

**FARKLI RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMLARI İÇİN  
SANTRAL YERİ SEÇİMİ ve RÜZGAR ENERJİ  
POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİNDE YAPAY  
ZEKA UYGULAMASI**

**TUNCA KARAMANLIOĞLU**

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE EĞİTİMİ  
ANA BİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MERSİN  
HAZİRAN – 2011**

**FARKLI RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMLARI İÇİN  
SANTRAL YERİ SEÇİMİ ve RÜZGAR ENERJİ  
POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİNDE YAPAY  
ZEKA UYGULAMASI**

**TUNCA KARAMANLIOĞLU**

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE EĞİTİMİ  
ANA BİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Danışman  
Doç. Dr. Aysun SAĞBAŞ**

**MERSİN  
HAZİRAN – 2011**

Tunca KARAMANLIOĞLU tarafından Doç. Dr. Aysun SAĞBAŞ danışmanlığında hazırlanan “Farklı Rüzgar Türbini Tasarımları İçin Santral Yeri Seçimi ve Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesinde Yapay Zeka Uygulaması” başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Doç. Dr. Aysun SAĞBAŞ

Doç. Dr. Hüseyin AKILLI

Yrd. Doç.Dr. Uğur EŞME

*A. Sağbaşı*  
*Hüseyin Akilli*  
*Uğur Eşme*

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 28.../07./2011 tarih ve 2011.17.../...331... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. A. Murat GİZİR  
Enstitü Müdürü



*Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.*

# **FARKLI RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMLARI İÇİN SANTRAL YERİ SEÇİMİ ve RÜZGAR ENERJİ POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİNDE YAPAY ZEKA UYGULAMASI**

**Tunca KARAMANLIOĞLU**

## **ÖZ**

Ülkemizin rüzgar potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgar enerjisinin yurdumuz ekonomisine katkısının hızlandırılması, yatırımcılara rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan yerlerin sunulması için 2002 yılında EİE ve DMİ işbirliği ile "Türkiye Rüzgar Atlası" yapılmıştır. Hazırlanmış olan Türkiye Rüzgar Atlası'na göre yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri incelendiğinde Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz Bölgelerinin en yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, Akdeniz bölgesinde özellikle Mersin, Silifke ve Anamur bölgeleri için rüzgar santrali kurulumu için en uygun yer seçimi yapılacak ve her bir bölge için rüzgar güç potansiyelleri tahmin edilerek, rüzgar güç potansiyeli en yüksek olan bölge belirlenmiştir. Ayrıca, yapılan tahminler ve ülkelerin uluslar arası şirketlerle birlikte giriştikleri kurulum çalışmaları göstermektedir ki; 2020 yılında dünyada üretilen elektriğin %50'sinin yenilenebilir kaynaklardan oluşacağı tahmin edilmektedir. Bu durum da rüzgar enerjisinin verimli kullanımının önemini ortaya koymaktadır. Çalışmanın önemli bir özelliği de farklı flap tasarımları ve bu sebeple oluşan farklı türbinler için enerji potansiyelinin hesaplanmış olmasıdır. Bu amaçla, rüzgar enerjisi santral yeri seçimi konusundaki öncelikler belirlenmiş, alternatifler arasında en uygun yerin seçilmesinde bulanık analitik hiyerarşi yöntemi uygulanmıştır. Seçilen bölge için farklı rüzgar türbin tasarımları için rüzgar güç potansiyelinin tahmin edilmesinde yapay sinir ağları yöntemi uygulanmıştır. Araştırmanın, Akdeniz bölgesinde özellikle Mersin, Silifke ve Anamur bölgeleri için uygulaması yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, Mersin, Silifke ve Anamur bölgelerinde rüzgar santrali kurulumu için en uygun yer seçimi yapılarak ve her bir bölge için rüzgar güç potansiyelleri tahmin edilerek, rüzgar güç potansiyeli en yüksek olan bölge belirlenmiştir. Elde edilen tahmin değerleri ve gerçek değerler karşılaştırılarak tahminin doğruluk gücü gösterilmiştir.

Yapılan çalışmanın, rüzgar enerjisi sektöründeki yatırımcılar ve özellikle Akdeniz Bölgesinde yatırım planı olan şirketler için önemli bilgiler sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, yapılacak fizibilite çalışmaları ile rüzgar enerjisi kaynaklarının verimli kullanımı sağlanması temel amaçtır.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar Enerjisi, Potansiyel Tahmini, Analitik Hiyerarşi prosesi, Yapay Sinir Ağları, Akdeniz Bölgesi

**Danışman:** Doç. Dr. Aysun SAĞBAŞ, Mersin Üniversitesi, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı

## **DESIGNS FOR DIFFERENT WIND TURBINE POWER PLANT SITE SELECTION AND THE DETERMINATION OF WIND ENERGY POTENTIAL APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

**Tunca KARAMANLIOGLU**

### **ABSTRACT**

Determination of wind potential in our country and accelerate the contribution of wind energy in our country's economy, which places a high potential for wind energy investors in 2002 for the submission of DMI in collaboration with EIE and "Turkey Wind Atlas" was performed. Turkey Wind Atlas has been prepared according to the level of 50 m-high wind potential was examined in the Aegean, Marmara and Eastern Mediterranean Regions with the highest potential to be seen. In this study, especially in the Mediterranean region of Mersin, Anamur, Silifke and the most appropriate location for the installation of wind farms to regions and each region will be estimated for the wind power potential, wind power potential in the region were the highest. In addition, the installation of the estimates and the countries they work with international companies indicate that 50% of electricity generated from renewable sources by 2020 is estimated to be in the world. This further demonstrates the importance of efficient use of wind energy. An important feature of the study, and therefore also of different flap designs for different turbines, the potential energy is calculated. To this end, wind energy power plant on site selection priorities were determined, the selection of alternatives to the most suitable place between the fuzzy analytical hierarchy method is applied. Different wind turbine designs for the selected region for the wind power potential of artificial neural network method is applied to predict. Research, especially in the Mediterranean region of Mersin, Anamur, Silifke and it was applied to regions. As a result of this study, Mersin, Anamur, Silifke and regions by choosing the most suitable place for the installation of wind farms and wind power potential for each region by estimating the wind power potential in the region were the highest. The resulting estimated values and actual values is shown by comparing the estimate of the power of truth.

The study, the wind energy sector, investors and investment plan, especially the Mediterranean region is thought to provide important information for the companies. In addition, feasibility studies, the main objective is to ensure efficient use of wind energy resources.

**Key Words:** Wind Energy, Potential Estimation, Analytical Hierarchy Process, Artificial Neural Networks, Mediterranean Region

**Advisor:** Doç. Dr. Aysun SAĞBAŞ, Department of Mechanical Education, University of Mersin

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZ</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>v</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI</b> .....	<b>3</b>
<b>3. ENERJİ KAYNAKLARI ve ENERJİNİN ÖNEMİ</b> .....	<b>6</b>
3.1. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI ve KÜRESEL ISINMA.....	9
3.2. SÜRDÜRÜLEBİLİR ve YENİLENEBİLİR ENERJİ.....	13
3.3. RÜZGAR ENERJİSİ ve GELİŞİMİ.....	14
3.3.1. Rüzgar ve Rüzgara Özgü Tanımlar.....	17
3.3.2. Dünyada Rüzgar Enerjisi.....	19
3.3.3. Dünyada Rüzgar Enerjisi Gelişim Örnekleri.....	22
3.3.4. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi.....	26
3.3.5. Rüzgar Enerjisi’nin Geleceği.....	30
3.3.6. Çevresel Etkiler ve CO <sub>2</sub> Salımı.....	36
3.3.7. Farklı Yönlerden Rüzgar Enerjisi.....	36
3.3.7.1. Rüzgar enerjisinin ekonomikliği.....	36
3.3.7.2. Rüzgar enerjisinin maliyeti.....	37
3.3.7.3. Rüzgar enerjisinin avantajları.....	37
3.3.8. Rüzgar Türbinlerinin Özellikleri ve Yapısı.....	38
3.3.9. Rüzgar Enerji Santrali ve Yer Seçimi.....	44
3.3.9.1. Rüzgar enerji santrali.....	45
3.3.9.2. Rüzgar potansiyeli yüksek yerlerin belirlenmesi.....	46
3.3.9.3. Rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesi.....	48
<b>4. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	<b>51</b>
4.1. YAPAY SİNİR AĞLARI.....	51
4.1.1. Yapay Sinir Ağları’nın Yapısı.....	51
4.1.2. YSA’da Öğrenme Katsayısı.....	53
4.1.3. Geri Beslemeli Ağ Modeli (BPN).....	54
4.2. ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ.....	54
4.2.1. Bulanık Mantık.....	55

4.2.2. Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi.....	56
4.2.3. Üçgen Bulanık Sayılar.....	58
4.2.4. Bulanık AHP Algoritması.....	59
<b>5. BULGULAR ve TARTIŞMA.....</b>	<b>64</b>
5.1. ELDE EDİLEN RÜZGAR ÖLÇÜMLERİ.....	64
5.2. YAPAY SİNİR AĞI MODELİNİN UYGULANMASI.....	65
5.3. BULANIK HİYERARŞİ PROSESİ KULLANILARAK RÜZGAR ENERJİ SANTRAL YERİ SEÇİMİ.....	68
5.3.1. Kriterler ve Alt Kriterler ile Alternatiflerin Belirlenmesi ve Hiyerarşik Yapının Oluşturulması.....	69
5.3.2. Bulanık AHP Algoritması ve Uygulaması.....	72
<b>6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....</b>	<b>75</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>77</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>81</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Dünyada Rüzgar Enerjisinin Durumu .....	20
Çizelge 3.2. Türkiye’de Rüzgar Enerji Santralleri .....	29
Çizelge 3.3. Ölçüm Yüksekliği ve Ölçülen Parametreler .....	48
Çizelge 4.1. İkili Karşılaştırmalarda Kullanılan Ölçek .....	63
Çizelge 5.1. Geliştirilen Yapay Sinir Ağı Modelinin Performansı .....	68
Çizelge 5.2. Alternatif Bölgelerin Rüzgar Hızı ve Rüzgar Gücü Değerleri .....	74



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Tepede Rüzgar.....	18
Şekil 3.2. Engelde (Bina) Türbilans Etkisi.....	18
Şekil 3.3. Türkiye’de Rüzgar Atlası .....	27
Şekil 3.4. Dünyada Kurulu Rüzgar Gücü.....	29
Şekil 3.5. Bölgelere Göre Gelecekteki Elektrik Talebi.....	30
Şekil 3.6. 2020’de %12 Rüzgar Gücü – Yıllık Yeni Kapasite.....	31
Şekil 3.7. 2020’de % 12 Rüzgar Gücü – Toplam Yeni Kapasite.....	33
Şekil 3.8. Piyasalarda Kurulan Rüzgar Türbinlerinin Ortalama Boyutu.....	34
Şekil 3.9. Weibull Dağılımı.....	41
Şekil 3.10. Weibull Dağılımının Dengelenmesi.....	42
Şekil 3.11. Rüzgar Türbinin Güç Eğrisi .....	44
Şekil 3.12. Rüzgar Türbini Genel Yapısı.....	44
Şekil 4.1. (l, m, u) Bulanık Üçgen Sayısı.....	59
Şekil 4.2. $M_1$ ve $M_2$ Arasındaki Kesişme .....	62
Şekil 5.1. Ölçülen Rüzgar Hızları.....	64
Şekil 5.2. Ölçülen Basınç Değerleri.....	64
Şekil 5.3. Ölçülen Bağıl Nem Değerleri.....	65
Şekil 5.4. Ölçülen Atmosfer Sıcaklığı.....	65
Şekil 5.5. Yapay Sinir Ağı Blok Diyagramı .....	66
Şekil 5.6. Mersin istasyonu için tahmin edilen ve ölçülen Rüzgar hızları.....	67
Şekil 5.7. Silifke istasyonu için tahmin edilen ve ölçülen Rüzgar hızları.....	67
Şekil 5.8. Kriter ve alt kriterlere ait AHP yapısı.....	72

Şekil 5.9. Expert Choice programı ile oluşturulmuş kriter ve alt kriterlerin normalize edilmiş ağırlık dağılımları.....	73
Şekil 5.10. Alternatif bölgelerin karşılaştırmalı grafikleri.....	73

## 1. GİRİŞ

Hızla artan dünya nüfusu ve tüketilen enerji miktarı insanları bu kaynakların daha verimli kullanılması konusunda yeni arayışlara itmiş ve alternatif enerji kaynakları detaylı olarak incelenmeye başlamıştır. İnsanoğlu yüzyıllardır enerji ihtiyacını karşılayabilmek için çeşitli kaynaklardan yararlanmıştır. Sanayi devriminin etkisi ile enerjiye olan ihtiyaç daha da çoğalmış ve bilim insanlarını çeşitli arayışlara yöneltmiştir. Enerji konusunun önemi, son günlerde çokça bahsedilen küresel ısınma ve enerjinin temizliği döngüsünün de katılımı ile bir kat daha artmıştır. Bu sebeple dünyada yenilenebilir enerjilere yönelimler olmuş, ülkeler sadece fosil kaynaklı enerji türlerinden yararlanmaya değil, fosil kaynaklara oranla birçok avantajı beraberinde getiren yenilenebilir enerji kaynaklarından da en verimli şekilde yararlanmaya başlamışlardır. Bu konu ile ilgili de; ülkemiz açısından en ilginç ve dikkat çekici olan yenilenebilir enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisi gösterilebilir.

Bugün tüm dünya üzerinde milyonlarca insana elektrik sağlayan, milyarlarca dolarlık iş hacmi olan ve on binlerce insana iş olanağı sunan genç bir endüstri olarak rüzgar enerjisi; hızlı bir gelişime göstermektedir. Ülkelerin enerji taleplerini hassas ve gerçeğe yakın bir şekilde ortaya koymaları, özellikle enerji fiyatlarının giderek arttığı yüzyılımızda daha da önem kazanmaktadır. Üretim planları ile büyük sermaye gerektiren yatırım kararlarının alınmasında, sürekli yenilenebilir, revize edilmeye her an açık hale getirilmesinde tüm dünya ülkelerinde ve uluslar arası kuruluşlarda çalışmalar sürdürülmektedir. Özellikle son günlerde tartışılan fosil kaynaklı enerji politikalarının çevreye olan etkisi ve küresel ısınmanın gün geçtikçe büyük bir hızla artış göstermesi bu konunun böyle bir bakış açısıyla değerlendirilmesini mecbur kılmaktadır. Enerji politikasının kısa bir süreç içerisinde birden değiştirilmesi mümkün olmayacağından, bu konudaki çalışmaların ivedilikle yapılarak dünyanın yeni bir enerji politikası dahilinde bu sorunu çözmesi gerekmektedir.

Bu bağlamda yenilenebilir enerjilerin gelişimi çok önem kazanmaktadır. Yapılan tahminler ve ülkelerin uluslar arası şirketlerle birlikte giriştikleri kurulum çalışmaları göstermektedir ki; 2020 yılında dünyada üretilen elektriğin yüzde

50'sinin yenilenebilir kaynaklardan oluşacaktır. Yenilenebilir enerjiler tükenmeme avantajına sahiptir. Fosil enerjilerle karşılaştırıldığında çevreye daha dost oldukları ve çok daha düşük sera etkisine sahip oldukları görülür. Başlıca yenilenebilir enerjiler; hidrojen enerjisi, rüzgar enerjisi, biokütle, güneş enerji, fotovoltaik sistem ve jeotermal enerjidir. Yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları grubu içinde yer alan güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi alışlagelmiş enerji kaynaklarının karşısında birer alternatiftir. Gerek güneş enerjisi ve gerekse rüzgar enerjisi çevre dostu temiz enerji kaynaklarıdır. Bu çalışmada, tükenmekte olan fosil kökenli enerji kaynaklarına alternatif olarak kullanılmaya başlanan yenilenebilir enerji türlerinden, rüzgar enerjisinin daha verimli kullanılabilmesi amacıyla enerji potansiyeli en yüksek olan bölge ya da bölgeler belirlenmeye çalışılmıştır. Rüzgar gücünde bulunan bu enerjinin, elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan Rüzgar Türbininin oluşum evreleri ve çalışma prensibi açıklanmıştır.

Ayrıca oluşturulabilecek bir rüzgar türbininin en verimli şekilde çalışabilmesi ve en yüksek seviyede enerji üretebilmesi için çok büyük önem taşıyan kurulum yeri seçimi Yapay Zeka yöntemleri kullanılmıştır. Rüzgar santrali kurulması öngörülen bölgenin rüzgar potansiyelinin belirlemek için yapay sinir ağları yöntemi kullanılmış olup, elde edilen tahmin sonuçlarının gerçek değerlerle karşılaştırılarak tahminin doğruluk gücü gösterilmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) istasyonlarının 1970-1980 dönemi rüzgar verileri değerlendirilerek, Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenmeye çalışılmıştır. Ülkemizde yapılan çalışmalar göstermiştir ki; rüzgar yoğunluğunun ve hızının en yüksek olduğu bölge Marmara bölgesidir. Ege ve Akdeniz bölgeleri de yüksek rüzgar hızı ve rüzgar yoğunluğuna sahip bölgelerdir.

Rüzgar enerjisinin gün geçtikçe önem kazandığı günümüz koşullarında dünya üzerinde de bu konuda birçok kapsamlı araştırma ve projeler yürütülmektedir. Bilgili ve arkadaşları; Türkiye'nin güney, güneybatı ve batı bölgelerindeki rüzgar hızı ve enerji potansiyelini belirlemek için yapay sinir ağlarını ve regresyon tekniğinin kullanmışlardır. Türkiye'nin güney, güneybatı ve batı kıyısında bulunan Akhisar, Bababurnu, Belen, Datça, Foça, Gelendost, Gelibolu, Gökçeada ve Söke bölgelerindeki rüzgar enerjisi potansiyelinin istatistiksel olarak analizi, Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonlarının yanında WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) paket programı kullanılarak incelenmiştir. Weibull modeli ve WAsP programı ile elde edilen değerler, Rayleigh modeli ile elde edilen değerlere göre tüm istasyonlar için daha iyi sonuçlar vermiştir. En yüksek rüzgar gücü potansiyelinin sırasıyla; 526 W/m<sup>2</sup> ile Gökçeada'da, 410 W/m<sup>2</sup> ile Gelibolu'da, 387 W/m<sup>2</sup> ile Belen'de olduğu görülmüştür.

Yurtoğlu yaptığı çalışmada, yapay sinir ağları metodolojisi ile bir öngörü modellemesi hazırlamıştır. Bu çalışmada, öngörü modellemesi yöntemi olarak Yapay Sinir Ağları (YSA) metodolojisinin kullanımı araştırılmıştır. Temel olarak, YSA teorisi detaylı bir şekilde incelenmiştir ve uygun görülen bir YSA mimarisi kullanılarak Türkiye ekonomisine ait bazı makroekonomik değişkenler modellenmiştir. Tahmin edilen modeller hem kendi içinde değerlendirilmiş hem de yaygın olarak kullanılmakta olan ve öngörü gücü yüksek modelleme teknikleri ile performans karşılaştırmaları yapılmıştır.

Özgener yaptığı çalışmada, Manisa'nın Muradiye havzası için rüzgar enerji potansiyelini hesaplamıştır. İtalya'da ise Grassi ve arkadaşları, rüzgar enerjisi tahmini için yapay sinir ağlarında iki gizli katman kullanmışlardır. Monfred ve arkadaşları İran için geliştirdikleri yeni bir strateji ile yapay zekayı rüzgar hızı tahmini için kullanmışlardır. İstanbul için yapılan bir çalışmada Kaya ve arkadaşları,

yenilenebilir enerjinin planlanmasında bulanık mantık (fuzzy), analitik hiyerarşi prosesi (AHP) metodlarından yararlanmıştır. Yine Kaya ve arkadaşları, üretim sistemlerindeki kalite kontrol problemlerinde de yapay sinir ağlarını kullanarak çeşitli sonuçlar elde etmişlerdir. Onlara göre çeşitli üretim sistemlerinde kontrol faaliyetleri de otomasyona dayalı hale gelmiştir. Otomatik kontrol sistemlerinde yapay zeka teknikleri etkin olarak kullanılmaktadır. Pek çok kalite kontrol probleminin çözümünde yapay sinir ağlarından yararlanılmıştır. Özellikle kontrol diyagramlarındaki şekillerin tanınmasında, üründeki yabancı maddelerin ortaya çıkarılması ve benzer problemlerde YSA'lar kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmaların değerlendirilmesi ile yapay sinir ağlarının, kalite problemlerinde başarıyla uygulandığı, doğruluk düzeyinin yüksek olduğu, zaman açısından işletmeye pek çok kazanım sağladığı, maliyetleri minimize ettiği, tek başına bir tek yapay zeka tekniği kullanmak yerine, iki veya daha fazla yapay zeka tekniğinden oluşan bir kombinasyon kullanmanın daha faydalı olduğu belirlenmiştir.

Çelik, Türkiye'nin güney bölgeleri için yaptığı çalışmada rüzgar yoğunluğunu Weibull ve Rayleigh dağılım modelleri ile hesaplamıştır. Ayrıca Sülün yaptığı bitirme çalışması için yıllık ortalama enerji hesabında, Weibull dağılımı kullanıldığında % 4,9 hata yapılmakta iken Rayleigh dağılımı ile yapılan hesabın içerdiği hata % 36,5'tir. Bu örnekte de daha düşük hata yüzdesine sahip olduğu görülen Weibull dağılımı rüzgar enerjisi konusundaki çalışmalarda tercih edilen metottur. Verilen islenmesi yoluyla elde edilen Weibull parametreleri kullanılarak herhangi bir rüzgar hızının frekansı konusunda hassas bir tahminde bulunmak mümkün olabilmektedir.

Özerdem ve arkadaşları da İzmir'de kurulabilecek bir rüzgar tarlası için fizibilite çalışması yapmışlardır. Öztopal ve arkadaşları çalışmalarında sinir ağlarını kullanarak rüzgar hızını tahmin etmişlerdir. Kalogirou ve arkadaşları yenilenebilir enerji sistemlerinin oluşabilmesi ve performans analizleri için meteorolojik parametreleri kullanmışlardır. Çalışmalarında rüzgar hızından güneşlenme süresine, yağış miktarından hava sıcaklığı ve neme kadar pek çok meteorolojik veri ile yapay sinir ağlarını oluşturup tahminlerde bulunmuştur. Atik ve arkadaşları, üç giriş ve üç çıkış hücresi ile oluşturdukları yapay sinir ağını meteorolojik verilerin işlenmesi için

kullanmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada sinir ağını eğiterek modellemesini gerçekleştirmişlerdir.

Üçgöl ve arkadaşları Isparta için güneş enerjisi ile elektrik enerjisi üretiminde yapay sinir ağı modellerini kullanmışlardır. Bu çalışmada, Süleyman Demirel Üniversitesinin Batı kampusu elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için heliostat aynalı güneş kulesi güç santrali modeli teorik olarak kurulmuş ve gerekli olan 2 MW'lık elektrik üretimi için Nisan ayı güneş enerjisi verilerinin ortalama değerleri kullanılarak gerekli hesaplar yapılmıştır. Teorik olarak hesaplanması oldukça karmaşık ve zaman alan değişken hesaplama değerlerinin (ay ve gün içerisinde değişen güneş ışınım değerlerinin, güç üretim ve enerji tüketimlerinin değişmesi vb.) tahmini için YSA metodu kullanılmıştır. Yapay Sinir Ağları metodu ile tahmin edilen değerler ile hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. Belirli değerler için yapılan hesaplamalar ve simülasyon sonucu elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Buna göre çalışmadan elde edilen sonuçlar; YSA metodunun, farklı basınç ve sıcaklıklardaki girdilere karşılık belirlenmesi istenen diğer değerlerin tahmin edilmesinde oldukça başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

### 3. ENERJİ KAYNAKLARI ve ENERJİNİN ÖNEMİ

Enerji hem bir üretim girdisi, hem de tüketim maddesidir. Aslında tüm üretim süreçlerinin ortak yanı, değişik oranlarda olsa bile, mutlaka emek, sermaye ve enerji kullanımınıdır. Enerjiyi bir temel girdi olarak tanımlayabiliriz. Tüketim maddesi olarak da en yaygın biçimde kullanılmaktadır. Aydınlatma, konfor sağlama, temizlik vb. akla gelebilecek uğraşların büyük çoğunluğu bir enerji tüketimini de beraberinde getirmektedir.

Günümüzde enerji üzerinde en çok durulan konulardan biri haline gelmiştir. Enerjinin önemine değişik boyutlardan yaklaşılabilir. Enerji teknik bir sorundur ve teknoloji geliştikçe bu sorunda ortadan kalkacaktır. Aynı zamanda enerji ekonomik bir sorundur. Aşırı biçimde artan petrol fiyatları tüm yakıtların fiyatlanmasına yol açmıştır. Aslında maliyeti 1–2 \$'ı bile bulmayan petrol anormal kazançlarla değil de, normal kazançlarla üretilirse, enerji sorunu da çözümlenmiş olacaktır. Diğer bir görüşe göre dünyanın enerji kaynakları tükenmektedir. Doğal olarak tükenen bu kaynağın değeri arttığı gibi, bulunması da güçleşmektedir. Bazılarına göre ise enerji sorunu çok uluslu petrol şirketlerinin açtığı bir derttir; bunlar yola getirilmedikçe soruna çare bulunamayacaktır.

Büyük bir olasılıkla bu ve benzeri tüm etkenler belli ölçülerde enerji sorununa sebep olmuştur. Ancak şunu belirtmekte yarar vardır ki, enerji sorunu her ülkede değişik sebeplerin bileşimlerinden oluşmuştur ve çözümü de oldukça farklı önlemleri gerektirmektedir. Her ne kadar bazı genellemeler yapılabilir ise de, sadece bunlara dayalı olarak belirlenecek politikalar da önemli mahsurlar taşıyabilir (Bozok, 1999).

Enerji fiyatlarında son yıllara kadar gözlenen artışlar, özellikle enerji ithalatçısı kalkınmakta olan ülkelerin yerli enerji kaynaklarını geliştirerek dışa bağımlılıklarını en aza indirmeleri için en kısa zamanda önlem almalarını mecbur kılmıştır.

Enerji kaynağının ulusal kalkınma içindeki kritik önemi 1973–74 dünya petrol fiyatlarındaki ani ve önemli artışa kadar göz ardı edilmiştir. Dünya petrol şoku ile tüm dünya enerji kaynaklarının tükenebilir niteliği yanında, ucuz olmadığının da bilincine varmıştır. Bunun yanı sıra kişi başına enerji tüketimi ile kişi başına gelir



arasında oldukça yakın bir ilişki olduğu da bugün herkes tarafından kabul edilmektedir. Kalkınmakta olan bir ülke daha yüksek bir kalkınma istiyorsa, üretimi arttırmak amacıyla fert başına enerji tüketimini de arttırmak mecburiyetindedir.

