

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

RÜZGAR HIZI TAHMİN YÖNTEMLERİ - ÖRNEK BİR UYGULAMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serkan ŞENKAL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**HAZİRAN 2014
SAMSUN**



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RÜZGAR HIZI TAHMİN YÖNTEMLERİ - ÖRNEK BİR UYGULAMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Serkan ŞENKAL
09210321**

Tezin Savunma Tarihi : 18 Temmuz 2014

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Serkan ŞENKAL Tarafından Hazırlanan

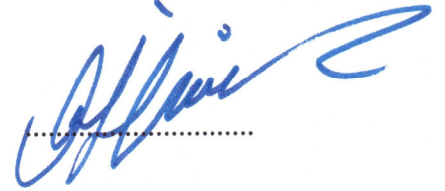
RÜZGAR HIZI TAHMİN YÖNTEMLERİ - ÖRNEK BİR UYGULAMA

başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından 18/07/2014 tarihinde yapılan sınav ile
YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Serap KARAGÖL
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Gökhan KAYHAN
Ondokuz Mayıs Üniversitesi



...../...../2014

Prof. Dr. Hüseyin DEMİR
Enstitü Müdürü

Sevgili eşim Gözde'ye ve biricik kızım Masal'a,

ÖNSÖZ

Engin bilgi ve tecrübeleriyle bu tez çalışmam süresince bana ışık tutan, özveri ve desteğini esirgemeyen, akademik çalışma azmi ve kararlılığı veren, kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum değerli hocam Sayın Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL'e ve değerli mesai arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Cem EMEKSİZ'e teşekkür eder, saygılarımı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2014

Serkan ŞENKAL
Elektronik ve Haberleşme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
KISALTMALAR	xv
RÜZGAR HIZI TAHMİN YÖNTEMLERİ - ÖRNEK BİR UYGULAMA.....	xvii
ÖZET.....	xvii
WIND SPEED FORCASTING METHODS – A SAMPLE APPLICATION...	xix
ABSTRACT	xix
1. GİRİŞ	1
2. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE ENERJİ DURUMU	3
2.1 Dünyada ve Türkiye’de Birincil Enerji Durumu	3
2.2 Dünyada ve Türkiye’de Yenilenemez Enerji Durumu	5
2.3 Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Durumu	8
3. GENEL BİLGİLER	17
3.1 Rüzgar Enerjisi	17
3.2 Rüzgar Enerjisi İle İlgili Temel Kavramlar.....	20
3.2.1 Gradyan kuvveti	21
3.2.2 Coriolis kuvveti	21
3.2.3 Merkezkaç kuvveti.....	21
3.2.4 Sürtünme kuvveti.....	22
3.2.5 Rüzgar türleri	22
3.2.6 Rüzgar gücü	23
3.3 Rüzgar Türbinlerinde Kanat Hız Oranı	26
3.4 Yüksekliğe Bağlı Rüzgar Hızı Değişimi	26
4. RÜZGAR HIZI TAHMİNİNİN ÖNEMİ.....	29
4.1 Rüzgar Hızı/Gücü Tahminlerinin Zaman Bazında Sınıflandırılması.....	30
5. RÜZGAR GÜCÜ TAHMİN METOTLARINA GENEL BİR BAKIŞ	31
5.1 Devamlılık Metodu.....	31
5.2 Fiziksel Yaklaşım	31
5.2.1 Mesoscale model 5 (MM5).....	31
5.2.2 Zephyr / Prediktor	33
5.2.3 Rüzgar gücü tahmin aracı	33
5.2.4 Previento	34
5.2.5 eWind	34
5.2.6 Sipreolico.....	35
5.2.7 Anemos	36
5.2.8 AWPPS modeli	37
5.3 İstatistiksel Yaklaşım	37
5.3.1 Yapay sinir ağları	37
5.3.1.1 Yapay sinir ağı genel yapısı	37
5.3.1.2 İleri beslemeli ağlar.....	39

5.3.1.3 Çok katmanlı algılayıcılar	40
5.3.1.4 Tekrarlamalı sinir ağları	40
5.3.1.5 Adaline ağlar	41
5.3.1.6 Radyal tabanlı sinir ağları.....	42
5.3.2 Zaman serisi modelleri.....	42
5.3.2.1 Otoregresif (AR) süreç	43
5.3.2.2 Hareketli ortalama (MA) süreci	43
5.3.2.3 ARMA ve ARIMA süreci	43
5.3.2.4 Gri tahminleyici.....	44
5.4 Hibrit ve Yeni Yapılar	46
5.4.1 ANFIS modeli	46
5.4.2 Bulanık mantık	49
6. MATERİYAL VE YÖNTEM	53
6.1 Dalgacık sinir ağları	53
6.1.1 Tek boyutlu dalgacık sinir ağı	54
6.1.1.1 Dalgacık ağı.....	54
6.1.1.2 Wavenet.....	55
6.1.2 Çok boyutlu dalgacık sinir ağı	56
6.2 Sinir Ağı Mimarisinin Belirlenmesi	57
6.3 Veri Setinin Hazırlanması	58
6.3.1 Normalizasyon	58
6.4 Dalgacık Sinir Ağı Aktivasyon Fonksiyonlarının Belirlenmesi.....	59
6.5 Sinir Ağlarının Eğitilmesi.....	60
6.6 Dalgacık Sinir Ağı Uygulaması	61
6.7 Dalgacık Sinir Ağı Başarımı	63
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR.....	73
EKLER.....	79
EK A	80
EK B	81
EK C	82
EK D	83
EK E	84
ÖZGEÇMİŞ	85

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1.	Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması.....	2
Çizelge 2.1.	Fosil Kaynaklı Yakıtların Dünyadaki Durumu	6
Çizelge 2.2.	Nükleer Enerjinin Dünyadaki Durumu	8
Çizelge 2.3.	Ülkelerin 2012 Yılı Yenilenebilir Elektrik Güç Kapasitesi (GW)	9
Çizelge 2.4.	Dünyada 2011 Yılı Jeotermal Enerji Kurulu Gücü	10
Çizelge 2.5.	Ülkelerin 2011 Yılı Biyoyakıt Üretim Miktarları (milyar litre)	11
Çizelge 2.6.	Türkiye'nin Güneş Enerji Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı .	13
Çizelge 2.7.	Ülkelerin Rüzgâr Türbin Güç Kapasitelerindeki Değişim	14
Çizelge 3.1.	Genel olarak rüzgarların sınıflandırılması.....	22
Çizelge 3.2.	Hellmann katsayısının değişimi	27
Çizelge 4.1.	Rüzgar tahminlerinin zaman bazında sınıflandırılması ve uygulamaları	30
Çizelge 6.1.	Dalgacık Aktivasyon Fonksiyonları	64
Çizelge 6.2.	İlk altı aylık süreçte her bir aktivasyon fonksiyon için hesaplanan RMSE ve MSE değerleri.	65
Çizelge 6.3.	İkinci altı aylık süreçte her bir aktivasyon fonksiyon için hesaplanan RMSE ve MSE değerleri.	66
Çizelge 6.4.	Pilot olarak seçilen Ocak ayı için kısa, orta ve uzun vadeli dönemler için hesaplanan RMSE ve MSE değerleri.	67

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Dünyada 2012 Yılı Birincil Enerji Kullanımı	3
Şekil 2.2.	Türkiye’de Birincil Enerji Üretiminin Kaynaklar Bazındaki Dağılımı	4
Şekil 2.3.	Türkiye’de Enerji Tüketiminin Kaynaklar Bazında Dağılımı	4
Şekil 2.4.	Türkiye’de Yerli Kaynaklı Enerji Üretimi ve Toplam Enerji Tüketimi	5
Şekil 2.5.	Türkiye Rüzgâr Enerjisi Kurulu Gücünün İllere Göre Dağılımı.....	16
Şekil 3.1.	Rüzgarın oluşumu	17
Şekil 3.2.	Hadley sirkülasyonu	18
Şekil 3.3.	Türkiye rüzgar haritası	19
Şekil 3.4.	Betz kanunu.....	24
Şekil 5.1.	Yapay sinir hücresi.....	38
Şekil 5.2.	İleri beslemeli ağ için blok diyagram.....	39
Şekil 5.3.	Çok katmanlı algılayıcı tipi sinir ağı yapısı	40
Şekil 5.4.	Elman tipi tekrarlamalı sinir ağı modelinin yapısı	40
Şekil 5.5.	Adaline sinir ağı modelinin yapısı	41
Şekil 5.6.	Radyal tabanlı fonksiyon ağı yapısı	42
Şekil 5.7.	İki girişli, bir çıkışlı ve 2 kurallı Sugeno tipi bir ANFIS yapısı.....	47
Şekil 5.8.	Gauss eğrisi tipi üyelik fonksiyonu ve parametre tanımları.....	48
Şekil 6.1.	Dalgacık sinir ağı yapısı.....	53
Şekil 6.2.	Dalgacık nöronu	54
Şekil 6.3.	Dalgacık sinir ağı	55
Şekil 6.4.	Çok boyutlu dalgacık aktivasyon fonksiyonlu dalgacık nöronu	56
Şekil 6.5.	Dalgacık sinir ağı program kodları.....	61
Şekil 6.5.	(devam) Dalgacık sinir ağı program kodları.....	62

KISALTMALAR

SHT	: Sayısal Hava Tahmini
YSA	: Yapay Sinir Ağı
DSA	: Dalgacık sinir Ağı
RMSE	: Root Mean Square Error
MSE	: Mean Squared Error
NWP	: Numerical Weather Prediction
ANN	: Artificial Neural Network
WNN	: Wavelet Neural Network
LPG	: Liquefied Petroleum Gas
Mtep	: Milyon ton eşdeğer petrol
ETKP	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
EPDK	: Enerji Piyasası Denetleme Kurulu
WWEA	: World Wind Energy Association
WASP	: Wind Atlas Analysis and Application Program
MM5	: Mesoscale Model 5
UTC	: Coordinated Universal Time
HIRLAM	: High Resolution Limited Area Model
WPPT	: Wind Power Prediction Tool
SCE	: Southern California Edison Corporation
FTP	: File Transfer Protocol
RTFA	: Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağı
Adaline	: Adaptive Linear Neuron
Madaline	: Multilayer Adaptive Linear Neuron
XOR	: Exclusive OR
AR	: Autoregressive
MA	: Moving Average
ARMA	: Autoregressive moving averages
ARIMA	: Autoregressive Integrated Moving Average
ARMAX	: Autoregressive moving average model with exogenous inputs
ARX	: Autoregressive moving average model with exogenous inputs
BÜİ	: Birikim Üretme İşlevi
TBÜİ	: Ters Birikim Üretme İşlevi
GM	: Grey Model
ANFIS	: Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
SSM/I	: Special Sensor Microwave Imager

RÜZGAR HIZI TAHMİN YÖNTEMLERİ - ÖRNEK BİR UYGULAMA

ÖZET

Son yıllarda, elektrik enerji şebekelerine rüzgar enerjisi üretimini entegre etmenin önemi hızla artmaktadır. Elektrik şebekesi içine rüzgar enerjisini entegre etmenin en büyük zorluğu, rüzgar enerjisinin değişkenliği ve süreksizliğidir. Bu durumla başa çıkmak için en iyi yaklaşım, rüzgar enerjisi üretiminin gelecekteki değerlerini tahmin etmektir. Yüksek doğrulukları ile rüzgar hızı tahmin yöntemleri bu sorunları en aza indirmek için kullanılabilecek etkili bir araçtır. Bu sebeple, rüzgar enerjisi veya rüzgar hızı tahmini için birkaç farklı yöntem literatürde yerini almıştır. Bu çalışmada sayısal hava tahmini (SHT), istatistiksel yaklaşımlar, yapay sinir ağları (YSA) ve farklı zaman ölçeğindeki hibrit tekniklere dayalı rüzgar gücü ve hızı ile ilgili en önemli tahmin teknikleri hakkında bilgi verilmeye çalışılacaktır.

Ayrıca, bu çalışma, yapay sinir ağı (YSA) ve dalgacık sinir ağı (DSA) kullanılarak çok kısa süreli rüzgar hızı tahminini ve bu ağların başarımlarının karşılaştırmasını sunmaktadır. Veri, bir yıllık bir süre için on dakikalık çözünürlükte Ondokuz Mayıs Üniversitesi'nde bulunan bir hava istasyonundan toplanmıştır. Rüzgar hızı tahminler önümüzdeki 10 dakika için 24 saatlik bir süre içinde sunulmaktadır. YSA ve DSA için aynı topoloji kullanılmasına rağmen, DSA için önerilen tahmin sisteminin başarımları, YSA'ya göre daha yüksektir. Kök Hata Kareler Ortalaması (RMSE) ve Ortalama Karesel Hata (MSE) başarımlarını etmen olarak seçilmiştir. Ve ayrıca, YSA ve DSA'nın aynı formları kısa vadeli, orta vadeli ve uzun vadeli rüzgar hızı tahminleri için de test edilmiştir. Bu dönemler için de ağ başarımları için aynı etmenler seçilmiştir.

Elde edilecek tahminler doğrultusunda, rüzgar enerjisi sağlayan sistemlerin, değişen atmosferik şartlara doğru ve hızlı uyumluğunun sağlanması hedeflenmektedir.

Anahtar Sözcükler: Dalgacık sinir ağı, yapay sinir ağları, rüzgar hızı tahmini.

WIND SPEED FORECASTING METHODS – A SAMPLE APPLICATION

ABSTRACT

In recent years, the importance of integrating the production of wind energy into electrical energy networks has been increasing rapidly. The biggest challenge to integrate wind energy into the power grid wind power is variability and discontinuity. To deal with this situation, the best approach is to predict future values of wind power production. Wind speed estimation methods with high accuracy are an effective tool that can be used to minimize these problems. Thus, several wind power or wind speed forecasting methods have been reported in the literature over the past few years. This study provides insight on the foremost forecasting techniques, associated with wind power and speed, based on numeric weather prediction (NWP), statistical approaches, artificial neural network (ANN) and hybrid techniques over different time-scales.

Furthermore, this study presents a very short- term wind speed prediction using artificial neural network (ANN) and wavelet neural network (WNN) and compares the performance of these networks. Data are collected from a weather station located in Ondokuz Mayıs University in ten minute resolution for a period of one year. Wind speed predictions are presented within a period of 24-hours for 10 minute ahead. Although ANN and WNN use the same topology, the performance of the proposed prediction system based on WNN has higher than that of ANN. The root mean square error (RMSE) and the mean squared error (MSE) values have been selected as performance criteria. And also, the same forms of ANN and WNN tested for short-term, medium-term and long-term wind speed predictions. For this terms, the same criteria selected for network performance.

According to forecasts will be achieved, provides wind energy systems, accurate and rapid adaptation to changing climatic conditions are be attained.

Key Words: Wavelet neural network, artificial neural network, wind speed forecasting.

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan ülkelerdeki enerjiye olan talebin hızlı artışı, nüfus artışı ve sanayileşmede enerjiye olan talep ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Enerji, zorunlu bir üretim faktörü olup bir ülkenin kalkınma potansiyelini yansıtmakta olan en temel göstergelerden biridir. Enerji tüketimiyle sosyal kalkınma arasında doğrusal bir ilişki olup, ekonomik gelişme ve refah seviyesinin yükselişiyle enerji tüketiminin de arttığı görülmektedir [1-3].

Günlük yaşamımızın vazgeçilmez bir unsuru olan enerji; kimyasal, nükleer, mekanik (potansiyel ve kinetik), termal (ısı), jeotermal, hidrolik, güneş, rüzgar, elektrik enerjisi gibi değişik şekillerde hayatımızda yer bulmakta ve uygun dönüşüm yöntemleriyle birbirine dönüştürülebilmektedir. Ekonomik anlamda değişik yöntemlerle enerji elde edilen kaynaklar, enerji kaynakları olarak isimlendirilmekte ve değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır. Kullanışlarına göre enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak ikiye ayrılırken; dönüştürülebilir olmalarına göre enerji kaynakları birincil ve ikincil enerji kaynakları şeklinde incelenmektedir (Şekil 1.1). Kısa bir gelecekte tükenileceği öngörülen kaynaklar yenilenemez enerji kaynakları olarak isimlendirilmektedir. Yenilenemez enerji kaynakları, fosil kaynaklılar ve çekirdek kaynaklılar olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise; sürekli devam eden doğal süreçlerdeki var olan enerji akışından elde edilen, oldukça uzun sayılabilecek bir gelecekte tükenmeden kalabilecek, kendisini yenileyebilen kaynakları ifade etmektedir [1,4].

Enerjinin herhangi bir değişim ya da dönüşüme uğramamış şekline birincil (primer) enerji denilmektedir. Birincil enerji kaynakları; petrol, kömür, doğal gaz, nükleer, hidrolik, biokütle, dalga-gelgit, güneş ve rüzgardır. Birincil enerjinin dönüştürülmesi sonucu elde edilen enerji de ikincil enerji şeklinde tanımlanmaktadır. Elektrik, benzin, mazot, motorin, kok kömürü, ikincil kömür, petrokok, hava gazı, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) bu tip enerji kaynaklarındandır [1,4].

