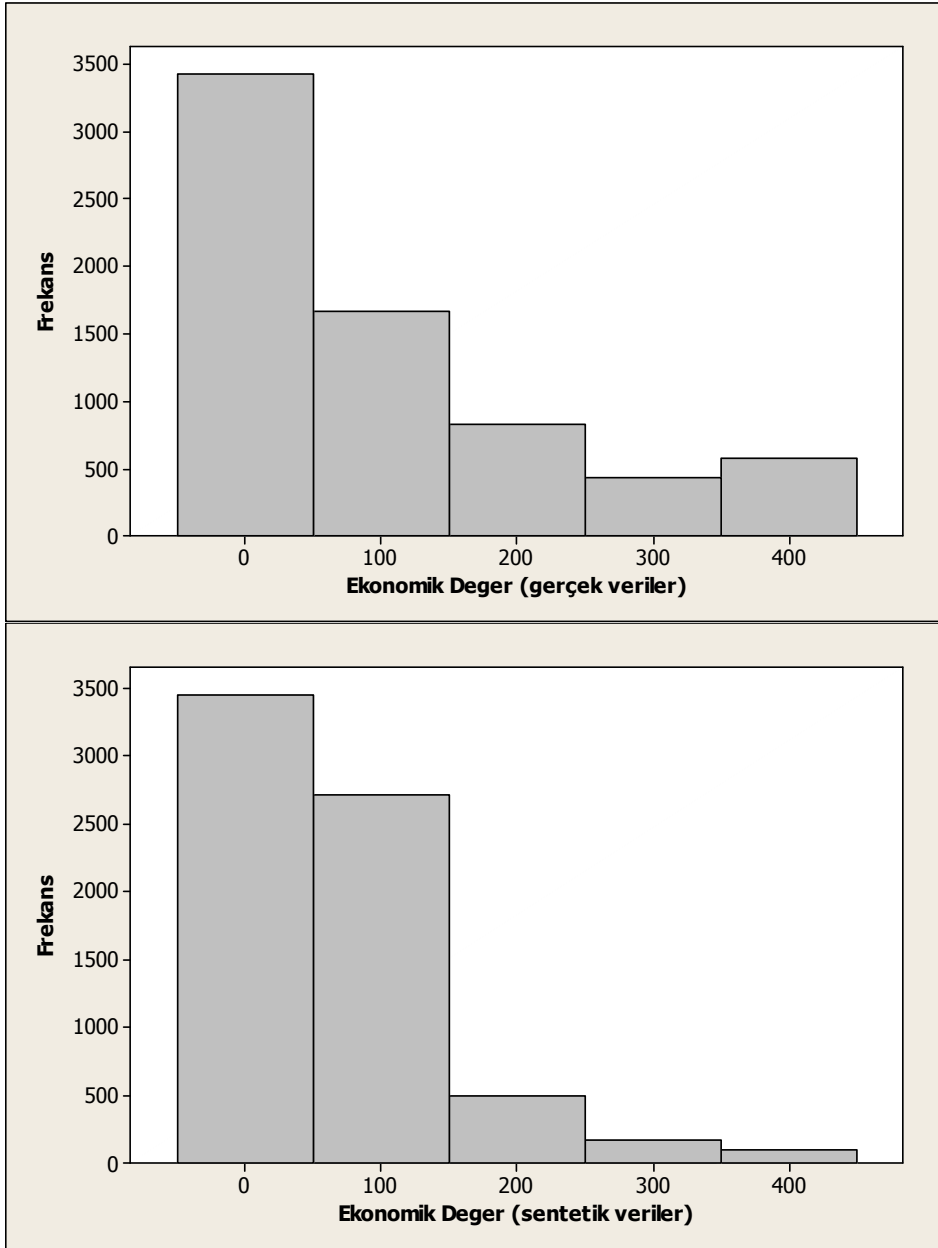
Şekil 40: Sentetik veriler için geçiş matrisi

Durumlar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Satır Toplamı
1	0,905613	0,065936	0,011726	0,007689	0,002884	0,002115	0,00173	0,000769	0,000769	0,000577	0,000192	0	0	0	0	0	1
2	0,518692	0,239875	0,107477	0,060748	0,029595	0,012461	0,006231	0,009346	0,003115	0,001558	0,004673	0,003115	0,001558	0,001558	0	0	1
3	0,298319	0,273109	0,113445	0,134454	0,10084	0,029412	0,016807	0,012605	0	0	0	0	0	0,008403	0,008403	0,004202	1
4	0,196347	0,191781	0,155251	0,146119	0,091324	0,09589	0,063927	0,027397	0,022831	0,009132	0	0	0	0	0	0	1
5	0,141935	0,058065	0,135484	0,206452	0,135484	0,116129	0,083871	0,032258	0,019355	0,03871	0,006452	0	0,006452	0,006452	0	0,012903	1
6	0,087302	0,071429	0,103175	0,126984	0,190476	0,134921	0,119048	0,055556	0,031746	0,047619	0,007937	0,007937	0,007937	0,007937	0	0	1
7	0,028571	0,038095	0,047619	0,095238	0,114286	0,104762	0,190476	0,2	0,057143	0,038095	0,038095	0	0,038095	0	0,009524	0	1
8	0,043956	0,076923	0,054945	0,087912	0,087912	0,175824	0,087912	0,120879	0,032967	0,087912	0,076923	0,032967	0,010989	0	0	0,021978	1
9	0,050847	0,067797	0	0,050847	0,067797	0,050847	0,084746	0,20339	0,135593	0,118644	0,050847	0,033898	0,033898	0,016949	0,033898	0	1
10	0	0,033333	0,016667	0,05	0,066667	0,1	0,116667	0,1	0,183333	0,1	0,05	0,116667	0	0	0,016667	0,05	1
11	0,025	0	0,025	0,025	0,05	0,125	0,05	0,125	0,075	0,15	0,175	0,05	0,025	0	0,05	0,05	1
12	0	0	0	0,04	0,04	0,08	0,04	0,08	0,16	0,08	0,08	0,12	0,08	0,08	0	0,12	1
13	0	0,05	0	0	0	0	0	0,05	0,1	0,15	0,1	0,1	0,05	0,15	0,2	0,05	1
14	0	0	0	0,047619	0,047619	0	0,095238	0	0	0,095238	0,190476	0,095238	0,095238	0,095238	0,095238	0,142857	1
15	0	0,025641	0	0,025641	0	0,025641	0,025641	0,051282	0,076923	0,102564	0,051282	0	0,051282	0,076923	0,205128	0,282051	1
16	0,02439	0,02439	0	0	0	0	0	0	0,02439	0	0	0,02439	0,04878	0,121951	0,414634	0,317073	1

4. SENTETİK VERİLER İLE GERÇEK VERİLERİN İSTATİSTİKİ ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI VE BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Düşük şiddetteki değerlerin toplam veride büyük bir oran kaplamasından dolayı üniform dağılıma dayalı üretilen rassal sayılar, kümülâtif geçiş matrisinde birinci geçiş bölgesinde yoğunlaşmış; böylece birinci geçiş bölgesi lehinde sentetik veriler üretilmiştir. Bu durum model parametrelerinin daha düşük çıkması sonucunu doğurmuştur. Gerçek ve sentetik verilere ilişkin sıklık diyagramlarında da görüldüğü gibi her iki seride de düşük değerler yoğunlukla bulunmakla birlikte gerçek verilerde yüksek değerlere; sentetik verilerde ise düşük değerlere daha sık rastlanmaktadır (Şekil 41).