Enerji tüketiminin ekonomiyi etkileyişini belirleyen faktörlerin en önemlileri; enerji ithal oranı ve ülke ekonomisinin dış ticaret yapısıdır. Tüketilen enerji tamamı yurtiçi kaynaklara dayalı ise, enerji üreten sektör de herhangi bir diğer sanayi kesimi gibi katma değer meydana getirir. Eğer bu sektör üretimini, diğer sektörlerle kıyasla daha verimli yapar ise, zaman içinde ekonominin genel gelişme hızından daha büyük bir hızla gelişir ve ekonomiyi olumlu yönde etkiler. Bunu şöyle ifade etmek de mümkündür; temel girdi olarak tanımlanan emek, sermaye ve enerji ekonomi içinde belli bir rekabet halindedir. Her girdi fiyatına oranla sağladığı ekonomik yarar ölçüsünde rekabet gücüne sahip olursa, ekonomi daha fazla enerji talep edecek ve tüketecektir. Verimli olan bu girdiyi daha fazla tükettiği için de ekonominin gelişme hızı artacaktır.

Oysa enerji girdilerini büyük oranda ithal yoluyla sağlayan ekonomi için ise durum oldukça farklıdır. Konuya açıklık getirmesi için, tükettiği enerjiyi tümüyle ithal eden bir ülke göz önüne alındığında, enerji alımı döviz ile yapılacağından, olay bir dış ticaret meselesi haline gelmekte ve ülkenin ithal-ihraç hacmi ile bunların kompozisyonu önem kazanmaktadır. Dış ticaret hacmi GSMH'ya küçük olan bir ekonomi, enerji fiyatlarının değişiminden büyük ölçüde etkilenmektedir. Çünkü enerji fiyatlarındaki artışı karşılayabilmek için ihracatın hemen hemen aynı oranda (kısa sürede) arttırmak mecburiyetinde kalacaktır. Aksi takdirde üç seçenek bulunmaktadır. Bunlar (Bozok,1999);

- Enerji tüketimini kısmak
- Diğer ithalat bedellerini kısmak
- Borçlanmak

Kısa vadede ilk iki şıkkı gerçekleştirmek oldukça güç ve politik olarak sakıncalı bulunduğundan genellikle borçlanma yoluna gidilir. Öte yandan alınan borç

sadece artan ithal girdilerinin bedellerini ödemeye harcanır ise, karşılaşılan kriz atlatılır. Fakat bunun karşılığında ileriki yılların ekonomik gelişmesi ipotek edilmiş olur. Oysa alınan borç, dış ticaret yapısını da değiştirmeyi amaçlayan biçimde kullanılır ise, bu ipoteğin bedeli daha kolay ödenebilir. Borçlanma ile tüm açığın kapanmasının mümkün olmadığı halde 1. ve 2. şık bir arada uygulanmaktadır. Bu durumda ekonomide hissedilir bir yavaşlama olmakta ve hem işsizliğe, hem de enflasyona yol açabilmektedir. Nitekim enerji ithal eden birçok ülkede, 1973–74 ve 1979–80 petrol fiyatları artışları sonucu ciddi ekonomik sorunlar baş göstermiştir.

Yurdumuzda, bir yandan artan nüfus, öte yandan sanayileşme, enerji türlerine olan ihtiyacı hızla arttırmıştır. Bu arada elektrik enerjisi talep artışının, öteki enerji türlerinden çok olması nedeniyle, dünyada elektrik enerjisi daha fazla üretilmeye ve tüketilmeye başlanmıştır. Ekonomik gelişme süresince, Türkiye’de görülen genel enerji ve elektrik enerjisi darboğazının çok büyük önem taşıdığı bilinmektedir. Bu önem, enerji üreten sektörlerin ekonominin öteki sektörleri ile yapısal bağlılığından kaynaklanmaktadır. Ülkemizde, elektrik enerjisi üretimini arttırabilecek acil önlemlerin alınması ve daha az enerji kullanan teknolojilerin uygulanması kısa dönemde mümkün olmaktadır. Buna karşın yine kısa dönemde, ekonomik gelişme ile sosyal refahın yükselmesini engellemeden ve sanayi sektörünün verimliliğine zarar vermeden, genel enerji ve elektrik enerjisi talebini azaltma olanakları bulunmaktadır. Bu açıdan, ülkemizde elektrik enerjisi açığının zaman geçirilmeden kapatılmasının tek yolu olan ekonomik politikalar büyük önem taşımaktadır.

Ülkelerin enerji taleplerini hassas ve gerçeğe yakın bir şekilde ortaya koymaları, özellikle enerji fiyatlarının giderek arttığı yüzyılımızda daha da önem kazanmaktadır. Üretim planları ile büyük sermaye gerektiren yatırım kararlarının alınmasında, sürekli yenilenebilir, revize edilmeye her an açık hale getirilmesinde tüm dünya ülkelerinde ve uluslar arası kuruluşlarda çalışmalar sürdürülmektedir (Bozok, 1999).

### 3.1. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI ve KÜRESEL ISINMA

Özellikle son günlerde tartışılan fosil kaynaklı enerji politikalarının çevreye olan etkisi ve küresel ısınmanın gün geçtikçe büyük bir hızla artış göstermesi bu konuyu böyle bir bakış açısında değerlendirmemi mecbur kılmaktadır. Enerji politikasının kısa bir süreç içerisinde birden değiştirilmesi mümkün olmayacağından, bu konudaki çalışmaların ivedilikle yapılarak dünyanın yeni bir enerji politikası dahilinde bu sorunu çözmesi gerekmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir enerjilerin gelişiminin iyi incelenmesi gereklidir.

Yenilenebilir enerjiler tükenmeme avantajına sahiptir. Fosil enerjilerle karşılaştırıldığında çevreye daha dost oldukları ve çok daha düşük sera etkisine sahip oldukları görülür. Başlıcaları, hidrolik enerji, rüzgar enerjisi, biokütle enerjisi, solar enerji, fotovoltaiik sistem ve jeotermal enerjidir. Yeni ve yenilenebilir enerji kayaları grubu içinde yer alan güneş enerjisi ve rüzgar enerjisinin yanı sıra jeotermal enerji alışlagelmiş enerji kaynaklarının karşısında birer alternatiftir. Temelde rüzgar enerjisi de dönüşüme uğramış güneş enerjisidir. Gerek güneş enerjisi ve gerekse rüzgar enerjisi, çevre dostu temiz enerji kaynaklarıdır. Bu kaynakların, yenilenebilir yani tükenmeyen kaynaklar oluşu, doğanın temel düzeninden kaynaklanmaktadır (Yücel, 2000).

İnsanoğlu, yaşamını doğal çevrede sürdürürken ihtiyaçlarını da doğal kaynaklardan sağlıyordu. Kurutmayı ve ısınmayı güneşle, tahıl üretimini rüzgarla yapıyor, bir mum yada kandilin ışığıyla aydınlanabiliyordu. Sonraları nüfus artıp ihtiyaçlar çeşitlenince, "daha çok" ve "daha hızlı"yı isteyen insanoğlu, yeni kaynakların arayışına girdi. Önce buharın keşfinde olduğu gibi kullandığı kaynakları yoğunlaştırarak "daha fazla" enerji elde etti. Ancak suda yaptığı yoğunlaştırmayı güneşin dağınık enerjisini birleştirmek için deneymeden bir başka yol ile daha yüksek enerji elde edebileceğini fark etti. Ardında yakılmasıyla daha fazla enerjiyi açığa çıkaran fosil kaynaklı yakıtlara yöneldi. Fakat bu yakıtların çevreye ve atmosfere verdiği zarar o denli büyüdü ki, faydalarını gölgeler oldu. Öyle ki en masumane zararları, atmosfere saldıkları sera gazları ile atmosferdeki ince denge çizgisini büyük bir kuvvet ile sarsmaktadır.

Sanayileşme ve makineleşmenin başlayıp geliştiği 100 yıl gibi kısa bir sürede, fosil yakıtların doğaya ve canlıların sağlığına verdiği zararlar etkisini göstermiştir. Kömür, doğalgaz, petrol gibi binlerce yılda oluşmuş kaynaklar "insanlığın gelişmesi" adına tükendikçe, atıklarıyla; hava, su, toprak da tükenmeye başlamıştır. Fosil yakıtlar olarak adlandırılan kömür, petrol ve doğalgazın yarattığı olumsuzluklar sadece yakın çevreyle sınırlı kalmamış; atmosfere de yayıldı. Sonunda bu kirlilik, iklim değişikliğine yol açmaya ve dünya yaşamını tehdit etmeye başlamıştır.

Günümüzde fosil kaynaklı yakıtların çevre ve insan sağlığında yarattıkları olumsuzluklar her geçen gün katlanarak artmaktadır. Fosil kaynaklı yakıtlar yakıldığında altı sera gazının açığa çıkmasına neden olmaktadır. Bunlardan en belirleyici olanları: karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve metan (CH<sub>4</sub>). Diğerleri ise kükürt, partikül madde, azot oksit, kurum ve kül benzeri maddelerdir. Yanma sırasında ortaya çıkan karbon monoksit (CO), oksijenden çok daha hızlı bir şekilde kandaki hemoglobine tutunarak, vücuttaki oksijeni bloke ederek ve en masumane olarak baş ağrısı vb. hastalıklara yol açtıkları çeşitli çalışmalar ile belirtilmektedir. Kömür ve petrolün yanmasıyla ortaya çıkan, kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>) ise kokusuyla fark ediliyor. Sülfürik aside dönüşerek insan sağlığına ve doğal çevreye onarılmaz zararlar verirken; kanser ve diğer hastalıklara yol açmaktadır.

Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların iklim değişikliğine yol açmasının nedeniyse, yanma sırasında ortaya çıkan CO<sub>2</sub> ve metan gibi sera gazlarının bünyelerinde ısı tutma özelliğine sahip olmaları. Güneş, gün doğumundan batımına kadar atmosferin içine ısı ve ışığını vermektedir. Doğal döngünün devamı için, bu ısının tekrar uzaya transferi gerekmektedir. Oysa fosil yakıtların neden olduğu sera gazları, ısının bir kısmının atmosferde tutulmasına yol açmaktadır. Böylece dünya ısınmaya ve iklim değişmeye başlamaktadır.

Atmosferdeki CO<sub>2</sub> oranı sanayi çağı öncesine göre %25 artmıştır ve 2050 yılında iki katına çıkacaktır. Bu artışın getirdiği sera etkisiyle dünya sıcaklığı 1900'den beri 0.4 – 0.6°C yükselmiştir. 2100 yılı tahmini ise 2.0°C yükseleceğidir.

Aslında dünyamız iklim değişiklikleri ile baş edebilecek bir düzenle varlığını sürdürebilen bir gezegendir. Fakat asıl sorun iklim değişikliklerine sebep

olan sera gazlarının artışlarına bağlı sıcaklık artışının dünyamızın alışa geldiği düzenden çok daha hızlı bir şekilde gerçekleşiyor olmasıdır. İklim değişikliğinin zincirleme sonuçları yavaş yavaş yaşamımızı etkilemeye başlamıştır. Su kaynakları kurumakta, çiçekler erken açmakta, erken yağın karlar ürünleri telef etmekte, bitkiler zamansız meyve vermekte ya da hiç vermemektedir. CO<sub>2</sub>'nin yanında atmosferdeki asit gazlarının çoğalmasında da canlılar üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Normal şartlarda çevreye zararları 0.7 – 4 US cent/kWh'dır.

Uzmanlar, fosil yakıtların etkilerini kısa ve uzun vadeli olarak değerlendirmektedirler. Kısa vadede oluşan sonuçlar artık yaşamımızın bir parçası haline gelmiştir. Sıcaklık arttıkça buzullar ana kütlede koparak erimekte, ıg olayları artmakta, sel felaketleri, fırtınalar, kasırgalar oluşmaktadır. Deniz kıyısında yaşayan binlerce kişi sel suları altında ölmektedir. Bunlar mevcut durumdaki artışın sonucu olarak her geçen gün daha da fazla şekilde yaşamımızın bir parçası olacak doğa olayları olarak görülmektedirler.

Küresel ısınmanın, uzun vadede öngörülen sonuçları daha vahimdir; ortalama sıcaklık artışı bu hızla devam ederse, önümüzdeki yüzyıl içerisinde deniz seviyesi 15 – 95 cm kadar yükseleceği tahmin edilmektedir. Bu, dünyanın en büyük kentlerinin sular altında kalması anlamına gelmektedir. Bu durumun olası sonuçlarına göre İstanbul ve Çanakkale'nin iki yakasını birleştirmek için mevcut köprüler yetersiz hale gelecek, Venedik dünya tarihinde efsane olan kayıp Atlantis şehrine eşlik edecektir. New York şehri ise korkulanın aksine terör olayları ile değil büyük bir doğa olayları zinciri ile dünya sahnesinden çekilecektir. Asıl trajik olan ise bu kirlilikten en az sorumlu olan az gelişmiş ülke ya da toplumların bu kirliliğin bedelini en fazla ödeyecek olmalarıdır.

Dünya genelindeki bu kirlenmelerin üçte birinin elektrik üretiminden kaynaklandığı belirlenmiştir. Fosil yakıt rezervleri doğal olarak azalmaktadır. 1996 yılı rakamlarıyla aktüel kullanım ve rezerv oranlarına göre kömürün 234 yıl, petrolün 42 yıl, doğalgazın ise 65 yıl sonra tükeneceği tahmin edilmektedir. Pratikte yıllar geçtikçe yeni rezervler bulunmakta ve teknolojinin gelişmesiyle eskiden ekonomik olmayan kaynaklar da buna katılmaktadır. Fakat şu anda tüketim hızı dünyada doğal

fosil oluşum hızının 300.000 katıdır. Diğer bir deyişle, bir günde bin yıllık oluşumu tüketiyoruz. Bu gidişle de mevcut rezervlerin tükenmesi kaçınılmazdır.

Kısa vadede fosil yakıtların yerini tamamen alabilecek bir yenilenebilir enerji türü yoktur, fakat mevcut teknolojiler desteklenerek hem rezervler için süre kazanılabilir hem de yumuşak bir geçiş sağlanarak petrol ve türevleri şu anda hiç alternatifi olmayan plastik hammaddesi olarak değerlendirilebilmesi olasıdır.

Sıcaklık artışının kısa vadede meydana getirdiği değişimlerin yaşanmaya başlaması ve buna bağlı olarak yapılan tahminler, sivil kuruluşlarla birlikte hükümetleri de harekete geçirmiştir. Suların altında kalma tehlikesiyle karşı karşıya kalan 77 ada devleti ve Malta'nın inisiyatifiyle ülkeler, 1992 yılında Rio Çevre Zirvesi'ne giden süreci başlattılar. 1992'de yapılan Rio Zirvesi'nin ardından, gelişmiş ülkeler 1992'de Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ni imzaya açtılar. Zirveye katılan ülkeler, diğer ülkelerle çözüm bulmak ve sera gazı emisyonlarını 1990 yıllarındaki seviyenin altına çekmek için, ülkelerin uyması gereken kuralları belirlemek üzere bir dizi Taraflar Konferansı (COP) düzenlediler. Ancak pek çok ülke yine ekolojik dengeleri ya da insan ve çevre sağlığını değil, kendi ekonomik çıkarlarını gözetince anlaşmada zorlandılar. Afganistan, Irak, Somali ve Türkiye gibi bazı ülkeler Rio anlaşmasını görmezlikten gelerek, bugüne kadar onaylamadılar. 1997 yılında yapılan Kyoto İklim Zirvesi'nde ise ABD, Kanada, Japonya, Avustralya gibi bazı ülkeler kendi ülkelerinde sera gazı emisyonlarında indirim yapma sorumluluğunu üstlenmek istememişlerdir. Bu arada kendi ülkelerinde güneş, rüzgar gibi temiz enerji kaynaklarını kullanan enerji sistemlerini geliştirerek Kyoto hedeflerini tutturmaya çalışan endüstrileşmiş Avrupa Birliği ülkeleri ise, Yunanistan, Portekiz, İspanya gibi birliğe yeni katılan ülkelerin emisyonlarını 1990 yılına göre % 30 civarında artırmasına göz yumulmasını istemişlerdir.

Bir yandan ulusal ve ekonomik çıkarlar gözetilirken, diğer yandan da nükleer enerji dahil olmak üzere petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtların zararını fark edenler, standart dışı ve pazar değeri olmayan çöp teknolojileri, bunun farkında olmayan ülkelere, aktarmaya başlamışlardır. Bu teknolojileri satabilmek için kredi veren ülkeler, geçmişin sorunlu teknolojilerini başka ülkelere de taşımışlardır.

Bunu yaparken de sorunun, iklim değişikliği ve küresel kirlenme gibi sonuçlarla kendilerine döneceğini hesap etmemişlerdir.

### 3.2. SÜRDÜRÜLEBİLİR ve YENİLENEBİLİR ENERJİ

Fosil ve nükleer yakıtlara alternatif doğal enerji kaynakları konusunda yapılan araştırmalar sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kavramlarını da gündeme getirdi. Yaşamın sürdürülebilirliği için kaynakların sürdürülebilir olması yeterli değildir. Ekolojik denge için kaynakların yenilenebilir olması gerekiyordu. Bir şeyin sürekliliği sürdürülebilir olduğunu göstermiyordu. Sürdürülebilirlik bütün açısından ancak yenilenebilir olursa mümkündür. Bu nedenle enerji sistemlerinin sürdürülebilir, enerji kaynaklarının yenilenebilir olması gerekmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, kendisini dünya var oldukça yenileyen, yani tükenmeyen enerji kaynaklarıdır (Şen, 2003). Başka bir deyişle; yenilenebilir enerji kaynağı, "doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı" olarak tanımlanmaktadır. Bugün yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlar, yakılınca biten ve yenilenmeyen enerji kaynaklarıdır. Oysa hidrolik (su), güneş, rüzgar ve jeotermal gibi doğal kaynaklar yenilenebilir olmalarının yanı sıra temiz enerji kaynakları olarak karşımıza çıkmaktadır .

Devlet Planlama Teşkilatı 8. Beş Yıllık Plan Enerji Özel İhtisas Komisyonu Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretimi Alt Komisyonu'nun hazırladığı raporlar, 2005 yılına kadar ülkemizde rüzgar güç santralleriyle 5000 MW kapasitede elektrik üretiminin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum o yıllarda; Türkiye'nin toplam elektrik ihtiyacının yüzde 7'sinin rüzgardan sağlanabileceği anlamına gelmektedir. Takvimler 2007'yi göstermekte iken, ancak ne kadar üzücüdür ki Türkiye'de kurulu rüzgar gücü santrali günümüz için 67 MW civarında kalmaktadır. Ayrıca ülkemiz için enerji tüketimimiz ve büyüme hızımız dikkate alındığında, ileride ihtiyaç duyacağımız enerji miktarı konusunda sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının ve özellikle rüzgar enerjisinin önemi bir kat daha artmaktadır. Ülkemizde 2003 yılı sonu itibarı ile 45420 MW toplam kurulu güç ile 160332 milyar kWh elektrik tüketilmiştir. Yüzde 8'lik bir yıllık büyüme ile bu her yıl 3600 MW yeni kurulu güç demektir. Bu ise, her yıl 1.5 katı büyüklüğünde bir

Atatürk Barajı, yani, 4-4.5 milyar USD yatırım yapılması demektir. Bu konuda asıl konu her bir enerji branşının ayrı ayrı savunulması yada çıkış yolu olarak gösterilmesi değil optimum enerji üretiminin en uygun politika ve stratejiler ile üretilerek tüketime sunulmasıdır. Bizim savunduğumuz konu da rüzgar enerjisinin tek başına kurtuluş yolu olması değil bu çıkmazı aşabilmek adına büyük bir katkısının olabileceğidir.

2020 yılında dünyada üretilen elektriğin yüzde 50'sinin yenilenebilir kaynaklardan olması planlanıyor. 2010 yılında kullanılacak elektrik enerjisinin yüzde 10'u ise rüzgardan sağlanacak. Bunun dışında dünyada pek yaygın olmayan başka yenilenebilir enerji kaynakları da bulunuyor. Dalga, med-cezir (gel-git), çöpten sağlanan metan gazı ve kanalizasyon ısısından da ısınma ve elektrik üretimi için enerji elde edilebiliyor. Doğaya saygılı enerji kaynaklarının kullanımı arttıkça, yeni enerji kaynakları konusunda yapılan araştırma faaliyetleri de artmaktadır.

### 3.3. RÜZGAR ENERJİSİ ve GELİŞİMİ

Dünyada ilk yel değirmeni, MS 644 yılında İran-Afganistan sınırındaki Seistan'da kurulmuştur. MS 750-850 yıllarında Çin'de pirinç tarlalarının sulanmasında da yel değirmenleri kullanılmıştır. Rüzgarın elektrik enerjisinde ilk kullanımı ise 1882 yılında Amerika'da New York'ta gerçekleştirilmiştir. Rüzgar enerjisi Avrupalılar tarafından önceleri daha çok tahıl öğütme işlemlerinde kullanılmakta idi. Hollanda, İspanya, Danimarka, Ege Adaları'nda bunların örneklerini görmekteyiz. 19. yy.ın sonlarına doğru da kuyulardan su çekme amacına yönelik olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Ayrıca İran, Suriye ve Türkiye'de de 12. yy.dan itibaren yaygın bir şekilde kullanılmıştır (Ültanır, 1998).

Yeraltından su çekmek için kullanılan rüzgar türbinleri elektrik üretim amaçlı kullanılan rüzgar türbinlerinden daha basit yapıdadır. Rüzgar tarafından oluşturulan enerji, pervane şaftına gelerek doğrudan su çekmek için yapılan tulumba mekanizmasına verilmektedir. Su çekme ve sulama amacına yönelik kullanılan rüzgar türbinleri 12-24 kanatlı, 2-5 m pervane çaplı ve 10-30 m yüksekliğinde tasarlanmaktadır. Zeminden çekilen su, borularla dışarıda bulunan ve biraz yüksekçe bir su deposunda toplanmaktadır. Su deposunun yüksek olmasının nedeni suya



yükseklik enerjisinin kazandırılarak tarlaya dağıtımı için ek bir enerjiye ihtiyaç duyulmasını engellemektir. 1980’li yıllarda 55 kW gücünde rüzgar türbinleri piyasada satılırken, bugün 1,5 MW büyüklüğünde bir rüzgar türbini tesis ederek, örneğin 850 yataklı bir otelin tüm gereksinimini karşılayacak elektriği üretmek mümkün hale gelmiştir. 1990’larda rüzgar enerjisi dünyanın en hızlı gelişen enerji kolu oldu. Dünyadaki rüzgar enerji santrallerindeki son üç senenin ortalama yıllık artış hızı %35,7 iken, kurulu güç 3 senede 2.5 katına ulaştı. Dünyada rüzgar enerjisini kullanan ilk 10 ülke sırasıyla; Çin, Amerika, Almanya, İspanya, Danimarka, Hindistan, İtalya, Hollanda, İngiltere ve İsveç’tir. Çevreci politikaların da etkin hale gelmesiyle 2010 yılında dünya genelinde kullanılan rüzgar enerjisine 38.313 MW’lık yeni bir kapasite eklenmiştir. Bu bir rekordur; fakat yeni bir rekor olmasının yanı sıra bir önceki seneden %39 daha fazla rüzgar enerjisi kapasitesi demektir. Yine de yaşanan bütün gelişmelere karşın dünya çapında kullanılan rüzgar enerjisi, enerji gereksiniminin yalnızca %5’ini karşılamaktadır. Bununla birlikte hızla artan kapasitesi ile rüzgardan elde edilecek enerji yakın gelecekte enerji gereksinimini karşılayacak ciddi bir kaynak halini alabilir.

Günümüzde rüzgar santralleri karalarda olduğu kadar denizlerde de kurulmaktadır. Karadan denize geçiş ilk uygulamalarla teknik alanda başarılı ve ticari uygulamaları da gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte daha gelişkin sistemler için AR-GE çalışmaları sürmektedir. Deniz üstü rüzgar enerjisi ile ilgili ilk çalışmalar 1970’li yılların sonuna doğru Danimarka, Hollanda, İsveç ve ABD’de başlamıştır. 1980’li yılların başında bu çalışmalar Uluslar arası Enerji Ajansı (IEA) bünyesinde yürütülmüştür. İlk deniz üstü “rüzgar çiftliği” Danimarka’da Loland adası yanında kurulan Vindeby rüzgar çiftliğiydi. Bu çiftlikte 5 MW’lık enerji üretilebiliyordu. 1991 yılı ortalarında işletmeye açılan çiftlik, Danimarka Enerji Bakanlığı’nın 100 MW’lık projesinin bir bölümünü oluşturuyordu. Avrupa’da 1995–1997 yılları arasında kapasitesi 12 MW olan rüzgar santralleri kurulmuş olup günümüzde bu santrallerin kapasitesi arttırılmaktadır. Sözgelimi İngiltere’nin doğu kıyısında, Inner Dowsing adı verilen bölgede karaya 5 km uzaklıkta yapılması planlanan bu santralde hedef 1.4 MW gücünde 9 türbin kurup 12.6 MW enerji üretmektir (Ültanır, 1998). Avrupa Birliği ülkeler 2020 yılı enerji planlarında belirttikleri hedeflere göre enerji ihtiyaçlarının %12’sini rüzgardan elde edeceklerdir.

Ülkemizde 1992 yılında Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği kurulmuştur. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğine bağlanmıştır. Pek çok kamu kurumu ve özel sektörden katılan üyelerden oluşmuştur. Enerji bakanlığının ve özellikle bu birliğin etkin çalışmaları sonucu, özel şirketler tarafından ilk defa 1998’lerde İzmir- Çeşme, Alaçatı mevkiinde ARES – Güç Birliği şirketi tarafından toplam 7.2 MW güçte rüzgar türbinleri kurularak elektrik üretimine geçilmiştir. Aynı yıllarda Çanakkale-Bozcaada’da Demirer Holding tarafından 10.2 MW’lık güçte rüzgar türbinleri kurulmuştur. Bu türbinler dönmeye ve elektrik üretmeye devam ederken ülkemizde pek çok yerde daha kurulması için büyük şirketlerin çalışmalarının devam etmektedir. 2004 yılı itibariyle 18 MW düzeyinde olan rüzgar enerjisi kurulu gücü, 2009 yılı sonu itibariyle 802,8 MW düzeyine ulaşmıştır. Mevcut kurulu gücün yanı sıra Türkiye enerji politikasındaki değişiklikler ile verilen lisanslı projeler tamamlandığında 2011 yılı sonu itibari ile 2110 MW düzeyinde bir enerjiyi ekonomisine kazandırmış olacaktır.

Ülkemizde bu konuda yapılan çalışmalar özellikle bu yıl içerisinde büyük bir ivme kazanmıştır. Şirketlerin yatırım yapmalarını kolaylaştırmak amacıyla REPA (Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası) geçtiğimiz yıllar içerisinde tanıtılarak, bu sektördeki firmaların kısa sürede yol alarak yatırımlarını tamamlamaları ve hem şirketler adına hem de ülke adına geride kalınan bu konuda büyük bir gelişme kaydedilmesine çalışılmaktadır.

Rüzgar enerjisi konusunda çalışan bir çok ünlü firma son dönem içerisinde çalışmaları hızlandırmışlardır. Bunlar, As Makinsan A.Ş., İzmir-Çeşme’de ve Çanakkale-Karacaören’de ve Demirer Holding İzmir-Çeşme ve Muğla-Datça’da rüzgar türbin kurma çalışmalarını sürdürmektedir. Aynı şekilde Interwind Ltd., Çanakkale-İntepe ve Atlantis Tic., Balıkesir-Bandırma’da türbin kurma çalışmalarını sürdürmektedir. Ülkemizde rüzgar enerjisinden rüzgar türbinleri kurarak elektrik üretmek amacıyla çalışan diğer büyük şirketlerin isimleri de şöyledir: Prokom A.Ş., Mage A.Ş., Yapısan Ltd., Ak-En A.Ş., Enda A.Ş., Simelko A.Ş., Teknik Tic., Akfırat A.Ş., Bilgin Holding- Escort A.Ş. Ayrıca Dünya Bankası, Avrupa Yatırım Bankası gibi finans kurumları ülkelerdeki temiz enerji kaynaklarından enerji üretecek projelere kredi vermektedir (Akgün (b), 2004).