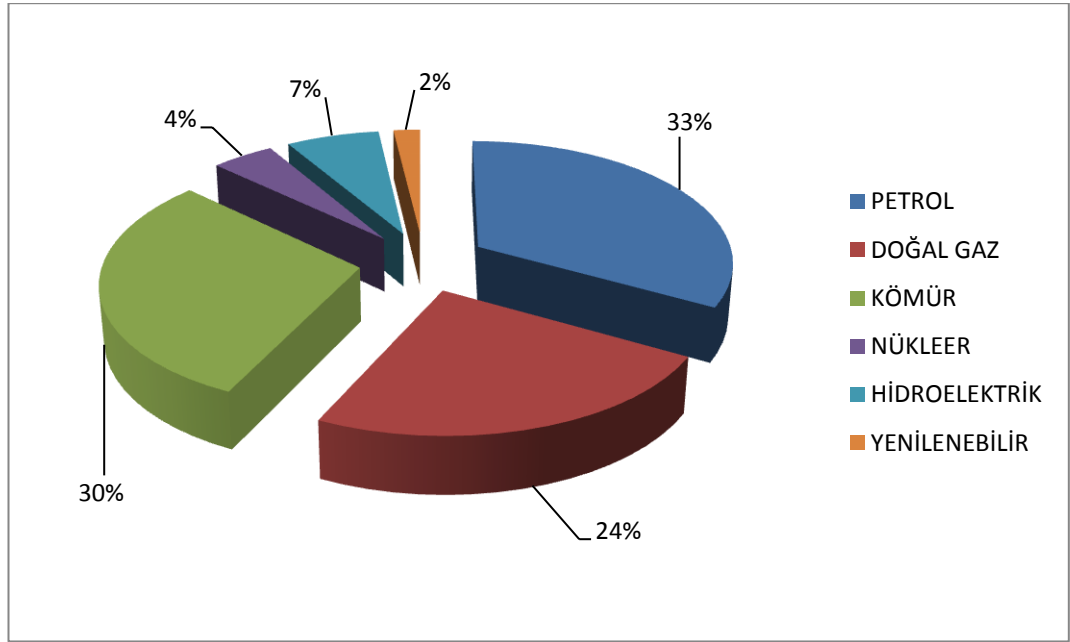
Çizelge 1.1. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması.

ENERJİ KAYNAKLARI			
KULLANIMINA GÖRE		DÖNÜŞTÜRÜLEBİLİRLİKLERİNE GÖRE	
Yenilenemez (Tükenir)	a) Fosil Kaynaklı	Birincil (Primer)	Kömür
	Kömür		Petrol
	Petrol		Doğal gaz
	Doğal gaz		Nükleer
	b) Çekirdek Kaynaklı		Biyokütle
Uranyum	Hidrolik		
Toryum	Güneş		
Yenilenebilir (Tükenmez)	Hidrolik	İkincil (Sekonder)	Rüzgar
	Güneş		Dalga, Gel-git
	Biyokütle		Elektrik, Benzin, Motorin
	Rüzgar		İkincil Kömür
	Jeotermal		Kok, Petrokok
	Dalga, Gel-git		Hava gazı
Hidrojen	Sıkıştırılmış Petrol Gazı (LPG)		

2. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE ENERJİ DURUMU

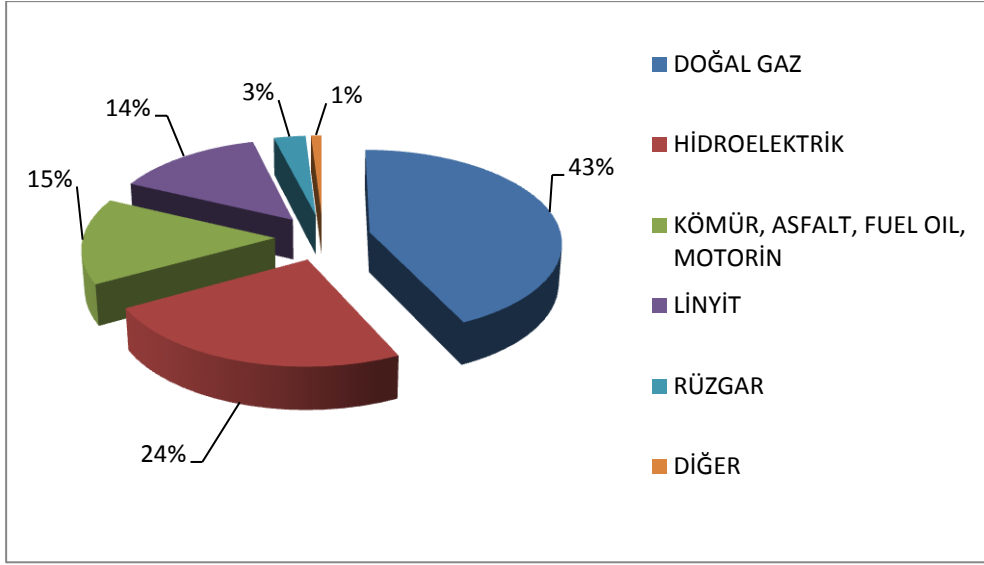
2.1 Dünyada ve Türkiye’de Birincil Enerji Durumu

Dünyada kullanılmakta olan enerjinin çoğu birincil enerji kaynaklarından elde edilmektedir. 2012 yılı verilerine göre dünyada birincil enerji kullanım miktarı 12476,6 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olarak gerçekleşmiştir. Şekil 2.1’de birincil enerji kullanımında en büyük paya sahip olan kaynakların sırasıyla; petrol (%33,1), kömür (%30,3) ve doğal gaz (%23,7) olduğu görülebilmektedir. Burada diğer yenilenebilir enerji kaynakları olarak bahsedilen; rüzgar, güneş, biyoyakıt ve jeotermal enerji kaynaklarıdır [5].



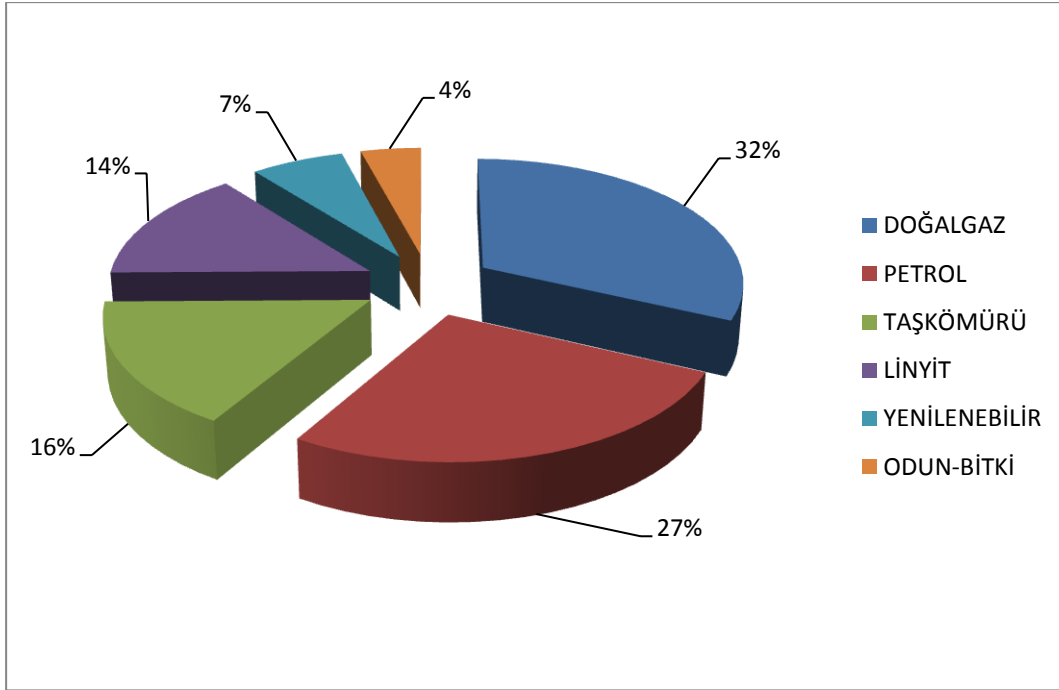
Şekil 2.1. Dünyada 2012 Yılı Birincil Enerji Kullanımı [5].

Dünyada 2012 yılı birincil enerjiden elektrik enerjisi üretimi 22504,3 TWh olarak gerçekleşmiştir. 2012 yılı itibarıyla Türkiye birincil enerji üretimi 239,101 TWh olarak gerçekleşmiştir. Aynı yıl birincil enerji üretiminin kaynaklar bazındaki dağılımı sırasıyla; doğalgaz (%43), hidroelektrik (%24), kömür, asfalt, fuel oil, motorin (%15), linyit (%14), rüzgar (%3) ve diğer kaynaklar (%1) şeklindedir (Şekil 2.2) [6].



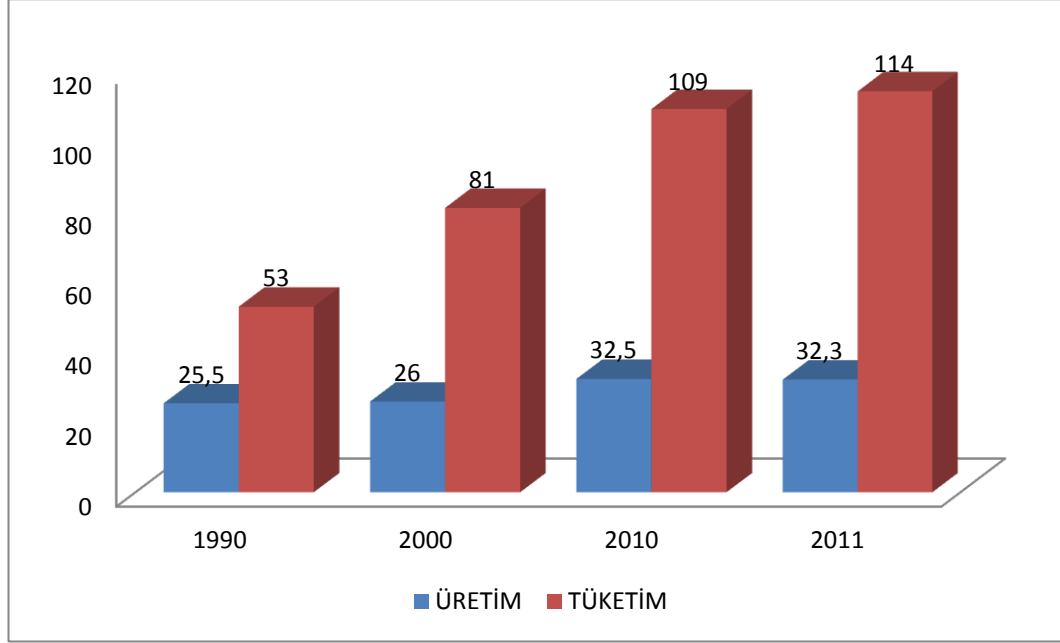
Şekil 2.2. Türkiye’de Birincil Enerji Üretiminin Kaynaklar Bazındaki Dağılımı [6].

Türkiye toplam enerji tüketiminin kaynaklar bazındaki dağılımı ise Şekil 2.3’de özetlenmiştir. Türkiye’nin 2012 yılı toplam enerji tüketimi 241,974 TWh olup ülkemiz dünyada enerji tüketimindeki payı 2010 yılı verilerine göre %0,9’dur. Enerji tüketimimizin büyük bir kısmını dışa bağımlı olduğumuz petrol ve doğal gaz oluşturmaktadır. Enerji kaynaklarının enerji tüketimindeki payları sırasıyla; doğal gaz (%31,9), petrol (%26,7), taşkömürü (%16,2), linyit (%14,5), yenilenebilir (%6,5) ve odun-bitki (%4,2) şeklinde gerçekleşmiştir [6,7].



Şekil 2.3. Türkiye’de Enerji Tüketiminin Kaynaklar Bazında Dağılımı [6].

1990-2011 yılları arasında Türkiye’de yerli kaynaklardan enerji üretim miktarı ve toplam enerji tüketim miktarı Şekil 2.4’de verilmiştir. Türkiye’de yerli kaynaklardan enerji üretiminin enerji tüketimini karşılama oranı yıllar içerisinde hızla azalmıştır. Bu oran 1990 yılında %48,11 iken 2011 yılında %28,33 olarak gerçekleşmiştir [6].



Şekil 2.4. Türkiye’de Yerli Kaynaklı Enerji Üretimi ve Toplam Enerji Tüketimi [6].

2.2 Dünyada ve Türkiye’de Yenilenemez Enerji Durumu

En önemli yenilenemez enerji kaynakları; petrol, kömür, doğalgaz ve nükleer olup bu kaynaklar dünya enerji üretiminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Fosil kaynaklı yakıtların rezerv miktarları ve kullanılabilme süreleri ile 2012 yılı sonu itibarıyla bu kaynaklardan üretilen ve tüketilen toplam enerji miktarları Çizelge 2.1’de verilmektedir. Rezerv miktarları ağırlık olarak, petrol için milyon ton, taşkömürü ve linyit gibi katı yakıtlar için milyar ton olarak ifade edilirken, gaz halinde bulunan doğal gazın için ise hacim trilyon m³ olarak belirtilmiştir. Üretim-tüketim durumu değerlendirilirken enerji kaynaklarının birimi Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olarak verilmiştir. 2012 yılı dünya petrol rezervi 235,8 milyon ton, doğal gaz rezervi 187,3 trilyon m³, kömür rezervi ise 860,94 milyar ton olarak tespit edilmiştir. Petrol, doğal gaz ve kömürün kullanılabilme süreleri sırasıyla; 52,9 yıl, 55,7 yıl ve 109 yıl olarak öngörülmektedir. Dünyada fosil yakıtlardan toplam enerji üretim miktarı 11230,4 Mtep olurken; tüketim miktarı 11083,3 Mtep olarak gerçekleşmiştir [5].

Çizelge 2.1. Fosil Kaynaklı Yakıtların Dünyadaki Durumu [5].

Kaynaklar		Dünya Rezervi (2012)	Dünya Rezervinin Kullanılabilme Süreleri (Yıl)	Üretim (Mtep)	Tüketim (Mtep)	Tüketim Payı (%)
Petrol (Milyon ton)		235,8	52,9	4324,8	4337,1	39,13
Doğal gaz (trilyon m ³)		187,3	55,7	3060,3	3016,1	27,21
Kömür (Milyon ton)	Taş Kömürü	404,76	109	3845,3	3730,1	33,66
	Linyit	456,17				
TOPLAM				11230,4	11083,3	100

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından yayınlanan Mavi Kitap Raporu'na göre; ülkemizin taşkömürü rezervi 1319,4 milyon ton, linyit rezervi 11752,2 milyon ton, petrol rezervi 43,1 milyon ton, doğal gaz rezervi 6,2 milyar m³ olarak belirlenmiştir. 2012 yılı itibarıyla Türkiye'deki elektrik santrallerinin toplam kapasitesi 57059,4 MW'dır. Bu kurulu gücünün %61,4'ünü (35027,2 MW) termik santraller, %38,6'sını (22032,2 MW) ise hidroelektrik, jeotermal ve rüzgar enerji santralleri oluşturmuştur [8].

Ülkemizdeki petrol durumu incelendiğinde; 2012 yılı ham petrol üretiminin 2,34 milyon ton, ortalama günlük üretimin 44 bin varil olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık aynı yıl ithal edilen ham petrolün 19,5 milyar ton ve ithal edilen petrole ödenen tutarın 15,92 milyar \$'ı aştığı görülmektedir. Kaynak ülke olarak bakıldığında İran, Rusya, Suudi Arabistan, Kazakistan ve Irak'ın toplam ithalat içindeki payı %97'den fazladır [7,8].

Türkiye'de doğal gaz tüketimi 1987 yılından bu yana sürekli artan bir eğilim içindedir. 1987 yılında 500 milyon m³ olan doğal gaz tüketimi 2012 yılı sonunda, 90,4 kat artarak 45,2 milyar m³'e ulaşmıştır. Aynı yıl içerisinde ithal edilen doğal gaza ödenen toplam tutar 23 milyar \$'ı bulmaktadır. İthal edilen doğal gaz büyük oranda; Rusya (%55), İran (%19), Cezayir (%10) ve Azerbaycan'dan (%8) temin edilmektedir. Buna karşılık 2011 yılı doğal gaz üretimimiz 686 milyon m³, ortalama günlük üretim 1,87 milyon m³ olup üretimin tüketimi karşılama oranı ise yalnızca %1,7'dir [7]. Ülkemizdeki linyitin ve taşkömürünün durumu incelendiğinde; 1974–2011 yılları arasındaki 37 yıllık süreçte linyit üretiminin yıllık 8,4 milyon tondan 73 milyon tona çıkarak 8,7 kat arttığı tespit edilmiştir. Türkiye'de 1974 yılında yıllık

yaklaşık 5 milyon ton olan taşkömürü üretimi 2010 yılına kadar olan süreçte yaklaşık %48 oranında düşerek 2,59 milyon ton düzeyine inmiştir. 2011 yılı taşkömürü üretimi de 2010 yılı taşkömürü üretimine yakın bir düzey olan 2,62 milyon ton seviyelerinde gerçekleşmiştir. Ülkemiz taşkömürü açısından yeterli kaynağa sahip olmadığından dışa bağımlı konumdadır ve bu nedenle son yıllarda ülkemizin kömür ithalatı hızla artış göstermiştir. Bu durumu kömürün konut ve sanayi de kullanımının artmasına ve yeni devreye giren ithal kömürlü termik santrallere bağlayabiliriz [7,8]. Nükleer enerji üretiminde kullanılan çekirdek kaynaklar; uranyum ve toryumdur. Dünyada 2011 yılı için çıkartılabilir uranyum rezervi 5327,2 bin tondur. Rezerv açısından en zengin ülkeler; Avustralya (1661 bin ton), Kazakistan (629 bin ton), Rusya (487,2 bin ton) ve Kanada (468,7 bin ton) olup Türkiye'nin uranyum rezervi bu ülkelere kıyasla çok daha düşük seviyededir (9129 tondur). Dünyada 2011 yılı için çıkartılabilir toryum rezervi 5385 bin tondur. Toryum rezervi açısından önde gelen ülkeler; Hindistan (846 bin ton), Türkiye (744 bin ton), Brezilya (606 bin ton), Avustralya (521 bin ton) ve ABD (434 bin ton) şeklinde sıralanmaktadır [9].