Şekil 41: Gerçek veriler ile sentetik verilere ilişkin sıklık diyagramları



Tablo 18: Gerçek Veriler ile Sentetik Verilerin İstatistikî Parametreleri

Parametre	Değer (Sentetik)	Değer (Gerçek)
Ortalama	75,72	99,46
Standart sapma	82,90	119,22
Varyans	6872,98	14214,19
Medyan	46,21	50,77
Çarpıklık	2,03	1,16
En Küçük Değer	0,0007	0
En Büyük Değer	379,98	379,73

Parametrelerdeki sapma, değerlerin değişim aralığı göz önünde bulundurulduğunda, ihmal edilebilir düzeyde olup modelin geçerliliği korunmaktadır. Aynı model kullanılarak rüzgâr hızları doğrudan modellendiğinde de parametrelerde düşük miktarda sapmalar gözlenmesine rağmen, rüzgâr hızı serisinde sıfır değerlerinin ekonomik değer serisine göre çok daha az tekrarlanması nedeniyle model sonuçlarının gerçek verilere daha iyi uyum sağladığı görülmüştür (bkz. Ek I).

Markov zinciri modelinin birinci derece geçiş matrisi yöntemi ile elde edilen kümülâtif geçiş matrisi, rüzgâr elektriğinin ekonomik değerleri için istenilen uzunlukta sentetik seriler üretmede kullanılabilir. Ancak modelde üretilen sentetik veriler, gerçek verilere göre daha düşük ortalama ve varyans değerlerine sahip olacaktır.

SONUÇ

Bu çalışmada, yaşamın her alanında giderek artan bir öneme sahip enerji konusu, sürdürülebilirlik kavramı çerçevesinde temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları açısından ve rüzgâr enerjisinin yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki yerini ve önemini vurgulayarak incelenmeye ve rüzgâr gücü ile üretilen elektriğin ekonomik değer zaman serisinin simülasyonunda Markov zinciri modelinin birinci derece geçiş matrisi yaklaşımının kullanımının uygunluğu gösterilmeye çalışılmıştır.

Günümüzde insanlığın ve kurmuş olduğu toplumsal yapının sürdürülmesinde rol oynayan en önemli faktör enerjidir. Dramatik ölçüdeki etkileri tüm dünyayı sarsan 1973 Petrol Krizi ile kritik önemi gözler önüne serilen enerji konusuna ilgi sürekli olarak artmakta olup enerjinin, ekonominin temel girdilerinden biri, sosyal ve ekonomik kalkınmanın vazgeçilmez bir unsuru olduğu tüm dünya tarafından kabul edilmektedir. Dengeli ve sürdürülebilir bir kalkınma ucuz, yeterli ve güvenilir enerji kaynaklarına sahip olmakla ve bu kaynakların yönetiminde kalitenin ve etkinliğin sağlanmasıyla yakından ilgilidir. Dünya enerji ihtiyacı ve talebi, nüfus artışı, teknolojik ilerlemeler ve ülkelerin gelişmişlik düzeyi ile paralel olarak artmakta bu durum enerji kaynaklarının sonluluğuna ilişkin tartışmaları gündeme getirmektedir. Bugün dünya birincil enerji tüketiminin büyük kısmı fosil yakıt kullanımı ile sağlanmaktadır. Bu durum öncelikle, bilinen fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmekte olduğu gerçeği ve zaten kıt olan bu kaynakların yerküre üzerindeki dengesiz dağılımı ile bağlantılı sorunlar şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Diğer yandan, fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan ciddi çevre sorunları, yeryüzündeki canlı hayatını tehlikeye atarak alternatif ve temiz enerji kaynakları ve bunların kullanımına uygun yeni teknolojilerin arayışını zorunlu kılmaktadır. Günümüzde enerji sorunu, belli ülkelerin sorunu olmaktan çıkmış ve küresel bir sorun halini almıştır. Son yirmi otuz yıldır yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında ve gelişiminde hızlı bir artış gerçekleşmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından Türkiye önemli bir potansiyele sahiptir ve ülkede yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki kullanımı

artmaktadır. Türkiye’de, ekonomik büyümeye paralel olarak enerji talebi de artmakta; artan bu talep ise büyük ölçüde enerji ithalatı yoluyla karşılanmaktadır. Ekonomik büyüme ile enerji tüketimi arasındaki nedensel ilişkinin tespitine yönelik olarak yapılan ampirik çalışmalar Türkiye’de enerji tüketiminin büyümeyi tetiklediği yönünde bulgular sağlamıştır. Bu durum, Türkiye’nin enerji ithalatçısı bir ülke konumunda olduğu gerçeği ile birlikte değerlendirildiğinde, ülkenin atıl ulusal kaynaklarının enerji üretimi sürecine dâhil edilmesi ve mevcut kaynakların kullanımında etkinliğin ve verimliliğin sağlanmasının ülke ekonomisi için muazzam öneme sahip olduğunun da kanıtıdır. Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynakları açısından barındırdığı potansiyelin, bu anlamda hem enerjide dışa bağımlılığın azaltılmasında ve enerji arz güvenliğinin sağlanmasında hem de ülkenin ulusal kaynaklarının kullanımının (1) uzun dönemde maliyetleri azaltıcı etkisi (2) milli gelir içinde yatırımların payını artırıcı etkisi nedeniyle, ekonomiyi canlandırıcı ve büyümeyi tetikleyici rolü göz ardı edilmemelidir. Diğer yandan, Türkiye’nin atıl durumdaki yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile zaman içerisinde ülkenin fosil yakıtlara olan bağımlılığının azaltılabileceği ve böylece hem fosil yakıt fiyatlarındaki artışlara ve rezervlerindeki azalışlara bağlı risklerin hem de kullanımları neticesinde şekillenen sera gazı emisyonuna bağlı risklerin minimize edilebileceği açıktır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en gelişmiş ve ticari açıdan en uygunu, çevre sorunlarına neden olmadığı gibi, güneş var olduğu sürece tükenmeyecek olan rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr gücü küresel kurulu kapasitesi büyüme oranları yıllık olarak yaklaşık %30 düzeylerinde gerçekleşmektedir. Türkiye, coğrafi konumu ve hüküm süren iklim koşulları itibariyle rüzgâr enerjisi bakımından teorik olarak elektrik enerjisinin tamamını karşılayabilecek seviyededir. Türkiye, rüzgâr potansiyeli bakımından özellikle Marmara ve Ege bölgeleri ile Batı Karadeniz ve Hatay civarında önemli avantajlara sahip bir ülkedir. Son yıllarda, özellikle rüzgâr enerjisine yönelik yasal düzenlemeler ve teşvikler ile bu alandaki yatırımların artması neticesinde 2009 yılında Türkiye, rüzgâr enerjisi kurulu kapasitesini önceki yıla göre en fazla arttıran ikinci ülke konumuna gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında özellikle