### 3.3.1. Rüzgar ve Rüzgara Özgü Tanımlar

Yer yüzeyinin gerek duyduğu enerjinin tümü güneşten gelir. Güneş yer yüzeyine her saat 100.000.000.000.000 kWh'lık enerji yayar. Başka bir deyişle, yer yüzeyi güneşten  $10^{17}$  watt gücünde enerji alır. Güneşten gelen enerjinin yaklaşık %1–2'si rüzgar enerjisine dönüşür. Yani rüzgar enerjisi, hız enerjisine dönüşmüş güneş enerjisidir.

Karalar, denizler ve havaküre farklı özgül ısılarla dolayısıyla farklı sıcaklıklara sahip olurlar. Sıcaklık dağılımı, coğrafik ve çevresel koşullara bağlıdır. Yerkürede ortaya çıkan sıcaklık ve buna bağlı basınç farklılıkları, rüzgarın oluşmasına neden olur. Yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hareket eden hava, "rüzgar" olarak isimlendirilmektedir. Yeryüzünde oluşan hava kütlesi hareketleri, yerin dönmesinden kaynaklanan "coriolis" kuvvetten ve yeryüzü ile akışkan hava kütlesi arasındaki sürtünme kuvvetinden etkilenirler (Yalçın, 2007).

Rüzgar enerjisini daha iyi anlayabilmek için ona özgü bazı tanımların bilinmesi konunun ilerleyen safhaları için yararlı olacaktır. Bu sebeple aşağıda ilgili tanımlar kısaca açıklanmıştır (Yalçın, 2007).

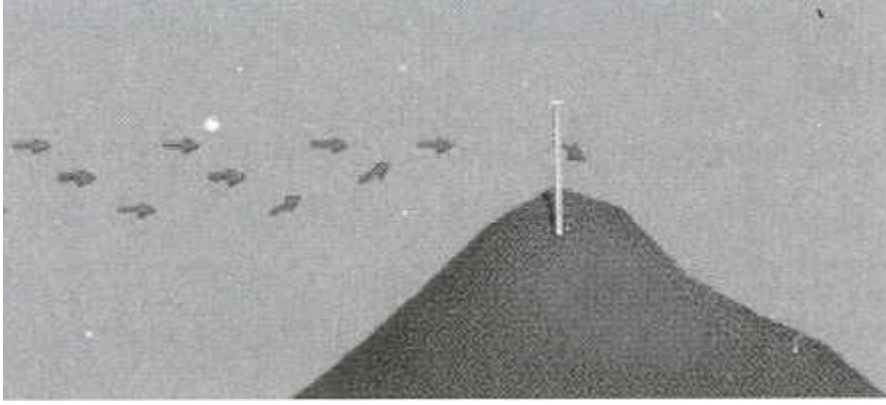
**Rüzgar hızının kısa periyot değişkenliği:** Rüzgar hızı çok küçük periyotlarla daima değişen dalga özelliği göstermektedir. Değişimin büyüklüğünün nasıl olduğu hem havaya hem de yüzey koşulları ve engellere bağlıdır.

**Günlük rüzgar değişimi :** Yer küredeki bir çok yerde, gündüzler gecelerden daha rüzgarlıdır. Bunun asıl nedeni deniz yüzeyi ve kara yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının gündüz gecedan daha fazla olmasıdır. Bu durum, enerjinin gündüz gecedan daha fazla üretilmesi ve tüketilmesinden dolayı önemli bir üstünlük sağlar.

**Rüzgarın yıllık değişimi:** Rüzgarın yıldan yıla değişimi %10–20 arasındadır. Danimarka da bu oran 19 yıl boyunca yaklaşık %9–10 arasında gözetlenmektedir.

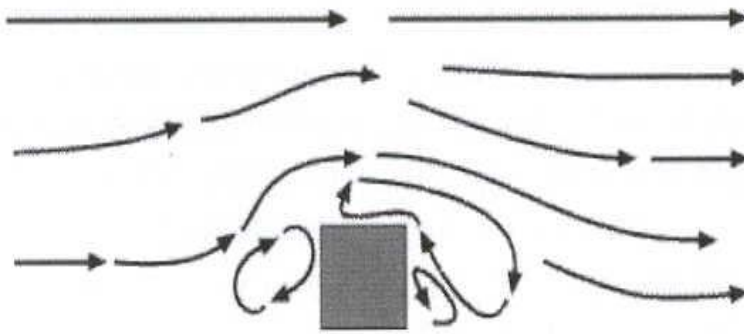
**Rüzgar hızlanması (Tepe etkisi):** Arazide türbinleri en iyi yerleştirilecek yer, hakim tepe ve sırtlarıdır. Bu durumu arazide baskın rüzgar yönü açısından olabildiğince üstünlük sağlar. Ayrıca, tepelerde rüzgar hızları, çevre arazilerden genellikle yüksektir. Tepenin rüzgarlı yanı ile kıyaslandığında, hava tepeye ulaşır ve tekrar dağılarak rüzgarsız yamaçtan alçak basınca doğru hareket eder. Düzgün ve

pürüzsüz olmayan tepelerde yüksek rüzgar hızı üstünlüğüne karşın türbülans önemli bir olumsuzluk oluşturur (Yalçın, 2007).



Şekil 3.1. Tepede Rüzgar (Yalçın, 2007).

**Rüzgar türbülansı (Girdabı):** Çok engebeli ve pürüzlü arazilerde binalar, ağaçlar gibi engeller çok fazla türbülans yaratır. Türbülans, düzenli olmayan rüzgar akışıdır. Bu akış çevrede dönme ve vorteks yaratır. Türbülans, rüzgar türbininde, rüzgardan enerji üretim verimliliğini azaltır. Türbülans, türbinde yıpranma hasarlanma ve bozulmalara neden olur. Kulelerin genellikle yüksek yapılmasının bir nedeni, hem türbülansdan kaçınmak hem de yüksek rüzgardan daha çok yararlanıp daha çok elektrik üretmektir. Düşük türbülans yoğunluğu, rüzgar türbinleri için daha fazla ömür sağlar. Denizlerde türbülans karadan daha azdır bu nedenle denize kurulan türbinler karaya kurulanlardan daha uzun ömürlüdür (Yalçın, 2007).



Şekil 3.2. Engelde (Bina) Türbülans Etkisi (Yalçın, 2007).

### 3.3.2. Dünyada Rüzgar Enerjisi

Öncelikle tüm dünya geneli için rüzgar enerjisinin değerlendirilmesi ve diğer ülkelerin bu enerjiye bakış açılarını incelersek, daha sonra ülkemiz için yapacağımız değerlendirmeler daha tutarlı olacaktır. Bu açıdan öncelikle potansiyeli incelemek bize yön gösterici olacaktır.

Dünyanın rüzgar enerjisi potansiyelini tahmin etmek ve belirlemek zordur. Fakat bilimsel çalışmalar ham rüzgar potansiyelinin sadece % 10'nun kullanılmasıyla, dünyanın elektrik enerji gereksiniminin tamamının karşılanabileceğini göstermiştir. Dünya Enerji Konseyi (WEC) dünya rüzgar kaynağının teknik potansiyelini,  $\text{km}^2$  başına 8 MW üretim kapasitesi ve %23 kapasite faktörü kabul ederek, dünya potansiyelini yılda 20.000 TWh olarak tahmin etmiştir. Yerden 10 metre yükseklikte dünya yüzeyinin yaklaşık % 27'sinin yıllık ortalama rüzgar hızı 5.1 m/s'den daha yüksektir. Uygun olmayan arazi, yerleşim alanları, tarımsal amaçlar ve diğer arazi kullanımları nedeniyle bu alanların sadece %4'ü elektrik üreten rüzgar tarlaları için uygundur. Bu alanlar kıta alanlarının 50° kuzey ve güney enlemleri arasında  $1000 \text{ km}^2$ 'lik sahil şeridi içinde bulunmaktadır. Ekonomik, estetik ve fiziksel planlama kısıtları nedeniyle bunun yaklaşık üçte birinin gerçekleştirilebileceği kabul edilmiştir.

Rüzgar enerjisi bakımından denizler, karasal alanlara göre daha zengindir. Kıyıdan 10 km açıklıkta ve 10 m derinlikteki alanların potansiyeli 750 TWh/yıl iken, kıyıdan uzaklığı 30 km ve su derinliği 40 m olan yerlerde 3500 TWh/yıl düzeyine çıkmaktadır (EİE, 2006).

Rüzgar enerjisinin gün geçtikçe önem kazandığı günümüz koşullarında dünya üzerinde de bu konuda birçok kapsamlı araştırma ve projeler yürütülmektedir. Küresel ısınmanın da etkisini yadsınmadığı bu koşullar dünya üzerinde rüzgar enerjisinin kısa bir süre içerisinde daha yaygın olarak kullanılacağına sinyallerini vermektedir. Rüzgar enerjisi dünyada ciddi biçimde yaygınlaşacaksa, öncelikle bu hedefleri gerçekleştirecek doğal kaynakların var olup olmadığını açıkça anlamak gerekir. Uygulamada, elektrik üretiminde kaynak yetersizliğinin, rüzgar gücü kullanımı açısından sınırlayıcı bir etken olma olasılığı yoktur. Dünyanın rüzgar kaynaklarının 53.000 TWh/yıl olduğu hesaplanırken, 2020 yılına kadar dünya

elektrik tüketiminin 25.579 TWs/yıl'a yükselmesi beklenmektedir. Bu nedenle teknik olarak elde edilebilecek küresel rüzgar kaynağı, dünyanın tüm elektrik gereksinimi için yapılan tahminin iki katından fazladır. Bugüne kadar yapılmış araştırmalar, dünyanın rüzgar kaynaklarının çok büyük ve neredeyse tüm bölgelere ve ülkelere yayılmış durumda olduğunu göstermektedir. Bunların büyüklükleri konusunda birçok değerlendirme yapılmıştır.

Bu tür çalışmalarda kullanılan yöntem, yer düzeyinden 10 metre yükseklikte, saniyede 5-5,5 metreyi aşkın ortalama yıllık rüzgar hızları olan kaç kilometrekare alan mevcut olduğunu değerlendirmektir. Bugünün enerji üretim maliyetleri ile, rüzgar enerjisinin kullanılması için bu ortalama hız, uygun kabul edilmektedir. Bundan sonra, toplam mevcut kaynak, arazi kullanım kısıtları hesaba katılarak yüzde 90 ya da daha fazla azaltılır. Bu kısıtlar, insan etkilerini, altyapıyı yada yüksek nüfus yoğunluğunu içerebilir. Bu sürecin sonunda, rüzgar kaynağı, piyasada bulunan ticari rüzgar türbinlerinin en gelişkin teknolojik performansına dayanarak, yıllık Terawattsaat (TWs) elektrik üretim miktarına çevrilir (Ewea, 2004).

Çizelge 3.1. Dünyada Rüzgar Enerjisinin Durumu.

ÜLKE	KURULU GÜÇ (MW)
Çin	44,733
Amerika	40,180
Almanya	27,215
İspanya	20,676
Hindistan	13,065
İtalya	5,797
Fransa	5,660
İngiltere	5,203

Kanada	4,008
Danimarka	3,734
<b>DÜNYA TOPLAMI</b>	<b>196.630</b>

Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü 2008 Nisan tarihi itibariyle 159,766 MW düzeyine ulaşmıştır. Bu kapasitenin; %81'i Avrupa ülkeleri ve Amerika birleşik Devletlerindedir. 2010 yılı sonu itibariyle %46'lık bölümü Avrupa'da olan 196,630 MW'lık toplam kurulu güç kapasitesi vardır

Rüzgar gücü kullanımının çoktan yerleşmiş olduğu ülkelerde elde edilen deneyim ise şunu gösteriyor: Daha ayrıntılı değerlendirmeler, gerçekte beklenenden çok daha fazla sayıda potansiyel sahanın kullanılabilir olduğunu kanıtlamaktadır. Bunun iyi bir örneği, Almanya'nın iç bölgelerindeki daha az rüzgarlı görünen sahaların keşfi olmuştur, Kaliforniya'nın dağ geçitlerinde olduğu gibi diğer örneklerde, yerel topografya olağanüstü iyi koşullar yaratmaktadır. Bu nedenle de dünyadaki toplam rüzgar kaynağının, bölgesel iklim gözlemlerine dayalı değerlendirmelerin gösterdiğinden daha da yüksek olması olasıdır. Son olarak, teknolojinin daha da geliştirilmesi, 5 m/s'lik rüzgar hızlarının kullanılma potansiyelini kesinlikle artıracaktır (Ewea, 2004).

Bugün dünyada rüzgar enerjisi kullanımı giderek yaygınlaşırken, bu çevre dostu enerjiyle, Danimarka, Finlandiya, Norveç ve İsveç'in toplam nüfusları kadar, 23 milyon nüfusun elektrik enerjisi ihtiyacı karşılanmaktadır. Yeryüzü Politikası Enstitüsü'nün geçici verilerine göre, rüzgar enerjisi üretim kapasitesi 2000 yılında 17 bin 800 MW iken 5 bin 500 MW (%31)'lik artışla 2001'de 23 bin 300 MW'a çıkmıştır. Oysa bu rakam daha 1994 yılında sadece 3488 MW'tı. Aynı yıl dünyada 742 MW'lık rüzgar tesisi kurulmuş olup, bu oran 1993 yılındakinden %50 daha fazladır. 1995 yılında eklenen kapasite ise, 1253 MW ile 1994 yılında eklenenin 1,7 katıdır. 1996 yılında 1292 MW, 1997 yılında 1568 MW, 1998 yılında 2597 MW, 1999 yılında ise 3922 MW'lık rüzgar enerjisi tesisi kurulmuştur. Görüldüğü gibi tesis kurulma hızı, her yıl bir önceki yıldan daha fazla artmaktadır. Bu da rüzgar enerjisinin önünün açık olduğunun bir göstergesidir (Şen, 2003).

### 3.3.3. Dünyada Rüzgar Enerjisi Gelişim Örnekleri

Dünyada rüzgar enerjisi konusunda uzmanlaşmış bir çok ülke olmasına rağmen gelişim sürecinin ilginç olduğu ve bu süreci başarı ile tamamlayan iki örnek vereceğim. Bunlar Danimarka ve Kaliforniya örnekleridir.

**Danimarka Örneği:** Hangi açıdan bakarsanız bakın, Danimarka insanının şaşırtıcı bir yönü yoktur. Dünya üzerindeki birçok şehirden daha az olan 5 milyonluk toplam nüfusu ve Avrupa'nın on birinci sıradaki ekonomisi ile ne ekonomik nede siyasi bir güce sahiptir. Enerji açısından ise yakınındaki Kuzey Denizi'nde bulunan sınırlı petrol ve doğal gaz kendisine önemli bir avantaj sağlamaz. Petrole bağımlı olan birçok devlet gibi Danimarka da yetmişli yıllarda ciddi şoklar yaşamış ve artan fiyatlar karşısında duramayan ekonomisi durgunluk batağına saplanmıştı. Yalnız diğer ülkeler kurtuluşu nükleer santrallerde veya sentetik yakıtlarda ararlarken Danimarka birçoklarına geri gitmek gibi gelen bir adım atmış ve Kuzey Avrupa kıyılarının ekonomisinde on ikinci yüzyılın ortalarından günümüze kadar son derece önemli bir rol oynamış olan bir kaynağa, rüzgar gücüne dönmüştü (Flavin, 1999).

Danimarka'da rüzgar enerjisine karşı olan tutku yetmişli senelerde uyanmaya başladı. Kesin bir sonuca ulaşmak isteyen uzmanlar eski rüzgar türbinlerinin planlarını gözden geçirdiler. Aktarma organları yeniden ele alındı. Hatta kamyonlardan çıkartılma eski aktarma elemanlarından bile medet umuldu. Kullanılacak parçaların kendi ürettiklerine çok benzediğini ve gelecekte bugün yapacakları yatırımın kat kat fazlasını çıkarabileceklerini hesaplayan tarım makineleri üreticileri bu araştırmaları desteklemeye başladılar. Kısa sürede önceleri ilkel bir görünüme sahip modeller Danimarka tepelerinde görülmeye başlandı. Kamunun büyük desteğini kazanan bu türbinleri geliştirmek amacı ile devlet yönetimi, önceleri nükleer güç denemeleri için etkinlik göstermiş olan Riso'daki enerji araştırma laboratuvarını bu konuda çalışmaya sevk etti. Eskiden yapılmış incelemeler üzerine kendi görüşlerini ekleyen tasarımcılar birkaç sene içinde bugünkü rüzgar gücü sanayi tarafından kullanılan teknolojiyi geliştirdiler. Temel yapısına bakıldığında fiberglastan yapılmış üç kanadı olan bir pervanenin, elektrik nakil hatlarını taşıyanlara benzeyen çelikten bir kule üzerinde döndüğü görülür. Dönmekte olan pervane bilinen bir dişli kutusu aracılığıyla bir jeneratörü çevirir.



Yapılan bu çalışmaların sonuçları Danimarka'daki bütün kırsal bölgelerde çıplak gözle görülebilir bazen tek başına, bazen de birkaç tanesi bir arada 20–30 metre çapında binlerce beyaz türbin yeşil kırlara dayanmış, devasa uçak pervaneleri gibi dönmektedir. Danimarka'da 1994 yılı itibari ile 3600 rüzgar türbini çalışmaktaydı. Toplam kapasite 500 MW dolayındaydı. Rüzgar gücünden elektrik sağlayan ülkeler arasında Danimarka, dünyada dördüncü sıradadır. 1994 yılında ülkenin toplam gereksiniminin %3'ü türbinlerden geliyordu. Bu oranın 2005 yılında %10'a yükselmesi beklenmektedir.

Danimarkalıların ürettikleri rüzgar türbinleri bütün dünyada dayanıklılıkları ile tanınmaktadır. Danimarka'da tasarımı ve üretilen türbinlere Kaliforniya'daki devasa merkezlerden Galler, İspanya, Hindistan, Çin ve diğer birçok ülkedeki daha küçük birimlere varana kadar her yerde rastlanmaktadır. Danimarka, yenilenebilir enerji teknolojilerinin mevcut elektrik üretim sistemlerine belirgin ölçüde entegre edilmesini sağlayan ilk ülke olmuştur (Flavin, 1999).

**Kaliforniya örneği:** Her yıl kurulmakta olan tesislere baktığımız zaman Kaliforniya rüzgar sanayinin çok erken yükselmeye başladığını görebiliriz. Makinelerin güvenilirliğinin artırıldığı ve her türbinden daha fazla enerji elde edildiği seksenli ve doksanlı yıllarda bu tesisler daha da olgunlaşmıştır. İlk başlarda sağlanan vergi muafiyetleri ve kredilerle ayakta duran atılımcılar zamanla devre dışı bırakılmışlar ve onların yerlerini Aetna ve John Hancock gibi sigorta şirketlerinin de dahil olduğu büyük firmalar almıştır. Seksenli yılların ortalarında 1–580 numaralı otoyol üzerinde San Fransisko Körfezinden doğuya giden herkes, kahverengi tepelerin önlerinde dönmekte olan binlerce beyaz türbinle karşılaşılıyordu. Kaliforniya'daki “rüzgar çiftlikleri” 1993 yılında 3 milyar kWh'lik elektrik ürettiyordu. Bu da bütün eyaletin elektrik talebinin %1.2'si demekti ki bu da San Fransisko'nun tüm meskenlerinin gereksiniminin türbinler aracılığıyla karşılanması anlamına geliyordu. Kaliforniya'nın rüzgar fırtınası başladığı zaman buraya yatırım yapanlar, kazanılan devlet ihaleleri doğrultusunda Boeing ve Westinghouse gibi firmalar tarafından uzay teknolojisinin en son sistemlerini kullanarak geliştirilen devasa türbinlerden yararlanmayı düşünmüşlerdi. Büyük rüzgar makinelerinin küçüklerden daha ekonomik olduğunu gösteren mühendislik çalışmalarına göre hazırlanan bu uzun ve zarif türbinlerin kanat uçları arasındaki mesafe, Boeing

747'lerin kanat açımından daha fazla idi. Ama bu makinelerin hiçbirinin ticari uygulamalar bakımından güvenilirliği veya ekonomikliği kanıtlanamadı. Maliyeti çok yüksek bazı deneylerden sonra, yatırım yapanlar iki ve üç kanatlı pervanelerden aynı anda yararlanabilen daha küçük modellere döndüler. Kullanılan ünitelerden bazıları devasa yumurta çırpıcılarına benziyorlardı (Jamieson vd., 1999).

Türbin yapısında sağlanan gelişmeler üzerine bazı küçük üreticiler kendi türbin modellerini piyasaya sürdüler. Bunların hepsi belirli bazı başarılar sağladıysa da çok azı kendini kanıtlayabildi. Hatta bazen bakımlarının son derece pahalıya çıkacağı anlaşıldığından içlerinde yüzlerce türbin bulunan bazı "rüzgar çiftlikleri" oldukları gibi terk edildi. Bu "rüzgardan mezarlıkların" bazıları doksanlı yılların ortalarında bile hala duruyorlardı. Danimarkalı rüzgar türbini üreticileri, Amerikalıları kurtarmaya geldiler ve Danimarka'da sattıklarının iki katı demek olan 7500 türbini yerine bağladılar.

O zamandan beri rüzgardan yararlanma teknolojisinde Danimarkalı ve Amerikalı üreticilerin ortak çabaları ve sürdürülen devlet desteği ile sürekli bir gelişme sağlandı. Rüzgar gücünün ABD'nde kuvvetlenmesine karşın bu konuda Avrupa ancak doksanlı senelerde kendisini toplamaya başladı. Avrupa'nın Kuzey ve Batlık Denizlerinin çevrelediği kıyılarında son derece kuvvetli bir rüzgar potansiyeli vardır. Bu potansiyel Polonya'ya kadar uzanır. Güney Avrupa'da ise Akdeniz rüzgarları bulunur. Çevre koruma çabalarının bir sonucu olarak bazı Avrupa ülkeleri seksenli yılların sonlarında araştırma ve geliştirme faaliyetleri ile teşvik olanaklarını arttırarak karbon ve kükürt içermeyen yenilenebilir enerji kaynaklarını geliştirme çabalarını güçlendirmişlerdir.

Rüzgar gücünün hızla gelişmekte olduğu Almanya'da yüksek elektrik fiyatları ve devletin cömert desteği sayesinde rüzgar gücü ile elektrik üreten özel işletmeler kilovat saat başına 13 cent gibi bir fiyat alabiliyorlardı. Hollanda'da entegre bir rüzgar gücü geliştirme programı Ulusal Çevre Koruma Planı'nın (National Enviromental Policy Plan) bir parçası olarak düşünülmüştü. İngiltere'de ise yeni özelleştirilen elektrik kurumu, kurulacak ek elektrik üretiminin bir bölümünü yenilenebilir kaynaklardan sağlamak zorunda kalıyordu. Eskiden nükleer güç ile

bağlantılı olarak düşünülmüş olan bu kural bugün rüzgar gücü için geçerli kılınmıştır (Jamieson vd., 1999).

Bir enerji şebekesinin güvenilir şekilde beslenmesinde en önemli ilke rüzgar hızının yüksek olduğu yörelerde büyük rüzgar türbinleri kurarak, gerekli gücü en ekonomik biçimde elde etmektir. Bu nedenle bazı bilim adamları, deniz rüzgarı enerjisi kümelerini savunmaktadır. Bu öneriye göre kıyı sularında denizden esen bütün rüzgarları alacak rüzgar türbini kümeleri kurmak gereklidir. Yapılan hesaplar 1 MW'lık 400 türbin alacak 100 metrekarelik bir deniz alanının, 420 000 kişilik bir kentten elektrik gereksinimini karşılayabileceğini göstermektedir. Ne var ki bu alanda rüzgarın esmediği günler için enerji depolama sorunu vardır. Sorun için en iyi çözüm olarak ise suyun büyük çapta elektrolizi önerilmiştir. Suyun elektrolizi yoluyla elde edilen hidrojen depolanabilir ve enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Bu yolla elde edilecek enerji ise denizden karaya enerjiyi iletecek kablolar yerine, gemilerle taşınmaya gereksinimi vardır. Elektroliz gerek karada gerekse denizde kullanılan rüzgar türbinlerinin enerjiyi kesikli üretmesinden kaynaklanan depolama sorununa getirilen çözümlerden yalnızca biridir. Enerji fazlasını akümülatörlerde depolamak, doldurmak yada ana şebekeyi rüzgar estiği sürece beslemek diğer yollardır.

Rüzgar gücü bütün memleketlerde eşit bir şekilde dağılmamıştır. Rüzgar gücü ile elektrik elde edebilme potansiyeli bakımından ABD ile boy ölçüşebilecek ülkeler arasında Arjantin, Kanada, Şili, Çin, Rusya ve İngiltere sayılabilir. Mısır, Hindistan, Meksika, Tunus ve Güney Afrika gibi devletler rüzgarla elde ettikleri gücü rahatlıkla %20 dolayında arttırabilirler. Bir bütün olarak Avrupa, estetik ve çevre koruma bakımından kenara ayırdığı alana göre gereksinimi olan elektriğin %7-26'sını rüzgar gücünden sağlayabilir. Rüzgardan ancak kısıtlı bir şekilde yararlanabilen bir çok yer, sahil şeritlerinden açıklara giderek daha fazla olanak sağlayabileceklerini görebilirler. İngiltere ve Polonya sığ sularda kuracakları rüzgar çiftlikleri ile gereksinimleri olan elektriğin büyük bir kısmını sağlayabilirler. Tropik kuşak dolayında yer alan ve adalardan oluşan 20 kadar devlet, sürekli esmekte olan batı rüzgarları aracılığıyla elektrik gereksinimlerinin büyük bir bölümünü karşılayabilir. Bu ülkeler elektriği dizel jeneratörleri ile pahalı bir şekilde ürettiklerini kabul ederek başka arayışlara dönecek olurlarsa, rüzgar gücü onlar için son derece çekici bir kaynak durumuna gelecektir (Jamieson vd., 1999).

#### 3.3.4. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi

Dünyada rüzgar enerjisine şöyle bir göz gezdirdikten sonra bir de ülkemiz için bu enerji çeşidini değerlendirmek konunun devamı açısından iyi olacaktır. Bu konuda da öncelikle potansiyel incelenecek daha sonra ülkemizde bu konuda yapılan yatırımlar sunulacaktır.

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) istasyonlarının 1970-1980 dönemi rüzgar verileri değerlendirilerek, Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak, DMİ tarafından yapılan ölçümler meteorolojik amaçlıdır (klimatolojik, sinoptik, hava kirliliği vb.) ve yerel rüzgarların ölçümleri Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) kurallarına göre 10 m’de yapılmaktadır. Enerji amaçlı rüzgar ölçümlerinde ise rüzgar hızı, rüzgar yönü ve çevre sıcaklığı (2 m) gibi parametreler 30 m ve mümkünse türbin hub (göbek) yüksekliğinde en az bir yıl periyodik olarak (10dk,1saat) ölçülmeli ve bilgisayar ortamında değerlendirilebilecek şekilde veri paketi olarak tespit edilmelidir (EİE, 2006).