Nükleer enerjinin dünyadaki durumu Çizelge 2.2'de özetlenmiştir. Dünya Nükleer Enerji Kurumunun 2011 yılı verilerine göre; dünyada nükleer santrallerden elektrik enerjisi üretimi 2518 milyar kWh olup elektrik enerjisi üretiminde nükleer enerjiden en fazla yararlanan ülke Fransa (%77,7)'dir. Aralık 2012 itibarıyla dünyada işletmede bulunan nükleer reaktör sayısı 436 ve bu reaktörlerin kurulu gücü 374135 MW'dır. Ayrıca inşa halinde 65 nükleer reaktör ve planlama aşamasında 168 nükleer reaktör bulunmakta olup bunların toplam güç kapasiteleri sırasıyla 65159 MW ve 185495 MW'dır [9].

Çizelge 2.2. Nükleer Enerjinin Dünyadaki Durumu [9].

Ülkeler	Nükleer Enerji Üretimi (2011)		İşletmedeki Santraller (2012)		İnşa Halindeki Santraller (2012)		Planlanan Santraller (2012)	
	Milyar kWh	Elek. En. Pay (%)	Adet	Güç Kap. (MW)	Adet	Güç Kap. (MW)	Adet	Güç Kap. (MW)
ABD	790,4	19,2	104	102195	1	1218	13	15660
Fransa	423,5	77,7	58	63130	1	1720	1	1720
Japonya	156,2	18,1	50	44396	3	3036	10	13772
Rusya	162	17,6	33	24164	10	9160	24	24180
Kore	147,8	34,6	23	20787	4	5205	5	7000
Almanya	102,3	17,8	9	12003	0	0	0	0
Kanada	88,3	15,3	20	14169	0	0	2	1500
Ukrayna	84,9	47,2	15	13168	0	0	2	1900
Çin	82,6	1,8	15	11881	29	30010	52	60880
İngiltere	62,7	17,8	16	10038	0	0	4	6680
Hindistan	28,9	3,7	20	4385	7	5300	18	15100
Türkiye	0	0	0	0	0	0	4	4800
Diğerleri	388,4	-	73	53819	10	9510	33	32303
TOPLAM	2518	13,5	436	374125	65	65159	168	185495

Türkiye’de 2013-2014 yılında Mersin Akkuyu’da yapımına başlanacak dört reaktörden oluşan toplamda 4800 MW kapasiteli nükleer santralin 2018-2021 yılları arasında faaliyete geçmesi planlanmaktadır. Ayrıca Sinop’a 5600 MW kapasiteli bir nükleer santralin kurulumu da proje aşamasındadır [9].

2.3 Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Durumu

Dünyada yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları; hidrolik enerji, jeotermal enerji, biokütle enerjisi, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisidir. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Küresel Durum Raporu’na göre seçilmiş ülkeler için 2012 yılı yenilenebilir elektrik güç kapasiteleri Çizelge 2.3’te verilmiştir. Buna göre yenilenebilir elektrik güç kapasitesi bakımından yenilenebilir enerjiden en fazla yararlanan ülkenin Çin (319 GW) olduğu görülmektedir. Çin, 229 GW’lık hidrolik enerji kapasitesiyle ve 75 GW’lık rüzgar enerji kapasitesiyle hidrolik enerji ve rüzgar enerjisinden en fazla faydalanan ülke konumundadır. Ayrıca enerji üretiminde fotovoltaik (PV) panellerden en fazla faydalanan ülkenin Almanya (32 GW); biyoyakıtlardan en fazla faydalanan ülkenin ise ABD (15 GW) olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 2.3. Ülkelerin 2012 Yılı Yenilenebilir Elektrik Güç Kapasitesi (GW) [10].

Teknoloji	Dünya	Avrupa Birliği	BRICS	Çin	ABD	Almanya	İspanya	İtalya	Hindistan
	GW								
Biokütle	83	31	24	8	15	7,6	1	3,8	4
Jeotermal	11,7	0,9	0,1	~0	3,4	~0	0	0,9	0
Okyanus (Gel git)	0,5	0,2	~0	~0	~0	0	~0	0	0
Güneş (PV)	100	69	8,2	7	7,2	32	5,1	16,4	1,2
Yoğunlaştırılmış termal güneş enerjisi	2,5	2	~0	~0	0,5	~0	2	~0	~0
Rüzgar	283	106	96	75	60	31	23	8,1	18,4
Toplam Yenilenebilir Güç Kapasitesi (Hidro güç hariç)	480	210	128	90	86	71	31	29	24
Kişi başı kapasite (W/kişi, Hidro güç hariç)	70	420	40	70	280	870	670	480	20
Hidrolik güç	990	119	402	229	78	4,4	17	18	43
Toplam Yenilenebilir Güç Kapasitesi (Hidro güç dahil)	1470	330	530	319	164	76	48	47	67

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan hidrolik enerjinin en yaygın kullanım şekli nehirler üzerinde barajlar inşa ederek suyu büyük rezervuarlarda biriktirmek ve suyun potansiyel enerjisinden yararlanarak elektrik enerjisi üretmektir. Bunun için hidroelektrik santrallerden faydalanılır. Çizelge 2.3'te dünyanın önde gelen ülkelerinin 2012 yılı hidrolik enerji kurulu gücü verilmektedir. 2012 yılı itibarıyla dünyanın toplam hidrolik kurulu gücü 990 GW olup kurulu gücü en yüksek olan ülke ise Çin'dir. Türkiye'nin hidrolik enerji potansiyeli 36603 MW/yıl olarak öngörülmektedir. Ülkemizin 2012 yılı hidrolik enerji üretimi 64,5 TWh olup aynı yıl elektrik enerjisi ihtiyacımızın %26,9'i hidrolik enerjiden karşılanmıştır [5,10].

Ülkemizde 2012 yılı sonu itibarıyla işletmede olan hidrolik santrallerin toplam kurulu gücü 3915 MW'dır. Ayrıca lisans alma sürecinde uygun bulunan hidroelektrik santrallerin kurulu gücü 3707,66 MW, lisans başvurusu yapan santrallerin kurulu gücü 1171 MW, lisans alma aşamasında olanların kapasitesi 1136,71 MW'dır. Elektrik üretiminde doğal gaz ağırlık verilmesi sonucu, hidrolik enerji üretimi ve hidrolik enerjinin toplam enerji üretimindeki payı azalmıştır.

Jeotermal enerji, yerkürenin iç ısısidir. Bu ısı, merkezdeki sıcak bölgeden yeryüzüne doğru yayılarak elektrik enerjisi üretimi, evlerin ısıtılması, kışın kaldırımlarda biriken karların eritilmesi, tarım, seracılık, balıkçılık gibi birçok amaç için kullanılabilir. Dünya jeotermal enerji kurulu gücü; elektrik ve ısı üretim gücü olmak üzere iki şekilde ifade edilmektedir. Çizelge 2.4'te 2011 yılı dünya jeotermal enerji kurulu gücü verilmiştir. Jeotermal elektrik kurulu gücü yüksek olan ülkeler; ABD, Filipinler, Endonezya ve Meksika iken; jeotermal ısı kurulu gücü yüksek olan ülkeler; ABD, Çin, İsveç ve Türkiye'dir [5,11].

Çizelge 2.4. Dünyada 2011 Yılı Jeotermal Enerji Kurulu Gücü [5,11].

Ülkeler	Elektrik (MWe)	Isı (MWt)
ABD	3112	12611,5
Filipinler	1967	3,3
Endonezya	1189	2,3
Meksika	887	155,8
İtalya	863	867
Yeni Zelanda	769	393,2
İzlanda	665	1826
Japonya	502	2099,5
Kosta Rika	208	1
El Salvador	204	2
Kenya	170	16
Türkiye	114	4078
Nikaragua	88	0
Rusya	82	308,2
Çin	24	8898
Almanya	8	2485,4
Norveç	0	3300
Belarus	0	3422
İsveç	0	4460
TOPLAM	11014	50583

Türkiye, dünyanın 7. büyük jeotermal enerji potansiyeline sahiptir. Ülkemiz jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretiminde dünya kapasitesinin %0,23'üne, ısı enerjisi üretiminde ise dünya kapasitesinin %4,3'üne sahiptir. Daha çok Batı Anadolu'da yer alan jeotermal sahaların %95'i bölgesel konut ısıtılması, seracılık ve kaplıca turizmine uygundur. Ülkemizdeki jeotermal ısıl güç potansiyeli 31500 MW olup bu ısıl güç 5 milyon konutun ısıtılmasına eşdeğerdir. Ayrıca Türkiye'nin jeotermal elektrik teknik potansiyeli 600 MW (4 milyar kWh/yıl, keşfedilen 15 saha) olarak belirlenmiştir. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından ispatlanmış jeotermal ısıl kapasite toplamı 4078 MW düzeyindedir. Türkiye'de Aralık 2011 itibarıyla mevcut yedi jeotermal elektrik santralının toplam kurulu gücü 114 MW'dır. Ayrıca 400 MW kurulu gücünde 13 jeotermal santral fizibilite ve/veya

proje aşamasındadır. Otuzun üzerinde firma ise jeotermal projeleri için etüt arama ve sondaj çalışmalarına devam etmektedir [7,8].

Biyokütle enerji kaynakları, içerisinde karbonhidrat bileşikleri olan bitkisel ve hayvansal kökenli tüm maddelerdir. Biyokütle enerji kaynakları kullanılarak, biyoetanol, biyodizel ve biyogaz olmak üzere üç temel yakıt elde edilebilmektedir. Dünyada 2011 yılında toplam biyoetanol üretimi 86,1 milyar litre iken; biyodizel üretimi 21,4 milyar litre olarak gerçekleşmiştir. En fazla biyoetanol üretimi gerçekleştiren ülkeler ABD, Brezilya, Çin, Kanada olurken; en fazla biyodizel üretimi gerçekleştiren ülkelerin Almanya, ABD, Arjantin, Brezilya, Fransa olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Çizelge 2.5) [10].

Çizelge 2.5. Ülkelerin 2011 Yılı Biyoyakıt Üretim Miktarları (milyar litre) [10].

Ülkeler	Biyoetanol	Biyodizel	Toplam
ABD	54,2	3,2	57,4
Brezilya	21,0	2,7	23,7
Almanya	0,8	3,2	3,9
Arjantin	0,2	2,8	3,0
Fransa	1,1	1,6	2,7
Çin	2,1	0,2	2,3
Kanada	1,8	0,2	2,0
Endonezya	0,0	1,4	1,4
İspanya	0,5	0,7	1,2
Dünya	86,1	21,4	107,0

Ülkemizdeki biyodizel durumu incelendiğinde; 14 Eylül 2011 verilerine göre Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu'na (EPDK) kayıtlı 36 firmanın biyodizel üretim lisansına sahip olduğu görülmüştür. Ancak yerli tarım ürünlerinden aktif biyodizel üretimi yapan sadece bir firma bulunmaktadır. Bu firma verimsiz tarım arazilerinde yetiştirilen aspir bitkisiyle biyodizel üretimini gerçekleştirmektedir. Çevre Bakanlığı verilerinde üç adet tesis atık yağdan biyodizel üretimi için izinli görünse de bunlardan sadece bir tanesi EPDK'dan lisanslıdır ve aktif üretim yapmaktadır. Ülkemizde yerli ham maddeyle üretilen biyodizelin motorinle harmanlanan %2'lik dilimi Özel Tüketim Vergisi (ÖTV)'nden muaf tutulmaktadır. 27.09.2011 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren EPDK Kararı gereğince piyasaya akaryakıt olarak arz edilen motorin türlerinin, yerli tarım ürünlerinden üretilmiş biyodizel içeriğinin 1 Ocak 2014 tarihi itibarıyla en az %1, 1 Ocak 2015 tarihi

itibarıyla en az %2, 1 Ocak 2016 tarihi itibarıyla en az %3 olması zorunluluğu getirilmiştir [7].

Biyometanol pazarında ise daha istikrarlı bir süreç işlemiştir. Biyodizele benzer şekilde 2000’li yılların başında başlayan biyometanol akımı istikrarlı yapılanmayla günümüze kadar gelse de bugüne kadar kullanım zorunluluğu olmaması nedeniyle sektörde bir canlılık sağlanamamıştır. Ülkemizde, biyometanol sektöründe mevcut durumda üç üretim tesisi bulunmaktadır. Türkiye’de kurulu biyometanol üretim kapasitesi 149,5 milyon litredir. Biyometanol kurulu kapasitemiz benzin tüketimimizin yaklaşık %7’sini karşılar durumdadır. Ancak pazarda yer alan biyometanol benzin tüketimimizin %1’inin çok altındadır. Sadece şeker pancarına dayalı biyometanol üretim potansiyelimiz 2–2,5 milyon ton civarındadır. Bu değer 2011 yılı benzin tüketimimizin tümünü karşılamaktadır. Ülkemizde biyodizelde olduğu gibi biyometanolde de yerli ham maddeyle üretilen biyometanolün benzinle harmanlanan %2’lik dilimi ÖTV’den muaftır. EPDK’dan yapılan açıklamaya göre, piyasaya akaryakıt olarak arz edilen benzin türlerine, 1 Ocak 2013 tarihinden itibaren %2, 1 Ocak 2014 tarihi itibarıyla da en az %3 oranında yerli tarım ürünlerinden üretilmiş biyometanol ilave edilmesi zorunlu kılınmıştır [7].

Ülkemizde biyogaz sektörü başta bazı şehirlerimiz olmak üzere çöpten biyogaz üretimi, bazı sanayi tesisleri ve belediyelerin atık su ve tesislerinden biyogaz üretimi, Orman ve Su İşleri Bakanlığı tarafından Anadolu’nun farklı yörelerinde yürütülen gazifikasyon demonstrasyon projeleri ve özel sektörde yürütülmekte olan sayıları az da olsa nitelikli biyogaz projelerinden oluşmaktadır. Ayrıca ülkemizde hayvancılık alanında da gerekli yatırımlar yapılarak hayvan atıklarından biyogaz üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Yıllık hayvan dışkısı biyogaz teorik potansiyelimizin büyüklüğü tahminen; kümes hayvanları için 401,5 milyon m³, küçükbaş hayvanlar için 852,6 milyon m³, büyükbaş hayvanlar 1354,2 milyon m³ olmak üzere toplam 2608 milyon m³ gaz üretilir. Bu bilgiler ışığında Türkiye’nin biyogaz potansiyelinin 1400-2000 Btep/yıl olduğu tahmin edilmektedir. Ocak 2012 itibarıyla Enerji Piyasası Düzenleme Kurulundan (EPDK) lisans alıp yapımı süren biyogaza dayalı elektrik üretim tesislerinin kurulu gücü 93 MW, biyokütleyle dayalı elektrik üretim tesislerinin kurulu gücü ise 12,8 MW’dır [7].

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreciyle açığa çıkan ışıma enerjisidir. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti 1370 W/m² değerindedir. Ancak yeryüzünde 0-1100 W/m² değerleri arasında değişim

göstermektedir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden güneş kolektörleri, güneş santralleri ve güneş pilleri (fotovoltaik piller) olmak üzere üç şekilde yararlanılmaktadır. Güneş kolektörleri genelde sıcak su temininde kullanılmaktadır. 2011 yılı dünya güneş kolektörü kapasitesi 182 GW olup kapasitesi yüksek olan ülkeler; Çin (118 GW), Türkiye (9,3 GW), Almanya (9,2 GW) ve Japonya (4,0 GW)'dır. Ayrıca elektrik enerjisi üretiminde kullanılan dünya toplam güneş pili (fotovoltaik pil) kapasitesi 70 GW olup kapasitesi yüksek olan ülkeler; Almanya (24,8 GW), İtalya (12,8 GW), Japonya (4,9 GW) ve ABD (4,0 GW)'dir [10].