rüzgârda, elektrik üretim tesislerinin yatırım ve işletim maliyetleri küresel ölçekte giderek azalarak konvansiyonel yakıtlar ile rekabet edebilecek düzeye doğru gerilemektedir. Rüzgâr ve diğer enerji kaynaklarından elektrik üretim tekniklerinin yatırım ve üretim maliyetleri karşılaştırıldığında rüzgâr kaynağının da yaygın olarak kullanılan diğer enerji kaynakları kadar ekonomik olduğu görülmektedir. Yenilenebilir enerjiler, 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. Enerjide yüksek oranda dışa bağımlı, enerji ithalatçısı bir ülke olarak Türkiye’de rüzgâr enerjisi kullanımının artması, dışa bağımlılığın azaltılmasında önemli bir araç olarak belirlemektedir.

Rüzgâr gücünden elde edilebilecek enerji miktarının hesaplanmasında kullanılan en önemli veri rüzgâr hızıdır. Rüzgâr kaynağının değişken doğasından ötürü, rüzgâr hızının veya rüzgâr hızına bağlı enerji üretim düzeyi gibi büyüklüklerin önceden öngörülebilmesi faydalıdır. Doğru ölçümler ve modellemeler ile rüzgârdan elde edilebilecek enerji miktarını küçük sapmalarla hesaplamak mümkündür. Öngörü modelleri, rüzgâr türbinlerinin ve rüzgâr çiftliklerinin işletimsel kontrolünde kullanılmak üzere saniyeler ve dakikalar biçimindeki zaman skalaları için kısa dönemli türbülans değişimlerinin tahmini ve güç istasyonlarının kurulumuna ilişkin kararlarda yol gösterici olarak kullanılmak üzere saatlik ve günlük zaman periyotları biçimindeki uzun dönemli tahminler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Kısa dönemli tahminler genel olarak istatistikî yöntemlere dayanırken uzun dönemli tahminler meteorolojik yöntemleri içermektedir. Meteorolojik ve istatistikî yöntemlerin bir bileşimi rüzgâr çiftliklerinden elde edilebilecek güç miktarının tahmininde oldukça faydalı bilgiler sunabilmektedir. Genel olarak yapılan tüm çalışmalarda ortalama rüzgâr hızları göz önünde tutulmaktadır. Özellikle ani değişimler göstermeyen yerlerdeki rüzgâr hızları durumunda ortalama daha da geçerlidir.

Rüzgârdan elde edilebilecek enerji miktarının tahmin edilebilirliği, rüzgâr enerjisine yapılacak yatırımları, belirsizlik faktörünü azaltmak yoluyla cazip kılabilir. Elektrik piyasasında fiyat teklifleri gelecekteki üretim miktarı tahminlerine dayanarak yapılmaktadır. Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretiminde ise söz konusu üretim miktarı rüzgâr şiddetine doğrudan bağlıdır. Bu açıdan bakıldığında rüzgâr şiddetinin veya rüzgâr şiddetine bağlı elektrik üretim düzeyinin küçük sapmalarla tahmin edilebilmesi, serbest elektrik piyasasında bir fiyat düzeyinin oluşmasında da doğrudan etkilidir. Rüzgâr enerjisi, çoğunlukla küçük veya orta ölçekli elektrik üretim tesislerinin dağıtım sistemi gerilim seviyesinden elektrik şebekesine bağlanmasıyla sisteme dâhil edilen ve üretim düzeyi büyük değişkenlikler gösteren bir kaynaktır. Rüzgâr enerjisi üretimindeki süreksizlik, bir gün sonraki üretim düzeyinin tahmin edilmesinde olduğu gibi üreticilerin piyasaya verecekleri fiyat tekliflerin belirlenmesinde de zorluklara neden olmaktadır. Bu noktada, rüzgâr enerjisi için iyi çalışan bir öngörü modeli hem üreticiler hem de sistem açısından sorunu hafifletebilir. Bir gün ilerisi için yapılan tahminler, güç istasyonlarının çalışma zamanlarının planlanmasında kullanılarak etkinlik artırılabilir ki böylece tesislerin işletim maliyetleri de azaltılabilir.

Teorik Weibull, Rayleigh, lognormal ya da gamma olasılık dağılım fonksiyonları rüzgâr hızı büyüklüğünün tahmin edilmesinde pratikte sıkça kullanılmaktadır. Otoresif hareketli ortalama modelleri (ARMA) ve bunun modele bir dışsal değişkenin de katılmasıyla genişletilmiş bir tipi olan ARMAX modelleri, yapay sinir ağları, bulanık mantık ve wavelet (dalgacık dönüşümü) temelli yöntemler ve Markov zincirleri rüzgâr hızı ve rüzgâr hızına bağlı büyüklüklerin tahmininde ve modellenmesinde kullanılmaktadır. Ekonometrik modellerin özellikle kısa ve orta dönemli öngörü başarısının yüksek olduğu gözlenmiştir.

Markov zinciri modelleri, literatürde rüzgâr hızı ve rüzgârın enerji değerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar, rüzgâr hızı ve rüzgâr enerjisi serilerinin, Markov zinciri modelinin geçiş matrisi yaklaşımı kullanılarak modellenebileceğini, gerçek verilerden elde edilen kümülatif geçiş