Bu nedenle, ülkemizin rüzgar potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgar enerjisinin yurdumuz ekonomisine katkısının hızlandırılması, yatırımcılara rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan yerlerin sunulması için 2002 yılında EİE ve DMİ işbirliği ile "Türkiye Rüzgar Atlası" yapılmıştır. Türkiye Rüzgar Atlası genel olarak bir fikir vermektedir. Hazırlanmış olan Türkiye Rüzgar Atlası’na göre yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri incelendiğinde Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz Bölgelerinin en yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

Türkiye’nin bugünkü teknik potansiyelinin 88.000 MW ve ekonomik potansiyelinin ise 10.000 MW civarında olduğu tahmin edilmektedir. Aşağıdaki şekilde ve bir sonraki tabloda gösterilen lejant renkleri Avrupa’nın da kullandığı renklerdir. Ülkemizde rüzgar potansiyeli olarak en son kırmızı renkte rüzgarlar görülmektedir. En üst katmanda görmüş olduğumuz lacivert renkle gösterilen rüzgar tipine ülkemizde rastlanılmamaktadır (EİE, 2006).



Şekil 3.3. Türkiye’de Rüzgar Atlası (EİE, 2006).

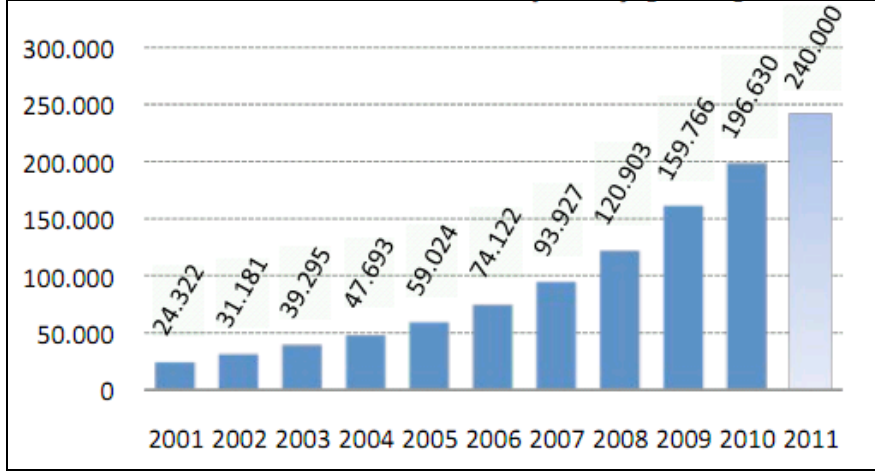
Enerji konusunda sıkıntı yaşamamak adına özel sektörün gözü de temiz enerji olan rüzgar enerjisine çevrilmiş durumda. Bu konuda birçok tanınmış şirket yatırımlarını bu yönde yapma taraftarı. Son dönem tartışılan konular üzerine çok önemli hale gelen ve gelişimi büyük bir hız kazanan rüzgar enerjisi için türbin üretici firmalar da seferber olmuş durumda. Ülkemizde rüzgar enerjisi ile ilgilenen şirketler uygun yerler için araştırmalarını yapıp lisans başvurularını yaparken üretici firmalar en erken 2008–2009 için tarih verebiliyor. Bu tarihten itibaren üretime geçen santraller geçtiğimiz 2 yılda ülkemize oldukça katkı yapmışlardır. Tüm dünyanın gözününün rüzgar enerjisine çevrilmiş olması, daha önceden bu konuda üretim yapmak üzerine yatırım yapmış firmaların yatırımlarının değer kazanmasına vesile olmuştur. Ülkemiz için de; 2002 yılında kurulan, 450 kişiye iş imkanı sağlayan, iç pazar harici 26 ülkeye ihracat yapan ve yıllık cirosu 28 milyon euro olan Enercon-Demirer Holding ortaklığında İzmir’deki Aero Rüzgar türbini kanat fabrikasında jenaratör üretimi hariç türbinin kalan kısımları üretilmekte. Genel ortaklık yapısına zaman zaman bu iki şirketin dışında Polat Holding’in de dahil olduğu görülmektedir.

2011 yılı sonuna kadar Demirer Enerji ile birlikte yaklaşık 500 MW kurulu gücünde rüzgar enerjisi yatırımı yapmakta olan Polat Enerji’nin, önümüzdeki günlerde hayata geçireceği yeni proje ise rüzgar santrali türbin jenaratör imalatı olacak. 30 milyon euro’luk yatırım hazırlığında olan şirket, hem iç pazara hem de dış pazara yönelik üretim yapacağı belirtiliyor.

Yenilenebilir enerji yatırımlarının rekabetçi olmaya başlaması, özel sektörün ilgisini bu alana çekmeyi başardı. Türkiye’de ilk rüzgar enerjisi yatırımı yapan şirketlerden Demirer Holding ile Polat Enerji’nin şu anda ayrı ayrı ve ortak olarak yürüttükleri 500 MW gücünde projeleri bulunmaktadır. Bu iki şirket Çanakkale’de 15 MW, Manisa’da ise 30 MW kurulu gücünde rüzgar santrali yatırımlarını devreye sokarak enerji sektörüne öncülük etmişlerdir. 2011 yılı sonuna kadar da 400 MW kurulu gücünde yatırım tamamlanarak ekonomiye kazandırılması planlanmaktadır.

Zorlu, Aksa ve Sanko da yenilenebilir enerjiye yatırım yapan şirketlerin başında gelmektedir. Elektrik dağıtım ihaleleri kadar, yenilenebilir enerjiyle de yakından ilgilenen Zorlu’nun hedefi, bölgede liderliği elde edebilmek olarak açıklanmıştır. Zorlu Enerji’nin Pakistan’daki rüzgar santrali projesi hızla ilerlemektedir. Bölgedeki rüzgar ölçüm istasyonunun temeli Ocak 2007’de atılmış ve ölçümlerine devam etmektedir. Yenilenebilir enerji yatırımlarına yönelik gruplardan bir diğeri ise Sanko’dur. Grup, Türkiye’de 800 milyon dolar ile 1 milyar dolar arasında enerji yatırımı yapacağını açıklayarak bu alanda dikkatleri üzerine çekmiştir. Mart 2007’de garanti bankası da, 42,5 MW kurulu gücüyle en büyük rüzgar elektrik santrali olacak Bergama Projesi için MV Holding’e 41,75 milyon euro tutarında proje finansmanı kredisi sağlamıştır. EPDK ise Mart 2007’de toplam 136,55 MW kurulu gücünde 7 ayrı rüzgar enerjisi santrali kurulması için lisans vermiştir. Lisans verilen şirketler arasında o dönemde Didim’de 31,5 MW kurulu gücünde rüzgar santrali yatırımı gerçekleştirmeyi planlayan Ayen Enerji ile Balıkesir’de 16 MW kurulu gücünde rüzgar santralini kuran Akenerji de bulunmaktadır. Ayres, İstanbul Enerji, Belen Elektrik, Kapıdağ, lisans alan diğer şirketler arasındadır ve yatırımlarını gerçekleştirmektedirler. Enerji Bakanlığı Türkiye’de 2020’ye kadar 3000 MW kurulu güce sahip rüzgar santralinin devreye girmesini planlamaktadır (Nisan 2007 Platin Dergisi).

Tüm dünya üzerinde rüzgar enerjisi kurulu gücü, yıllık %20-30’luk bir artış seviyesi ile 2006 yılı içersinde 74 GW seviyesine ulaşmıştır. 2010 yılına gelindiğinde 196 GW seviyesini geçen rüzgar enerjisinin 2011 yılında 240 GW seviyesini geçmesi beklenmektedir.



Şekil 3.4. Dünyada Kurulu Rüzgar Enerjisi Gücünün yıllara göre değişimi (MW)

2006 yılına kadar kurulu gücü 20.1 MW olan Türkiye'nin rüzgar enerji santralleri 2006 ve 2007 yıllarında büyük bir artış göstererek 131.35 MW düzeyine çıkmıştır. 2000-2006 arası dönemin durağan geçmesinin sebebi yap-işlet-devret modelinin üzerindeki tartışmalar ve rüzgar enerjisinin günümüz koşullarında daha iyi anlaşılabilen küresel ısınmaya etkisinin tam anlaşılmamış olmasıdır.

Tablo 3.2. de detaylarının verildiği bu konuda Eylül 2007'e kadar 600 MW'ı aşan tedarik sözleşmesi yapılan RES'ler listelenmiştir.

Çizelge 3.2. Türkiye'de Rüzgar Enerji Santralleri (2007), (EPDK).

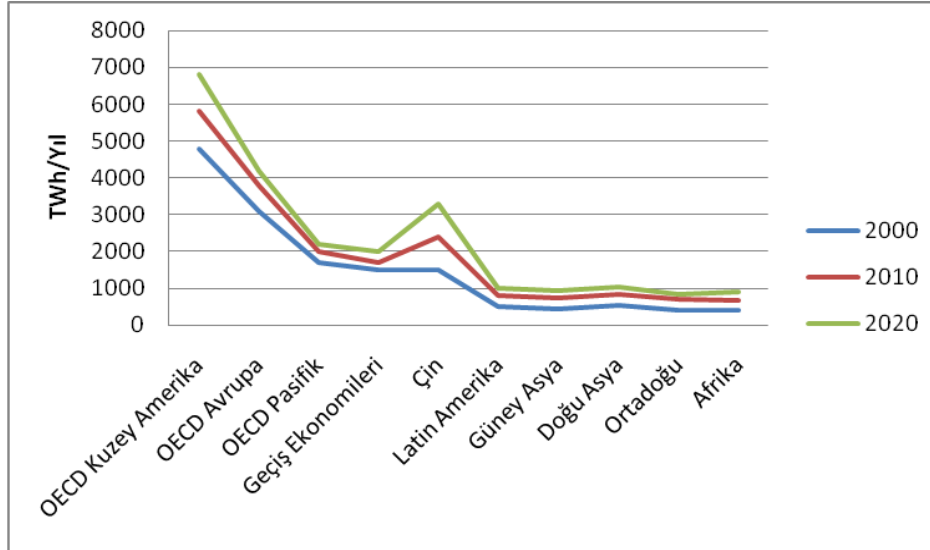
Mevkii	Şirket	Üretime geçiş tarihi	Kurulu Güç (MW)	Türbin imalatçısı	Türbin kapasitesi (KW)
İstanbul	Lodos A.Ş	1/2008	24,00	Enercon	2,000
İzmir	İnnores A.Ş	1/2008	42,50	Nortex	2,500
Aydın	Sabaş A.Ş	1/2008	19,50	Vensys	1,500
İstanbul	Ertürk A.Ş	1/2008	60,00	Ventas	3,000
Çanakkale	As Makinsan Temiz A.Ş	11/2008	30,00	Nordex	2,500
İzmir	Ak-El A.Ş	11/2008	66,60	Enercon	900-2,000
Hatay	Ezel Ltd.Şti	11/2008	35,10	Fuhrlander	900
Hatay	Ezel Ltd.Şti	11/2008	22,50	Fuhrlander	2,500
Balıkesir	Baki A.Ş	11/2008	90,00	Vestas	3,000
Bilecik	Sagap A.Ş	11/2008	66,60	Conergy AG	900

Balkesir	Bangüç A.Ş	11/2008	15,00	Vensys	1,500
Osmaniye	Rotor A.Ş	1/2009	130,00	GE	2,500
<b>TEDARİK SÖZLEMESİ İMZALI PROJE TOPLAMI</b>			<b>601,80</b>		

### 3.3.5. Rüzgar Enerjisinin Geleceği

Rüzgar enerjisinin geleceğini etkileyecek etmenler olarak gelecekteki elektrik talebi, yıllık büyüme hızı, teknolojinin gelişmesi ile türbin boyutlarının büyümesi, kapasite faktöründeki artışlar, yapılan yatırımlarla birlikte yaratılan istihdam ve rüzgar enerjisinin çevresel etkileri sayılabilir.

Gelecekteki elektrik talebi zaman zaman Dünya Enerji Konseyi ve Uluslar arası Enerji Ajansı gibi uluslar arası kuruluşlarca hesaplanmaktadır. 2020 yılına kadar küresel enerji tüketiminin, 2002'deki rakama göre %63 artarak, yılda 25.579 TWs düzeyine ulaşacağını göstermektedir. 2030 yılı başlarına gelindiğinde, dünyanın talebi ikiye katlanacaktır (Ewea, 2004).



Şekil 3.5. Bölgelere Göre Gelecekteki Elektrik Talebi (IEA) (Ewea, 2004).

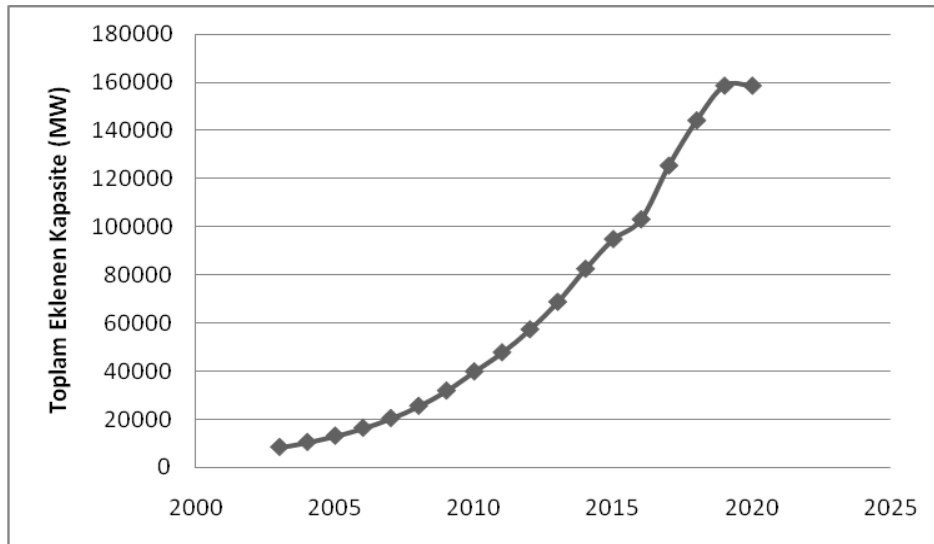
2003 yılı sonundaki kurulu rüzgar kapasitesine göre yapılan bu değerlendirme, 2010 yılına kadar % 25'lik bir büyüme hızı ve dünyadaki toplam



kurulu güç arttıkça bunu izleyen daha düşük büyüme hızları öngörmektedir. Türbinlerin hem boyutları hem de kapasite faktörleri düzenli olarak artacaktır. 2020 yılına kadar, IEA tarafından tahmin edilen dünya elektrik talebinin yüzde 12'sini karşılamaya yetecek bir yıllık üretimle, 1245 GW'lık bir kurulu güce ulaşılmış olacaktır. Bu tahmini büyüme, diğer elektrik üretim teknolojilerini piyasada ulaşılmış olduğu yaygınlık düzeyi ile eşdeğerdir. Rüzgar gücü, 2030 yılına kadar dünya elektrik talebinin %21'ini, 2040 yılına kadar ise %23'ünü karşılayabilecektir.

Özet olarak bakılacak olursa; aşağıdaki şekil ve tablodan da görüleceği üzere; rakamlar 2003 yılı sonundaki toplam rüzgar enerjisi değerleridir. O sırada dünyadaki kurulu güç, 2003'te yeni kurulan toplam 8344 MW'lık santraller dahil, 40.000 MW'ın biraz üzerindedir.

Geleceğe bakıldığında, 2004-2011 döneminde her yıl kurulan yeni sistemlerin büyüme oranı, 2010 yılı sonuna kadar işletmeye sokulacak yaklaşık 197.517 MW ile birlikte yılda %25 olarak hesaplanmıştır. Bu ise o dönemdeki en yüksek büyüme hızıdır. 2011 yılından sonra, büyüme hızları düzenli olarak düşecek, buna karşın rüzgar gücünün sürekli büyüme, her yıl eklenen tesislerle ve artan bir hızla devam edecektir (Ewea, 2004).

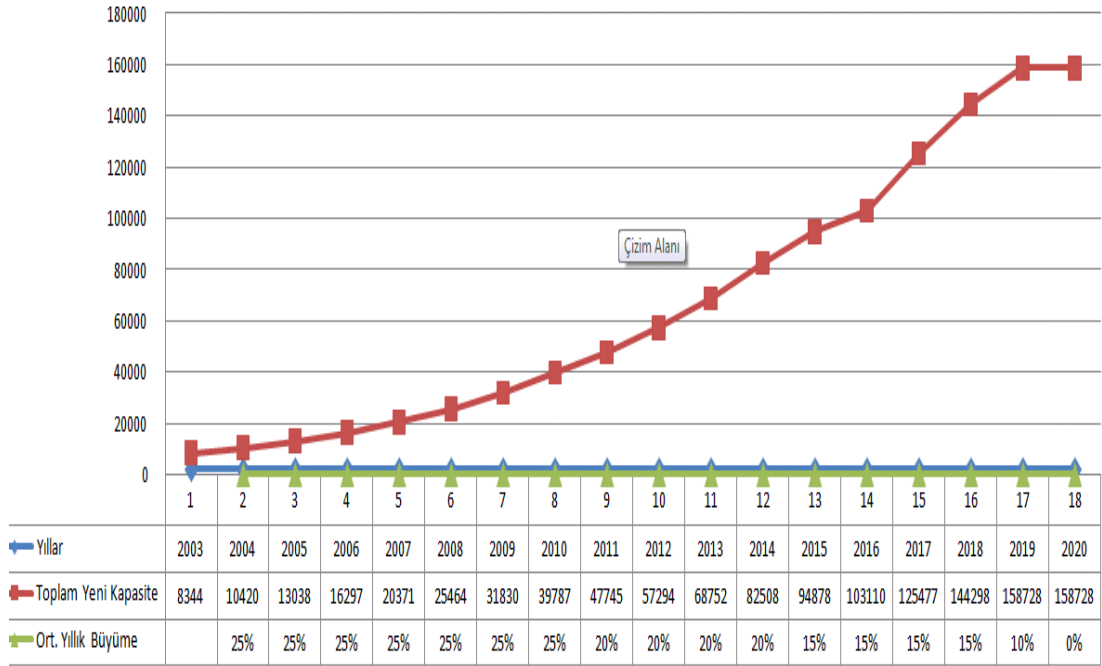


Şekil 3.6. 2020'de %12 Rüzgar Gücü – Yıllık Yeni Kapasite (MW) (Ewea, 2004).

Gelişme, 2019 yılının ötesinde, yaklaşık 158.700 MW'lık bir yıllık tesis kurma oranıyla sürmektedir. Kabaca 3200 GW'lık küresel rüzgar enerjisi düzeyinin korunacağı bir zaman diliminde, rüzgar enerjisinin piyasadaki yaygınlığının, yaklaşık 30–40 yıl içinde ulaşılabilecek bir 'doyma' noktasına sahip olan tipik bir S-eğrisi izlemesi beklenmektedir.

Gittikçe artan yeni kapasite, zamanla, eski rüzgar santrallerinin yenileriyle değiştirilmesini de içerecektir. Burada, bir rüzgar türbini için, eski türbinlerin yenileriyle değiştirilmesi kadar, yeni projelerin gerçekleştirilmesini de gerektiren ortalama 20 yıllık bir yaşam süresi kabul edilmektedir. Türbinlerin yenilenmesi ya da 'yeniden güçlendirilmesi' işi, 2025 yılından sonra oldukça büyük bir hızla gelişecek ve senaryonun daha sonraki yıllarında gittikçe daha önemli olacaktır. 2040 yılına gelindiğinde, artık tüm yeni kurulu güç, türbinlerin yeniden güçlendirilmesi ile elde edilecektir.

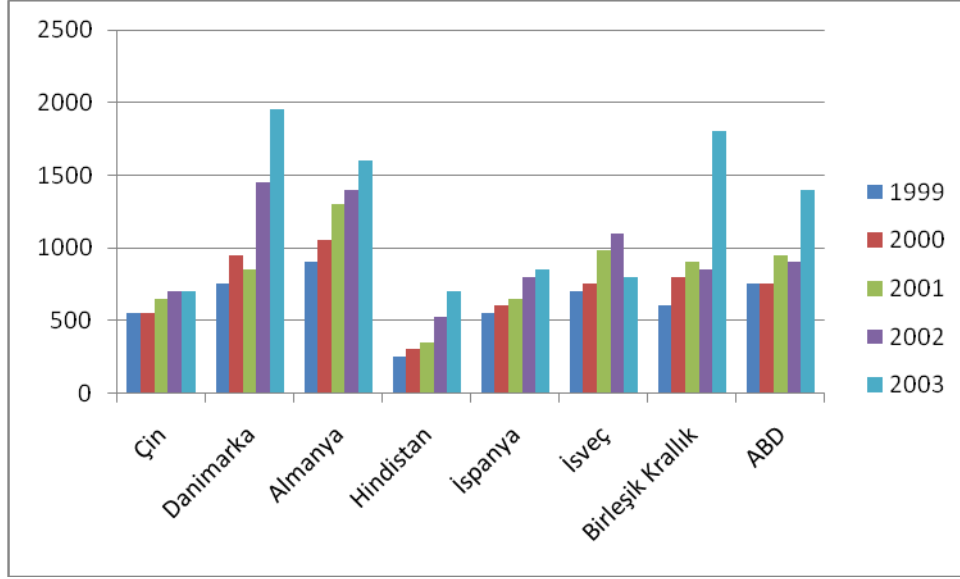
Rüzgar enerjisi için büyüme hızları, tarihsel istatistikler ile rüzgar türbini piyasasının önde gelen şirketlerinden alınmış bilgilerin bir karışımına dayanmaktadır. Dünyanın kullanılabilir rüzgar potansiyeli ve değişik bölgelerdeki elektrik tüketim düzeyleri de değerlendirilmiştir. Rüzgar teknolojisinde gelecekteki maliyet indirimleri, 'öğrenme hızları' konusundaki beklentilere dayanmaktadır. Bu indirimler bugünkü 1 kW's başına 3,79 euro cent'lik bir fiyat düzeyinden (1 kW kurulu güç başına yaklaşık 804 Euro) başlayarak artmaktadır (Ewea, 2004).



Şekil 3.7. 2020’de % 12 Rüzgar Gücü – Toplam Yeni Kapasite (MW) (Ewea, 2004).

Ağır teçhizat üreten bir endüstri için, yüzde 20-25 yıllık büyüme hızları yüksektir. Buna karşın, rüzgar endüstrisinin endüstrileşmesinin ilk aşamasında çok daha yüksek büyüme hızları yaşanmıştır. 1993-1998 yılları arasında, yeni kapasitenin büyüme hızı %40’tır; 1998-2003 yılları arasında ise %26 gibi etkileyici bir ortalama sürdürülmüştür. Rüzgar enerjisi endüstrisi, mevcut yaygınlaşma hızına göre, en az yedi yıl boyunca, yılda %25’lik bir talep artışını rahatça karşılayabilecektir. 2010 yılı sonunda, makine üretim miktarının 39.787 MW/yıl düzeyine ulaşması beklenmektedir. Senaryoda, yeni kapasitenin yıllık büyüme hızı, 2011 yılından sonra yavaşlayarak yüzde 20’ye 2015 yılında yüzde 15’e ve sonunda da 2019 yılında yüzde 10’a inmektedir. 2019 yılındaki makine üretim kapasitesi hızı, yıllık 158.728 MW’ta dengelenmektedir (Ewea, 2004).

Şekilde, 1999-2003 yılları arasında piyasadaki rüzgar türbini boyutlarının nasıl hızla büyüdüğünü göstermektedir. Bu şekle bakıldığında, önde gelen bazı piyasalarda, özellikle de Birleşik Krallık, Danimarka ve Hindistan’da kurulan türbinlerin ortalama boyutlarının iki kattan fazla arttığı görülür (Ewea, 2004).



Şekil 3.8. Seçilmiş Piyasalarda Kurulan Rüzgar Türbinlerinin Ortalama Boyutu (kW) (Ewea, 2004).

Birçok boyutta rüzgar türbini bulunmaktadır. Türbin özellikleri her geçen gün gelişmektedir. Günümüzde 5000 kW (5 MW) gibi büyüklüklerdeki türbin kapasiteleri test edilmektedir (Unay, 2006).

Rüzgar türbinlerinin kapasite faktörleri, bugün gördüğümüz yüzde 24'lük küresel ortalamayı şimdiden yükseltmiştir. Bu hem daha iyi bir ilk tasarıma sahip olmalarının, hem de daha iyi konumlandırılmalarının bir sonucudur. Yakın geçmişte, iyileştirilmiş kapasite faktörlerine esaslı bir katkı da daha büyük türbinlerin merkezlerinin yerden yüksekliğindeki artışla gelmiştir. İç bölgeler için, görece büyük pervanelere sahip olan rüzgar türbinlerinin imal edilmesi de buna yardımcı olmuştur. Elektrik şebekesi açısından, yüksek bir kapasite faktörü istenen bir özelliktir, çünkü belli bir noktada şebekeye beslenen daha fazla güç anlamına gelir. Rüzgar türbinlerinin kapasite faktörlerinin iyileştirilmesinin herhangi bir teknik engel oluşturmadığını, bunun yalnızca şebekeye daha iyi bir bağlantı, modelleme ve maliyet meselesi olduğunu da vurgulamak gerekir. Bu senaryo, ortalama kapasite faktörlerinin 2006 yılında %25'e kadar yükselen değer, 2012 yılına kadar ise yüzde 28'e yükseleceğini öngörmektedir (Ewea, 2004).

Gelecek için rüzgar enerjisinin yatırım değerinin, 2003 yılında 7 milyar Euro'dan, 2019 yılında 82,7 milyar Euro tepe noktasına yükseleceğini hesaplanmaktadır. 2020 yılında, dünyada 1245 GW'lık bir rüzgar gücü düzeyine ulaşmak için gereken toplam yatırım, 692 milyar Euro olarak hesaplanmaktadır. Bu miktar büyük gözüküyorsa da bunun, 20 yıllık bir sürenin tamamındaki toplam değer olduğu ve toplam küresel enerji sektörü yatırımlarının yalnızca küçük bir parçasını temsil ettiği unutulmamalıdır. Örneğin, 1990'larda enerji sektöründeki yıllık yatırım, her yıl 158-186 milyar Euro civarındaydı. 2020 yılına gelindiğinde, bu miktar daha önemli bir orana karşılık gelebilir; ama o zamana kadar, rüzgar gücünün, hidroelektriğin bugünkü payını aşarak, dünya elektrik talebinin yüzde 20'lik bir bölümünü karşılamaya doğru gideceği de unutulmamalıdır. Aynı dönemde, üretim maliyetlerinin 3,79 Euro cent/kWs'den 2,45 Euro cent/kws'e düşmesi beklenmektedir. Dünyada 2020 yılına kadar, imalat, tesis kurma ve rüzgar enerjisi endüstrisiyle ilişkili diğer alanlarda, 2 milyon 300 bin kişiye istihdam yaratılmış olacaktır.