Türkiye, coğrafi konumu sebebiyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre daha avantajlı konumdadır. Ülkemizde ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi metrekarede 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınlam şiddeti metrekarede yılda 1311 kWh (günlük ortalama 3,6 kWh) olarak tespit edilmiştir. Türkiye 110 gün gibi yüksek bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir ve gerekli yatırımların yapılması halinde Türkiye, günde birim metrekaresinden 1100 kWh'lik güneş enerjisi üretebilir. Ülkemizde en fazla güneş enerjisi alan bölge Güneydoğu Anadolu olup, bunu Akdeniz Bölgesi ve Doğu Anadolu Bölgesi takip etmektedir (Çizelge 2.6) [7,12].

Çizelge 2.6. Türkiye'nin Güneş Enerji Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı [7].

Bölge	Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m²-yıl)	Güneşlenme Süresi (Saat / yıl)
Güneydoğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

Güneş kolektörleriyle sıcak su üretimi (2010 yılında 12 milyon m² civarında düzlemsel güneş kolektörü) çoğunluğu Akdeniz ve Ege bölgesinde olmak üzere ülkemizde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kolektörlerden yararlanılarak üretilen ısı güç 9,3 GW seviyelerindedir. Fotovoltaik güç sistemleri ise küçük güçte ve modüler olarak kurulabilme özellikleri nedeniyle uzun yıllardır elektrik şebekesi olmayan ücra yerlerde enerji ihtiyacının karşılanmasında şebekeden bağımsız küçük güç

birimleri olarak kullanılmasının yanı sıra şebekeye bağlı enerji santrali olarak da kullanılmaktadır. Hâlen telekomünikasyon istasyonları, deniz fenerleri, otoyol ve park aydınlatmaları, trafik ikaz sistemleri, su pompalama ve bazı ev ve iş yerleri vb. otonom sistemlerde kullanılmakta olup bu kapsamdaki tesislerin toplam kurulu gücünün 5 MW'a ulaştığı belirtilmektedir [7].

En önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgâr enerjisi, güneş radyasyonunun yer yüzeylerini farklı ısıtmasından kaynaklanır. Yer yüzeylerinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına, bu basınç farkları havanın hareketine neden olur. Yüksek basınçtan alçak basınca doğru olan hava hareketi de rüzgârı oluşturur. Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretimi rüzgâr türbinleriyle gerçekleştirilmektedir. Rüzgâr türbinlerinin genel olarak çalışma prensibi; kinetik enerji, mekanik enerji ve elektrik enerjisi döngüsüne dayanmaktadır.

Dünya Rüzgar Enerjisi Kurumu'nun (WWEA) 2011 yılı Dünya Rüzgar Enerjisi Raporu'na göre ülkelerin rüzgâr türbin güç kapasiteleri Çizelge 2.7'de verilmiştir. 2011 yılı dünya rüzgâr türbin güç kapasitesi 237227 MW olarak gerçekleşmiştir. Rüzgâr türbin güç kapasitesi sıralamasında 2010 yılında 1. sırada yer alan Çin, 2011 yılında da ilk sırada yer almıştır. Türkiye ise 2011 yılında güç kapasitesini %35,7 oranında arttırıp 1729 MW'a çıkararak dünya rüzgâr türbin güç kapasitesi sıralamasında 17. sırada yer almıştır (Çizelge 2.7) [13].

Çizelge 2.7. Ülkelerin Rüzgâr Türbin Güç Kapasitelerindeki Değişim [13].

2011 Yılı Sıra No	ÜLKE	2011 Yılı Toplam Kapasite (MW)	2011 Yılı Büyüme Oranı (%)	2010 Yılı Sıra No	2010 Yılı Toplam Kapasite (MW)
1	Çin	62364	39,4	1	44733
2	ABD	46919	16,8	2	40180
3	Almanya	29075	6,8	2	27215
4	İspanya	21673	4,8	4	20676
5	Hindistan	15880	21,54	5	13065,8
6	İtalya	6787	17,1	6	5797
7	Fransa	6640	17,3	7	5660
8	İngiltere	6018	15,7	8	5203,8
9	Kanada	5265	31,4	9	4008
10	Portekiz	4379	18,3	11	3702
17	Türkiye	1729	35,7	17	1274
	TOPLAM	237227	18,8	-	199739

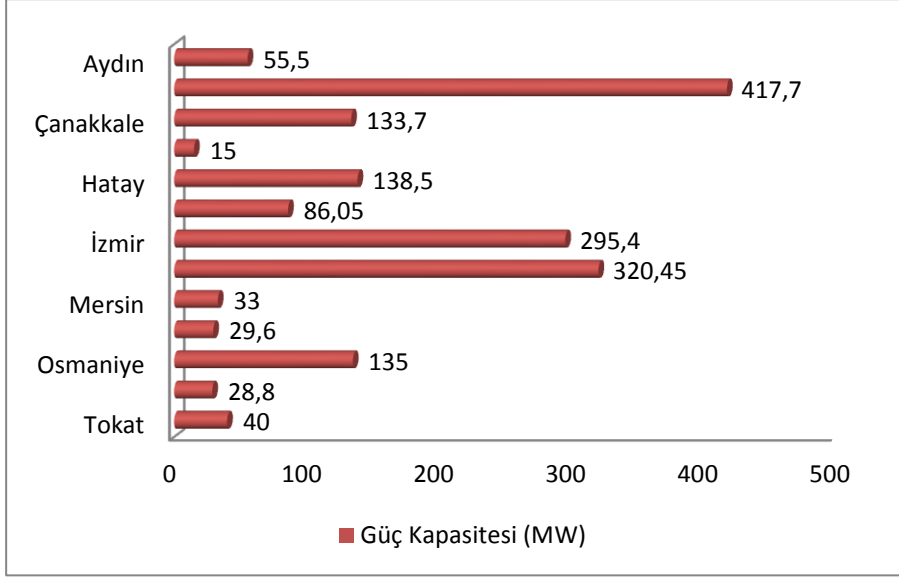
Elektrik enerjisi üretiminde, rüzgâr türbin kurulu gücü payının en yüksek olduğu üç Avrupa ülkesi; Almanya, İspanya, İtalya'dır. Dünya rüzgâr türbin kurulu

gücü projeksiyonuna göre toplam kapasitenin 2015 yılında 600000 MW, 2020 yılında 1500000 MW'dan fazla olacağı öngörülmektedir. Dünyada karaya (onshore) kurulan rüzgar türbinlerinin yanında denize (offshore) kurulan rüzgar türbinleri de elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. 2011 yılı offshore rüzgar türbinlerinin toplam kapasitesi 3117,6 MW olup offshore rüzgar türbin kapasitesi en yüksek olan ülkeler; İngiltere (1341 MW), Danimarka (854 MW) ve Hollanda (249 MW) şeklindedir [13].

Dünyadaki rüzgâr türbin imalatının büyük kısmı; Çin, ABD, Almanya, Danimarka, İspanya ve Hindistan gibi rüzgâr türbin güç kapasitesi yüksek olan ülkelerde gerçekleştirilmektedir. 2011 yılı pazar payı en yüksek olan rüzgâr türbin üreticileri sırasıyla; Vestas-Danimarka (%12,9), Goldwind-Çin (%9,4), GE Wind-ABD (%8,8), Gamesa-İspanya (%8,2), Enercon-Almanya (%7,9) ve Suzlon-Hindistan (%7,7) olarak belirlenmiştir [10].

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından 50 m yükseklikte yapılan rüzgâr hız ölçümlerine göre 6,5 m/s'nin üzerindeki rüzgâr hızları değerlendirildiğinde Türkiye kara rüzgâr potansiyeli 131756,40 MW; rüzgâr hızının 7,0 m/s'nin üzerinde olduğu bölgeler dikkate alındığında kara rüzgâr potansiyeli 48000 MW olarak belirlenmiştir. Ayrıca rüzgâr hızının 6,5 m/s'nin üzerinde olduğu alanlarda Türkiye deniz rüzgâr potansiyeli 17393,20 MW olarak tespit edilmiştir [7,8].

Türkiye'nin rüzgâr türbin güç kapasitesi her yıl artmakta olup 1998 yılında 9 MW düzeyinde olan rüzgar türbin güç kapasitesi Aralık 2011 itibarıyla 1729 MW düzeyine ulaşmıştır. Rüzgar kurulu gücü Türkiye 2011 toplam kurulu gücünün (52911 MW) %3,2'sini oluşturmaktadır. 2011 yılında rüzgâr santrallerinden üretilen elektrik enerjisi 4726 milyar kWh olarak gerçekleşmiş olup toplam elektrik üretiminin %2,07'sine karşılık gelmektedir. Rüzgâr santralleri yoğun olarak Balıkesir, Manisa, İzmir, Hatay, Osmaniye, Çanakkale ve İstanbul illerinde yer almaktadır (Şekil 2.5) [7].



Şekil 2.5. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Kurulu Gücünün İllere Göre Dağılımı [7].

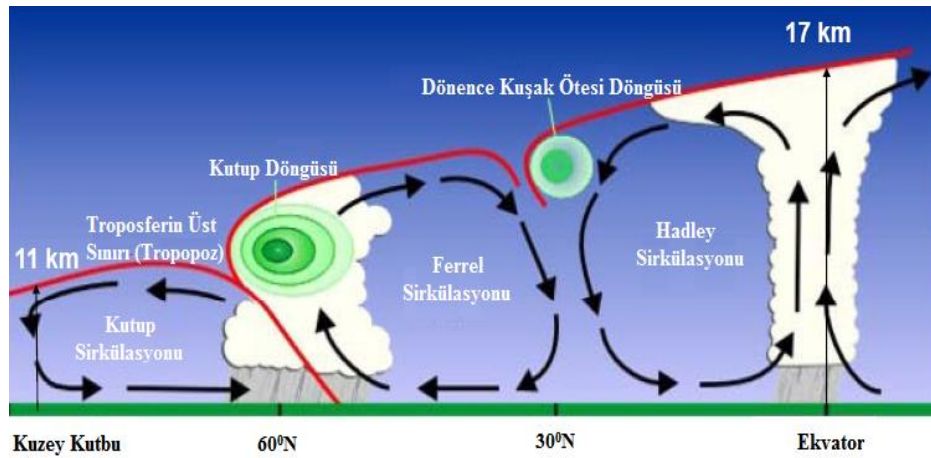
Dünya rüzgâr türbin güç kapasitesi 2011 yılında 237227 MW olarak gerçekleşmiştir Rüzgâr türbin güç kapasitesi yüksek olan ülkeler sırasıyla; Çin, ABD, Almanya, İspanya ve Hindistan'dır. Türkiye'nin rüzgâr türbin güç kapasitesi Aralık 2011 itibarıyla 1729 MW düzeyine ulaşmıştır. Rüzgâr kurulu gücü Türkiye 2011 toplam kurulu gücünün (52911 MW) %3,2'sini oluşturmaktadır. 2011 yılında toplam elektrik enerjisi üretiminin %2,07'si rüzgâr enerjisinden sağlanmıştır. Temiz, yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisinin kullanımının artırılması ülkemiz menfaatleri açısından son derece önemlidir. Bu yüzden rüzgâr türbin kurulu gücümüzün 2023 yılı hedefi olan 20000 MW kapasiteye ve izleyen dönemlerde toplam potansiyel olan 48000 MW kapasiteye ulaştırılmasına gayret gösterilerek enerjide dışa bağımlılığımızın azaltılması gerekmektedir [7,13].

3. GENEL BİLGİLER

3.1 Rüzgar Enerjisi

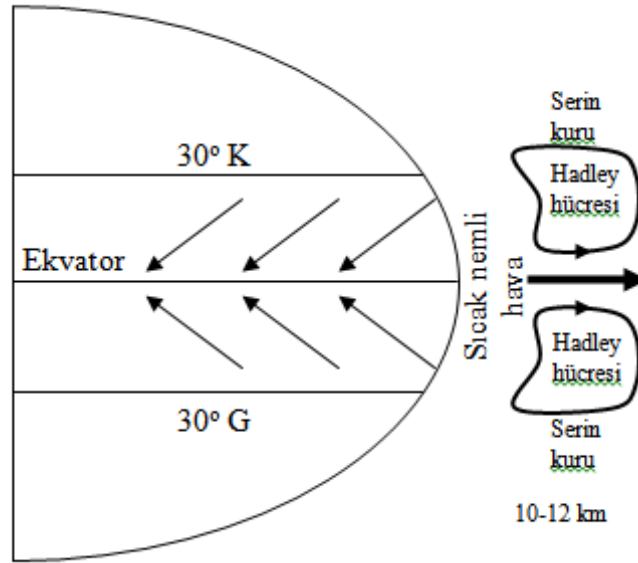
Rüzgar enerjisi alternatif enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Rüzgar enerjisi sistemlerinin temel girdisi rüzgarlardır. Rüzgarın kinetik enerjisini mekanik veya elektrik enerjisine çevirip kullanıma sunan sistemlerde rüzgar enerjisi çevrim sistemleridir. Rüzgar enerjisinin temel kaynağı ise güneştir. Gerekli enerjisini güneşten alan bir ısı makinesi olarak nitelenebilecek olan atmosferde; ısıl potansiyel farklara sahip olan hava kütleleri, daha soğuk ve yüksek basınç alanı olan bir noktadan, daha sıcak ve alçak basınç alanına hareket ederler. Isı enerjisinin kinetik enerjiye dönüştüğü bu doğa olayındaki hava kütlesi hareketine, rüzgar adı verilir [14].

Atmosferin toplam enerjisi, kinetik ve potansiyel enerji olarak ikiye ayrılır ve temel olarak basınç kuvvetlerinin etkisiyle potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümünün bir sonucudur. Şekil 3.1’te gösterildiği gibi ekvator civarında yerle temas halinde bulunan sıcak ve nemli hava konveksiyonla yükselir, yükseldikçe soğur, belli bir seviyeye yükseldikten sonra daha soğuk olan kuzey enlemlere doğru hareket eder ve 30° kuzey enlemlerine yaklaşıncı tekrar yeryüzüne doğru alçalır.



Şekil 3.1. Rüzgarın oluşumu [15].

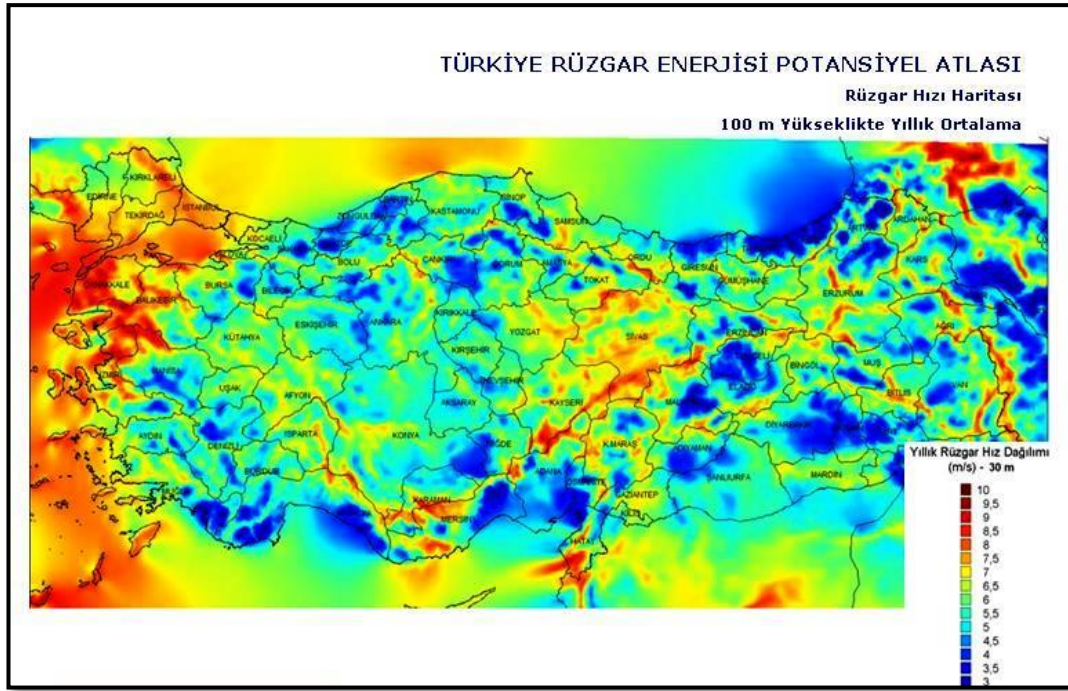
Burada nispeten daha soğuk ve kuru olan hava ekvatora doğru yönelir. Bu duruma Şekil 3.2’de gösterilen ‘Hadley Sirkülasyonu’ adı verilir [16].



Şekil 3.2. Hadley sirkülasyonu [16].

Türkiye coğrafi konumu ve iklim koşulları itibari ile rüzgar enerjisi bakımından, teorik olarak elektrik enerjisinin tamamını karşılayabilecek düzeydedir. Ülkemizde toplam 8000 km'yi bulan sahil şeridinin büyük bir kısmında rüzgar enerjisi kullanılabilir durumdadır. Türkiye, Avrupa'da İspanya'dan sonra rüzgar enerjisi potansiyeli en zengin ülkeler arasında yer almaktadır. Brüt potansiyelinin yılda 400 milyar kWh, teknik potansiyelinin ise, 120 milyar kWh olduğu düşünülmektedir. Söz konusu teknik potansiyel yıllık elektrik üretiminin 1,2 katıdır.