matrisinin istenilen uzunlukta sentetik veriler üretmek için kullanılabilceğini ve bu yolla elde edilen sentetik verilerden herhangi bir rüzgâr enerjisi sistemi için girdi verisi olarak yararlanılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, söz konusu literatürden hareketle, Markov zincirinin geçiş matrisi yaklaşımının, rüzgâr türbinlerinde rüzgâr hızına bağlı olarak üretilen enerji miktarının ekonomik değer zaman serisinin simülasyonundaki geçerliliği araştırılmıştır. Bu amaçla, Yalova ili Süpürgelik mevkiinde bir yıllık süre için ölçülmüş saatlik ortalama rüzgâr hızı verilerine bağlı olarak üretilebilecek elektrik enerjisinin ekonomik değer serisinin simülasyonu Markov zinciri modelinin birinci derece geçiş matrisi yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Markov zincirinin geçiş matrisi oluşturulurken türbin güç eğrisinin özellikleri temel alınarak ve ekonomik değerlerin ortalama ve varyans değerleri göz önünde bulundurularak toplamda 16 durumlu bir süreç tanımlanmıştır. Güç eğrisine dayalı bir yaklaşımın benimsenmesi ve Markov zinciri modelinin rüzgâr elektriğinin ekonomik modellemesinde kullanılması literatüre yeni katkılar sağlamıştır. Bütün bunların yanında düşük şiddetteki değerlerin toplam veride büyük bir oran kaplamasından dolayı uniform dağılıma dayalı üretilen rassal sayılar, kümülâtif geçiş matrisinde birinci geçiş bölgesinde yoğunlaşmış; böylece birinci geçiş bölgesi lehinde sentetik veriler üretilmiştir. Bu durum model parametrelerinin daha düşük çıkması sonucunu doğurmuştur. Parametrelerdeki sapma, değerlerin değişim aralığı göz önünde bulundurulduğunda, ihmal edilebilir düzeyde olup modelin geçerliliği korunmaktadır. Gerçek veriler ile sentetik verilerin karşılaştırılması, rüzgâr türbinlerinden üretilen elektriğin ekonomik değer serisinin istatistikî parametrelerinin güvenilir biçimde yeniden üretilebileceğini göstermektedir. Markov zinciri modelinin birinci derece geçiş matrisi yöntemi ile elde edilen kümülâtif geçiş matrisi, rüzgâr elektriğinin ekonomik değerleri için istenilen uzunlukta sentetik seriler üretmede kullanılabilir. Sentetik zaman serilerinden herhangi bir rüzgâr enerjisi sisteminin ekonomik analizlerinde yararlanılabilir. Böylelikle, rüzgâr ölçümlerinin yapılabilmesi için gerekli teçhizat ve cihazların satın alım ya da kiralama maliyetlerinden, cihazların kalibrasyonuna ilişkin çeşitli maliyetlerden ve zamandan tasarruf edilebilir. Model, ölçüm olmayan noktalardaki kestirimler veya eksik verilerin tamamlanması için kullanılabilir. Modelin,

özellikle ileriye yönelik uzun dönemli planlamalarda, gelir/gider veya yatırımların kârlılığına ilişkin analizlerde kullanılabilir olması bu çalışmanın en önemli sonucudur.

Verilerin çok sayıda rüzgâr çiftliğinden elde edilmesi model parametrelerindeki sapmaların minimize edilmesine katkıda bulunacaktır. Diğer yandan, her ne kadar planlama ve öngörü amacıyla yapılan çalışmalarda kullanılan rüzgâr verileri çoğunlukla bir yıllık dönemi kapsasa da daha uzun zaman dilimini içeren verilerin kullanılması da model sapmalarını azaltarak modellerin tahmin başarısını arttıracaktır. Bu bağlamda, Türkiye'nin çeşitli bölgelerindeki rüzgâr çiftliklerinden elde edilebilecek veriler ile model makro düzeyde geliştirilerek ülke çapında ya da bölgesel olarak uzun dönemli ekonomik analizlerde kullanılabilir şekilde yapılandırılabilir.

İleriki çalışmalarda, mevsimsel etkinin bertaraf edilmesi amacıyla simülasyon işleminin aylık verilerle çalışılması ve önceki çalışmaların bulgularından hareketle daha iyi sonuçlar elde edilebileceği düşünüldüğü için Markov zinciri modelinin en azından ikinci derece geçiş matrisi yönteminin denenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbad, J. R.
2010 “Electricity market participation of wind farms: the success story of the Spain pragmatism”, *Energy Policy*, 38, 3174- 3179 pp.
- Acaroğlu, M.
2007 *Alternatif Enerji Kaynakları*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara
- Akdağ S. A. – Güler .
2010 “Evaluation of wind energy investment interest and electrşçsty generation cost analysis for Turkey”, *Applied Energy*, 87, 2574- 2580 pp.
- Akkaya S.,
2007 “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Açısından nemi ve Bir Rüzgar Enerjisi Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
- Akova, İ.
2008 *Yenilenebilir Enerji Kaynakları*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara
- Akyüz O.
2000 “Rüzgar Enerjisi ile Diğer Enerji Kaynaklarının Fiyat/ Maliyet Analiz Raporu”, <http://www.egetek.org> Erişim Tarihi: 21.08.2010
- Albostan A. – eki Y. – Eren L.
2009 “Rüzgar Enerjisinin Türkiye’nin Enerji Arz Güvenliğine Etkisi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, C 24, No 4, ss. 641-649, Ankara
- Altınay G. – Karagl E.
2005 “Electricity consumption and economic growth: evidence from Turkey” *Energy Economics* 27, 849–856 pp.
- Apergis N. – Payne J. E.
2010a “Renewable energy consumption and growth in Eurasia”, *Energy Economics* 32, 1392-1397 pp.
2010b “Renewable energy consumption and economic growth evidence from a panel of OECD countries”, *Energy Policy*, 38, 656-660 pp.
- Assmann, D., et al.
2006 *Renewable Energy, A Global Review of Technologies, Policies and Markets*, Earthscan, London
- Bakırtaş T. - Karbuz S.- Bildirici M.
2000 “An econometric analysis of electricity demand in Turkey” *METU Studies in Development*, vol. 27 (1-2), Middle East Technical University, Ankara, Turkey, pp. 23–34.

- Boyle, Goldfrey, et al.
2004 *Energy Systems and Sustainability: Power for a Sustainable Future*, The Open University, Milton Keynes
- British Petrol
2010 “*BP Statistical Review of World Energy*”, London
- Brokish, K.,- Kirtley, J.,
2009 “Pitfalls of Modeling Wind Power Using Markov Chains”, Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on December 24, 2009 at 16:11 from IEEE Xplore.
- Burton T., et al.
2008 *Wind Energy Hand Book*, John Wiley & Sons, Chichester
- Cassedy E.- Grossman P.
1998 *Introduction to Energy: Resources, Technology and Society*, Cambridge University Press
- Cerit, C.- Yüksel, M.,
2004 *Olasılık*, Beta Yayınevi, İstanbul
- Ceylan, H. - Öztürk, H.K.,
2004 “Estimating energy demand of Turkey based on economic indicators using genetic algorithm approach”, *Energy Conversion and Management* 45, 2525–2537
- Chiou-Wei S., Z. – Chen C. – Zhu Z.
2008 “Economic growth and energy consumption revisited—Evidence from linear and nonlinear Granger causality”, *Energy Economics* 30, 3063–3076
- Costa, A., et al.
2008 “A review on the young history of wind power short-term prediction”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 12 (6), 1725–1744.
- Çetin N., S. – Başaran K.
2010 “Adnan Menderes Üniversitesi Yerleşkesinin Rüzgar Elektrik Potansiyelinin Belirlenmesi”, VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, ss. 167- 174, Bursa
- Çetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F.,
2004 “Biyogaz, Türkiye ve Seçenekler”, V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul
- Çetintaş H. – Çetin T.
2004 “Elektrik Piyasasında Rekabetçi Uygulamalar” Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, C.9, S. 1, s.111-137