Diğer maliyetleri ve yararlarının yanı sıra rüzgar enerjisinin istihdam etkisi, hesaba katılması gereken yaşamsal bir etkidir. Yüksek işsizlik oranları, dünyanın neredeyse her ülkesinde ekonomik durum açısından başlıca yüklerden biri olmaya devam etmektedir. Bu nedenle de çok miktarda nitelikli ve niteliksiz iş gücü gerektiren herhangi bir teknoloji, büyük ekonomik önem taşıyacak ve farklı enerji seçenekleri arasında yapılan politik seçimlerde, büyük olasılıkla güçlü bir rol oynayacaktır. Yirmi yıl ötesine bakarak, istihdamın belirleyici bir parametre olmaya devam edeceğini varsaymak mantıklı olmayabilir. Buna karşın, eğer bunun tersi, yani sürüp giden bir işsizlik olursa, o zaman bunun gibi uzun dönemli bir teknolojik gelişmenin ne kadar istihdam sağlayacağını bilmek önemlidir. 2020 yılına kadar dünyada rüzgar gücü endüstrisiyle ilişkili imalat, tesis kurma ve diğer işlerde, toplam 2 milyon 300 bin kişiye istihdam yaratılmış olacaktır (Ewea, 2004).

### 3.3.6. Çevresel Etkiler ve CO<sub>2</sub> Salımı

Rüzgar enerjisi temiz enerji kaynaklarından ve yaşadığımız çevre üzerinde olumlu etkileri gözlemlenmektedir. Örneğin; 500 kW'lık bir rüzgar türbini 57 000 ağacın yapacağı CO<sub>2</sub> temizleme işine eşdeğer iş yapar (EİE,2006).

2020 yılına kadar toplam 10 milyar 771 milyon ton karbondioksit indirimi sağlanmış olacaktır. Rüzgar enerjisinin en önemli çevresel yararı, iklim değişikliğinden sorumlu ana gaz olan karbondioksitin dünya atmosferine salımında sağlanan indirimdir. Gelecek tahminlerine göre, yıllık karbondioksit indirim düzeyi, 2003 yılında 50 milyon 800 bin tondan, 2020 yılında 1 milyar 832 milyon tona çıkacak, toplam tasarruf miktarı o zamana kadar 10 milyar 771 milyon tona ulaşmış olacaktır.

Çağdaş rüzgar teknolojisi aynı zamanda, çok iyi bir enerji dengesine de sahiptir. Bir rüzgar türbininin ortalama 20 yıllık yaşam döngüsü süresince, imalat tesis kurma ve hizmet işlerine bağlı karbondioksit salımı, ilk üç ile altı aylık işletme döneminin sonunda geri ödenir (Ewea, 2004).

### 3.3.7. Farklı Yönlerden Rüzgar Enerjisi

Bir önceki bölümde rüzgar enerjisini genel olarak incelenip, dünyadaki ve Türkiye'deki rüzgar enerjilerine değinildi. Bu bölümde ise rüzgar enerjisi hakkında daha çok, teknik konular anlatılmıştır. Maliyet, avantajları, türbin yapısı, rüzgarın oluşumu gibi bir çok konuda açıklama yapılmış, kısacası farklı yönlerden rüzgar enerjisi incelenmiştir.

#### 3.3.7.1. Rüzgar enerjisi'nin ekonomikliği

Rüzgar enerjisi ilk yatırımlara ve kW başına maliyetleri incelendiğinde diğer enerji türlerinden daha pahalı bir enerji olarak görülebilir ancak çevreye verilen zararlar ve bunların etkilerinin düşürülmesi için yapılacak harcamalarda dikkate alındığında rüzgar enerjisinin diğer enerji türlerine göre bir hayli ekonomik olduğu görülmektedir.

### 3.3.7.2. Rüzgar enerjisi'nin maliyeti

Rüzgar enerjisini, diğer enerji çeşitleri ile karşılaştırmadan önce maliyetini kendi içersinde inceleyelim. Dünyanın en büyük sorunu olan enerji, günümüzde çoğunlukla yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanmaya çalışılmaktadır. Bunun en büyük nedenlerinden biri de fosil ve nükleer güç ile enerji üreten tesislerde maliyetin, yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgar gücüyle enerji üreten tesislere göre oldukça yüksek olmasıdır.

Rüzgar enerjisi, elektrik üretimi maliyetinin azalması ve verimliliğin artması şeklinde iyileşmeye devam etmektedir. 1980 yılında dünyada, rüzgardan elde edilen 1 kWh enerjinin maliyeti yaklaşık 30 cent iken 1991'de bu değer 6 cent'e kadar düşmüştür. Günümüzde ise bu değer ülkelerin sağladığı kolaylıklar nedeniyle 4,7 cent/kWh'tir. Dünyada 1 kWh'lik enerji maliyetinin 2013 yılında 3 cent ve 2020 yılında ise 2,5 cent'e kadar ineceği tahmin edilmektedir (Akyüz, 2000).

Rüzgar enerjisinin maliyet açısından ekonomikliğinin yanı sıra, istihdam oluşturması da önemli bir faktördür. Rüzgar türbinlerinin kurulduğu arazi sahibi çiftçilere ödenen kira bedelleri, kırsal alanlarda önemli bir ek gelir sağlamaktadır. Ayrıca rüzgar türbinlerinin kurulumu ve bakım-onarım çalışmaları sırasında da önemli iş olanakları doğmaktadır (Akyüz, 2000).

### 3.3.7.3. Rüzgar enerjisinin avantajları

Günümüzde bir çok avantajı bulunan rüzgar enerjisinin önemi (EİE, 2006), (Yalçın, 2007) ve (Ewea, 2004) kaynakları incelendiğinde açıkça ortaya çıkmaktadır:

- Sonlu fosil kaynakların kullanımını azaltması, bugünkü enerji üretim kaynaklarına doğal kaynakların tüketilmesini geciktirerek destek olması ve yeni teknolojilerin gelişmesi için zaman sağlaması.
- Sera gazı ve CO<sub>2</sub> salımlarında fosil kaynaklara göre daha avantajlı olması, oksijen tüketmemesi, asit yağmurlarına yol açmaması, atmosferik ısınmaya neden olmaması ve radyoaktif etkisinin olmaması.
- Doğal bitki örtüsüne ve insan sağlığına olumsuz etkilerinin olmaması, 0,6 MW'lık bir türbin için rüzgar enerjisinde 86.000 ağaca eşdeğer oksijen tasarrufu sağlaması.

- Hammadde sıkıntısı olmayan yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olması.
- Türbinlerin oturduğu alanın çok küçük olması ve türbinler arası alanların başka amaçlarla kullanımına olanak vermesi (toplam alanın %1'i türbin'e yollar için yeterli).
- Kısa sürede devreye alınabilen ve genişletilebilen tesisler ile rüzgar gücünün elektriğe verimli dönüşümünü sağlaması.
- Ömrü dolan türbinleri söküp kaldırmanın kolay olması. Arazinin yeniden kullanılabilmeye uygun olması.
- Rüzgar endüstrisinin modern ve teknolojik gelişiminin tüm dünyada hızlı olması, yüksek miktarda istihdam sağlaması.
- Rüzgar santrali projelerinin basit ve türbinlerin bakımının kolay olması.
- Teknolojik alt yapının olması.
- Rüzgar santralleri kurmak için gerekli kredi faiz oranlarının düşmesi ve verilen teşvikler ile yatırımcılar için rüzgar santrali kurmanın çekici hale gelmesi.
- Dışa bağımlılığının olmaması, petrol fiyatlarındaki dalgalanmalardan etkilenmemesi.

### 3.3.8. Rüzgar Türbinlerinin Özellikleri ve Yapısı

Rüzgar enerjisi üretimi için kullanılan türbinler teknolojik gelişmeler sayesinde gün geçtikçe modernleşmekte ve eksik olduğu düşünülen konular bir bir tamamlanmaktadır.

Performansı artırıcı sistemler ile rüzgar, dünden bugüne yel değirmenlerinden modern türbinlere kadar basamak basamak bir gelişim göstermiştir. Şimdi kısaca modern türbinlerin genel yapısına bakacak olursak;

- Modern rüzgar türbinleri 2-3 kanatlıdır.
- Kanat çapları yaklaşık olarak 30 m'dir.



- Belli bir zaman aralığında rüzgar hızı değişmez değildir. Ancak, şebekeye enerji, rüzgar jeneratörü ve kanat özellikleri ile yaklaşık olarak değişmez olarak verilir.
- İki rüzgar türbini arasındaki uzaklık yaklaşık olarak 150-300 m arasında değişebilir. Bu nedenle arazinin yaklaşık %99'luk kısmı tarım, hayvancılık ve diğer amaçlar için kullanılabilir.
- En ekonomik rüzgar santrali, 10-30 MW'lık kapasite büyüklüğüdür. Bugün yaygın büyüklükteki 25 türbin yılda yaklaşık 20GWh'lık enerji üretilmektedir.
- Enerji üretimi rotor yüksekliğinde rüzgar hızının küpüne ve kanatların süpürme alanına bağlıdır.
- Rüzgar hızı yükseklikle artar, çoğu türbin 30-50m kule yüksekliğine sahiptir.
- Beklenen türbin ömrü en az 20 yıldır.
- Her türbin bilgisayar sistemi ile denetlenmektedir.
- Rüzgardan üretilen elektriğin birim maliyeti giderek düşmektedir. 2000 yılındaki maliyetinin %50 daha ucuza üretilen rüzgar enerjisinin 2015 yılına kadar maliyetlerin günümüzden %25 daha azalması beklenmektedir.
- Türbin güçleri birkaç kW'tan birkaç MW'a kadar değişebilmektedir.
- Rüzgar türbinleri karaya kurulduğu gibi denizlerde de kurulabilmektedir.

Rüzgar türbinine bağlı elektrik üretici, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Rüzgar enerjisi dönüştürme sistemleri 50W ile 2-3 MW arasında mekanik veya elektrik gücü sağlayabilmektedir. Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgardan sağlanacak enerji rüzgar hızına bağlıdır. Rüzgar hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgarın sağlayacağı enerji, gücüne ve esme saati sayısına bağlıdır, özgül rüzgar gücü, hava debisine dik birim yüzeye düşen güçtür. Topografik koşullara göre yerden 50 m yükseklikte özgül güç, hız 3.5 m/s den küçük iken,  $50W/m^2$  den az olabileceği gibi hız 11.5 m/s den büyük iken  $1800W/m^2$  den çok olabilir. Ortalama rüzgar hızı yıldan yıla değişebilir. Rüzgar

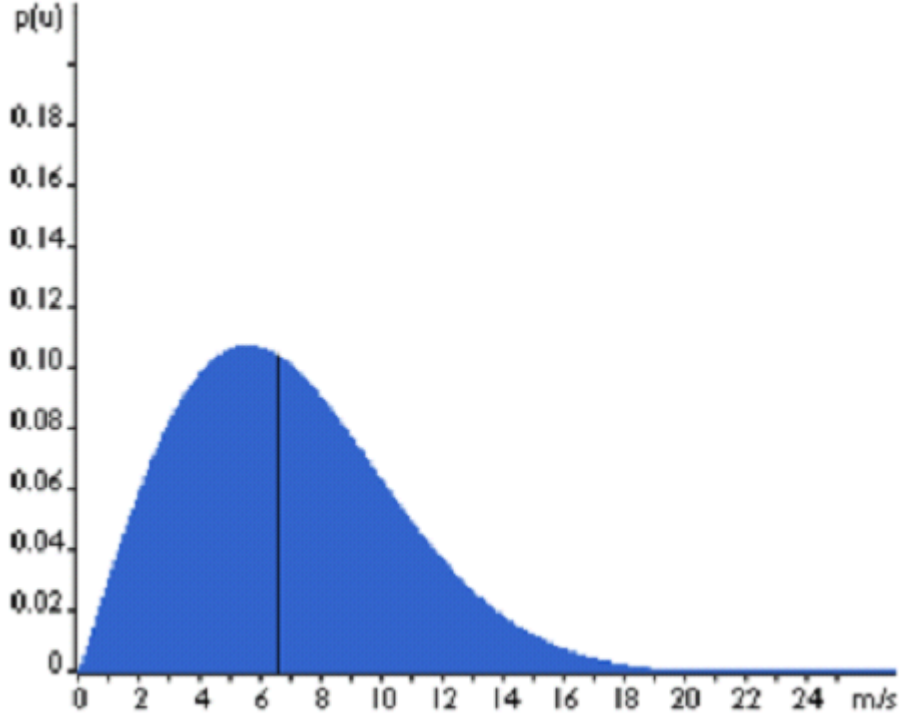
hızının değişkenliğinden dolayı, rüzgar enerjisi potansiyelinden elde edilecek enerji, yıllık ortalama hız değerinden hesaplanan enerjiden daha fazla olmaktadır. Bu yüzden belli bir bölgede rüzgar türbinleri ile üretilebilecek elektrik enerjisi üretim miktarının hesabında, yıllık ortalama rüzgar hızından çok, gözlemlenene dağılım veya Weibull dağılımı ile hesap edilmiş rüzgar hızı sıklık dağılımı kullanılmaktadır. Türbin tarafından üretilen enerjinin miktarı, rüzgar hızı dağılımına bağlıdır. Rüzgar hızları, frekans dağılımına bağlı olarak, aynı ortalama rüzgar hızına sahip farklı yerlerde iki kata varabilecek güç yoğunluğu farklılıkları olabilir. Bu durum küp çarpanından kaynaklanmaktadır (Yalçın, 2007).

Elde edilen rüzgar kayıtları, kalite kontrolü yapılarak istatistik çözümlenmeler de kullanılmak üzere değerlendirilir. Deęerlendirmelerde, hem uzun dönemli rüzgar kayıtlarını elde etmek, hem de farklı site ve farklı yüksekliklerde rüzgar özelliklerini belirlemek için rüzgar hızı dağılımı, olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılır. Bu fonksiyonlar, Weibull dağılımı, Rayleigh dağılımı ve Rüzgar gülüdür (Yalçın, 2007).

Rüzgarın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, hem enerji üretimi değerlendirmelerinde hem de rüzgar endüstrisinde çok önemlidir. Türbin tasarımcıları, türbin iyileştirilmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgar dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar. Eğer bir yıl boyunca rüzgar ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgarların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgarların daha çok ortaya çıktığı görülür. Bir site için rüzgar dağılımı ya ölçülerek, ya da ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde “Weibull dağılımı” ile belirlenir (Akgün (a), 2004).

Weibull dağılımı, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirtilir. Bu dağılımın altında kalan alanın toplam olabilirliği “1” dir. Yani, sakin havalar da bunun içinde olmak üzere, belli bir periyotta rüzgarın her aralıkta toplam olma olasılığı %100 dür. Weibull dağılımı eğrisi simetrik değil çarpıktır. Bu eğriyi oluşturan her bir hız frekansları, ortalama hızın bulunmasını da sağlar. Tipik bir yerdeki rüzgar değişimi genellikle Weibull dağılımı, kullanılarak tanımlanabilir. Bu, özel yerde bu eğrinin şekli, şekil parametresi 2 için belirlenmiş ve ortalama rüzgar hızı 7 m/s’dir (Akgün (a), 2004).

Dağılımda şekil parametresini 2'ye eşitlediğimizde de Rayleigh dağılımını elde etmiş oluruz.

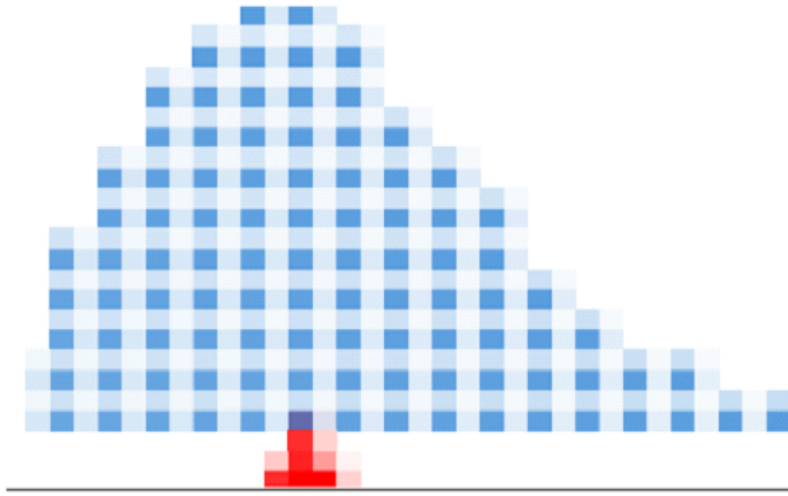


Şekil 3.9. Weibull Dağılımı.

İstatistikle aşına olan insanlar, bu eğrinin şeklinden bir olasılık yoğunluk dağılımını gösterdiğini fark ederler. Bu eğri altındaki alan daima tam olarak 1 dir, çünkü rüzgar hızının sıfır dahil diğer hızlarda esme olasılıkları % 100 olmalıdır. Mavi alanın yarısı dikey siyah çizginin, 6.6 m/s de, solunda kalmaktadır. 6.6 m/s bu dağılımın medyanı diye adlandırılır. Bu demektir ki, zamanın yarısında esmeler 6.6 m/s den daha az hızda iken, diğer yarısında daha fazla hızda olacaktır. O zaman, ortalama hız için neden 7 m/s dendiği merak edilebilir. Ortalama hız gerçekte o yerden elde edilen rüzgar gözlemlerinin ortalamasıdır. Görüldüğü gibi rüzgar hızlarının dağılımı eğrilmiştir, yani, simetrik değildir. Bazen çok yüksek rüzgar hızlarına sahip olunabilir, ancak onlar seyreklerdir. 5.5 m/s rüzgar hızları bu dağılımda oldukça yaygındır, buna bu dağılımın mod değeri denir. Her bir hız aralığını bu aralığın olma olasılığı ile çarpıp hepsini toplarsak ortalama hız elde edilir. Rüzgar

hızlarının istatistik dağılımı yerküre üzerinde bir yerden diğerine, lokal iklim şartlarına, kara parçası ve onun yüzeyine bağlı olarak değişir. Böylece Weibull dağılımının da hem şekli hem de ortalaması değişmektedir (Akgün (a), 2004).

Ortalama rüzgar hızını bulmanın bir diğer yolu, aşağıdaki grafikte tam olarak gösterilen, mavi tuğla yığınlarının dengelenmesidir. Her tuğla, yıl boyunca zamanın %1'lik diliminde esen rüzgar olasılığını temsil etmektedir. Yığılmada 1 m/s'lik rüzgar hızları en solda, 17 m/s'lik rüzgar hızları en sağdadır. Yığındaki denge 7. yığımda olmaktadır, yani ortalama hız 7 m/s'dir. (Akgün (a), 2004).



Şekil 3.10. Weibull Dağılımının Dengelenmesi.

Rüzgar hızları ile ilgilenilmesinin nedeni onların enerji içerikleridir, yukarıda gösterilen tuğla örneğindeki gibi. Biz tuğlaların hacimleri ile ilgilenildi. Şimdi, tam olarak rüzgar gücünün rüzgar hızının küpü ile değişmesine benzer olarak bir tuğlanın hacmi, içeriğinin küpü ile değişmektedir. Rüzgar hızlarının Weibull dağılımı dikkate alındığında; her bir hız artımı için rafa bir tuğla yerleştirilir. Böylece, rüzgar hızının olasılık dağılım yüzdesi elde edilmiş olur. Her tuğlanın büyüklüğü, rüzgar hızına karşılık gelirse; her tuğlanın ağırlığı rüzgardaki enerjinin miktarına karşılık gelir. Sağdaki 17 m/s'lik rüzgar hızlarında gerçekten ağır tuğlalarımız var demektir. 1 m/s'lik hızlardaki tuğlaların hemen hemen 500 katı ağırlığındadır. (1 m/s'lik rüzgar  $0.61 \text{ W/m}^2$  'lik bir güce sahiptir, 17 m/s deki rüzgar ise  $3009 \text{ W/m}^2$  'lik bir güce

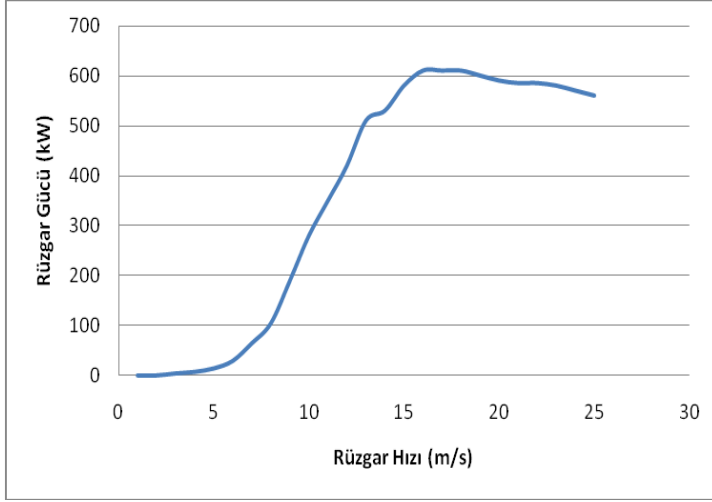
sahiptir). Güç dağılımı ortalama değeri, rafı dengeleyen rüzgar hızına karşılık bulunur. Bu durumda görüldüğü gibi yüksek rüzgar hızları nadir görülmesine rağmen, onların ağırlıkları çok fazla enerjiye karşılık gelir. Örnekte ortalama rüzgar hızı 7 m/s'dir, ancak rüzgar hızlarının ağırlıklı güç ortalaması 8.7 m/s'ye karşılıktır. Bu rüzgar hızının güç karşılığı  $402 \text{ W/m}^2$ 'dir (Akgün (a), 2004).

Rüzgardaki enerji ile ilgili olarak, enerji potansiyeli (güç) her bir saniyede rüzgar hızının küpü ile ve havanın yoğunluğu ile orantılı olarak değişir. Eğer Weibull dağılımından her bir rüzgar hızı olasılığı her bir rüzgarın gücü ile çarpılırsa; farklı rüzgar hızlarındaki güç yoğunluğunu ve rüzgar enerjisi dağılımı hesaplanmış olur. Fark edilmesi gereken en önemli şey, rüzgar enerjisi miktarının ilgilenilen yerdeki ortalama rüzgar hızının üstünde olan hızlardan kaynaklanacağıdır. Çünkü, yüksek rüzgar hızları düşük rüzgar hızlarından çok daha fazla enerji üretir (Akgün (a), 2004).

Rüzgar türbinleri ekseriya, 3-5 m/s arasındaki rüzgar hızlarında çalışmaya başlayacak şekilde dizayn edilir. Türbini çalıştırmaya başlatan bu en küçük hız değerine cut in rüzgar hızı denir

Rüzgar türbinleri yüksek rüzgar hızlarında, örneğin 25 m/s üzerindeki hızlar görüldüğünde türbini korumak ve çevresine zarar vermemek için, durdurulmaya programlanır. Türbinin durdurulduğu bu hız, cut out rüzgar hızı diye adlandırılır (Akgün (a), 2004).

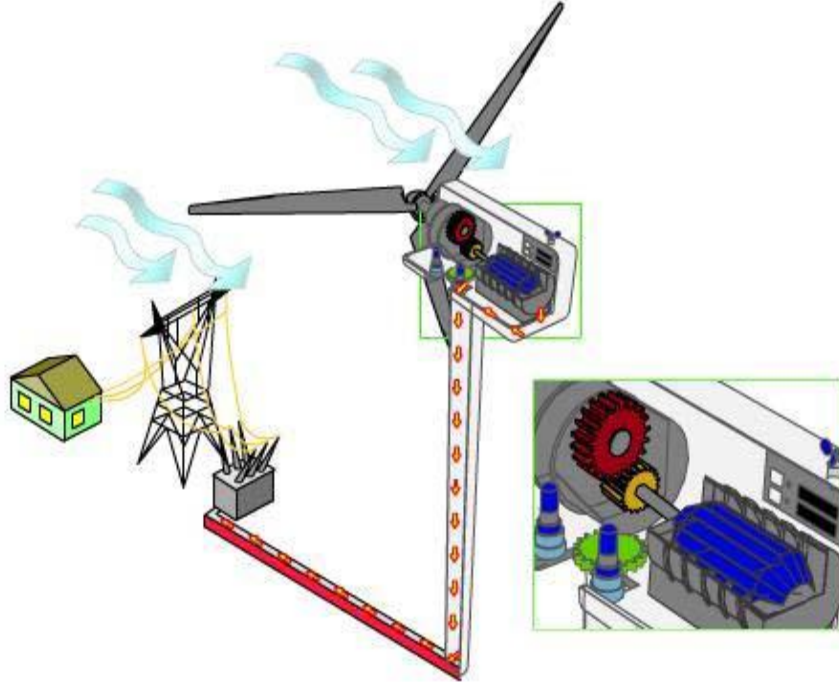
Bir rüzgar türbininin güç eğrisi, türbinin farklı rüzgar hızlarında üretilen elektrik gücü miktarının ne kadar olacağını gösteren bir eğridir. Alttaki grafik 600 kW'lık tipik bir rüzgar türbininin güç eğrisini göstermektedir. Güç eğrileri saha ölçümleri ile bulunur, rüzgar türbinine makul yakınlıktaki bir direk üzerine yerleştirilen bir anemometre ile (anemometre türbin üstüne veya çok yakınına yerleştirilmez, türbin türbülansından korunmak ve rüzgar hız ölçümlerini güvenilir yapmak için.) Eğer rüzgar hızı çok hızla dalgalanmıyorsa o zaman bir kimse anemometreden rüzgar hız değerlerini kullanabilir, türbinden elektrik gücü miktarını okur ve bu iki değeri bir grafik üstüne çizer (Akgün (a), 2004).



Şekil 3.11. Rüzgar Türbinin Güç Eğrisi.

### 3.3.9. Rüzgar Enerji Santrali ve Yer Seçimi

Rüzgar enerji santrali elektrik üretmek amaçlı kurulan bir çok türbinden ve şebekeye aktarım teknolojilerinden oluşur. Böyle bir tesisin yerinin seçimi birçok kriteri göz önüne alarak yapılmalıdır. Elektrik eş zamanlı üretilip tüketiliyor ve depolanamaz olması bu konunun önemini bir kat daha arttırmaktadır.



Şekil 3.12. Rüzgar Türbinini Genel Yapısı.

### 3.3.9.1. Rüzgar enerji santrali

Elektrik üretmek amacıyla kurulan birden fazla rüzgar türbinleri topluluğuna “Rüzgar Santrali” yada “Rüzgar Çiftliği” denir. Rüzgar enerjisi bakımından denizler, karasal alanlara göre daha büyük zenginlik göstermektedir. Karalarda ise rüzgar santrallerinin kurulacağı yerlerin seçimi çok önemlidir. Rüzgar santrallerinin kurulması düşünülen yerler için ortalama ve saatlik rüzgar hızları, santral sahasına kurulan gözlem istasyonlarından temin edilir. Rüzgar santrallerinin planlanması aşamasında, rüzgar atlasları ilk başvuru kaynakları olmalıdır.

Rüzgar atlası; yer yüzeyinden 10 m yükseklikte, yer yüzeyinde ölçülmüş olan rüzgar hızı ve yönüne yeterli süre ve sayıdaki meteoroloji istatistiklerinin, özel bilgisayar programları yardımıyla değerlendirilmesi sonucunda elde edilen, enerji plancılara ve yatırımcılara, rüzgar gücü ve kapsadığı alanlar hakkında bilgi veren verilerdir. Öte yandan, rüzgar atlası yer seçiminde tek başına yeterli olmayacaktır. Yer seçiminde özel çalışma ve ölçümlere gerek duyulmaktadır (EİE, 2006).