Ancak, Türkiye genelinde 10 metre yükseklikteki rüzgar yoğunluğunun alansal ve zamansal dağılımı ile teknolojik yetersizlikler göz önünde tutulduğunda, güvenilir rüzgar enerjisi potansiyeli, 12 milyar kWh/yıl olarak hesaplanmaktadır (Şekil 3.3). Ayrıntılı ölçümler ve yeni verilerle bu değerin artması olasıdır [17].



Şekil 3.3. Türkiye rüzgar haritası [18].

Türkiye'nin teorik olarak hesaplanan potansiyeli 100000 MW üzerindedir. Son yapılan hesaplamalara göre ekonomik potansiyel 55000 MW dolaylarında hesaplanmıştır [19]. Bu potansiyelin ortalama kapasite kullanım oranları % 35 civarındadır. Diğer bir deyişle yılda ortalama 3000 saat enerji üretimi mümkün olabilecektir. Bu rakamlar incelendiğinde, rüzgar enerjisi potansiyelinin Türkiye için kullanılması gereken çok önemli bir enerji kaynağı olduğunu göstermektedir. Fakat rüzgar enerjisinin mevcut olan enterkonnekte sisteme bağlanması en büyük sıkıntı olarak görülmektedir. Şebekenin iyileştirilmesi ve yönetimi hayati önem arz etmektedir.

Rüzgar enerjisinin temiz, ücretsiz ve sınırsız bir kaynak özelliğine sahip olması, enerji arzını çeşitlendirerek enerji güvenliği sağlaması, dış kaynaklı yakıt ithaline ihtiyaç duymaması, rüzgar enerjisi çevrim sisteminin çok çabuk inşa edilebilmesi ve sistemin inşa edildiği alanda tarım ve sanayi faaliyetlerinin de yürütülebilmesi gibi çok sayıda sağladığı avantajdan ötürü bu sektöre ülkemizde hızlı bir şekilde yatırım yapılmaktadır.

Geleneksel yakıtların aksine, enerji güvenliği açısından yakıt maliyetlerini ve uzun dönemli yakıt fiyatı risklerini eleyen, ekonomik, politik ve tedarik riskleri açısından diğer ülkelere bağımlılığı ortadan kaldıran, yerli ve her zaman

kullanılabilir bir kaynak olması rüzgar enerjisinin önemini daha da arttırmaktadır [17].

3.2 Rüzgar Enerjisi İle İlgili Temel Kavramlar

Bir bölgenin topografik özelliği, rüzgarın yönü, hızı ve dağılımında önemli rol oynar. Dağ silsilesi, tepe ve kayalıklar rüzgar şeklini büyük ölçüde etkiler. Denize paralel, rüzgar yönüne dik, orta eğimli ve özellikle de çıplak olan dağ silsileleri, enerji üretimine uygun yerlerdir. Zirvedeki rüzgar hızı, eğim ve dağ silsilesinin büyüklüğüne bağlı olarak artar. Bu nedenle tepenin üst-ön kısımları rüzgar enerjisi tesisleri için uygundur [20].

Rüzgarın oluşmasında; basınç merkezleri arasındaki yatay uzaklık, dünyanın kendi eksenini etrafındaki hareketi, yer şekilleri ve basınç farkı da etkili olmaktadır. Rüzgar, hızına göre fırtına, hortum, kasırga, tayfun vb. isimler alır. Rüzgarlar denizlerin dalgalanmasında, deniz akıntılarının oluşmasında ve karaların şekillenmesinde büyük önem taşımaktadır. Ayrıca rüzgarlar bitkilerin çoğalmasında da önemli aşılama özelliğine sahiptir [21].

Meteorolojik ve topografik açıdan rüzgarın yoğun olabileceği yerler aşağıdaki şekilde sıralanır [22]:

1. Basınç değişiminin yüksek olduğu yerler,
2. Yağışların sürekli esen rüzgara paralel olduğu vadiler,
3. Yüksek, engebesiz tepe ve platolar,
4. Sürekli rüzgar alan az eğimli vadiler,
5. Güçlü rüzgar alanlarının etkisinde kalan tepe ve zirveler,
6. Jeostrofik rüzgar ve yüksek ısı değişimine sahip kıyı şeritleri.

Rüzgar enerjisi sistemlerinin başlıca avantaj sağlayan özelliklerini de şöyle sıralamak mümkündür;

- Rezerv yakıt tüketmezler ve sonsuz denebilecek bir kaynağa sahiptirler,
- Temiz ve yenilenebilir enerji kaynağıdır, çevre kirliliğine sebep olmazlar,
- Yerli kaynak kullanımı sağlandığında, dışa bağımlılık ortadan kalkar ve ekonomik katkı sağlar,
- Elektrik enerjisine dönüştürülmesi, teknik olarak mümkün ve basittir,
- Rüzgar, hava hareketi olduğundan nakil sorunu olmaz,

- Depolanmayı gerektirir ve bu depolama başka bir enerjiye çevrilerek mümkündür,
- Kullanılabilirlikleri için sağlıklı rüzgar ölçümlerinin yapılması ve potansiyel karakterinin belirlenmesi gerekmektedir [23].

Rüzgar, dünya yüzeyine göre bağlı hava hareketidir. Hava yeryüzünde hareket edebilmek için bazı kuvvetlere ihtiyaç duyar. Rüzgarı oluşturan ve hızına etki eden atmosfer içindeki belli başlı kuvvetler gradyan kuvveti, coriolis kuvveti, merkezkaç kuvveti ve sürtünme kuvveti şeklinde sıralanır.

3.2.1 Gradyan kuvveti

Gradyan kuvveti havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru hareket ettirecek şekilde etki eder [24]. Havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru yönlendirir. Gradyan kuvveti Denklem 3.1'deki gibi ifade edilir.

$$G = \frac{1}{\rho_h} \frac{\Delta P}{h} \quad (3.1)$$

G gradyan kuvveti (atm), ρ_h hava yoğunluğu (kg / m³), ΔP izobarlar arası basınç farkı, h izobarlar arası uzunluk (m) olarak ifade edilmektedir.

3.2.2 Coriolis kuvveti

Coriolis kuvvetine yer dönmesinin saptırıcı kuvveti de denilmektedir. Genellikle iki grupta incelenir. Bunlardan ilki enlem dereceleri boyunca meydana gelen hareketler için yer dönmesi saptırıcı kuvveti, ikincisi ise ekvator dan kutuplara doğru veya ters yönde meydana gelen hareketler için yer dönmesi saptırıcı kuvvetidir. Kutupların eksenini etrafında batıdan doğuya doğru dönen dünyanın, hava kütlesi iki kuvvetin etkisindedir. Bunlar yerçekimi kuvveti ve merkezkaç kuvvetidir. Yerçekimi kuvveti, cismi yerin merkezine doğru çeker. Merkezkaç kuvveti ise cismi eksenden uzaklaştırmak ister [21].

3.2.3 Merkezkaç kuvveti

Merkezkaç kuvveti girdap hareketi gösteren hava bölümlerinde rüzgarın yönü ve hızı üzerinde etkili olur. Bir basınç alanında basınç eğrileri ne kadar yuvarlak ise havanın girdap içindeki dönüş hareketi o kadar hızlı, merkezkaç etkisi de o oranda çok olur. Bu etki izobar eğrileri düzleştikçe azalır. Merkezkaç kuvvetinin birim kütleye etki eden ivmesi;

$$a = \frac{V^2}{R} \quad (3.2)$$

a , Merkezkaç kuvvetin birim kütleye etki eden ivmesi (m/sn^2),

V , Rüzgarın hızı (m/s),

R , Rüzgarın döner çapı (m) olarak ifade edilmektedir [25].

3.2.4 Sürtünme kuvveti

Rüzgarın yer yüzeyine sürtünmesi nedeniyle oluşur. Bu nedenle rüzgar hızını yavaşlatır. Sürtünme kuvvetinin etkisi, yer yakınında en yüksek değerdedir. Rüzgarlar sürtünmenin etkisinde olup olmamasına göre iki gruba ayrılır. Bunlar: Yüksek seviye rüzgarları ve yeryüzü rüzgarlarıdır. Yüksek seviye rüzgarları, sürtünme kuvvetinin etkisinde değildir. Yeryüzü rüzgarları, sürtünme kuvvetinin etkisindedir [21].

3.2.5 Rüzgar türleri

Rüzgarlar genellikle iki ana grupta incelenir. Bunlar sürekli ve süreksiz rüzgarlardır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Genel olarak rüzgarların sınıflandırılması [26].

Sürekli Rüzgarlar					Süreksiz Rüzgarlar		
Alize Rüzgarları	Kontr-Alize Rüzgarları	Muson Rüzgarları	Meltem Rüzgarları		Föhn Rüzgarları	Siklon Rüzgarları	Antisiklon Rüzgarları
			Kara ve Deniz Meltemleri	Dağ ve Vadi Meltemleri			

Alize rüzgarları; kuzey ve güney yarım kürede 30° enlem üzerinde bulunan yüksek basınç kuşağından ekvator üzerindeki alçak basınç kuşağına doğru eserler. Burada ısınan hava kütlesi yükselmeye başlar ve atmosferin yüksek bölgelerinde alize rüzgarlarının ters yönünde esen rüzgarlar oluşur. Bu rüzgarlara kontralize rüzgarları adı verilir. Meltem rüzgarları; karaların denizlerden ve dağların vadilerden daha çabuk ısınıp soğuması sonucu, üzerlerinde bulunan hava kütlelerini etkilemesi nedeni ile oluşurlar.

Föhn rüzgarları ise dağlık bölgelerdeki hava hareketlerinden meydana gelirler. Hareket halindeki bir hava kütlesi, yüksekçe bir dağa çarparak her 100 m’de 0,5 °C soğuyarak yükselir ve daha sonrada dağın diğer yamacına her 100 m’de 1 °C ısınarak iner [26].

Bir rüzgar türbininden elde edilebilecek olan enerjinin belirlenebilmesi için, rüzgarın temel parametreleri olan; esme hızı, esme süresi ve esme yönünün belirlenmesi gerekir. Bunun için de, rüzgar ölçümlerinin yapılması ve belirli bir periyot içerisindeki dağılımının gözlenmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, çevredeki doğal olaylar da gözlenmelidir [27].

3.2.6 Rüzgar gücü

Rüzgar gücü, hava yoğunluğuyla doğrusal olarak değişir. 15°C sıcaklıkta ve 1 atm basınçta hava yoğunluğu 1.225 kg / m³’tür [28]. En genel haliyle hava yoğunluğu Denklem 3.3’de gösterilmiştir.

$$\rho_h = \frac{PMW10^{-3}}{RT} \quad (3.3)$$

Bu denklemde; P, mutlak basınç (atm), R, ideal gaz sabiti, T, kelvin cinsinden mutlak sıcaklık, MW, havanın moleküler ağırlığı olarak ifade edilir.

Rüzgar türbini çıkış gücü rotorun süpürdüğü alanla doğrusal olarak değişir. Yatay eksenli türbin için, rotorun süpürdüğü alan Denklem 3.4’de gösterilmiştir. Bu denklemde R metre cinsinden kanat çapı, bir başka ifadeyle rüzgarın döner çapı olarak ifade edilmektedir [28].

$$A = \frac{\pi}{4} R^2 \quad (3.4)$$

Hava, diğer akışkanlarda olduğu gibi kinetik enerjiye sahiptir. V_1 hızı ile hareket eden m kütlesine sahip havanın kinetik enerjisi;

$$E_k = \frac{1}{2} m V_1^2 \quad [Nm] \quad (3.5)$$

şeklindedir. Hareketli hava kütlesi, kanat süpürme alanı A olan bir rüzgar türbininin pervanesine dikey yönde çarptığında, hava kütlesinde bulunan kinetik enerjinin bir kısmı frenlenir ve frenlenen enerji türbin kanatlarının çalıştırılmasında kullanılır [29]. Türbin kanatlarına çarpan ρ_h yoğunluğundaki havanın kütleli debisi;

$$\dot{m} = \rho_h V_l A \quad [\text{kg/s}] \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir.

Güç birim zamanda yapılan iş olarak tanımlandığında, rüzgarın iş yapabilme yeteneği (P_r);

$$P_r = \frac{\left(\frac{1}{2} m V_l^2\right)}{t} \quad [\text{Nm/s}] \quad (3.7)$$

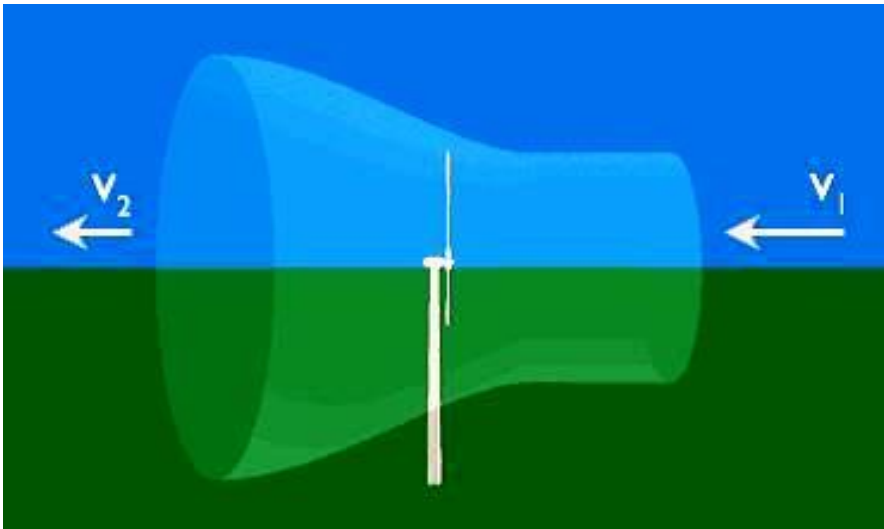
olarak ifade edilebilir. $dm/dt = \dot{m}$ şeklinde ifade edilip, $\dot{m}$ yerine (3.6) numaralı eşitlik yazılırsa, rüzgardan elde edilebilecek teorik güç aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P_r = \frac{1}{2} \rho_h A V_l^3 \quad [\text{W}] \quad (3.8)$$

Tüm sistemlerde olduğu gibi, rüzgar dönüşüm sistemlerinde de bu teorik gücün tamamının kullanılması, teknik olarak mümkün değildir. Bir rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminde, toplam verim;

- Türbin verimi
- Dişli mekanizmasının verimi
- Mekanik kavrama sisteminin verimi
- Generatör verimi değerlerine bağlıdır.

Bunlardan en önemlisi C_p ile ifade edilen türbin verimidir [29]. Bununla birlikte bir rüzgar türbininde elde edilebilecek verimin %59,26'yı aşamayacağı Betz tarafından ortaya konmuştur [30]. Betz teoremi ile ilgili olarak, rüzgar pervanesinden geçen havanın enerji hareketi Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4. Betz kanunu [17].

Rüzgar pervanesinden geçen havanın enerji dengesi;

$$E_{kt} = E_{k1} - E_{k2} \quad [Nm] \quad (3.9)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Hareket halindeki rüzgarın taşıdığı kinetik enerji, kinetik enerjinin tanımına göre düzenlenecek olursa (3.9) numaralı eşitlik, aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$E_{kt} = \left(\frac{1}{2}\right) m (V_1^2 - V_2^2) \quad [Nm] \quad (3.10)$$

Güç; birim zamanda yapılan iş olduğuna göre, türbinden elde edilecek güç;

$$P_t = \frac{E_{kt}}{t} = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{dm}{dt}\right) (V_1^2 - V_2^2) \quad [Nm/s] \quad (3.11)$$

şeklinde yazılır. Burada; dm/dt , $\dot{m}$ ile ifade edilirse, türbinden elde edilecek güç;

$$P_t = \left(\frac{1}{2}\right) \dot{m} (V_1^2 - V_2^2) \quad [W] \quad (3.12)$$

şeklini alır. Rüzgarın türbin kanatlarında yapacağı iş, aynı zamanda rüzgar tarafından kanatlara uygulanan birim zamandaki basınca bağlıdır:

$$P_t = S \cdot V \quad [W] \quad (3.13)$$

Rüzgarın, türbin kanatlarına yapacağı basınç ise;

$$S = \dot{m} (V_1 - V_2) \quad [kgm/s^2] \quad (3.14)$$

şeklinde ifade edilebilir. (3.12) ve (3.13) numaralı denklemler birbirine eşitlenip, (3.14)'de yerine yazılırsa;

$$\dot{m} V (V_1 - V_2) = \left(\frac{1}{2}\right) \dot{m} (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.15)$$

elde edilir. Buradan;

$$V = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad [m/s] \quad (3.16)$$

şeklinde bir sonuç elde edilir. Bu durumda, türbine gelen rüzgar hızının, kanatların önündeki ve arkasındaki rüzgar hızlarının ortalaması olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. (3.6) numaralı eşitlik kullanılarak, türbinden geçen havanın kütleli debisi ($\dot{m}$), (3.12)'de yerine yazılırsa;

$$P_t = \left(\frac{1}{2}\right) \rho_h A V (V_1^2 - V_2^2) \quad [\text{W}] \quad (3.17)$$

ifade elde edilir. (3.16) numaralı eşitlik, (3.17)'de yerine yazılırsa;

$$P_t = \left(\frac{1}{4}\right) \rho_h A (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad [\text{W}] \quad (3.18)$$

ifadesi elde edilir. P_t ve P_r değerleri birbirine oranlandığında;

$$C_p = \frac{P_t}{P_r} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \right] \quad (3.19)$$

türbin verimi olan C_p elde edilir. $\frac{V_2}{V_1} = n$ ile tanımlanırsa;

$$C_p = \left(\frac{1}{2}\right) (1 - n^2)(1 + n) \quad (3.20)$$

şeklinde verim katsayısı fonksiyonu elde edilir. Fonksiyonun türevini alınıp sıfıra eşitlendiğinde, C_p 'yi maksimum yapan n değeri 1/3 olarak bulunur. Bunun anlamı, C_p 'nin maksimum olması için kanatların, rüzgarın türbin giriş hızı, türbinden çıkış hızının 3 katı olacak şekilde dizayn edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu durumda türbinden elde edilecek maksimum verim, 0,5926 olacaktır. Pratikte bu oran yaklaşık %45 olabilmektedir [31].