- Çevirgen B.
2008 “The Casual Relationship Between Energy Consumption and Economic Growth”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Bölümü, Ankara
- Çınar Ö.
2002 “Türkiye’nin Rüzgar Enerjisi Avantajları ve Hatay İlinde Maliyet ve Enerji Potansiyelinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Bölümü, Isparta
- Doğru C.,
2010 “Türkiye’de Elektrik Piyasasının Yeniden Yapılandırılması Sürecine Bir Bakış”, Namık Kemal Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sosyal Bilimler Metinleri, No:1, Tekirdağ
- Dönmez, Ş.,
1998 “Nükleer Enerjinin Eli Kulağında”, Ekonomik Forum Dergisi, Y.5, S.3
- Duran, M.,
1993 “Nükleer Enerji Gerçeği ve Türkiye”, Çevre ve Mühendis Dergisi, Y. 1, S. 3,
TMMOB Çevre Mühendisler Odası Yayın Organı
- European Wind Energy Association
2009 The Economics of Wind Energy, EWEA
- Erdal, G., - Erdal, H.,- Esengun, K.,
2008 “ The causality between energy consumption and economic growth in Turkey” Energy Policy 36, 3838–3842
- Erdoğan, E.,
2009 “On the wind energy in Turkey”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 1361- 1371pp.
- Eren Ö., - Öztürk H. – Atal M.
2010 “Güneş Işınım Ekserji ve Bursa İlindeki Değişimi”, VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, ss. 373- 380, Bursa
- Erol E.,
2007 “Türkiye’ de Elektrik Enerjisinin Tarihi Gelişimi: 1902- 2000”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, İstanbul
- Ersan, Oya,
1993 “Nükleer Santrallerde Atık Sorunu”, Çevre ve Mühendis Dergisi, Y. 1, S. 3, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası Yayın Organı
- Ettoumi, F.Y., et al.
2003 “Statistical bivariate modelling of wind using first order Markov chain and Weibull distribution”, Renewable Energy, 28, 1787- 1802 pp.

- Fairman, D., et al.
2007 "Using Solar Energy to Arrest the Increasing Rate of Fossil-Fuel Consumption: The Southwestern States of the USA as Case Studies, *Energy Policy*, 35: 567-576.
- Fujisawa N.- Shirai H.
1987 "Experimental Investigation on the Unsteady Flow Field Around a Savonius Rotor at the Maximum Power Performance, *Wind Engineering*, Tokyo, 11(4), 195- 206 pp.
- Gilks W.R., et al.
1996 *Markov Chain Monte Carlo In Practice*, Chapman&Hall, London
- Gökçınar, R., E.,
2008 "Rüzgar Enerjisi Fayda-Maliyet Analizi ve Hibrit Sistemler", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Gupta, H., - Roy, S.,
2007 *Geothermal Energy: An alternative Resource for 21st Century*, Elsevier B.V. , Amsterdam
- Güler, Ö.
2009 "Wind energy status in electrical energy production of Turkey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 473- 478 pp.
- Güner, S., Albostan, A.,
2007 "Türkiyenin Enerji Politikaları," IV. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Gaziantep
- Güneş, M.,
1999 "Fotovoltaik Sistemin Sağladığı Elektrik Enerjisi İle Çalışan Bir Uygulama Sisteminin Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, Elazığ
- Gürel A.
2010 "Biyogaz Üretimini Gelişimi ve Ekonomikliği", VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, ss. 321-328, Bursa
- Gürsoy, Umur
2004 "Enerjide Toplumsal Maliyet ve Temiz ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları", Türk Tabipler Birliği, Ankara, s. 36
- Global Wind Energy Council
2009 "2008-2009 Global Installed Wind Power Capacity", downloaded GWEA official web site, 11.07.10
- Halaç, Osman,
2001 *Kantitatif Karar Verme Teknikleri*, Alfa Kitabevi, Bursa

<http://www.dmi.gov.tr>
<http://www.dmi.gov.tr/genel/saglik.aspx?s=123> (Erişim Tarihi: 02.08.10)
http://www.enerji.gov.tr/tr/dokuman/Enerji_Kaynaklarinin_ve_Enerjinin_Kullaniminda_Verimlilikin_Artirilmesine_Dair_Yoneticilik.pdf
http://www.enerji.gov.tr/mevzuat/5627/5627_Sayili_Enerji_Verimliliği_Kanunu.pdf
<http://www.epdk.gov.tr/web/elektrik-piyasasi-dairesi/kanunlar>
http://www.enerji.gov.tr/mevzuat/5346/5346_Sayili_Yenilenebilir_Enerji_Kaynaklarini_n_Elektrik_Enerjisi_Uretimi_Amacli_Kullanimina_Iliskin_Kanun.pdf
http://www.emo.org.tr/ekler/ac04853f8058f61_ek.doc
<http://www.reuk.co.uk>
<http://windpower.org>
<http://www.thewindpower.net/wind-turbine-datasheet-technical-8-nordex-n90-2300.php>
<http://www.yalovakultur.gov.tr/Genel/BelgeGoster.aspx?F6E10F8892433CFFD52DD97CAAFACAC8C022CBCFC7BD3FB8>

Holttinen H.

2005 “Optimal electricity market for wind power”, Energy Policy, 33, 2052-2063 pp.

International Energy Agency

2000 “Needs for Renewables: Developing a New Generation of Sustainable Energy Technologies”, Paris

2003 “Renewables for Power Generation: Status and Prospects”, Paris

2007 “Renewables for Power Generation: Status and Prospects”, Paris

2009 “World Energy Outlook 2009”, Paris

2009 “Key World Statistics 2009”, Paris

İzgi E. vd.

2010 “Rüzgar Enerjisinde Kısa Süreli Rüzgar Hızı ve Güç Tahminlerinin Karşılaştırılması”, VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, ss. 532- 539, Bursa

Jebaraj S. – Iniyar S.

2006 “A review of energy models”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 10, 281- 311pp.

Jobert, T. – Karanfil, F.

2007 “Sectoral energy consumption by source and economic growth in Turkey” Energy Policy 35, 5447–5456.

Jones D.I. – Lorenz M.H.

1986 “An application of a Markov chain noise model to wind generator simulation”, Mathematics and Computers in simulation, 28, 391- 402 pp.