Rüzgar enerji santralından üretilen enerji miktarı rüzgar hızlarının küpüyle orantılıdır. Bu nedenle, rüzgar santrali kurulacak en uygun yerin belirlenmesi ve belirlenen yerde yapılacak enerji amaçlı rüzgar ölçümleri büyük önem taşımaktadır (Çalışkan, 2006).

Rüzgar santrali yer seçimi konusunda doğanın kendisi bir yol göstericidir. Santral alanı içindeki ağaçlar, bitki örtüsü ve çaylar var ise, bunlar baskın rüzgar varlığı ve yönü hakkında önemli ip uçları vermektedirler. Parklarda rüzgar potansiyelini belirlemek için herhangi bir ölçüm sistemi kurulmadan önce, meteorolojik ve topografik olarak rüzgar potansiyelinin yüksek olabileceği yerlerde, topografya ve dağ silsileleri dikkate alındığında daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir (EİE, 2006).

RES kurulumu için öncelikle kaynak tespiti ve bir dizi araştırmayı içeren ön etüt süreci önem kazanmaktadır. Bu bölümün ayrıntıları aşağıdaki kısımlarda incelenmiştir.

### 3.3.9.2. Rüzgar potansiyeli yüksek yerlerin belirlenmesi

Rüzgar enerji santrali yatırımı için ilk yapılması gereken rüzgar potansiyeli yüksek yerlerin tespit edilmesidir. Bu aşamada belirlenmesi gereken, rüzgar hızlarının yaklaşık tahmini değerleridir. Tahmini rüzgar hızlarının bulunacağı ilk başvuru kaynağı ise daha önce de bahsettiğimiz rüzgar atlaslarıdır (Çalışkan, 2006)

Düşünülen yerlere yakın meteoroloji ve konu ile ilgili kurumlarının yapmış olduğu rüzgar ölçümleri de bir fikir verebilir. Bunların yanı sıra, rüzgar enerji santrali kurulacak yerin tespitinde doğanın kendisi gerçek bir yol göstericidir. Ağaçlar, çalılıklar gibi biyolojik göstergeler, rüzgarın oluşturduğu jeolojik belirtiler (aşınmalar, erozyon) önemli ip uçları vermektedir. Ayrıca; yöre halkının gözlemleri, eski yel değirmen kalıntıları ve rüzgarı çağrıştıracak yerel, sosyal ve kültürel belirtiler (tepe isimleri, maniler vb) rüzgar varlığını işaret ederler (EİE, 2006).

Duyumlar, gözlemler ve kuruluşların yapmış olduğu ölçüm kayıtları ile kabaca belirlenen yerde bizzat arazi çalışması yapılarak tahmini rüzgar hızları belirlenir. Ayrıca, el anemometresi ile belli bir sıklıkta ve sürede anlık rüzgar hızlarının tespit edilmesi de yararlı olacaktır. Yapılan ön çalışmalar sonucu belirlenen tahmini ortalama rüzgar hızları 5-7 m/s civarında ise rüzgar kaynağın ekonomik olarak değerlendirilebileceği düşünülmelidir (Çalışkan, 2006).

Ortalama rüzgar hızlarının yüksek olacağı düşünülen sahaya rüzgar enerji santrali kurmak fiziksel, çevresel, teknik ve yasal açılardan mümkün olmayabilir. Rüzgar enerji santrali kurmaya aday sahalarda dikkat edilecek bazı kriterler Çalışkan, EİE, Akgün, ve diğer kaynaklar incelendiğinde aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Sahaya ulaşım kolaylığı
- Bölgenin elektrik enerjisi talebi
- Ulusal şebekeye bağlanma kolaylığı
- Üretilecek enerjiyi pazarlama imkanları
- Enerji nakil hatlarının ve trafo merkezlerinin güç kapasitesi
- Üretilecek enerjinin nakli için trafo merkezlerine olan uzaklık



- Sahanın yol ve diğer çalışmalar için işlenme kolaylığı
- Arazinin eğimi
- Sahanın büyüklüğü
- Arazinin kullanım şekli
- Sahanın bitki örtüsü
- Arazinin hakim rüzgar yönüne göre durumu

Yatırımcı, bu ve buna benzer kriterleri değerlendirdikten sonra araştırma alanını biraz daha genişleterek aşağıda belirtilen sorulara da cevap aramalıdır (Çalışkan, 2006);

- Sahanın yerleşim birimlerine olan uzaklığı
- Sahanın imar durumu
- Sahanın askeri, sivil radar ve buna benzer tesislere olan yakınlığı
- Sahanın sit, milli park, orman arazisi veya diğer kapsamda olup olmadığı
- Sahanın doğal yaşam etkinlikleri ve ekolojik açısından önemi
- Sahanın mülkiyeti ve kullanım biçimi
- Sahanın jeolojik yapısı
- Yeraltı su kaynaklarının analizi
- Yakın civarda yaşayanların rüzgar santrallerine bakış açısı
- Sahanın sivil ve askeri havacılık amaçlı kullanım şekli
- Sahanın buzlanma, yağmur, yıldırım ve atmosferik kararlılık durumları
- GSM kapsama alanının tespiti
- Yasal yükümlülükler
- Yerel elektrik dağıtım şirketi ile yapılacak görüşmelerin sonuçları

Araştırma sahasında rüzgar varlığının tahmini değeri ve yukarıda sıralanan kriterlere bulunulan cevaplar dikkate alınarak yatırımın teknik, ticari ve sosyo-kültürel olarak verimli olabileceği sonucuna varıldığında ilgili sahada rüzgar potansiyelinin belirlenmesine yönelik gerekli çalışmalara başlanmalıdır.

### 3.3.9.3. Rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesi

Bir sahanın rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi için öncelikle bölgenin alansal rüzgar atlası elde edilmelidir. Rüzgar atlasının temelini ise sağlıklı ve güvenilir enerji amaçlı rüzgar ölçümleri oluşturmaktadır. Yeterli sürede (en az bir yıl) rüzgar verileri elde edildikten sonra bu verilerin istatistiksel analizleri yapılmalıdır. Elde edilen istatistiksel sonuçlar umut verici bulunursa bölgenin alansal rüzgar atlasının hazırlanmasına başlanmalıdır (Çalışkan, 2006).

Bir bölgenin rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesi için rüzgar varlığının ispatlandığı yerde gerçekçi rüzgar hız ve yön bilgilerine ihtiyaç duyulur. Bu amaçla, arazinin topografik yapısı, düşünülen santralin büyüklüğü gibi unsurlar dikkate alınarak belirlenen sahaya bir ve/veya birden fazla rüzgar enerjisi gözlem istasyonu (RGİ) kurulmalıdır. Rüzgar enerjisi gözlem istasyonları; genellikle 30 metre ve tercihen rüzgar türbini hub yüksekliğinde olan, gergi halatları ile zemine sabitlendirilmiş bir direk üzerine monte edilen belli sayılardaki ölçüm sensörleri ve ölçüm verilerinin kayıt edildiği sistemden (Data Logger) oluşmaktadır. RGİ'ndeki ölçüm direğinde teorik olarak tabloda verilen yüksekliklerde ilgili parametreler ölçülmektedir (Çalışkan, 2006).

Çizelge 3.3. Ölçüm Yüksekliği ve Ölçülen Parametreler (EİE, 2006).

Ölçüm Yüksekliği (m)	Ölçülen Parametreler
2	Işınım, sıcaklık, basınç
10	Rüzgar Hızı
20	Rüzgar Hızı
30	Rüzgar Hızı, Rüzgar Yönü

Rüzgar enerji santral planlaması yapılan sahada en az bir yıl süreyle sürekli olacak şekilde 10'ar dakikalık bazda enerji amaçlı rüzgar ölçümleri yapılmalı, elde edilen ölçüm değerleri varsa yakın civardaki başka ölçüm kayıtları ile karşılaştırılıp değerlendirilmelidir. Ölçüm periyodunun uzatılması ve mümkünse türbin hub yüksekliğinde yapılabilecek rüzgar ölçümleri rüzgar potansiyelinin daha sağlıklı belirlenmesini sağlayacaktır. Bu arada, rüzgar gözlem istasyonlarının kurulduğu noktalara ait 1/25 000 ölçekli harita üzerindeki UTM (Universal Transverse Mercator) ve derece-dakika cinsinden koordinatları ile birlikte deniz seviyesinden olan yüksekleri de tespit edilmelidir.

Rüzgar gözlem istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi hayati öneme sahiptir. Rüzgar gözlem istasyonunun kurulacağı nokta veya noktalar her şeyden önce o alanı temsil edebilecek bir yer olmalıdır. WMO (Dünya Meteoroloji Örgütü) standartlarına göre temsil mesafesi arazinin topografik yapısına bağlı olarak 500 m ile 100 km arasında değişmektedir. Ayrıca seçim yapılan nokta, topografik açıdan son derece uygun olmakla birlikte bu alanda engel sınıfına giren nesnelere bulunabilir. Bu şekilde seçilmiş yerler amaca uygun olmamaktadır. Hakim rüzgar yönüne göre tepe arkalarında kalan yerlerin seçimi tercih edilmemelidir. Bu durumda rüzgar hızı gerçek değerinden türbülanslar nedeniyle çok fazla uzaklaşabilir. Yapılan gözlemlerde, bu tip yanlış uygulamalar durumunda rüzgar hızının gerçek değerinden -%50 ile +%100 değerleri arasında, rüzgar yönünün de 150° kadar saptığı tespit edilmiştir. Ayrıca, rüzgar gözlem istasyonunun kurulacağı noktadaki rüzgar akışları daima birbirine paralel olmalı, bozulmuş rüzgar akışları ve türbülanslar bulunmamalıdır. Rüzgar verilerinden yola çıkarak hesaplanacak türbülans yoğunluğu değeri de %10-15'den büyük olmamalıdır. Enerji amaçlı rüzgar hız ve yön ölçümlerinde hassasiyetin %1'in altında olması istenmektedir. Zira, ölçümlerde yapılabilecek %10 oranında bir hata, enerji üretimine yaklaşık % 30'luk bir hata ve belirsizlik olarak yansır. Bu yüzden yer seçimi mutlaka bu konularda son derece deneyimli uzman personel tarafından yapılmalıdır (Çalışkan, 2006).

Rüzgar gözlem istasyonuna yakın çevresel engeller, ölçülen rüzgar hız ve yön değerlerini etkilemektedir. Binalar, ağaçlar gibi yakın çevresel engeller rüzgar hızını ve yönünü kayda değer ölçüde değiştirmekte, engel etrafında türbülansa neden olmakta ve rüzgar ölçüm verilerinin sağlıklı olmasını engellemektedir. Bu nedenle

rüzgar gözlem istasyonlarının yeri, civarda fazla engel olmayacak şekilde seçilmelidir.

## 4. MATARYEL ve YÖNTEM

Bu bölümde, yapay sinir ağı yöntemi ile 1975-2006 yılları arasında hesaplanan ortalama meteorolojik değerlere bağlı olarak olası rüzgar hızı değerlerini tahmin etme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için logaritmik sigmoid fonksiyonlu ve iki gizli katmanlı sinir ağı modellenmesi kullanılmıştır.

### 4.1. YAPAY SİNİR AĞLARI

Yapay sinir ağı ya da kısaca YSA; insan beyninin çalışma sisteminin yapay olarak benzetimi çabalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. En genel anlamda bir YSA insan beynindeki birçok nöronun (sinir hücresinin), ya da yapay olarak basit işlemcilerin birbirlerine değişik etki seviyeleri ile başlanması sonucu oluşan karmaşık bir sistem olarak düşünülebilir. Önceleri temel tıp birimlerinde insan beynindeki nöronların matematiksel modelleme çabaları ile başlayan çalışmalar, geçtiğimiz on sene içerisinde, disipline bir şekil almıştır. YSA bugün fizik, matematik, elektrik ve bilgisayar mühendisliği gibi çok farklı bilim dallarında araştırma konusu haline gelmiştir. YSA'nın pratik kullanımı genelde, çok farklı yapıda ve formlarda bulunabilen bilgi verilerini hızlı bir şekilde tanımlama ve algılama üzerinedir. Aslında mühendislik uygulamalarında YSA'nın geniş çaplı kullanımının en önemli nedeni, klasik tekniklerle çözümü zor problemler için etkin bir alternatif oluşturmaktır. Çünkü bilgisayarlar insanın beyinsel yeteneğinin en zayıf olduğu çarpma, bölme gibi matematiksel ve algoritmik hesaplama işlemlerinde hız ve doğruluk açısından yüzlerce kat başarılı olmalarına rağmen insan beyninin öğrenme ve tanıma gibi işlevlerini hala yeteri kadar gerçekleştirememektedir.

#### 4.1.1. Yapay Sinir Ağları'nın Yapısı

Temel olarak, bir yapay sinir hücresinin iç aktivasyonu ya da ham çıktısı, girdilerin ağırlıklandırılmış toplamıdır. Ancak genelde son değeri belirlemek için bir eşik fonksiyonu da kullanılır. Çıktı 1 ise, sinir hücresi harekete geçer (aktif hale gelir). Çıktı 0 ise, sinir hücresi harekete geçmez. Tek katmanlı yapay sinir ağı sadece girdi ve çıktı katmanlarından oluşur. En basit tek katmanlı sinir ağı modeli

perseptron'dur. Çok katmanlı sinir ağı bir ya da daha fazla gizli katmanı olan ileri beslemeli sinir ağıdır. Genelde bu ağ bir girdi katmanı, en az bir gizli katman ve bir de çıkış katmanından oluşur. Gizli katmanlara ihtiyaç duyulmasının sebebi girdi katmanlarından gelen genellikle işlenmemiş sinyallerin özelliklerini belirlemek, ağırlıklandırmak ve sonuçları çıktı katmanına yönlendirmektir.

Her yapay sinir hücresi şekilden görüldüğü gibi girdiler ( $X_n$ ), ağırlıklar ( $W_n$ ), toplam fonksiyonu ( $\Sigma$ ), aktivasyon fonksiyonu  $F(\Sigma)$  ve çıktı ( $y$ ) olmak üzere beş ana kısımdan oluşur. Girdiler, girdi seti veya kendinden önceki bir katmandaki başka bir işlem elemanının çıktısıdır. Burada  $X$  girdi bilgilerini içeren vektör olmak üzere  $X_T=[X_1, X_2, \dots, X_n]$  şeklinde ifade edilebilir.

Ağırlıklar, girdi seti veya kendinden önceki bir katmandaki başka bir işlem elemanının, bu işlem elemanı üzerindeki etkisini ifade eden değerlerdir. Ağırlık katsayı değerlerini içeren vektör ise  $W_T=[W_1, W_2, \dots, W_n]$  ile gösterilebilir. Hücreye taşınan her bir bilgi, girdi değerleri ve bağlantı ağırlık değerlerinin çarpılmasıyla elde edilir. Hücrede toplanan net bilgi:

$$NET = \sum_{i=1}^n X_i W_i = W_1 X_1 + W_2 X_2 + \dots + W_n X_n \quad (4.1)$$

olarak bulunur.

Hücrede toplanan bilgi bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek hücrenin gerçek çıktı değeri olan  $y$  değeri,  $y=f(NET)$  ifadesi ile elde edilir. Bu çalışmada sigmoid (eşik) aktivasyon fonksiyonu seçildiği için  $y$  çıktı değeri:

$$y = \frac{1}{1 - e^{-NET}} \quad (4.2)$$

olarak bulunur.

YSA, yapay sinir hücrelerinin birbirileri ile çeşitli şekillerde bağlanmasından meydana gelir ve katmanlar şeklinde düzenlenir. YSA'nın en fazla kullanılan modeli çok katmanlı perseptron sinir ağı (MLP)'dir. Bir MLP modeli her bir katmanda en az bir nöron bulunacak şekilde giriş; bir veya daha fazla gizli katman ve çıkış katmanından oluşur.

Giriş katmanındaki işlemci elemanlar, giriş sinyallerini ara katmandaki işlemci elemanlara dağıtan bir tampon görevi görür. Ara katman işlemci elemanları bir önceki katın çıkışlarını giriş olarak kullanır. Tüm girişlerle ağırlıklar çarpılarak toplanır. Daha sonra toplanan bu değer bir transfer fonksiyonundan geçirilerek o nöronun çıkış değeri hesaplanır. Bu işlemler bu kattaki bütün işlemci elemanlar için tekrarlanır. Çıkış katmanındaki işlemci elemanlar da, ara katman elemanları gibi davranırlar ve ağ çıkış değerleri hesaplanır. MLP modelde bilgi akışı ileri yönde olduğu için ileri beslemeli YSA olarak da bilinir. Farklı öğrenme algoritmaları kullanılarak ağı eğitilmesi sağlanır.

Kullanılan eğitim algoritmasına göre aşağıdaki eşitlik kullanılarak ağı çıkışı ile istenen çıkış arasındaki hata minimuma düşüncüye kadar ağı ağırlıkları değiştirilir.

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{k \in \text{outputs}} (t_k - o_k)^2 \quad (4.3)$$

#### 4.1.2. YSA'da Öğrenme Kat sayısı

YSA'da istenilen doğru sonuçları elde edebilmek için uygun öğrenme katsayıları son derece önemlidir. Örneğin; bir analiz sırasında ağırlıkların ( $W_i$ ) çok yüksek tutulması, fonksiyon ( $f$ ) davranışının bozulmasına sebep olabilir. Öğrenme katsayısını böyle bir davranışı önlemek için küçük tutmak gereklidir. Öğrenme katsayısı;  $0,01 < e < 10$  aralığında seçilebilen sabit bir sayıdır. Diğer taraftan çok küçük öğrenme katsayısı da ağı öğrenme işinin oldukça yavaşlamasına sebep olacaktır. Bu çalışmada öğrenme katsayısı 1 alınmıştır.

#### 4.1.3. Geri Beslemeli Ağ Modeli (BPN)

Mühendislikte ve pek çok alanda en çok kullanılan öğrenme algoritması, geriye yayılma (BPN) algoritmasıdır. Bunun en büyük nedeni, öğrenme kapasitesinin yüksek ve algoritmasının basit olmasıdır. Bu yüzden yapılan çalışmada YSA'yı eğitmek için BPN algoritması kullanılmıştır. BPN'de öncelikle ilk katmana bir girdi vektörü uygulanır. Daha sonra girdi ve 1. katman arasındaki ağırlıklar yardımıyla, 1. katmandaki her birimin aldığı toplam girdi belirlenir. Her birim, girdisini lineer olmayan bir fonksiyondan geçirerek bir sonraki katmana göndereceği çıktıyı belirler. Bir katmandaki tüm birimlerin durumları paralel olarak belirlenir. Bu işlem, çıktı katmanındaki birimlerin durumları belirleninceye kadar sırayla tekrar edilir.

BP algoritması, gerçek çıktı  $y$  ile istenen çıktı  $d$  arasındaki karesel hatayı minimum yapmak için gradyan azalma algoritmasını (gradyan descent algorithm) kullanır ve hata aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E = \frac{1}{2} \left[ \sum_p \sum_k |d_{pk} - y_{pk}|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

Burada;  $E$  ortalama karesel hatayı (MSE),  $d_{pk}$  istenen çıktı vektörünü ve  $y_{pk}$  gerçek çıktı vektörünü (ağ çıktısı) gösterir. Hatanın sıfır veya sıfıra çok yakın olması, ağın çok iyi eğitildiğini gösterir (Lin vd., 1996).

#### 4.2. ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ

İnsanoğlu var olduğundan bu yana karar verme sorunu ile karşı karşıyadır. Ancak, insanlar, genellikle, karar verme aşamasında, mevcut olan karar verme metotlarından yararlanmaktan kaçınırlar. Bunun nedeni; insanların, kendi değer sistemlerini ve ne istediklerini tam olarak bildiklerine inanmaları; başka birinin kendilerine ait düşünceleri düzenleyip karar vermelerine yardımcı olacağına inanmamalarıdır. Buna karşın; yapılan araştırmalar, insanoğlunun beyin kapasitesinin, karmaşık kararların etkin ve sezgisel bir şekilde sentezini gerçekleştirmeye yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. İnsanların bu tarz



yaklaşımından hareketle, Saaty tarafından ortaya atılan analitik hiyerarşi yöntemi, kişileri nasıl karar vermeleri konusunda bir yöntem kullanmaya zorunlu kılmak yerine; onlara kendi karar verme mekanizmalarını tanıma olanağı sağlayıp; bu şekilde daha iyi kararlar vermelerini amaçlamaktadır (Kandakoğlu, 2006).

Analitik hiyerarşi prosesi, insanoğlunun hiçbir şekilde kendisine öğretilmeyen fakat var oluşundan bu yana karar verme sorunu ile karşılaştığında içgüdüsel olarak benimsediği karar mekanizmasıdır (Özdemir, 2002). Bugüne kadar kişilerin karar verme sürecine yardımcı olabilmek için çok ölçütlü karar verme yöntemleri geliştirilmiştir. Thomas Saaty tarafından 1970'li yıllarda geliştirilen analitik hiyerarşi prosesinde, karar vericinin amacı doğrultusunda kriterler ve ona ait alt kriterler ve alternatiflerden oluşan hiyerarşik bir model kullanılır. Bu hiyerarşik model karar vericinin bilgisinin, deneyiminin, düşüncelerinin ve öngörülerinin mantıksal bir şekilde birleştirildiği, sağlıklı karar vermesine yardımcı olabilecek güçlü bir yöntemdir (Kuruüzüm vd., 2001).

Başka bir deyişle analitik hiyerarşi prosesi hem objektif hem de subjektif değerlendirme kriterlerini dikkate alabilen ve yaygın olarak kullanılan bir çok kriterli karar verme tekniğidir. Anlaşılmasının çok kolay olması ve basit matematik hesaplamaları içermesi sebebiyle, AHP oldukça büyük bir ilgi görmüş ve gerçek hayatta birçok alanda kullanılmıştır (Çanlı vd., 2007).

#### 4.2.1. Bulanık Mantık

1965 yılında Lütü (Lotfi) Asker Zade (Zadeh) tarafından ortaya atılan bulanık küme, mantık ve sistem kavramları bu araştırmacının uzun yıllar boyunca kontrol altında çalışması; istediği kontrolü elde edebilmesi için fazlaca doğrusal olmayan denklemlerin işin içine girmesi; yöntemin karmaşıklaşması ve çözümün zorlaşması neticesinde ortaya çıkmıştır (Şen, 2004).

Bulanık mantık, klasik mantığın aksine iki seviyeli değil, çok seviyeli işlemleri kullanmaktadır. Bulanık mantık yaklaşımı, makinelere insanların özel verilerini işleyebilme ve onların deneyimlerinden ve öngörülerinden yararlanarak çalışabilme yeteneği verir. Bu yeteneği kazandırırken sayısal ifadeler yerine sözel

ifadeler kullanır. İşte bu sözel ifadelerin makinelere aktarılması matematiksel bir temele dayanır (Klir vd., 1994).

Bulanık mantığın en geçerli olduğu iki durumdan ilki, incelenen olayın çok karmaşık olması ve bununla ilgili yeterli bilginin bulunmaması durumunda kişilerin görüş ve değer yargılarına yer verilmesi, ikincisi ise insan muhakemesine, kavrayışlarına ve karar vermesine ihtiyaç gösteren hallerdir (Şen, 2004).

#### 4.2.2. Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi

Geleneksel çoklu kriterli karar verme yöntemlerinde kriter ve alternatiflerin nihai değerlendirilmesi gerçek sayılarla ifade edilir ve alternatif, kriterleri tümüyle tatmin eder veya etmez klasik mantığıyla karar verme gerçekleşir. Ama gerçek hayatın karmaşıklığından ve insanoğlunun algılama kapasitesinin sınırlı olmasından, kesin olarak kavrayamadığımız çok sayıda çeşitli nesnelere vardır ki bunlar sadece subjektif görüşlerle değerlendirilebilir. Böyle karmaşık nesnelere ilişkin karar vermenin üstesinden gelmek için nesneyi nitelendiren genel özellik (örneğin güzellik) bulanık (fuzzy) özellik olarak ele alınır ve bu özellik her biri bir kriter karşılık gelmek üzere özellikler yığını ile tanımlanır, bu konuda Saaty de 1978 yılında çeşitli çalışmalar yapmıştır. Böylece, karar verici alternatifleri oluştururken kişisel görüşlerine dayanarak belirsizlik içeren dilsel değerler kullanır ki bunlar da bulanık kümelerle temsil edilebilir. Karar verici tarafından kriterlerin birbirine göre ikili mukayeselerinden ve alternatiflerin mevcut kriterlere göre tümüyle objektif değerlendirilmesinden sonra birtakım metot ile sonuca ulaşılır (Kahraman vd., 2003).

AHP hem objektif hem de subjektif değerlendirme kriterlerini dikkate alabilen ve yaygın olarak kullanılan birçok kriterli karar verme tekniğidir. Ancak, AHP yönteminde, 1 ile 9 arasında numaralandırılmış ölçeklerin kullanımının basit olmasına rağmen bir takım tutarsızlıklar bulunmaktadır. Ayrıca, karar vericiler genel olarak aralıklı karar vermeyi sabit değerli karar vermeye göre daha rahat bulmaktadır. Dolayısıyla, bu yöntem, karar vericinin kararları ile belirsizliğin açıklanması ve sayılara dökülmesi konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden,

insani düşünme şeklini yansıtmak amacıyla Bulanık AHP geliştirilmiştir (Çanlı vd., 2007).

Farklı yazarlar tarafından hazırlanmış birçok bulanık AHP metodu vardır. Bu metotlar alternatif seçiminde ve problemleri doğrulamada hiyerarşik yapı analizleri ve bulanık grup teorisi konseptini kullanan sistematik yaklaşımlardır. Karar veren kişiler genellikle, aralık hükmünü esas almanın sabit değer hükümlerine göre daha güvenilir sonuçlar doğurduğunu bulmuşlardır. Çünkü eşleştirme sürecinin bulanık doğasından dolayı genellikle tercihlerin açığa kavuşmasında güçlük yaşanmaktadır (Kahraman vd., 2003).