3.3 Rüzgar Türbinlerinde Kanat Hız Oranı

Kanat hız oranı, V rüzgar hızına, kanatların açısal dönme hızına ω ve kanat çapına R bağlı olarak değişmektedir [32]. Bu ifade başarımlı katsayısını belirleme açısından da önemlidir. Kanat hız oranı Denklem 3.21'de ifade edilmiştir.

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (3.21)$$

3.4 Yüksekliğe Bağlı Rüzgar Hızı Değişimi

Rüzgar hızı, ölçüm yapılan noktanın coğrafi koşullarına ve yüksekliğine bağlı olarak değişir. Bu nedenle uygulama ile teorik esasların örtüşebilmesi için rüzgar türbininin kurulması planlanan yükseklikteki rüzgar hız değerlerinin (V_r) ölçülmesi ya da hesaplanması gereklidir. Ölçümlerin yapıldığı yükseklik (H_{ref}) ile rüzgar türbini kule yüksekliğinin (H) farklı olması durumunda; ölçüm değerleri (V_{ref}), Hellmann

katsayısı (μ) kullanılarak (3.22) numaralı eşitlik yardımıyla istenilen yüksekliklere aktarılabilmektedir [26].

$$V_r = V_{\text{ref}} \left(\frac{H}{H_{\text{ref}}} \right)^{\mu} \quad [\text{m/s}] \quad (3.22)$$

Hellmann katsayısı da rüzgar hız ölçüm yerinin coğrafi özelliklerine bağlıdır ve Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Hellmann katsayısının değişimi [29].

Ölçüm Yerinin Tanımı	μ (Hellmann Katsayısı)
Açık deniz, kıyı şeridi	0,14
Açık alan ve tarlalar	0,18
Ağaçlık alan ve şehir	0,28
Yüksek binalı kentsel alan	0,27-0,40

4. RÜZGAR HIZI TAHMİNİNİN ÖNEMİ

Rüzgar, yenilebilir bir enerji kaynağı olması, genel olarak basit bir yapıda olması ve elde edilen verimin yüksek olması, diğer santrallere göre çok kısa bir sürede kurulabilmesi nedenleriyle elektrik enerjisi üretiminde kullanımı sürekli olarak artan bir enerji kaynağıdır. Ancak, rüzgar santrallerinin diğer konvansiyonel santrallerden farklı yapıda olması nedeniyle bulundukları bölgelerde elektrik şebekesine bağlantıları sırasında güç kalitesi yönünden bazı sorunlar meydana gelmektedir. Bu sorunları giderebilmek adına yapılan çalışmalar göstermektedir ki; doğruluk oranı yüksek rüzgar tahminlerinin yapılması, uygun ve teknik kapasitesi yüksek jeneratör seçimi, gerilim dalgalanmalarının en aza indirilmesi, harmonik ve flikerin belirlenen sınır değerler içinde tutulması, rüzgar türbininin arıza ve arıza sonrası tepkilerinin ilgili etmenlere uyması, aktif ve reaktif gücün kontrolünün yapılması güç kalitesini artıran en önemli faktörlerdir [33].

Son yıllarda fosil yakıt kaynaklarının tükenmeye başlaması ve çevresel kaygılar nedeniyle mevcut enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı gittikçe artmaktadır. Bu enerji kaynakları içerisinde rüzgar enerjisi; temiz, sürdürülebilir ve diğer kaynaklara göre daha az maliyetli olmasından dolayı ön plana çıkmaktadır. Ancak rüzgardan elde edilen enerjinin rüzgar hızına bağlı olarak sürekli değişimi, şebekelerde üretim/tüketim dengesizliğine neden olabilmektedir. Bu dengesizlik sonucunda ortaya çıkabilecek olan gerilim ve frekans değişimi gibi önemli sorunların önüne geçebilmek için şebekedeki elektrik üretimi ve tüketimi arasındaki denge sürekli olarak korunmalıdır. Rüzgar türbinlerindeki enerji üretimi, rüzgar hızının doğrudan bir fonksiyonudur ve klasik üretim sistemlerinden farklı olarak üretim/tüketim dengesi ayarı kolaylıkla yapılamamaktadır. Ancak “İletim Sistemi İşletmecileri” elektrik üretimi ile tüketimi arasındaki dengeyi yönetebilmek için üretim araçlarının kullanımını, yük profillerine cevap verecek şekilde önceden planlamaktadırlar. Bu nedenle spot piyasalarda katılımcılar belirli bir üretim maliyetindeki enerji miktarları tahminlerini en az bir gün önceden bildirmektedirler [33].

Rüzgar gücü tahmini için en çok kullanılan yöntemlerden biri rüzgar hızının tahminiyle güç eğrilerinden yararlanarak güç değerlerinin hesaplanmasıdır. Bu yüzden Avrupa'daki birçok kurum, rüzgar tahmin modelleri üzerine çalışmaktadır. Rüzgar hızının tahmin edilebilmesi ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Aksi halde yanlış bildirimler sonucunda eksik veya fazla enerji için cezalar ödenmesi gerekmektedir. Ülkemizde şu an için bu şekilde gelişmiş bir spot piyasa bulunmamaktadır. Ancak toplam rüzgar gücünün 1000 MW'ı aştığı düşünülürse böyle bir düzenlemeye ihtiyaç duyulacağı açıktır, böyle bir rüzgar gücü tahmini için ise en çok kullanılan yöntemlerden biri rüzgar hızının tahminiyle güç eğrilerinden yararlanarak güç değerlerinin hesaplanmasıdır. Ayrıca piyasaya katılımın dışında, rüzgar ve klasik santrallerin üretiminin en uygun olacak şekilde kombine işletiminde veya bazı enerji depolama sistemleri ile birlikte rüzgarın kullanımında rüzgar tahminlerinden faydalanılabilir [34].

4.1 Rüzgar Hızı/Gücü Tahminlerinin Zaman Bazında Sınıflandırılması

Rüzgar tahmin metotlarının zaman bazında sınıflandırılması kesinlik arz etmemektedir. Bununla beraber rüzgar tahmini dört kategoride incelenebilir;

- Çok kısa vadeli tahminler; birkaç saniyeden 30 dakikaya kadar,
- Kısa vadeli tahminler; 30 dakikadan 6 saate kadar,
- Orta vadeli tahminler; 6 saatten 1 güne kadar,
- Uzun vadeli tahminler; 1 günden 1 haftaya kadar (ve daha fazlası) [35].

Çizelge 4.1. Rüzgar tahminlerinin zaman bazında sınıflandırılması ve uygulamaları

Zaman dilimi	Aralık	Uygulamalar
Çok kısa vadeli	birkaç saniyeden 30 dakikaya kadar	- Elektrik piyasası faiz oranları - Düzenletici eylemler
Kısa vadeli	30 dakikadan 6 saate kadar	- Ekonomik yük dağıtım planlaması - Yük arttırma/azaltma kararları
Orta vadeli	6 saatten 1 güne kadar	- Jeneratör çevrimiçi/çevrimdışı olma kararları - Bir sonraki gün ki elektrik piyasasında operasyonel güvenlik
Uzun vadeli	1 günden 1 haftaya kadar (ve daha fazlası)	- Birim taahhüt kararları - Rezerv gereklilik kararları - Optimal işletme maliyeti için bakım planlaması

5. RÜZGAR GÜCÜ TAHMİN METOTLARINA GENEL BİR BAKIŞ

5.1 Devamlılık Metodu

Bu yöntem aynı zamanda “Saf tahminci” olarak da bilinir. Bu metotta, “t” anındaki rüzgar hızının “t+Δt” anındaki ile aynı olacağı varsayılmıştır. İnanılmaz şekilde bu yöntem, çok kısa vadeliden kısa vadeli tahminlere kadar, fiziksel ve istatistiksel metotların birçoğunda çok fazla doğruluğa ulaşmaktadır. Sanayide halen çok kısa vadeli tahminler için kullanılmaktadır. Bu nedenle herhangi bir tahmin metodu geliştirildiğinde, ilk kez, devamlılık metodunun klasik etmenlerine karşı, bu tekniğin ne kadar üzerine çıkabildiğini kontrol etmek için test edilmelidir [36].

5.2 Fiziksel Yaklaşım

Fiziksel sistemler, atmosferin ayrıntılı fiziksel tanımlamalarına dayalı parametreleri kullanır. Genellikle meteoroloji hizmetlerinin kabaca bir grid üzerinde verdiği rüzgar hızları, rüzgar çiftliğinin bulunduğu bölgedeki koşullara dönüştürülür [37].

Sayısal Hava Tahmini rüzgar hızı tahmini için fiziksel bir yaklaşımdır. Sayısal hava tahmin modelleri karmaşık matematiksel modellerin çözümü için çalışır ve bu çözümler için sıcaklık, basınç, yüzey pürüzlülüğü ve engeller gibi hava verilerini kullanırlar. Yüksek miktarda hesaplama yükünden dolayı sayısal hava tahmin modelleri süper bilgisayarlar üzerinde işlenirler. Sayısal hava tahmin modelleri, bilgi almadaki zorluklar nedeniyle günde 1 veya 2 kez çalıştırılırlar ve maliyetleri oldukça yüksektir. Bu durum orta ve uzun vadeli (>6 saat) tahminlerde kullanışlılığı sınırlar. Sayısal hava tahmin modelleri en doğru tahminlerini hava koşulları kararlı olduğunda verirler [38,39].

5.2.1 Mesoscale model 5 (MM5)

MM5 hava tahmin modeli, Amerika'da bulunan Ulusal Atmosferik Araştırma Merkezi tarafından geliştirilen, şu anda birçok modern meteoroloji örgütü ve üniversiteler tarafından tercih edilen bir modeldir [40].

Özellikle tercih edilmesinin nedeni; atmosferde meydana gelen düşey hareketleri 10km ve altındaki çözünürlüklerde daha sağlıklı hesaplayabilmesidir. Bu nedenle kısa vadeli ve yerel tahminlerde oldukça başarılı bir modeldir. MM5 modeli sayesinde, daha küçük ölçekte alanlar için sağlıklı ve sık zaman aralıklarında ayrıntılı hava tahmini yapmak mümkün olmaktadır [40].

MM5, Türkiye’de günde 4 defa 00, 06, 12, 18 UTC’de, iki ayrı alanda iki farklı çözünürlükte eşzamanlı olarak çalıştırılmaktadır. İç içe geçmiş bu alanların yatay çözünürlüğü ana bölge için 27 km, sadece Türkiye sınırlarında tahmin yapılan bölge için 9 km’dir. Tahmin periyodu 48 saattir. En basit tanımla, sayısal hava tahmini, atmosferin durumunu gösteren değişkenlerin (sıcaklık, rüzgar, nem ve basınç) zamana ve yere bağlı değişimlerini ifade eden denklemlerin (hareket, termodinamik, süreklilik, hidrostatik eşitlik) matematik çözümleri yapılarak gelecekteki durumunu tahmin etme işlemine denir. Başka bir ifade ile atmosfer modelleri, belirli bir zaman aralığı için, başlangıç koşullarından hareketle atmosfer simülasyonları yaparlar. Kısa (24-72 saat) ve orta (72-240 saat) vadeli hava tahminleri için kullanılan modeller 2 gruba ayrılabilir:

Küresel Modeller: Yatay çözünürlüğün Spektral (yatay çözünürlüğün dalga sayısı ile orantılı olduğu) veya grid (yatay çözünürlüğün iki grid noktası arasındaki mesafe ile orantılı olduğu) olarak çözümlendiği bu model türünde basit hidrostatik eşitlik kullanılmaktadır. Yani havanın ağırlığıyla düşey basınç gradyan kuvveti arasında bir denge olduğu kabul edilmektedir. Küresel atmosferik modeller ve genel dolaşım modelleri küresel modellere örnek olarak verilebilir. Bu model türünde düşey ivme hesaplamalarda ihmal edilir.

Sınırlı Alan Modelleri: Bu tür modellerde küresel modellerin tersine yatay çözünürlük dalga sayısı ile değil grid noktaları arasındaki mesafe ile orantılıdır. Yani küresel modellerde dalga sayısı arttığında çözünürlük artarken sınırlı alan modellerinde grid sayısı artınca ki bu durumda grid noktaları arasındaki mesafe azalır, çözünürlük artar. Sınırlı alan modellerinin bazılarında hidrostatik denge kabul edilirken (Sinoptik/Meso-scale modeller) bazılarında ise hidrostatik denge eşitliği kabul edilmez (Cloud-scale/Cloud Resolving modeller). Bunlar genellikle çok yüksek çözünürlük gerektiren tahmin problemlerinde kullanılmaktadır [40].

5.2.2 Zephyr / Prediktor

Zephyr/Prediktor modeli, Danimarka'da bulunan Risoe Ulusal Laboratuvarı Meteoroloji Bolumu tarafından WASP ailesi içerisinde geliştirilmiştir [41]. Genellikle kısa süreli 0-48 saat arasındaki tahmin aralığını kapsar. Bu model, interneti de aktif bir şekilde kullanarak tahminlerini yapmaktadır. Önceleri Prediktor modeli geliştirilmiş, Zephyr modeli daha sonra geliştirilerek Prediktor ile birleştirilmiştir.

5.2.3 Rüzgar gücü tahmin aracı

WPPT, rüzgar gücünün öngörülmesi için başka bir felsefeyi uygulamaktadır. Danimarka Teknik Üniversitesinde Enformatik ve Matematiksel Modelleme Departmanı ve Eltra ile Elsam arasında bir işbirliği sağlamıştır. WPPT, daha büyük bölgelerde rüzgar gücü üretimini tahmin etmek için istatistiksel metotları uygulamaktadır. WPPT, bölgedeki rüzgar türbinlerinin toplam popülasyonunun yalnızca bir alt grubunu kapsayan online veriyi kullanır. İlgili bölge, her biri bir referans rüzgar çiftliği tarafından kapsanan alt bölgelere ayrılır. Daha sonra, yarım saatten 36 saate kadar değişen zaman periyotları boyunca rüzgar gücünü tahmin etmek için, iklimsel değişkenlerin yerel ölçümleri ve rüzgar hızının ve yönünün meteorolojik tahminleri kullanılır. Alt bölgedeki tüm rüzgar türbinlerini kapsamak için, her bir alt bölgeye ilişkin rüzgar çiftliği güç tahmini yapılır ve daha sonra tüm bölge için bir tahmine ulaşmak amacıyla alt bölgelere ilişkin tahminler bir araya getirilir [42].

WPPT'ye ilişkin giriş verisi, referans rüzgar çiftliklerindeki güç çıkışı, rüzgar hızı, rüzgar yönü ve hava sıcaklığıdır. Bu veri, 5 dakikalık ortalama değerler olarak örneklenir. Buna ilave olarak, modellere girdi olarak meteorolojik tahminler kullanılır. Tahminler her 6 saatte bir güncellenir ve 1 saatlik çözünürlükle 48 saat öndeki bir periyodu kapsar. Genel olarak, WPPT, çevrimiçi ölçümler ile tahmin edilen meteorolojik değişkenler arasındaki en uygun ağırlığı belirlemek için istatistiksel metotları kullanır.

WPPT'nin ilk sürümü 1994 yılının Ekim ayında devreye girmiştir. Bu sürüm herhangi bir SHT verisini kullanmamıştır. Tahminler, yalnızca yedi rüzgar çiftliğine ilişkin ölçümlerin istatistiksel analizini esas almaktaydı. Bu tahminler, aşağıdaki nedenlerden dolayı 8 saati aşan tahmin bölgeleri için uygun değildi:

- Ölçüm cihazının güvenilirliği zayıftı;
- Çok az sayıda rüzgar çiftliği mevcuttu;
- Meteorolojik tahminler eksikti.

1996 yılında yeni bir proje başlatıldı. Bu projenin hedefi, daha fazla rüzgar çiftliğini kapsayarak, cihazların güvenilirliği artırılarak ve iyi meteorolojik tahminler elde edilerek daha iyi tahminler elde etmektir. ELTRA dağıtım merkezi, iyi sonuçlarla bu sistemi kullanmaktadır. Orada, 2 GW'tan daha fazla kurulmuş rüzgar gücü kapasitesiyle tahminler sağlanmaktadır [43].