- Jonsson T. – Pinson P. – Madsen H.
2010 “On the market impact of wind energy forecasts”, *Energy Economics*, 32, 313- 320 pp.
- Kaltschmitt M. Streicher
2007 *Renewable Energy Technology, Economics and Environment*, Springer, Berlin
- Kaminsky, F.- Kirchoff, R.- Syu C., - Manwell J.
1991 “A comparison of alternative approaches for the synthetic generation of a wind speed timeseries,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 113, 280–289 pp.
- Kar M. – Kınık E.
2008 “Türkiye’de Elektrik Tüketimi Çeşitleri ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkinin Ekonometrik Bir Analizi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, İ.İ.B.F. Dergisi*, X(II), 333-353.
- Kara Harp Okulu Yayınları
2002 “Yöneylem Araştırması” ,Kara Harp Okulu Yayınları, Ankara
- Karagöl E. - Erbaykal E.- Ertuğrul H. M.
2007 “Türkiye’de Ekonomik Büyüme ile Elektrik Tüketimi İlişkisi: Sınır Testi Yaklaşımı”, *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 8 (1), 72-80.
- Karamanav, M.,
2007 “Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya, 2007
- Karaosmanoğlu, F.
2004 “Enerjinin Önemi, Sınıflandırılması ile Kaynak İhtiyaç Dengesi ve Gelecekteki Enerji Kaynakları” , *Dünya ve Türkiye’deki Enerji ve Su Kaynaklarının Ulusal ve Uluslararası Güvenliğe Etkileri Sempozyumu*, İstanbul
2006 “Türkiye Biyoyakıt Potansiyeli ve Son Gelişmeler”, 10. Türkiye Enerji Kongresi, İstanbul
- Kaygusuz K. Kaygusuz A.
2002 “Renewable energy and sustainable development in Turkey” *Renewable Energy* 25, 431-453, p.433
- Kaygusuz, K,
1999 “Utilization of solar energy and waste heat”, *Energy Sources*, 21, 595-610 p
2007 “Energy for sustainable development:key issues and challenges”, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 2, 73-83 pp.

- 2010 “Wind energy status in renewable electrical energy production in Turkey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2104-2112 pp.
- Kaygusuz, K. – Sarı, A.,
2003 “Renewable energy potential and utilization in Turkey”, *Energy, Conversion and Management*, 44, 459- 478
- Kaygusuz K., Yüksek O., Sarı A.
2007 “Renewable energy sources in European union: markets and capacity”, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2, 19-29 pp.
- Kazıcı, Muhammet Sertaç,
2009 “Rüzgar Enerjisi ve Türbin Seçiminin Maliyete Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Keskin, Melda E.,
1993 “Nükleer Endüstri ve Rutin Radyasyon”, *Çevre ve Mühendis Dergisi*, Y.1, S.3, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası Yayın Organı
- Kılıç, Hayrettin,
1997 “Küresel Boyutlarıyla Nükleer Enerji”, *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, S. 401, s. 22
- Lise W. – Van Montfort K.
2007 “Energy consumption and GDP in Turkey: Is there a co-integration relationship?”, *Energy Economics* 29, 1166–1178 pp.
- Lund, Henrik,
2010 *Renewable Energy Systems: The Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions*, Elsevier, Burlington
- Mehel, N.,
2009 “Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, Kullanımı ve Almanya- Türkiye Karşılaştırması”, Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Maliye ABD, Aydın
- Menegaki, A., N.
2010 “Growth and renewable energy in Europe: A random effect model with evidence for neutrality hypothesis”, *Energy Economics*; Article in Press; downloaded from journal homepage: www.elsevier.com/locate/eneco ; 18.12.2010.
- Mertoğlu, Orhan,
2002 “Türkiye’de Jeotermal Enerji”, *Enerji Dünyası, DEK, TMK Bülteni*, Sayı: 45, ss. 26-38.
- Mucuk M. – Uysal D.
2009 “Türkiye Ekonomisinde Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme”, *Maliye Dergisi*, Sayı 157, ss. 105-115

- Nfaoui, H., et al.
2004 “A stochastic Markov chain model for simulating wind speed time series an Tangiers, Morocco”, *Renewable Energy*, 29, 1407- 1418 pp.
- Nordex Energy
2004 NORDEX N90 Technical Description, downloaded from official web site at 07.06.2010
- Nuclear Energy Agency
2007 “*Risks and Benefits of Nuclear Energy*”, Paris
- Oğulata, T., Oğulata, N.,
2002 “Solar energy potantial in Turkey”, *Energy Sources*, 24, 1055-1064 p
- Özdamar, A.,
2002 “Dalga Enerjisinden Elektrik Enerjisi Elde Edilmesi Üzerine Bir Araştırma, Çeşme Örneği”, *Su Ürünleri Dergisi* S:17
- Öztopal A., vd.
2010 “Rüzgar Şiddetinin Bulanık Mantık- Yapay Sinir (ANFIS)Yaklaşımıyla Kısa süreli Tahmini”, VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, ss. 184-196, Bursa
- Öztürk Ahmet,
2002 *Yöneylem Araştırması*, Ekin Kitabevi, Bursa
- Papaefthymiou G.,
2008 “MCMC for Wind Power Simulation”, *IEEE Transactions on energy Conversion*, Vol. 23, No.1, 234-240 pp.
- Revuz D.,
1991 *Markov Chains*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam
- Sadorsky, P.,
2009 “Renewable energy consumption and income in emerging economies” *Energy Policy* 37, 4021–4028 pp.
- Shamshad A., et al.,
2005 “First and second order Markov chain models for synthetic generation of wind speed time series”, *Energy*, 30, 693-708 pp.
- Soytaş, U.,- Sarı, R., -Özdemir, O.
2001 “ Energy Consumption and GDP Relations in Turkey: A Cointegration and Vector Error Correction Analysis” *Economies and Business in Transition: Facilitating Competitiveness and Change in the Global Environment* Proceedings: 838-844: Global Business and Technology Association.