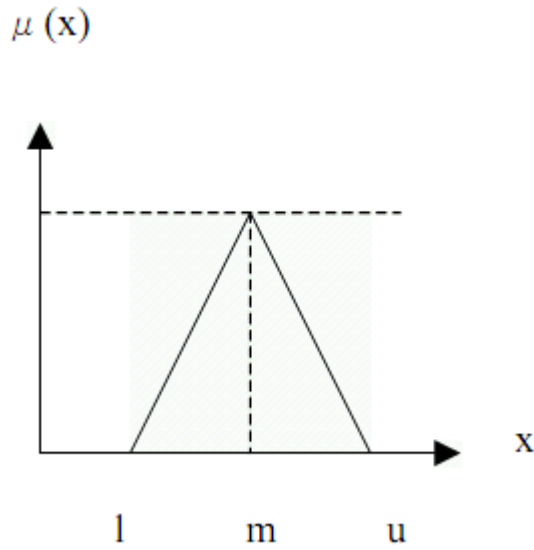
Bulanık AHP konusundaki ilk çalışma, üçgensel üyelik fonksiyonları yoluyla açıklanan bulanık oranları mukayese eden Van Laarhoven ve Pedrycz (1983) çalışması olmuştur. Buckley (1985) ikizkenar yamuk şeklindeki üyelik fonksiyonlarının kıyaslama oranlarının bulanık önceliklerini belirlemiştir ve karşılaştırma oranlarının bulanık önceliklerini trapezoidal üyelik fonksiyonu ile belirlemiştir. Stam vd., (1996) AHP’de tercih değerlerini belirlemede ya da değerlere yaklaştırmada yapay zekanın son zamanlarda ne kadar geliştiğini keşfetmiştir. Chang (1996) bulanık AHP’nin ele alınmasında ikili eşleştirmeler için üçgensel bulanık sayıları ve ikili karşılaştırmaların suni boyut değerleri için boyut analizi metodunu kullanmasıyla yeni bir yaklaşım ortaya koymuştur. Cheng (1997) üyelik fonksiyonunun değer sınıfına dayanan bulanık AHP ile deniz kuvvetleri taktiksel misil sistemleri değerlendirilmesi için yeni bir algoritma öne sürmüştür. Weck vd., (1997) klasik AHP’ye bulanık mantığın matematiğini katarak farklı üretim çevrim alternatifleri değerlendirmek için bir metot ortaya koymuştur. Kahraman vd., (1998) bulanık ağırlıklı değerlendirmede ve AHP’nin ağırlıklarını elde etmede bulanık objektif ve sübjektif metodu kullanmıştır. Deng (1999) kalitatif çok ölçütlü analiz problemlerini basit ve şeffaf şekilde ele alırken bir bulanık yaklaşımı sunmuştur. Lee vd., (1999) AHP’nin ardındaki temel düşünceleri gözden geçirmiştir. Bu düşüncelere dayanarak, araştırmacılar karşılaştırma aralıkları kavramını ortaya çıkarmış ve bulanıklığı kıyaslama prosesine uydurmak ve global tutarlılığı başarmak için stokastik optimizasyona dayanan bir metodoloji öne sürmüşlerdir. Zhu vd., (1999) boyut analizi metodu ve bulanık AHP’nin uygulamaları üzerinde bir değerlendirme yapmıştır. Chan vd., (2000) bulanık çerçevede soyut ve somut yararları

sayısallaştıran bir teknoloji seçimi algoritması sunmuştur. AHP ve ekonomik değerlendirmeler için bulanık grup teorisinin bir uygulamasını tanımlamışlardır. Hiyerarşiyi izleyerek, bulanık uygun indeksi olarak adlandırılan her bir alternatif teknolojinin tercihsel ağırlıkları bulunmuştur. Teknolojilerin bulanık uygun indisleri daha sonra dereceleri değerlendirilmiş ve teknolojilerin tercihsel dereceli düzenleri bulunmuştur.

Ekonomik değerlendirme perspektifinden bir bulanık nakit akış analizi çalıştırılmıştır. Chan vd., (2000) simülasyon ve MCDM teknikleri kullanan FMS'in otomatik dizaynı için entegre bir yaklaşım rapor etmiştir. Tasarımın prosesi, yapıyı ve simülasyon metotları kullanılarak alternatif tasarımları meydana getirmektedir. En uygun tasarım seçimi (AHP'ye dayanarak) FMS simülasyon modelinden çıktılarını analiz etmek için kullanılmıştır. Zeka araçları (örneğin uzman sistemler, bulanık sistemler ve sinir ağları) FMS tasarımını desteklemek için geliştirilmiştir. Active X tekniği FMS otomatik tasarım prosesinin yeni entegrasyonu için ve zeki karar destek prosesleri için kullanılmıştır. Leung ve Cao (2000) bir bulanık tutarlılık tanımını tolerans sapmasını hesaba katarak sunmuştur. Temel olarak, ilişkili önemlerin (kesin tolerans değerlerine izin veren) bulanık oranları, lokal önceliklerinin üyelik değerleri üzerindeki kısıtlar olarak formüle edilmiştir. Bulanık lokal ve global ağırlıkları genişletme prensipleri yoluyla belirlenmiştir. Alternatifler maksimum-minimum küme derecelendirme metoduyla global ağırlıklar temelinde değerlendirilmiştir. Kuo vd., (2002) yeni uygun bir depoya yerleştirme için bir karar destek sistemi geliştirmiştir. Öne sürülen sistemin ilk bileşeni bulanık analitik prosesi için hiyerarşik yapı geliştirme olmuştur (Kahraman vd., 2003).

#### 4.2.3. Üçgen Bulanık Sayılar

Bir üçgen bulanık sayı (triangular fuzzy number – TFN)  $(l | m, m | u)$  veya  $(l, m, u)$  şeklinde gösterilir. Bir bulanık olay için  $l$ ,  $m$  ve  $u$  parametreleri, sırasıyla mümkün en küçük değeri, en çok beklenen değeri ve mümkün en büyük değeri temsil eder. Şekil 4.1'de örnek olarak bir bulanık üçgen sayı verilmiştir (Çanlı, 2007).



Şekil 4.1. (l, m, u) Bulanık Üçgen Sayısı.

Her üçgen bulanık sayının lineer gösterimleri sol ve sağ taraf şeklinde aşağıdaki üyelik fonksiyonu ile tanımlanabilir (Çanlı vd., 2007):

$$\mu(x|\tilde{M}) = \begin{cases} 0, & x < l, \\ (x-l)/(m-l), & l \leq x \leq m, \\ (u-x)/(u-m), & m \leq x \leq u, \\ 0, & x > u. \end{cases} \quad (4.5)$$

#### 4.2.4. Bulanık AHP Algoritması

Farklı yazarlar tarafından hazırlanmış birçok bulanık AHP metodu vardır. Bu metotlar alternatif seçiminde ve problemleri doğrulamada hiyerarşik yapı analizleri ve bulanık grup teorisi konseptini kullanan sistematik yaklaşımlardır (Kahraman vd., 2003).

Geleneksel Bulanık AHP yöntemleri yorucu aritmetik hesaplamaları kullanarak operasyonlardaki bulanık değerlerle ilgilenmektedir. Ayrıca, bu yöntemlerin bir diğer dezavantajı da kesin bir sonuca ulaşmak için fazladan durulaştırma işlemine ihtiyaç duyulmasıdır. Chang'ın yaklaşımında ise, bulanık sayıların kesişimi yöntemiyle hesaplamalar yapıldığı için, yukarıda bahsedilen dezavantajlar geçerli değildir (Çanlı vd., 2007).

Aşağıda bu çalışmada kullandığım, bulanık analitik hiyerarşi prosesi Chang'in yaklaşımı esas alınarak detaylı olarak anlatılmıştır:

$X=(x_1,x_2,\dots,x_n)$  bir nesne kümesi ve  $U=(u_1,u_2,\dots,u_n)$  de bir hedef kümesi olsun. Chang'in genişletilmiş analiz yöntemine göre, her bir nesne ele alınarak her hedef için  $g_i$  değerleri sırasıyla oluşturulur. Böylece, her bir nesne için m genişletilmiş analiz değerleri aşağıdaki şekilde elde edilebilir (Erensal vd.,2005):

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m, \rightarrow i = 1, 2, \dots, n \quad (4.6)$$

Burada tüm  $M_{g_i}^j (1, 2, \dots, m)$  değerleri parametreleri 1, m ve u olan üçgen bulanık sayıdır (Kahraman vd., 2003).

Chang'in genişletilmiş analizinin adımları aşağıda gibi verilebilir (Kahraman vd., 2003):

#### Adım 1:

Bulanık yapay büyüklük değeri, i. nesneye göre şöyle tanımlanır:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} \quad (4.7)$$

$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j$  ifadesini elde etmek için, m değerleri üzerinde bulanık toplama

işlemini belirli bir matris için aşağıdaki gibi gerçekleştirmek,

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left( \sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \text{ ve } \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} \quad (4.8)$$

ifadesini elde etmek için  $M_{g_i}^j (1, 2, \dots, m)$  değerleri üzerinde bulanık toplama işlemi yapmak

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left( \sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (4.9)$$

ve daha sonra (5.5) denklemindeki vektörün tersini hesaplamak gerekir (Kahraman vd., 2003).

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n ui}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n mi}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n li} \right) \quad (4.10)$$

**Adım 2:**

$M_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 = (l_1, m_1, u_1)$  ifadesinin olasılık derecesi şu şekilde tanımlanır:

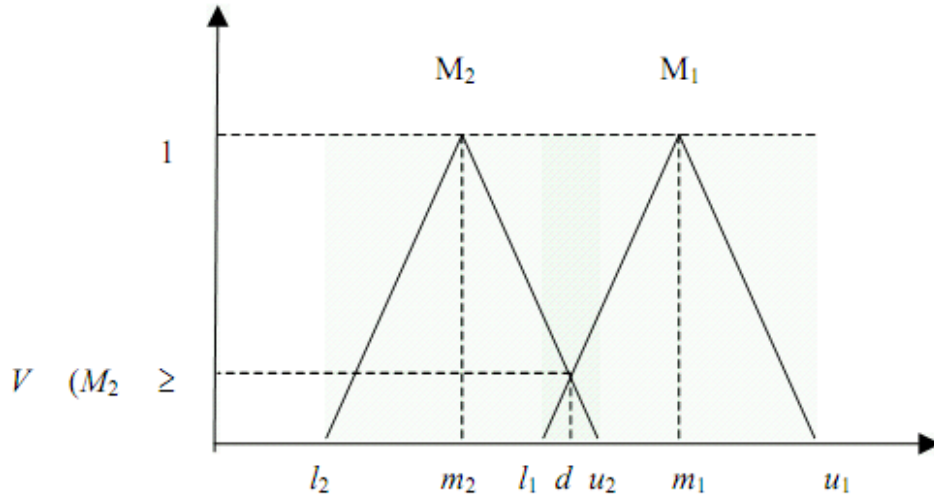
$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))] \quad (4.11)$$

Veya diğer bir ifade ile

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d)$$

$$= \begin{cases} 1, & \text{eğer } m_2 \geq m_1 \\ 0, & \text{eğer } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2)(m_1 - l_1)}, & \text{diğer hallerde} \end{cases} \quad (4.12)$$

Burada d, Şekilde gösterildiği gibi  $\mu_{M_1}$  ve  $\mu_{M_2}$  arasındaki en yüksek kesişim noktası olan D'nin ordinatıdır.  $M_1$  ve  $M_2$ 'yi karşılaştırmak için,  $V(M_1 \geq M_2)$  ve  $V(M_2 \geq M_1)$  değerlerinin her ikisine de ihtiyaç duyulur (Kahraman vd., 2003).



Şekil 4.2.  $M_1$  ve  $M_2$  arasındaki kesişme (Kahraman vd., 2003).

### Adım 3:

Konveks bir bulanık sayının olasılık derecesinin  $k$  konveks bulanık sayıdan  $M_i$  ( $i=1,2,\dots,k$ ) daha büyük olması şu şekilde tanımlanabilir:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ ve } (M \geq M_2) \text{ ve } (M \geq M_k)] = \min V(M \geq M_i), \quad i=1,2,\dots,k \quad (4.13)$$

$$\text{Burada } k = 1,2,\dots,n; \quad k \neq i \text{ için,} \quad d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad (4.14)$$

Olduğu düşünülürse ağırlık vektörü şu şekilde bulunur:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (4.15)$$

Burada  $A_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )  $n$  elemandan oluşur (Kahraman vd., 2003).

### Adım 4:

Normalize edilmiş ağırlık vektörleri

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (4.16)$$

olarak bulunur. Burada,  $W$  ağırlık vektörü bulanık bir sayı değildir.



Yukarıda anlatılan Bulanık AHP algoritmasındaki ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması için kullanılan ölçek Tablo 4.1’de verilmiştir. Standart tercih çizelgesi, tek sayılardan oluşan, aradaki çift sayıların da uzlaşma değerleri olarak kullanıldığı bir ölçek tablosu şeklinde de tanımlanabilir.

Çizelge 4.1. İkili karşılaştırmalarda kullanılan ölçek (Çanlı, 2007).

SÖZEL ÖNEM	BULANIK ÖLÇEK	KARŞIT ÖLÇEK
Eşit Önemli	(1, 1, 1)	(1/1, 1/1, 1/1)
Biraz daha fazla önemli	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
Kuvvetli Derecede Önemli	(3, 4, 5)	(1/5, 1/4, 1/5)
Çok Kuvvetli Derecede Önemli	(5, 6, 7)	(1/7, 1/6, 1/5)
Tamamıyla Önemli	(8, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/8)

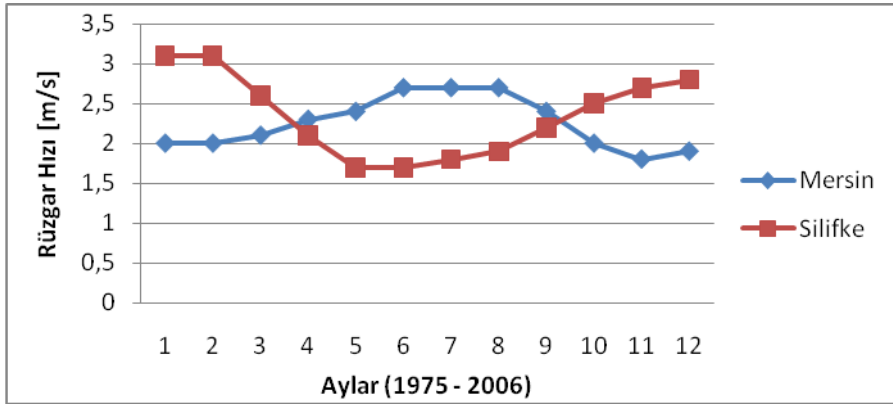
Çalışmanın bu bölümden itibaren Yapay Sinir Ağları ile Rüzgar hızı tahminini ardından, tahmini değerler göz önünde bulundurularak AHP algoritması ile uygun santral yeri seçimi işlemi gerçekleştirilmiştir.

## 5. BULGULAR ve TARTIŞMA

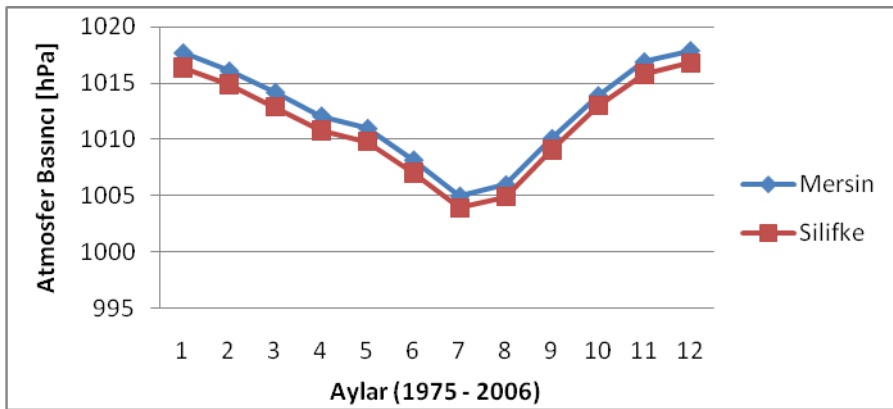
Çalışmanın bu bölümünde ölçümlerden elde edilen veriler ve bu mevcut verilerin derlenmesi ile oluşturulmuş bulgular değerlendirilmiştir. Ölçüm ve değerlendirmeler sonucunda elde edilen veriler, materyal ve metot kısmında açıklanan yöntemler ile değerlendirilmiştir.

### 5.1. ELDE EDİLEN RÜZGAR ÖLÇÜMLERİ

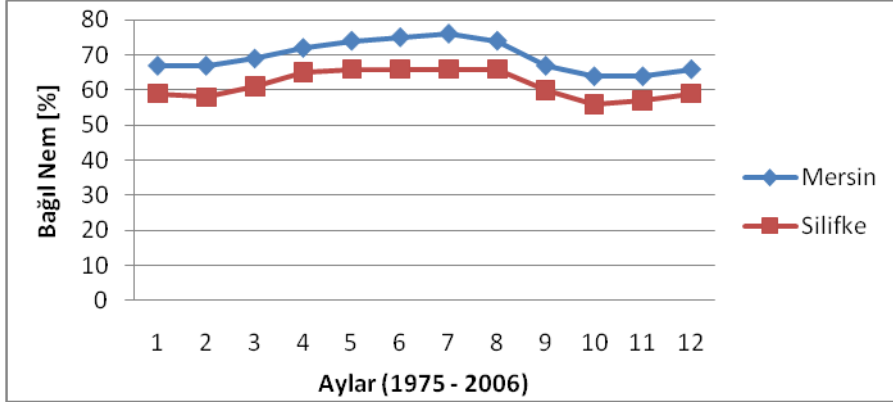
1975-2006 yılları arasındaki Mersin ve Silifke bölgelerindeki istasyonlara ait verilerin Devlet Meteoroloji İşleri Müdürlüğünden eldesi ile bu verilere bağlı olarak bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde 32 yıllık verilerin aylık ortalaması ile eğitilen ağ yapısından 2011 yılına ait tahmin yapılmıştır.



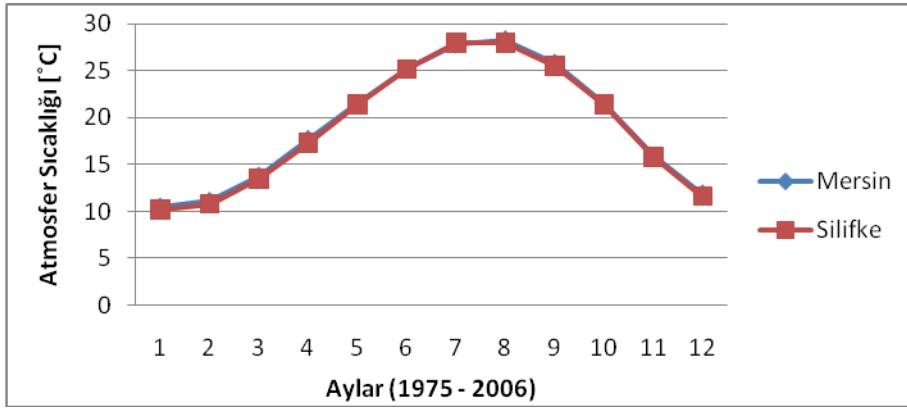
Şekil 5.1. Ölçülen Rüzgar Hızları.



Şekil 5.2. Ölçülen Basınç Değerleri.



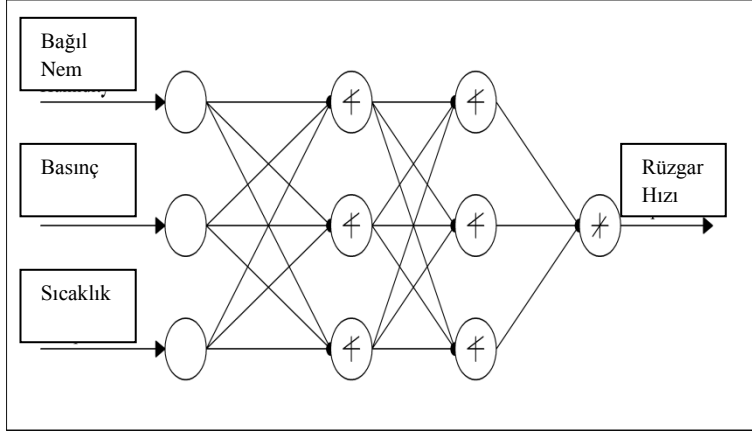
Şekil 5.3. Ölçülen Bağıl Nem Değerleri.



Şekil 5.4. Ölçülen Atmosfer Sıcaklığı.

## 5.2. YAPAY SİNİR AĞI MODELİNİN UYGULANMASI

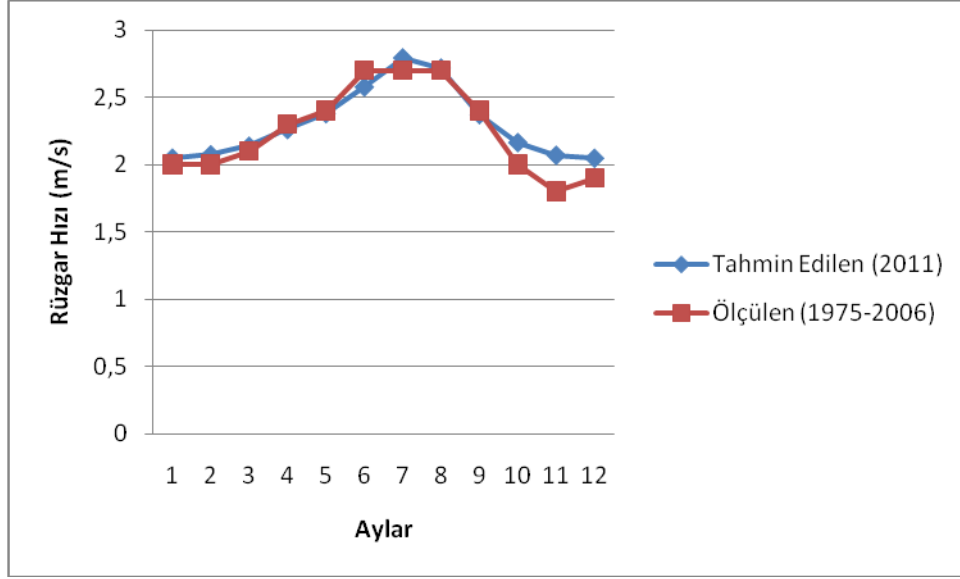
Akdeniz Bölgesindeki iki istasyon için rüzgar hızı tahmininin yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak nasıl yapıldığı açıklanmıştır. Şekilde iki gizli katmanlı ve logaritmik sigmoid fonksiyonlu yapay sinir ağının ağ yapısı gösterilmektedir. Çıkış katmanında ise lineer aktivasyon fonksiyonu uygulanmıştır.



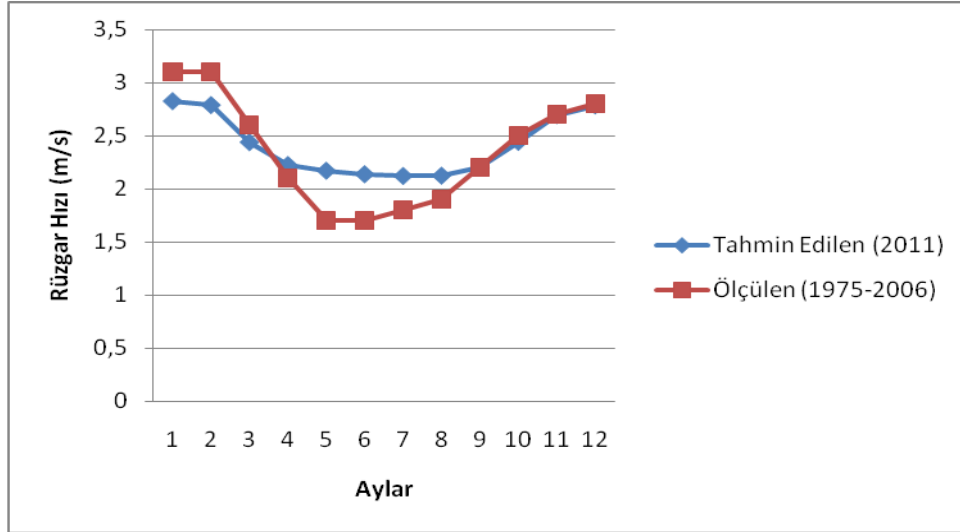
Şekil 5.5. Yapay Sinir Ağı blok diyagramı.

Basınç, sıcaklık ve bağıl nemden oluşan üç giriş katmanlı yapay sinir ağı, iki gizli katman ile modellenip işlemlerini yaptıktan sonra rüzgar hızını tahmin etmiştir. Geri beslemeli bir öğrenme algoritması kullanılarak oluşturulan sinir ağı yapısı, Mersin ve Silifke istasyonlarından alınan meteorolojik bilgiler rehberliğinde eğitilip rastlantısal olarak teste tabi tutulmuştur. Eğitim verileri ve test verileri meteorolojik yılın içinden önce sıralı ardından rastgele seçilmiştir. Yapay sinir ağının öğrenmesi gerçekleştikten sonra eğitim ve test verilerinden ayrı veriler ile uygulama rastlantısal olarak gerçekleştirilmiştir.

Mersin ve Silifke istasyonlarındaki rüzgar hızı değerleri için ölçüm verileri ve yapay sinir ağının elde ettiği tahmin verileri karşılaştırmalı olarak şekil 5.6. ve şekil 5.7’de sunulmuştur.



Şekil 5.6. Mersin istasyonu için tahmin edilen ve ölçülen Rüzgar hızları.



Şekil 5.7. Silifke istasyonu için tahmin edilen ve ölçülen Rüzgar hızları.

Yukarıdaki veriler, 1975-2006 yılları arasındaki verilerin aylık ortalamaları ile elde edilmiş değerlerin, bu değerler ile eğitilen yapay sinir ağı modeline göre 2011 yılı için tahmin değerlerinin karşılaştırmasını içermektedir. Karşılaştırma sonrasında Yapay Sinir Ağı'nın hata değerleri ölçülmüş ve Çizelge 5.1. de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Geliştirilen Yapay Sinir Ağı Modelinin Performansı.

İstasyon	İşlemler		
	<i>MAE</i>	<i>MSE</i>	<i>MPAE</i>
<b>Mersin</b>	0,033	0,008	4,038
<b>Silifke</b>	0,064	0,007	8,694

Ortalama mutlak hata yüzdesi Mersin meteoroloji istasyonu için 4,038% olarak bulundu Silifke meteoroloji istasyonu ve en iyi sonuç için 8,694% olarak bulundu. Bu önerilen sinir ağı tabanlı bir yaklaşımının, rüzgar hızı çıktı tahmininde yeterince doğru olduğu anlamına gelmektedir.

Mersin ve Silifke istasyonları için yapılan tahminlerin yanı sıra Anamur istasyonundan elde edilen (2010–2011) yılları arasındaki ölçüm verilerinin ortalamalarının alınarak değerlendirilmesi ile toplamda üç istasyon için AHP yöntemi ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda belirtilen değerlere en uygun bölge seçilerek rüzgar enerji santrali kurulumu için yer tespit edilmiştir.

### 5.3. BULANIK ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ KULLANILARAK RÜZGAR ENERJİ SANTRAL YERİ SEÇİMİ

Gelişen teknoloji ve büyüyen nüfusa bağlı olarak artan enerji ihtiyacı, bütün ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de yeni enerji kaynakları üzerinde daha fazla düşünülmesini ve hızlı bir şekilde alternatiflerin üretilmesini gerekli hale getirmiştir. Fosil yakıtların bir gün tükeneceği, nükleer enerjinin de halen tartışılan ve olumsuzluklarına net, mantıklı, herkesin şüphelerini giderecek yanıtlar verilemediği düşünülürse yenilenebilir ve çevreyle uyumlu olan güneş, rüzgar, dalga vb. enerjilerin hem dünyamız hem de bizler için çözümler sunacağı görülmektedir.

Ülkemizde bulunan büyük potansiyelinden henüz tam verim alarak kullanamadığımız rüzgar enerjisi bu konuda ön plana çıkan bir başlık olmaktadır. Bu sebeple araştırmalar kurulu olan sınırlı kapasiteyi arttırmanın haricinde kurulu

kapasitenin tam verimle çalışması üzerine de yapılmaktadır. Tam verim de günümüz şartları için gelişmiş teknolojinin yanında iyi incelenen ve hesaplarının, mikro konuşlandırmalarının detaylı ve dikkatlice yapıldığı bir araştırma aşamasıyla sağlanmaktadır.