5.2.4 Previento

Previento modeli Oldenburg Üniversitesi tarafından geliştirilen bir modeldir [44]. Rüzgar türbini yüksekliğindeki rüzgar hızını dikkate alan bir modeldir. Previento modeli, sayısal hava tahmin verilerine ek olarak, orografi, pürüzlülük ve stabilite verilerini alıp çalıştırılarak kısa süreli rüzgar elektrik santralinden elektrik enerji üretim tahmini yapmaktadır.

5.2.5 eWind

eWind™ sistemi Gerçek Rüzgar Çözümleri tarafından (A.B.D) geliştirilmiştir ve şimdi yaklaşık 1000 MW'lık kurulmuş güçle Güney Kaliforniya Edison (SCE) firmasında çalışmaktadır. Sistem, dört temel bileşenden oluşmaktadır:

- Yüksek-çözünürlüklü üç-boyutlu fizik-tabanlı atmosferik nümerik model grubu;
- Uyarlanabilir istatistiksel modeller;
- Tesis çıkış modelleri;
- Tahmin verme sistemi.

Fizik-tabanlı atmosferik modeller; kütle, momentum ve enerji ve nemli hava için durum denkleminin temel fiziksel ilkelerini temsil eden bir matematiksel denklem grubudur. Bu modeller, dünya genelindeki işlevsel hava tahmin merkezlerinde kullanılanlara benzerdir. Ancak, eWind™ modelleri daha yüksek bir çözünürlükte çalıştırılır (başka bir deyişle, daha küçük şebeke hücreleriyle) ve modellere dahil edilen fizik ve veriler, rüzgar tahmin uygulamaları için yüksek çözünürlüklü simülasyonlar için özel olarak konfigüre edilmektedir.

Tahminleri oluşturmak için mevcut eWind™ konfigürasyonu tekli bir numerik model (Meso-Ölçekli Atmosferik Simulasyon Sistem modeli) kullanmaktadır.

İstatistiksel modeller, belirli bir konum için tahmin edilecek olan spesifik parametrelerin ve fizik tabanlı atmosferik modellerin çıkışı arasındaki temel ilişki grubudur. Bu uygulamada, özel parametreler, beş alt istasyonun her birine güç sağlayan rüzgar türbinlerinin konumundaki hava yoğunluğu, rüzgar hızı ve yönüdür. İstatistiksel modelin rolü, fiziksel tabanlı modelin çıkışını, çözilemeyen ya da aksi takdirde fiziksel model tarafından kullanılan şebekelerde yeterli bir şekilde simule edilebilen diğer süreçler ve alt-şebeke ölçeğini hesaba katmak için ayarlamaktır.

Sistemin üçüncü bileşeni rüzgar türbini çıkış modelidir. Bu model, atmosferik değişkenlerle rüzgar türbini çıkışı arasındaki bir ilişkidir. Rüzgar türbini çıkışı belirli bir rüzgar türbini konfigürasyonuna uygulanan sabit bir ilişki ya da yakın zamandaki (örneğin, 30-gün) atmosferik veriden ve rüzgar türbini çıkış verisinden elde edilen basit istatistiksel bir ilişki olabilir. Son parça, tahmin iletim sistemidir. Kullanıcı, tahmin bilgilerini, e-posta, FTP iletimi, fakslanan bir sayfa ya da web sayfası ekranında alma seçeneğine sahiptir.

SCE gün-öncesi güç üretimi için, sistem, günde iki tahmin verecek şekilde konfigüre edilmektedir: öğleden sonra 5'te bir öğleden sonra tahmini ve sabah 5:30'da bir sabah tahmini. Her bir çevrim aşağıdaki üç kısımdan oluşmaktadır.

- Fiziksel modelin gerçekleştirilmesi;
- Önceki 30 günlük fiziksel model tahminlerini ve ölçülmüş verileri esas alan istatistiksel modelin yeniden yapılması;
- Mevcut çevrimde her bir tahmin saati için bu istatistiksel denklemlerin değerlendirilmesi.

5.2.6 Sipreolico

Sipreolico, III. Carlos Üniversitesi, Madrid, İspanya ve iletim sistem operatörü Red Electrica de Espana tarafından geliştirilmiş istatistiksel-tabanlı bir tahmin aracıdır. Halen, 36 saate kadar olan bir tahmin bölgesiyle saatlik tahminleri sağlayan bir prototiptir. Bu prototipler, zaman serisi analiz algoritmalarına giriş verisi olarak çevrimiçi güç ölçümleri ve meteorolojik tahminler kullanılarak üretilir. İlk olarak Sipreolico tekli rüzgar çiftlikleri için tahmin üretir. Her bir rüzgar çiftliğine ilişkin tahminler var olduktan sonra, bölgelerde toplanır. Son olarak, tüm İspanya için

Üretim tahminleri oluşturulur. Belirli bir rüzgar iftliği için, Sipreolico, dört giriş tipini kullanmaktadır: rüzgar iftliğinin karakteristikleri; gerçek bir g eğrisine ulaşmak için gelen rüzgar ve çıkış gücünün tarihsel kayıtları; g çıkışının online ölçümleri ve HIRLAM tarafından sağlanan meteorolojik tahminler. Tahmin oluşturmak için Sipreolico'nun kullandığı algoritma, hangi giriş tipinin mevcut olduğuna bağlıdır. Giriş verisi temel, ilave ya da tamam olabilir. Temel veriler, her rüzgar iftliği için mevcut olan verilerdir ve standart güç eğrisi ve meteorolojik tahminlerden oluşmaktadır. İlave veriler, temel veriler artı gerçek güç eğrisidir. Tam veriler, temel veriler artı üretilen enerjinin evrimii ölçümleridir.

Yalnızca temel veriler mevcutsa, tahmin, rüzgar hızı tahminlerini ve mevcut türbinlerin tekli g eğrilerini toplayan standart g eğrisini esas almaktadır. İlave veriler söz konusu olduğunda, bir rüzgar iftliği için, gelen rüzgar ve çıkış gücüne ilişkin tarihsel kayıtlar mevcuttur. Gerçek bir rüzgar iftliği eğrisi oluşturulacak ve tahminler daha doğru olacaktır. Bu durumda, rüzgar yönü tahminleri ve rüzgar hızı hesaba katılabilir. Online lmler mevcutsa, istatistiksel bir zaman serisi analizi gerçekleştirilir. Bu metot en doğrusudur ve Sipreolico'nun ana kısmıdır. Halen, şebekeye bağlanan rüzgar iftliklerinin %80'inden fazlası evrimii bilgi sağlamaktadır. Bu, rüzgar iftliklerinin gücü için doğru tahminlerin var olduğu anlamına gelmektedir. Andalusia bölgesinde, Güney İşpanya'da Sipreolico'nun başarımı ortalamanın üstündedir. Bu göze çarpan başarım, söz konusu bölge için HIRLAM'ın kalitesine atfedilebilir. Bunun zıttı olarak, Navarra bölgesinde Sipreolico'nun başarımı ortalamanın altındadır. Navarra'daki rüzgar çiftlikleri sahillenden uzakta yer almaktadır ve bölge de çok komplekstir. Bu, rüzgar iftliklerinin anemometreleri tarafından ölçülmüş olan rüzgar hızları ile HIRLAM tahminleri arasındaki büyük farkların nedenidir. Rüzgar iftliklerinin konumu, 12 saati aşan tahmin bölgeleri için zayıf tahminlere neden olmaktadır. Ancak, İşpanya'nın tümüne ilişkin başarımı yeterlidir. Münferit tahminlerin toplanmasının, Sipreolico'nun başarımı üzerinde pozitif bir etkisi vardır.

5.2.7 Anemos

Aneomos projesi, büyük güçlü kara ve deniz rüzgar elektrik santrallerinden yapılan üretimin tahmini için geliştirilen ve 27 ülkeye mensup niversite, enstitü, kamu kuruluşu ve özel şirket gibi kuruluşların bir araya gelerek oluşturdukları bir konsorsiyumdur [45].

5.2.8 AWPPS modeli

Fransa’da geliştirilen bu modeli 0-72 saat arasında tahmin yapabilmektedir. Bulanık sinir ağıları yöntemini kullanarak tahmin yapmaktadır. Özellikle 6-10 saat arası gibi çok kısa süreli tahminler için kullanılmaktadır [46].

5.3 İstatistiksel Yaklaşım

İstatistiksel yaklaşım ölçüm verileri ile eğitime dayanmaktadır ve model parametrelerinin ayarlanması için yakın geçmişteki gerçek ile tahmin edilen rüzgar hızları arasındaki farkı kullanır [38,39]. Bu model kolay ve ucuzdur. Zamanında tahminler sağlarlar. Herhangi bir önceden tanımlanmış modele bağlı değildir, daha doğrusu örneklerle dayalıdır. Eğer örnekler geçmişteki örneklerle uyuşursa hata en aza indirilmiş olur. Yapay sinir ağlarına dayalı yöntemler ve zaman serilerine dayalı modeller bu yaklaşımın alt sınıflarıdır.

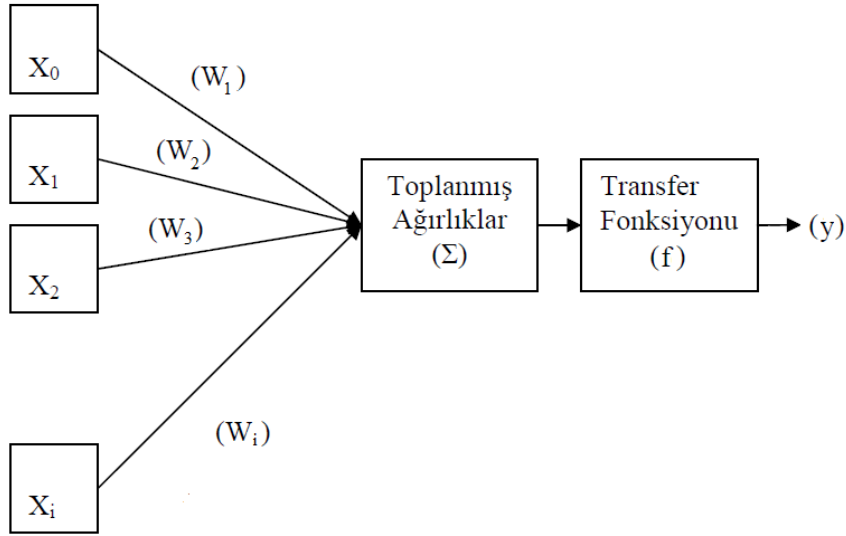
5.3.1 Yapay sinir ağları

5.3.1.1 YSA genel yapısı

Yapay sinir ağları, insan beyni esas alınarak modellenmiş bir sistemdir. Klasik yöntemlerle çözülemeyen problemleri insan beyninin çalışma sistemine benzer yöntemlerle çözmeye çalışır [47]. Bilgisayar ortamında, beynin yaptığı işlemleri yapabilen, karar veren, sonuç çıkaran, yetersiz veri durumunda var olan mevcut bilgiden yola çıkarak sonuca ulaşan, sürekli veri girişini kabul eden, öğrenen, hatırlayan bir algoritma kısaca “Yapay Sinir Ağları” olarak adlandırılır [47,48].

YSA uygulamalarında tek katmanlı ve çok katmanlı sinir ağları kullanılır. Şekil 2’de görülen tek katmanlı ağ, bir girdi ve bir çıktı katmanından oluşur. Burada girdi katmanı işlem yapmaz. Basit olarak ağırlıklarla değiştirilen girdileri, gelecek katmandaki her bir sinire gönderir [49].

Biyolojik sinir hücresinin girdi, işlem ve çıktı karakteristiğini gerçekleştirmek üzere oluşturulmuş bir yapay sinir hücresi Şekil 5.1 ile verilmiştir. Bunlar: girişler (X_i), ağırlıklar (W_i), toplam fonksiyonları (Σ), aktivasyon (transfer) fonksiyonu (f) ve çıkış değeri (y)’dir.



Şekil 5.1 Yapay sinir hücresi.

Bu hücrelerin paralel bağlanması ile katmanlar, katmanların da seri bağlanması ile çok katmanlı yapay sinir ağı oluşur. Genelde bir giriş katmanı, bir gizli katman ve bir de çıkış katmanından oluşan ağılar kullanılmaktadır [50].

Yapay sinir ağı iki aşamalı olarak çalışmaktadır:

- Öğrenme aşaması,
- Test aşaması.

Öğrenme aşamasında ağı giriş-çıkış ilişkisini veren matematiksel bağıntıdaki ağırlık katsayıları (ω) ve eşik katsayıları (b) ayarlanır. Ağırlık vektörü ω , $\omega(0)$ başlangıç değerinden başlanarak ardışıl olarak değiştirilir. $(k+1)$ adım için ω ağırlık vektörü şu şekilde hesaplanır:

$$\omega(k+1) = \omega(k) + \Delta\omega(k) \quad (5.1)$$

$\Delta\omega$, ağırlık değişimi, x giriş vektörü ile öğrenme işareti r 'nin çarpımı ile orantılıdır. Öğrenme işareti r , genel olarak ω , x ve hedeflenen çıkış t 'nin bir fonksiyonudur. Buna göre k . adım için $\Delta\omega(k)$ şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta\omega(k) = \alpha r [\omega(k), x(k), t_j(k)] \quad (5.2)$$

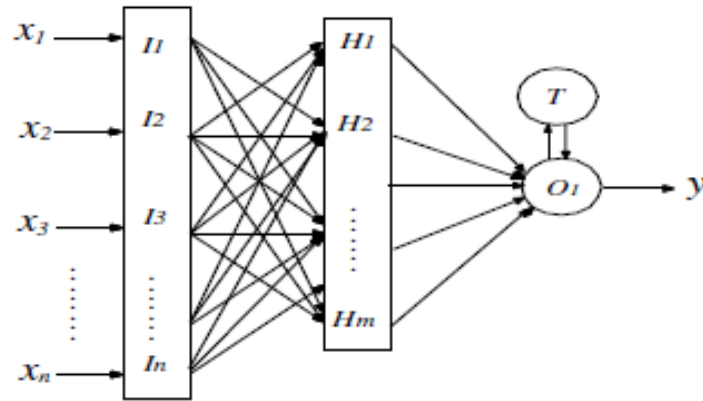
Burada α , öğrenme oranı olarak adlandırılan ve öğrenmenin hızını belirleyen pozitif bir sayıdır.

Test aşamasında, Eğitim aşamasında bulunan ω ve b değerleri kullanılarak elde edilen matematiksel model yardımı ile giriş verilerine karşılık düşen çıkış değerleri bulunur.

Yapay sinir ağı, giriş verisi ile çıkış rüzgar hızları arasındaki ilişkiyi öğrenebilmesi için uzun bir zaman çerçevesinde alınan geçmiş veriler kullanılarak eğitilirler. Yapay sinir ağı, öğrenme için geçmiş veriler ile beslenen bir giriş katmanı, saklı katman/katmanlar ve tahmin sonuçlarını sağlayan çıkış katmanından oluşur. YSA modelleri; ileri beslemeli sinir ağı, çok katmanlı algılayıcılar, tekrarlamalı sinir ağı, radyal tabanlı fonksiyon sinir ağı, ADALINE ağı gibi modeller olabilir.

5.3.1.2 İleri beslemeli ağı

İleri beslemeli bir ağda nöronlar genellikle katmanlara ayrılmışlardır. İşaretler, giriş katmanından çıkış katmanına doğru tek yönlü bağlantılarla iletilir. Nöronlar bir katmandan diğer bir katmana bağlantı kurarlarken, aynı katman içerisinde bağlantıları bulunmaz. Şekil 5.2’de ileri beslemeli ağ için blok diyagram gösterilmiştir.

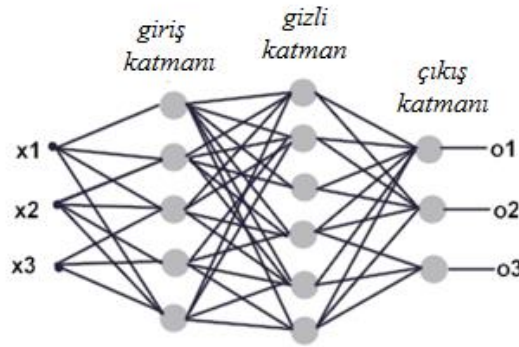


Şekil 5.2. İleri beslemeli ağ için blok diyagram.

İleri beslemeli YSA’da, hücreler katmanlar şeklinde düzenlenir ve bir katmandaki hücrelerin çıkışları bir sonraki katmana ağırlıklar üzerinden giriş olarak verilir. Giriş katmanı, dış ortamlardan aldığı bilgileri hiçbir değişikliğe uğratmadan orta (gizli) katmandaki hücrelere iletir. Bilgi, orta ve çıkış katmanında işlenerek ağ çıkışı belirlenir. Bu yapısı ile ileri beslemeli ağı, doğrusal olmayan statik bir işlevi gerçekleştirir. İleri beslemeli 3 katmanlı YSA’nın, orta katmanında yeterli sayıda hücre olmak kaydıyla, herhangi bir sürekli fonksiyonu istenilen doğrulukta yaklaştırabileceği gösterilmiştir. En çok bilinen geriye yayılım öğrenme algoritması, bu tip YSA’ların eğitiminde etkin olarak kullanılmakta ve bazen bu ağlara geriye yayılım ağı da denmektedir.