- Soytas, U., Sari, R.
2003 “Energy Consumption and GDP: Causality Relationship in G-7 Countries and Emerging Markets”, *Energy Economics* 25: 33-37
- Stern, D.
2004 “Economic Growth and Energy”, in: Cleveland C.J. (ed.), *Encyclopedia of Energy* Vol. 2, pp. 35–51, Amsterdam: Elsevier.
- Şahin, A. D.- Şen Z.,
2001 “First-order Marov chain approach to wind speed modelling”, *Journal of Wind Engineering and Industrial aerodynamics*, 89, 263-269 pp.
- Şahin, A. D.,
2004 “Progress and recent trends in wind energy”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 501- 543 pp.
2010a “Türkiye’de Yenilenebilir enerji Sektörünün Temel Sorunları”, VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, ss.624- 625, Bursa
2010b “Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Uygulanabilirliği”, Kadir Has Ödülü, İstanbul
- Şen, Zekai,
2002 *Temiz Enerji ve Kaynakları*, Su Vakfı Yayınları, İstanbul
- Şen, Z. - Şahin, A. D.,
1998 “Regional wind energy evaluation in some parts of Turkey”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, 345-353 pp.
- Şengül S. – Tuncer İ.
2006 “Türkiye’de Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme: 1960-2000”, *İktisat İşletme ve Finans Dergisi*, 21(242), 69-80 ss.
- Şenkal A. – Çetin N.,S.
2010 “Türkiye’deki Rüzgar Santralleri ve Kapasite Faktörlerinin Mevsimsel Analizi”, VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, ss. 526- 531, Bursa
- Taha Hamdy A.
2007 *Yöneylem Araştırması*, Çev. Baray Alp Ş, Esnaf Şakir, Literatür Yayıncılık 4. Baskı, İstanbul
- Tanwar, N.,
2007 “Clean Development Mechanism and Off-grid Small-scale Hydropower projects: Evaluation of Additionality”, *Energy Policy*, 35: 714-721.
- T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,
2009 T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2010-2014 Stratejik Planı Bakanlık web sitesinden indirilmiştir (12.07.09)
- The European Wind Energy Association
2010 “Wind in Power: 2009 European Statistics ”

- Tolay M., Baileys R., Waterschoot A.
2010 “Tarım ve Orman Atıklarından Enerji Üretimi”, VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, ss. 279- 286, Bursa
- Toman, M.A. - B. Jemelkova
2003 “Energy and economic development: an assessment of the state of knowledge”, Energy Journal 24(4): 93–112.
- Toraman, Onur,
2008 “Rüzgar Enerjisi Santrallerini İçeren Elektrik Enerji Sistemlerinde Güvenilirlik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Turanlı M. – Güriş S.
2000 *Temel İstatistik*, Der Yayınları, İstanbul
- Türksoy, F.,
2001 “Rüzgar verisi ölçümü ve analizi”, Rüzgar Enerjisi Sempozyumu, 87-88, 95-98,101-102, İzmir
- Ulusoy V.
2006 “Ekonomik Büyüme ve Enerji Tüketimi: Bir Ekonometrik Uygulama”, I. Ulusal Türkiye’de Enerji ve Kalkınma Sempozyumu, İstanbul.
- Uyar, Önder E.,
2009 “Sürdürülebilir Kalkınma Bağlamında Kurulacak Olan Nükleer Reaktörlerin Türkiye’nin Enerji Güvenliğine Etkileri” T.C. Genel Kurmay Başkanlığı Harp Akademileri Komutanlığı Stratejik Araştırmalar Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Uyar, Tanay S.,
1993 “Elektrik Üretim Sistemlerinde Çevre Etkileri”, Çevre ve Mühendis, Y.1, S.3, TMMOB Çevre Ve Mühendisleri Yayın Organı
- Uyumaz Y. S. – Güçlü A.
2010 “Rüzgar Enerjisi ve Türkiye”, VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, ss. 197- 207, Bursa
- Ülgen, K., Hepbaşı, A.,
2002 “Prediction of solar radiation parameters through clearness index for İzmir, Turkey, Energy Sources, 24, 773-785 p
- Ünalın G.
2003 “Türkiye Enerji Kaynaklarının Genel Değerlendirmesi”, Jeoloji Mühendisliği Dergisi 27 (1)
- Vaughan C.,
2006 “The Economics of Wind Energy”, Clipper Windpower Inc.,
(http://www.windpoweringamerica.gov/pdfs/workshops/2006_summit/vaughan.pdf ; Online, 17. 12.2010)

- Winston Wayne L.,
1994 *Operations Research: Applications and Algorithms*, Duxburg Pres, California
- World Energy Council
2009 “*European Climate Change Policy Beyond 2012*”, London
2009 “*Survey of Energy Resources Interim Update 2009*”
- Yalova Valiliği
2003 “Yalova İl Çevre Durum Raporu”, İl Çevre ve Orman Müdürlüğü, Yalova
- Yamak T.,
2006 “Türkiye’nin Alternatif Enerji Kaynakları Potansiyeli ve Ekonomik Analizler”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul
- Yayla S., vd.
2010 “Vangölü Kıyısı Üzerinde Bir Bölgenin Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi”, VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, ss. 159- 166, Bursa
- Yelmen B.- Öztekin S. – Üstüner M.
2010 “Temiz Enerji Açısından Enerji Kaynaklarının Yönetiminde Yeni Açılımlar” VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, ss. 381- 388, Bursa
- Zachariadis, T.,
2006 “On the Exploration of Causal Relationships between Energy and the Economy”, Department of Economic University of Cyprus, Discussion Paper
2007 “Exploring the Relationship between Energy Use and Economic Growth with Bivariate Models: New Evidence from G-7 Countries”, *Energy Economics*, 29: 233-1253.

EKLER

EK I: RÜZGAR HIZI VERİLERİNİN MARKOV ZİNCİRİ İLE MODELLENMESİ

Rüzgar hızı verileri, Markov zincirinin birinci derece geçiş matrisi yaklaşımı ile modellenirken ekonomik değerlerin aynı yöntemle modellenmesi sürecinde izlenen adımlar takip edilmiştir.

BİRİNCİ DERECE GEÇİŞ MATRİSİNİN OLUŞTURULMASI

Markov geçiş matrisinde durumların belirlenmesi için güç eğrisinin özelliklerine ve rüzgar hızı serisinin ortalama ve varyansına göre hareket edilmiş ve 12 farklı alt küme oluşturulmuştur. Bu 12 farklı alt küme kullanılarak durumdan duruma geçiş olasılıklarını bulunduran 12X12 boyutundaki geçiş matrisi Şekil 1'deki gibi elde edilmiştir.

Şekil 1: Geçiş Olasılıkları Matrisi

States	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	satır toplamı
1	0,577247	0,412921	0,008427	0,001404	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0,090515	0,773714	0,097644	0,035958	0,00186	0,00031	0	0	0	0	0	0	1
3	0,008631	0,373613	0,334155	0,267571	0,01233	0,003699	0	0	0	0	0	0	1
4	0,001625	0,097482	0,163282	0,580016	0,135662	0,021121	0,000812	0	0	0	0	0	1
5	0	0,022556	0,026316	0,283835	0,471805	0,172932	0,016917	0,005639	0	0	0	0	1
6	0	0,003165	0,012658	0,075949	0,265823	0,455696	0,142405	0,037975	0,006329	0	0	0	1
7	0	0	0	0,049296	0,084507	0,295775	0,415493	0,119718	0,035211	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0,013699	0,082192	0,342466	0,424658	0,109589	0,027397	0	0	1
9	0	0	0	0,04	0,04	0,08	0,12	0,4	0,28	0,04	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,5	0,25	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0,25	0,25	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	1

Birinci derece geçiş matrisinin a_{ij} hücresinde bulunan ve 0 ile 1 arasında değişen değer, t zamanında i. durumda bulunan sistemin t+1 zamanında j. durumda bulunma olasılığını gösterir. Örneğin a_{11} hücresindeki 0,57 değerinin anlamı, t zamanında 1. durumda bulunan sistemin takip eden saatte yine 1. durumda bulunma olasılığının %57 olduğudur.