Tesis yerinin seçilmesinde birçok etmenin inceleniyor olması ve bu etmenlerin genel üzerine olan etkilerinin de hesaba katılması hem verimi arttıracak hem de günümüz koşullarında firmalar için en önemli başlıklardan biri olan maliyetin düşürülerek yatırımın sağlıklı yapılmasını sağlayacaktır. Yatırım öncesi yapılan hesaplamalarda ki %10'luk bir hatanın kurulum ve çalışma esnasında oluşturacağı kaybın %30 oranında olması da bu konunun önemini bir kez daha ön plana çıkarmaktadır (EİE, 2006).

Bu çalışma kapsamında öncelikle, rüzgar enerjisi 3. bölümde ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve rüzgar enerji santrali kurulumu için hangi yerin seçileceğine, sözel ifadeleri göz önünde bulundurarak insani düşünme şeklini yansıtan ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayan Bulanık AHP yöntemi kullanılarak karar verilmiştir. Burada hesaplamalar yapılırken, yorucu aritmetik hesaplamaları kullanan Geleneksel Bulanık AHP yöntemlerinin dezavantajlarının geçerli olmadığı ve hesaplamaların bulanık sayıların kesişimi yöntemiyle yapıldığı "Chang'in Bulanık AHP Algoritması" esas alınmıştır.

### 5.3.1. Kriterler Ve Alt Kriterler İle Alternatiflerin Belirlenmesi Ve Hiyerarşik

#### Yapının Oluşturulması

Daha önce de belirtildiği gibi kriterlerin ve alt kriterlerin belirlenmesinde uzman kişilerden alınan fikirlerin ve bilgilerin yanı sıra Mustafa Çalışkan'ın RES için ön etüt ve kaynak belirleme çalışmalarından da yararlanılmıştır (Yalçın, 2007).

Akdeniz bölgesi için deneysel bir çalışma olmasından dolayı bölgeye özgü kriterler kullanılmıştır. Bu şekilde; potansiyel, teknik ve çevresel etkenler olmak üzere 3 ana kriter belirlenmiştir.

Daha sonra her bir ana kriter için, yine uzmanların bilgi ve tecrübelerinden yararlanılarak alt kriterler oluşturulmuştur. Bu alt kriterler aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır:

**Potansiyel (P):** Bu ana kriter rüzgarın o bölgede ne kadar olduğunu belirleyen alt kriterleri içerir. Bu başlık altında rüzgar hızı, rüzgar yoğunluğu, hakim rüzgar yönü, çevresel engeller ve kapasite faktörü gibi alt kriterler bulunmaktadır. Santralin kurulabilmesi için çevresel engeller harici alt kriterlerin yüksek olması istenir. Potansiyel santral kurulumu için belirleyici bir unsurdur.

- **Rüzgar Hızı (RH):** Rüzgar hızı, EİE tarafından hazırlanan rüzgar enerjisi potansiyel atlasındaki uzun dönem verileri ve tesis yeri alternatiflerini seçtikten sonra en az bir senelik kısa dönem verileri incelenerek belirli istatistik değerlerine ulaşılarak değerlendirilir. 5 m/s değerinin altındaki rüzgar hızı değerleri verimli sayılmamaktadır. Ancak yapılan çalışma deneme niteliğinde olduğundan ve ölçüm verileri yüksekliğinin de düşük olmasından dolayı (zaman zaman 3 metre zaman zaman 5 metrelik yüksekliklere ait ölçümler) ilgili rüzgar hızı değerine çoğu zaman ulaşamamıştır.
- **Rüzgar Yoğunluğu (RY):** Rüzgar yoğunluğu bir bölge için  $m^2$ 'deki üretilebilecek enerji miktarının ifadesidir. Kısaca  $m^2$  başına düşen enerji miktarıdır. ( $W/m^2$ )

**Çevresel Etkenler:** Bu kriterde tesisin seçilecek yere kurulması için dikkat edilecek deprem kuşağı ve ormanlık alan gibi alt kriterleri içinde bulunduran konular incelenir.

- **Deprem Kuşağı (DK):** Teknolojinin gelişmesi ile rüzgardan daha fazla verim almak adına kule yüksekliklerinin giderek artması bu konudaki dayanıklılık ve dayanım değerlerinin de artmasını gerektirmiştir. Deprem kuşağında olan bir yapının temel hesapları bu konu göz önüne alınarak yapıldığından bu başlığın bir alt kriter olarak alınmasına gerek duyulmuştur.



- **Ormanlık Alan (OA):** Ormanlık alan yüksek ağaçların engel statüsüne girmesinden ötürü hem ölçümleri etkilediğinden hem de belirli ormanlık arazilerin koruma altında olmasından ve tesis kurulumuna izin verilmemesinden ötürü önemli bir alt kriter olarak karşımıza çıkmaktadır.

**Teknik Etkenler:** Asker ve sivil radar tesislerine uzaklık, yerleşim birimlerine uzaklık, karayolu ve hava yollarına uzaklık gibi alt kriterlerin incelendiği teknik etkenler, tesislerin kurulum yerinin etraftakileri nasıl etkilediği açısından önem taşımaktadır.

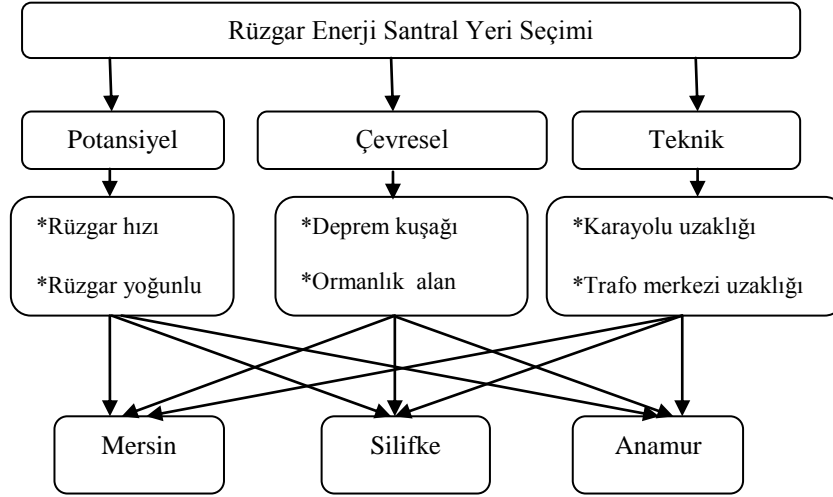
- **Askeri ve Sivil Radar Tesislerine Olan Uzaklık (RTU):** RED sistemlerinin dönen kanatları elektromanyetik iletişim cihazlarında girişime neden olabilir. Rüzgar enerji dönüşüm sistemleri (RED) dönen kanatları radarlar gibi elektromanyetik iletişim cihazlarının kullanımında girişime neden olabilir.
- **Trafo Merkezlerine Uzaklık (TMU):** Trafo merkezine olan uzaklık şebekeye bağlantı açısından yapılacak iletim ve taşıma konularını etkileyeceğinden önemli bir alt kriterdir. İletim ve taşımanın uzun olması kayıplardan ötürü istenmeyen bir durumdur.
- **Sahaya Yakın Karayolu Uzaklığı (SYKU):** Ulaşılamayan bir yere tesis kurmak, kurulum aşamasından işletme ve bakım aşamasına kadar efektif olmayacağından rüzgar enerjisi santrallerine ulaşım önemli bir konudur. Kurulacak sahaya yakın karayolu belirli bir yere kadar ise şirketin bu karayolunu sahaya bağlayan yol için de yatırım yapması gerekebilmektedir.

Yukarıda açıklanan kriterler göz önüne alınarak birbirleriyle karşılaştırılacak olan alternatifler, Akdeniz Bölgesinden seçilen aşağıdaki yerlerdir:

Bölge 1: Mersin

Bölge 2: Silifke

Bölge 3: Anamur

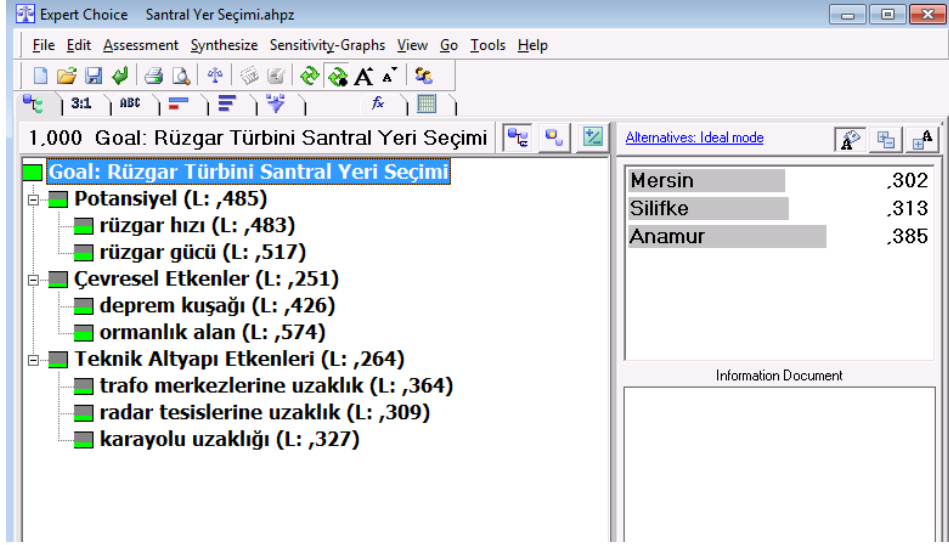


Şekil 5.8. Kriter ve alt kriterlere ait AHP yapısı.

### 5.3.2. Bulanık Ahp Algoritması ve Uygulaması

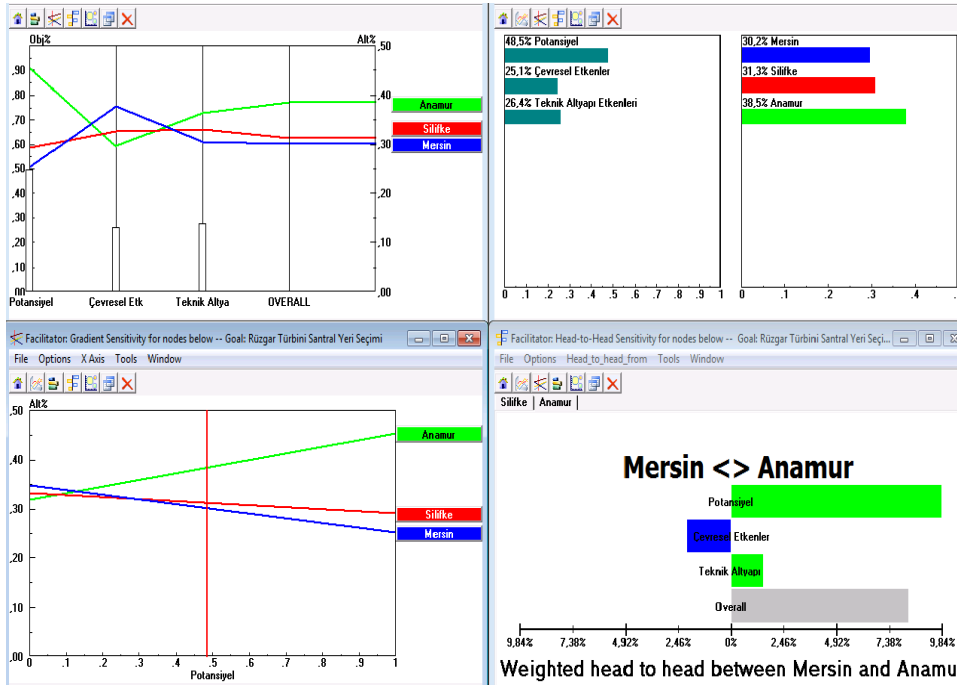
Geleneksel Bulanık AHP yöntemleri yorucu aritmetik hesaplamaları kullanarak operasyonlardaki bulanık değerlerle ilgilenmektedir. Ayrıca, bu yöntemlerin bir diğer dezavantajı da kesin bir sonuca ulaşmak için fazladan durulaştırma işlemine ihtiyaç duyulmasıdır. Chang'in yaklaşımında ise, bulanık sayıların kesişimi yöntemiyle hesaplamalar yapıldığı için, daha önce bahsedilen dezavantajlar geçerli değildir (Çanlı vd., 2007).

Çalışmanın bu kısmında ise uygulama örneğine ilişkin sonuçlar yer almaktadır. Chang'in yaklaşımı ile çözüm yapılırken işlem bütünlüğünü sağlamak ve zamandan tasarruf etmek için bilgisayar programlarından yararlanılmıştır. AHP algoritması kullanarak bilimin ve endüstrinin pek çok alanında yer edinen *expert choice* firmasına ait paket program tercih edilmiştir. Program kullanılarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.9. Expert Choice Programı İle Oluşturulmuş Kriter ve Alt Kriterlerin Normalize Edilmiş Ağırlık Dağılımları.

Yapılan hesaplamalar sonucunda alternatif bölgelere ilişkin grafiksel dağılım ve gösterimler şekil 5.10.'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Alternatif Bölgelerin Karşılaştırmalı Grafikleri.

Yapılan çalışmaya göre belirlenen üç alternatif içinde en ideal sonucu Anamur bölgesi vermiştir. Silifke bölgesi de belirlenen kriterler göz önünde tutulduğunda ikinci en ideal bölge olarak görünmektedir. Alternatifler içerisinde en kötü sonuç ise Mersin bölgesine aittir. Mersin bölgesi belirlenen kriterleri gerçeklerken performans olarak ancak üç ve sonuncu olabilmektedir. Çizelge 5.2’de yapılan çalışmaya ilişkin rüzgar hızı ve rüzgar gücü değerleri sıralanmıştır.

Çizelge 5.2. Alternatif Bölgelerin Rüzgar Hızı ve Rüzgar Gücü Değerleri.

<b>BÖLGE</b>	<b>Rüzgar Hızı (m/s)</b>	<b>Rüzgar Gücü (w/m<sup>2</sup>)</b>
Mersin	3.45	25,15
Silifke	3.52	26,71
Anamur	4.17	44,41

Çizelge 5.2’ye göre yıllık en yüksek rüzgar gücü değeri 44,41 (W/m<sup>2</sup>) değeri ile Anamur bölgesine aittir. Silifke bölgesi ikinci olurken Mersin bölgesi alternatifler arasında sonuncu olarak göz ardı edilmiştir.

Bu sonuçlar, olası bir rüzgar enerji santrali kurulumu için Akdeniz bölgesinin belirli kesimlerinin yatırımcılar için bir alternatif olabileceğini ortaya çıkartmaktadır. Bölgenin farklı topografik kesimlerindeki potansiyelleri ve enerji eldesi için kullanılacak türbinin kapasitif faktörünün de iyileştirilmesi ile bölgemizde, özellikle Anamur ve havadisinde oldukça verimli rüzgar santrallerinin kurulabileceği tahmin edilmektedir. Rüzgar Türbininin kapasitif faktörü; türbindeki kanat, dişli yada kule tasarımlarındaki değişiklikler ile bölgelere göre iyileştirilebilen 0,25 – 0.40 arasında değişen önemli bir parametredir. Bu parametrenin değişmesi türbin tasarımının değişmesi ile sağlanabilmektedir.

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma, günümüzde hızla artan enerji tüketimi ve hızla tükenen enerji kaynaklarına alternatif olabilecek rüzgar enerjisi ve bu konudaki verimliliği arttırmak için rüzgar enerji santralleri kurulumunda yer seçimi konusunda yapılmıştır. Her çeşit türbin tasarımında kullanılabileceğinden, türbin tasarımındaki farklılıklar (kapasitif faktörün değişmesi) olumsuz bir sonuç yaratmayacaktır.

Bir rüzgar santralının ekonomik ve teknik açılardan başarıya ulaşmasının temelinde sağlıklı verilere dayalı olarak hesaplanan enerji üretim miktarları gelmektedir. Bir alandaki rüzgar enerji potansiyelini maksimum düzeyde değerlendirmek için kısa zamanlı veriler yerine detaylı fizibilite çalışmaları yapılmış rüzgar enerjisi santral projeleri üretilmelidir. Bu durum hem yatırımcının önünü görmesine hem de ülke kaynaklarından maksimum düzeyde yararlanılmasına yardımcı olacaktır. Dünya ülkeleri ve ülkemiz göz önüne alındığında; ülkemizin bu enerji türünde olan büyük kapasitesine rağmen bu kapasiteyi üretime tam verimle dökemediği görülmektedir. Bu konuda yapılacak çalışmalar hem ülkemizin kaynaklarını maksimum düzeyde kullanma imkanı hem de yeni iş alanları sağlayacaktır.

Özellikle son günlerde etkisini bir hayli hissettirmeye başlayan küresel ısınma faktörünün de devreye girmesi ile temiz enerji olarak bilinen rüzgar enerjisi bir kez daha gündeme gelmiş ve tüm dünya ülkelerinde bu konuya yönelim artmıştır. Şüphesiz biz endüstri mühendislerine bu konudaki verimliliği arttırmak ve maksimum çıktıyı sağlayabilmek adına iyi hazırlanmış fizibilite etütleri ve sağlıklı veriler ile minimum yanılma payına ulaşma görevi düşmektedir. Hesaplamalardaki %10'luk bir değişimin sonuçlara %30 oranında yansıdığı daha önceden de belirtilmiştir. Böyle bir durum için tüm kriterlerin değerlendirilmesi ve karar verici sistemin çok iyi çalışması gerekmektedir.

Bu çalışmada, çok kriterli karar verme teknikleri arasında AHP yöntemi, karar verme problemlerinde kullanılan pek çok diğer yöntemle göre gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği için en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Konuyla ilgili uzman kişilerin görüş ve değerlendirmelerine dayanan bu yöntemde, en doğru sonuca varmak için, insani düşünme biçiminden kaynaklanan belirsizliği de hesaba katmak

gerektiğinden Bulanık AHP yöntemi tercih edilmiştir. Rüzgar enerjisi santral yeri seçimi problemi için ana ve alt kriterler belirlenmiş, istenen hiyerarşik yapı oluşturulmuş ve bulanık AHP çalışması sonucunda Mersin – 0.302, Silifke - 0.313 ve Anamur – 0.385 ağırlıkları elde edilmiş ve en iyi alternatif olarak Anamur tercih edilmiştir. Ayrıca Akdeniz bölgesinde, seçilen bölgelerin rüzgar enerji potansiyelini tahmin etmek için yapay sinir ağı yöntemi uygulanmış olup, en yüksek potansiyele sahip bölge Anamur bölgesi olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde ana kriterlerin tek tek değiştirilmesinin haricinde ikili ve üçlü kombinasyonlar halinde değiştiği bir duyarlılık analizi çalışması yapılması seçim sonucunu değiştirebilecek durumlar sağlanabilir. Ancak bu durumda tutarlılığın bozulmamasını sağlamak bir hayli güç olacaktır. Bu çalışmada uygulanan yöntemler karmaşık gibi görünse de, oldukça pratik hesaplamalarla sonuca ulaşılmasını ve pek çok faktörü göz önünde bulundurarak gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

## KAYNAKLAR

- Akgün, N., (a), “Rüzgar Değişikliklerinin Tarifi - Weibull Dağılımı” Meteoroloji Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara (2004).
- Akgün, N., (b), “Rüzgar Enerjisi ve Gelişimi” Meteoroloji Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara (2004).
- Akgün, N., (c), “Rüzgar Türbin Bileşenleri” Meteoroloji Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara (2004).
- Akyüz O., “Yenilenebilir Enerjilerin Maliyet Açısından Karşılaştırılması” Asmakinsan Ltd.Şti., Ankara – Türkiye (Mayıs 2000).
- Atik K., Deniz E., Yıldız E., “Meteorolojik Verilerin Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi”, KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, 10: 148-152 (2007).
- AWEA, “Wind Energy Views on the Environment; Clean and Green”, Wind Energy Fact Sheet American Wind Energy Association (2000).
- Bilgili M., Şahin B., Şimşek E., “Türkiye’nin Güney, Güneybatı ve Batı Bölgelerindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyeli”, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 30: 1-12 (2010).
- Bozok, A., “Enerji Santralleri” Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi, Bitirme Tezi, İstanbul s.3 (1999).
- C. Flavin, A Force to be Reckored With, Renewable Energy World, p.36 (1999).
- Çalışkan, M., “Rüzgar Enerji Santralleri İçin Ön Etüt Ve Kaynak Belirleme Çalışmaları” EİE Yayınları, Ankara (2006).
- Çanlı, H., Kandakoğlu, A., “Hava Gücü Mukayesesi İçin Bulanık AHP Modeli”, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi (Ocak, 2007) Cilt 3 Sayı 1, 71–82 (2007).
- Çelik N.A., “A Techno-economic analysis of wind energy in southern Turkey”, I.J. Green Energy, 4:233-247 (2007).
- E.İ.E., “Rüzgar Enerjisi” Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Ankara (2006).
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK), “Rüzgar Santrali Lisansları”, [www.epdk.gov.tr/lisans/elektrik/yek/yek.html](http://www.epdk.gov.tr/lisans/elektrik/yek/yek.html) (07.04.2011).
- Enerji İşleri Etüd İdaresi (EİE), “Yenilenebilir Enerji”, [www.eie.gov.tr](http://www.eie.gov.tr) (07.04.2011).

- Erensal, Y.C., Öncan, T., Demircan, M.L., “Determining key capabilities in technology management using fuzzy analytic hierarchy process: A case study of Turkey”, *Information Sciences* (2005).
- Ewea, 2020 Yılına Kadar Dünya Elektriğinin %12’sinin Rüzgar Gücünden Elde Edilmesi İçin Bir Plan, “Rüzgar Gücü 12”, [www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/WF12/RzgarGc12.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WF12/RzgarGc12.pdf) (09.03.2011).
- Gourieres, D.L., “Wind Power Plants” –1.st edition (1982).
- Grassi G., Vecchio P., “Wind energy prediction using a two-hidden layer neural network”, *Elsevier*, 15: 2262-2266 (2010).
- Jamieson, P., Quarton, D., “Technology Development for Offshore Wind”, “Renewable Energy World”, (May,1999), p.30 (1999).
- Kandakoğlu A., “Günümüz Pazar Koşullarında İşletmelerin Hedef Önceliklendirmesi İçin Algoritma Önerisi ve Uygulaması” ,Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 75s., (2006).
- Kalogirou S.A., “Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5:373–401 (2001).
- Kaya İ., Kahraman C., “Fuzzy process capability analyses: An application to teaching processes”, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 19:259-272 (2008).
- Klir, J.G., Juan, B., “Fuzzy sets and Fuzzy Logic Theory and Applications”, Prentice-Hall,Inc., Upper Saddle River, NJ, USA (1994).
- Kuruüzüm, A., Atsan, N., “Analitik Hiyerarşi Yöntemi ve İşletmecilik Alanındaki Uygulamaları”, *Akdeniz İ.İ.B.F. Dergisi*(1), 83-105 (2001).
- Monfared M., Rastegar H., Kojabadi H., “A new strategy for wind speed forecasting using artificial intelligent methods”, *Renewable Energy*, 34(3): 845–8 (2009).
- Lin C.T., Lee C.S.G., "Neural fuzzy systems", PTR Prentice Hall, (1996).
- Özdemir, M.S., “Bir işletmede analitik hiyerarşi süreci kullanılarak performans değerlendirme sistemi tasarımı.”, *Endüstri Mühendisliği*, Nisan-Mayıs-Haziran 2002-Sayı 2 (2002).



- Özerdem B., Özer S., Tosun M., “Feasibility study of wind farms: A case study for Izmir, Turkey”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94:725-743 (2004).
- Özgener L., “Investigation of wind energy potential of Muradiye in Manisa, Turkey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 3232–3236 (2010).
- Öztopal A., Kahya C., Sahin A.D., “Yapay sinir ağıları ile rüzgar şiddeti modellemesi (Wind speed modelling with artificial neural network)”, III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyum, İstanbul, Turkey 415 – 422 (2000).
- Platin Dergisi “Polat Enerji Rüzgar Türbini Üretecek”, s.82 (Nisan, 2007).
- Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), “Türkiyede Rüzgar Potansiyeli”, <http://repa.eie.gov.tr/> (07.04.2011).
- Sağiroğlu Ş., Beşdok E., Erler M., “Mühendislikte yapay zeka uygulamaları-1: Yapay sinir ağıları”, *Ufuk Kitabevi*, (2003).
- Şen, Ç., “Gökçeada’nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi İle Karşılanması”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, 78s., (2003).
- Şen, Z., “Mühendislikte Bulanık (Fuzzy) Mantık ile Modelleme Prensipleri”, *Su Vakfı Yayınları*, İstanbul (2004).
- The avea blog, “into the wind”, [www.avea.org](http://www.avea.org) (04.03.2011).
- Tümerdem O., “Rüzgar Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye’nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul (2002).
- Unay, L.B., “A Pre-Feasibility Study Methodology For Wind Power Use On College Campuses”, *Colorado State University – Pueblo*, (2006).
- Üçgül İ., R.Selba R., Kızıllıkan O., Şenol R., Karakoç H., “Elektrik Enerjisi Üretiminde Güneş Kulesi Sisteminin Yapay Sinir Ağlarıyla Modellenmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi*, (2004).
- Ültanır, M.Ö., “Denizde Kurulan Rüzgar Santralleri”, *Uzman Enerji*, s.24 (1998).
- Wordpress, “Ekoloji”, [www.wordpress.com/tag/ekoloji/](http://www.wordpress.com/tag/ekoloji/) (13.05.2011).
- Yalçın, U., “Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi Kullanılarak Rüzgar Enerjisi Santral Yeri Seçimi”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 126s., (2007).

Yıldız Teknik Üniversitesi 9. Kalite Günleri Seminerleri 7. Oturum – Erol Demirer (2002).

Yılmaz M., “Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Maliyet Analizi”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 81s., (2000).

Yurtoğlu H., “Yapay Sinir Ağları Metodolojisi ile Öngörü Modellemesi: Bazı Makroekonomik Değişkenlerin Türkiye Örneği”, Ekonomik Modeller ve Stratejik Araştırmalar Müdürlüğü, Şubat (2005).

Yücel, B., “Avrupa’da Yenilenebilir Enerjilerin Bilançosu ve 2010 Hedefi”, Kaynak Elektrik, Sayı 141 s.31 (2000).

## ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ

**Adı Soyadı:** Tunca KARAMANLIOĞLU

**Doğum Tarihi:** 23/10/1985

**Öğrenim Durumu:**

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Bilgisayar (Donanım)	Nazilli A.T.L	2000-2004
Lisans	Tasarım ve Konst. Öğrt.	Mersin Üniversitesi	2005-2009
Yüksek Lisans	Makine Eğitimi A.B.D.	Mersin Üniversitesi	2009-2011

**(Varsa) Görevler:**

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Öğretim Görevlisi	Mersin Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O.	2010-2011

### ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. The Application of Artificial Neural Networks in the estimation of Wind Speed: A case study, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS 2011), 2011, Elazığ, Turkey.
2. A Study on Potential and Utilization of Renewable Energy Sources in Turkey, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS 2011), 2011, Elazığ, Turkey.
3. Artificial Intelligent Applications for the Forecasting of Annual Wind Energy Output, ISCSE2011, 2nd International Symposium on Computing in Science and Engineering Kusadasi,Aydin/TÜRKİYE, 1-4 june 2011.
4. Estimation of Wind Energy Potential Based on Frequency Distributions in the Mediterranean Sea Region of Turkey, ISCSE2011, 2nd International Symposium on Computing in Science and Engineering Kusadasi,Aydin/TÜRKİYE, 1-4 june 2011.