KÜMÜLATİF GEÇİŞ MATRİSİ VE SENTETİK VERİLERİN ÜRETİLMESİ

Kümülatif geçiş matrisi, P_C , geçiş matrisindeki olabilirlik sayılarının her satır için ardışık toplamalarının alınmasıyla oluşturulmuştur.

$$P_{ik} = \sum_{j=1}^k p_{ij}$$

Şekil 2: Kümülatif Geçiş Olasılıkları matrisi

States	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,577247	0,990169	0,998596	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0,090515	0,864228	0,961872	0,99783	0,99969	1	1	1	1	1	1	1
3	0,008631	0,382244	0,7164	0,98397	0,996301	1	1	1	1	1	1	1
4	0,001625	0,099106	0,262388	0,842405	0,978067	0,999188	1	1	1	1	1	1
5	0	0,022556	0,048872	0,332707	0,804511	0,977444	0,994361	1	1	1	1	1
6	0	0,003165	0,015823	0,091772	0,357595	0,813291	0,955696	0,993671	1	1	1	1
7	0	0	0	0,049296	0,133803	0,429577	0,84507	0,964789	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0,013699	0,09589	0,438356	0,863014	0,972603	1	1	1
9	0	0	0	0,04	0,08	0,16	0,28	0,68	0,96	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,75	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,5	0,75	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	1

Sentetik verilerin üretilmesinde, ekonomik değer zaman serisi için uygulanan adımlar tekrarlanmış ve uniform dağılıma bağlı olarak üretilen rassal sayıların kümülatif matriste karşılık bulduğu duruma göre aşağıdaki eşitliğe dayalı olarak yeni rüzgar hızı serisi belirlenmiştir.

$$V_{Hız,Yeni} = V_{Alt Sınır} + Z_i (V_{Üst Sınır} - V_{Alt Sınır})$$

Burada $V_{Alt Sınır}$ ve $V_{Üst Sınır}$ söz konusu 12 duruma ilişkin durum sınır değerlerini ve Z_i ise rastgele sayıları ifade etmektedir.

SENTETİK VERİLER İLE GERÇEK VERİLERİN İSTATİSTİKİ ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Sentetik verilerle gerçek verilerin istatistikî özelliklerinin karşılaştırılması, Markov zincirinin birinci derece geçiş matrisi yönteminin, herhangi bir zaman dilimi için rüzgar hızı verilerinin yapay olarak üretilmesinde uygun bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 1: Sentetik Ve Gerçek Verilerin İstatistikî Parametreleri

Rüzgar Parametresi	Değer (Simülasyon)	Değer (Gerçek)
Ortalama	6,38	6,11
Standart sapma	1,72	3,53
Medyan	6,16	5,63
Çarpıklık	1,55	0,73
En Küçük Değer	0,004	0
En Büyük Değer	24,07	24,85

EK II: NORDEX N90 (2300 kW) RÜZGAR TÜRBİNİNİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

General data

- Wind turbine name : N90/2300
- Nominal power : 2300 kW
- Rotor diameter : 90 m
- Available model
- Offshore model : yes

Technical data

- Surface : 6362 m²
- Power density : 2.8 m²/kW
- Wings number : 3
- Power control : Pitch
- Available since : 2003

Weight

- Hub : 91 tons
- Tube : 180 - 320 tons
- Rotor : 53 tons
- Total : 324 - 484 tons

Rotor

- Min rotation speed : 9.6 rounds/minute
- Max rotation speed : 16.9 rounds/minute
- Min wind speed : 3 m/s
- Nominal wind speed : 13 m/s
- Max wind speed : 25 m/s
- Manufacturer : LM, Nordex

Gear box

- Gear box : no
- Speed number : 3
- Ratio : 1:77.44
- Manufacturer : Eickhoff, Winergy

Generator

- Type : Async.
- Number : 1
- Max speed : 1310 rounds/minute
- Output voltage : 690
- Manufacturer : VEM, Winergy

Tower

- Min hub height : 80 m
- Max hub height : 105 m

Datasheet update : 09/2010

Kaynak: <http://www.thewindpower.net/wind-turbine-datasheet-technical-8-nordex-n90-2300.php> (Erişim Tarihi: 16.10.2010)

POWERCURVE N90/2300 KW

Windspeed [m/s]	Power [kW]	Cp
4	35	0,140
5	175	0,359
6	352	0,418
7	580	0,434
8	870	0,436
9	1237	0,435
10	1623	0,417
11	2012	0,388
12	2230	0,331
13	2300	0,269
14	2300	0,215
15	2300	0,175
16	2300	0,144
17	2300	0,120
18	2300	0,101
19	2300	0,086
20	2300	0,074
21	2300	0,064
22	2300	0,055
23	2300	0,049
24	2300	0,043
25	2300	0,038

Rounded values based on measurements of Risø National laboratory and aerodynamical calculations

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Yeri ve Yılı	:	Ankara	17.02.1981	
Öğr.Gördüğü Kurumlar	:	Başlama Yılı	Bitirme Yılı	Kurum Adı
Lise	:	1996	1999	Ulubatlı Hasan Anadolu Lisesi/ Bursa
Lisans	:	1999	2004	Gazi Üniversitesi, İİBF, Ekonometri Bölümü / Ankara
Yüksek Lisans	:	2007	2011	Uludağ Üniversitesi, SBE, Ekonometri Bölümü/ Bursa
Medeni Durum	:	Bekar		
Bildiği Yabancı Diller ve Düzeyi:		İngilizce		İyi
Çalıştığı Kurum (lar)	:	Başlama ve Tarihleri	Ayrılma	Çalışılan Kurumun Adı
	1.	07/ 2004	08/2005	TBMM
	2.	03/ 2009		Yalova Üniversitesi
Yayımlanan Çalışmalar	:			İnci, A.G., Karatepe S. ve Demirel B. “Hizmetler Sektörü Çerçevesinde Beşeri Sermaye ve Büyüme İlişkisi: Türkiye Örneği”, 7. Uluslararası Bilgi, Ekonomi ve Yönetim Kongresi, Ekim 2009, Yalova Karatepe S., Şahin A.D. ve Öztürk A. “Rüzgar Türbinlerinden Üretilen Elektrikğin Ekonomik Değerinin Markov Zinciri ile Modellenmesi”, 8. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Aralık 2010, Bursa

Selin KARATEPE