5.3.1.3 Çok katmanlı algılayıcılar

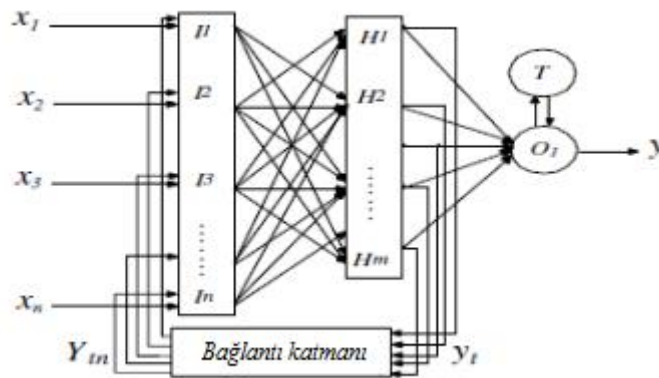
Girdi ile çıktı arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı bir problemi, ADALINE ile çözmek mümkün olamamıştır. Doğrusal olmayan bir ilişki gösteren XOR problemini çözmek amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda Çok Katmanlı Algılayıcı modeli geliştirilmiştir. Rumelhart ve arkadaşları tarafından geliştirilen bu modele hata yayma modeli veya geriye yayılım modeli de denilmektedir. Şekil 5.3'te Çok katmanlı algılayıcı tipi sinir ağı yapısı verilmiştir.



Şekil 5.3. Çok katmanlı algılayıcı tipi sinir ağı yapısı.

5.3.1.4 Tekrarlamalı sinir ağları

Elman tipi tekrarlamalı sinir ağı modelinin yapısı Şekil 5.4'de verilmiştir. Tekrarlamalı sinir ağının nöron karakteristiği ileri beslemeli sinir ağı ile aynıdır ve geri yayılım metodu ile eğitilir. Fakat tekrarlamalı sinir ağı yapısında bir bağlantı katmanı bulunur. Bu katman, saklı katmanın çıkışlarını kopyalayıp bir adım geciktirerek ileri besleme yapısına ekler. Bağlantı katmanı tekrarlamalı sinir ağının yapısına, giriş ve saklı katmanın çıkışları arasında ileri besleme yapısını tersleyerek, hem giriş hem de çıkış katmanlarının bilgisini yansıtır.



Şekil 5.4. Elman tipi tekrarlamalı sinir ağı modelinin yapısı.

Sonuç olarak, öğrenmenin ilerlemesi ile geçmiş bilgisi tekrarlamalı sinir ağı için korunmuş olur.

$$V_p(k+1) = V^{(0)}(n+1) = \left[V^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-an}(1 - e^a) + \frac{b}{a} \quad (5.3)$$

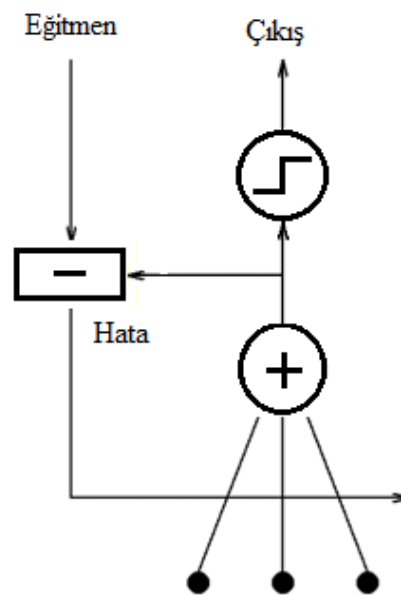
Burada ‘r’ artık (rezidüel) orandır, değeri 0 ile 1 arasındadır.

Tekrarlamalı sinir ağının eğitimi sonucunda, geçmişe ait bilgiler ağı yansıtılmış olur. Zaman serisi veri tahmininde basitçe ileri beslemeli ağ kullanarak geçmiş bilgileri sağlamak zordur. Fakat tekrarlamalı sinir ağı niteliğinin sahip olduğu geri besleme yapısını onu etkili kılar.

5.3.1.5 Adaline ağlar

1959’da, Stanford üniversitesinden Bernard Widrow, basit nöron benzeri elemanlara dayanan ve “Adaline” olarak adlandırılan bir adaptif lineer elemanı geliştirmiştir. Adaline yapısı tüm sinir ağlarının en basitidir ve öğrenme için danışmanlı öğrenmeyi kullanır. Adaline ve iki tabakalı biçimi olan “madaline” ses tanıma, karakter tanıma, hava tahmini ve adaptif kontrol gibi çok çeşitli uygulamalar için kullanılmıştır.

Adaline birçok uygulama için oldukça iyi çalışmasına rağmen lineer problem uzayıyla sınırlıdır. Lineer transfer fonksiyonu kullanırlar. Giriş ve istenilen çıkış desenlerinin tekrar tekrar ağı uygulanmasıyla eğitim gerçekleştirilir. Desenlerin doğru sınıflara ayrılmasıyla, hatalar minimize edilerek öğrenme gerçekleştirilir. Eğitimden sonra adaline, yeni girişleri kazandığı deneyime göre sınıflandırabilir. Şekil 5.5’de Adaline sinir ağı modelinin yapısı verilmiştir.

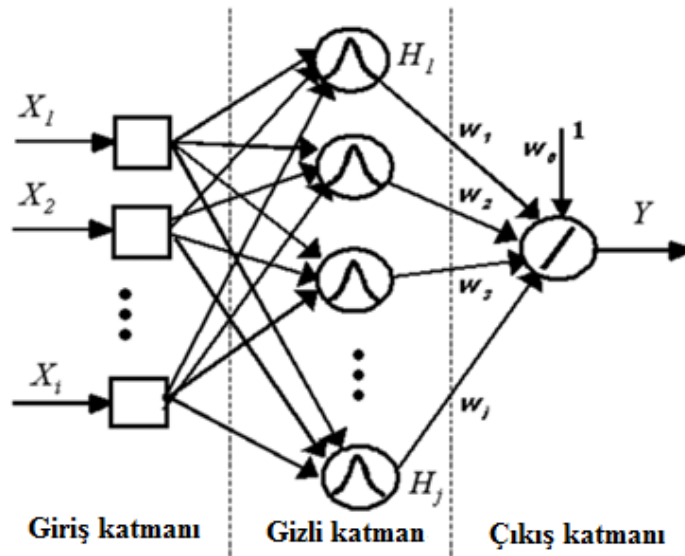


Şekil 5.5. Adaline sinir ağı modelinin yapısı.

5.3.1.6 Radyal tabanlı sinir ağıları

Katmanlı YSA'nın tasarımında eğitici geriye yayılım öğrenme algoritması bir en iyileme uygulamasıdır. Ara katmandaki işlemci elemanlar girişlerin ağırlıklandırılmış şeklini kullanmamakta ve ara katmandaki işlemci elemanların çıkışları YSA girişleri ile temel fonksiyonun merkezi arasındaki uzaklığa göre belirlenmektedir.

Radyal tabanlı fonksiyon ağı tasarımı ise çok boyutlu uzayda eğri uydurma yaklaşımıdır ve bu nedenle RTFA'nın eğitimi, çok boyutlu uzayda eğitim verilerine en uygun yüzeyi bulma problemine dönüşür. Radyal tabanlı fonksiyonlar, sayısal analizde çok değişkenli interpolasyon problemlerinin çözümünde kullanılmış ve YSA'nın gelişmesi ile birlikte bu fonksiyonlardan YSA tasarımında yararlanılmıştır. RTFA, ileri beslemeli YSA yapılarına benzer şekilde giriş, orta ve çıkış katmanından oluşur ancak, giriş katmanından orta katmana dönüşüm, radyal tabanlı aktivasyon fonksiyonları ile doğrusal olmayan sabit bir dönüşümdür. Orta katmandan çıkış katmanına ise uyarlamalı ve doğrusal bir dönüşüm gerçekleştirilir. Şekil 5.6'da Radyal tabanlı fonksiyon ağı yapısı verilmiştir.



Şekil 5.6 Radyal tabanlı fonksiyon ağı yapısı.

5.3.2 Zaman serisi modelleri

Otoregresif Hareketli Ortalama (ARMA) modelleri, rüzgar hızı veya gücünün gelecek değerlerinin tahmininde, zaman serilerine dayalı yaklaşımlardaki en popüler modellerdir. Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA), mevsimsel-ARIMA (seasonal-ARIMA) ve parçalı-ARIMA (fractional-ARIMA), sistem dışı değişken

girişli ARMA (ARMAX veya ARX) bu modelin varyasyonlarıdır [51]. Gri tahminleyiciler, doğrusal tahminleyiciler, üstel düzeltme vb. zaman serilerine dayalı modeller de mevcuttur.

5.3.2.1 Otoregresif (AR) süreç

Bir AR modelinde, bağımlı değişken geçmişteki değerinin bir fonksiyonudur. Birçok zaman serisi verisi de bu süreci içermektedir. Bu durum aşağıdaki gibi bir denklemle ifade edilebilir.

$$x^t = a + a^1x^{(t-1)} + a^2x^{(t-2)} + a^3x^{(t-3)} + \dots + \varepsilon \quad (5.4)$$

Burada, a, sabit terimi temsil ederken a^1 gibi katsayılarda gecikmeli değerlerin şimdiki değerle olan ilişkisini temsil eder. Ayrıca ε hata terimi de rassal şokları tanımlamaktadır. Genel bir şekilde AR(p) şeklinde ifade edilir.

5.3.2.2 Hareketli ortalama (MA) süreci

Eğer serinin gecikmeli hata terimi, şimdiki hata terimini etkiliyorsa hareketli ortalama süreci tanımlanır. Bir hareketli ortalama sürecinde değişkenin tahmin değeri hata terimlerinin tahmin değeri ile ilgilidir.

Bir hareketli ortalama süreci,

$$x_t = e_t - a_1e_{t-1} - \dots, t = 1, 2, \dots, n \quad (5.5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Genel şekil olarak MA(q) şeklinde ifade edilir.

Hareketli ortalama sürecinde, her bir gecikmeli hata terimi onun şimdiki değerini etkilemektedir.

5.3.2.3 ARMA ve ARIMA süreci

Çoğu zaman serisi gerek AR ve gerekse de MA sürecini içermektedir. Ayrıca I(integrated) ise seri tarafından içerilen trendi ifade etmektedir. ARIMA olarak ifade edilen süreç değerlendirilecek olursa, ARIMA(p,d,q) bize zaman serisinin p dereceden kendisinin gecikmesi ile ilişkisini ifade eden AR(p) sürecini içerdiğini, q ile ifade edilen ve hata terimlerinin geçmiş değerleri ile ilişkisini ifade eden ve rassal süreci yansıtmaması açısından hata terimlerinin düzleştirilme metotlarından olan MA(q) sürecini ifade etmektedir.

Ayrıca eğer zaman serilerinde genelde olduğu gibi bir durağan olmama durumunun olması ya da durağan bir zaman serisi ile karşılaşmamız “d” ile ifade edilir ve zaman serisi hangi düzeyde durağan ise belirtilir.

Söz konusu denklem,

$$Y_t = m + a_1 y_{t-1} + \dots + a_p y_{t-p} + u_t - b_1 u_{t-1} - \dots - b_q u_{t-q} \quad (5.6)$$

bize ARIMA(p,d,q) sürecini ifade eder [52].

5.3.2.4 Gri tahminleyici

Gri sistem kuramı temelleri, ilk kez 1982 yılında Çinli bir bilim insanı olan Deng Julong tarafından ortaya konulmuştur [53]. Gri sistem kuramı disiplinler arası bir düşüncedir. Bu kuramda, eğer bir sistem hakkında her şey biliniyorsa o sistem ‘beyaz’ olarak isimlendirilir, diğer taraftan eğer sistem hakkında hiçbir şey bilinmiyorsa o sisteme ‘siyah’ denir. Buna göre gri bir sistem, bir kısmı bilinen bir sistemdir. Gri tahmininin gücü, sadece birkaç veri ile gelecekteki değeri tahmin etme kabiliyetinden gelmektedir. Gri sistem kuramına göre; bir gri sistemden elde edilen veri dizisindeki rastlantısallık bir şekilde azaltılırsa, o sisteme ait gelişim öznitelikleri daha kolay bulunup ortaya çıkartılacaktır.

Gri modeline dayanan gri tahminin üç temel işlemi vardır; Birikim Üretme İşlevi (BÜİ), Ters Birikim Üretme İşlevi (TBÜİ) ve gri modelleme.

GM(1,1) modeli en yaygın kullanılan modeldir. Sistemden elde edilen ve GM(1,1) modelinin oluşturulmasında kullanılacak olan verinin rastlantısallığını azaltmak amacıyla, ilkel veriye aşağıda ayrıntıları açıklanan Birikim Üretme İşlevi (BÜİ) uygulanır [54]. Geliştirilen gri diferansiyel denklem, sistemin n-adım ilerideki değerinin öngörülmesi amacıyla çözülür. Hesaplanan öngörölmüş değerleri kullanarak veriye Ters Birikim Üretme İşlevi (TBÜİ) uygulanır ve ilkel verinin öngörölmüş değerleri hesaplanmış olur.

GM(1,1)’deki ilk “1” sadece bir değişken olduğunu, diğer “1” ise oluşturulacak modelde 1. dereceden gri diferansiyel eşitliğinin kullanılacağını gösterir.

Gri tahmin modelinin girişi, anemometre ile “k” kez elde edilen rüzgar hızı dizisidir.

$$V^{(0)}(1), V^{(0)}(2), \dots, V^{(0)}(n) \quad (n \geq 4), \quad (5.7)$$

$$V^{(0)}(n) = V(k), \dots, V^{(0)}(1) = V(k - n + 1) \quad (5.8)$$

Burada “n” gri modelin boyutudur.

Rüzgar hızı dizisinin birikmiş üreten işlemi yapıldığında, BÜİ dizisi;

$$V^{(0)}(i) = \sum_{m=1}^i V^{(0)}(m) \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (5.9)$$

şeklinde elde edilir. BÜİ dizisi kullanılarak oluşturulan GM(1,1) gri diferansiyel eşitliği;

$$\frac{dV^{(1)}(t)}{dt} + aV^{(1)}(t) = b \quad (5.10)$$

Eşitliğin katsayıları (5.11) denkleminde göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (5.11)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(V^{(1)}(1) + V^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(V^{(1)}(2) + V^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(V^{(1)}(n-1) + V^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$Y = [V^{(0)}(2) \quad V^{(0)}(3) \quad \dots \quad V^{(0)}(n)]^T \quad (5.13)$$

(5.10) Gri diferansiyel eşitliğinden $V^{(1)}(i)$ aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V_p^{(1)}(i) = \left[V^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-a(i-1)} (1 - e^a) + \frac{b}{a} \quad (5.14)$$

Yukarıdaki eşitlikle $V^{(0)}(1)$ temel alınarak $n + P$ adım tahmin elde edilir ve ters birikmiş üretme işlemi yapılır (IAGO), ardından i . adımın rüzgar hızı tahmini;

$$V_p^{(1)}(i) = \left[V^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-a(i-1)} (1 - e^a) \quad i = 1, 2, \dots, n + P \quad (5.15)$$

(k+1). zamanın rüzgar hızı tahmini;

$$V_p(k+1) = V^{(0)}(n+1) = \left[V^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-an} (1 - e^a) + \frac{b}{a} \quad (5.16)$$

Yeni bir örnek zamanı geldiğinde, yeni ölçülen rüzgar hızı V , rüzgar hızı dizisinden $V^{(0)}(1)$ 'i çıkarır ve hız dizisi sola kayar. Bundan sonra V dizinin sağında yerini alır.

Evrensel olmamasına rağmen, hemen hemen tüm zaman ölçeklerinde yapay sinir ağları, zaman serisi modellerine göre daha iyi başarımlar göstermektedir [55].

5.4 Hibrit ve Yeni Yapılar

Genel olarak, fiziksel ve istatistiksel yaklaşımların karıştırılması veya kısa ve orta vadeli modellerin bir araya getirilmesi gibi farklı yaklaşımların kombinasyonları hibrit yaklaşımlar olarak isimlendirilir. Örneğin okyanus yüzeyinden rüzgar hızı ve yönünü elde etmek için ışınsal transfer ve yapay sinir ağı teknikleri, özel mikrodalga sensör (SSM/I) ile birleştirilmiştir [56]. Sonuçlar göstermiştir ki; yapay sinir ağı kombinasyonunun, sadece SSM/I kullanımına göre sayısal hava tahmininden gelen verilerin etkisini artıracak yönde olduğudur.

Yeni popüler tekniklerden biri de rüzgar hızlarının mekansal ilişkilerine dayanan bir modeldir. Burada, farklı bölgelerdeki rüzgar hızları arasındaki konumsal ilişki dikkate alınır. Yerel noktanın ve onun çevresindeki mevkiilerin rüzgar hızı zaman serileri, genellikle yapay sinir ağı veya Adaptif Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi kullanılarak rüzgar hızı tahmininde bulunulur. Bu sayede uzak istasyonda fark edilen rüzgar hızı zaman serisindeki değişim, biraz zaman gecikmesi ile ölçülen istasyonda gözlenmiştir [57,58].

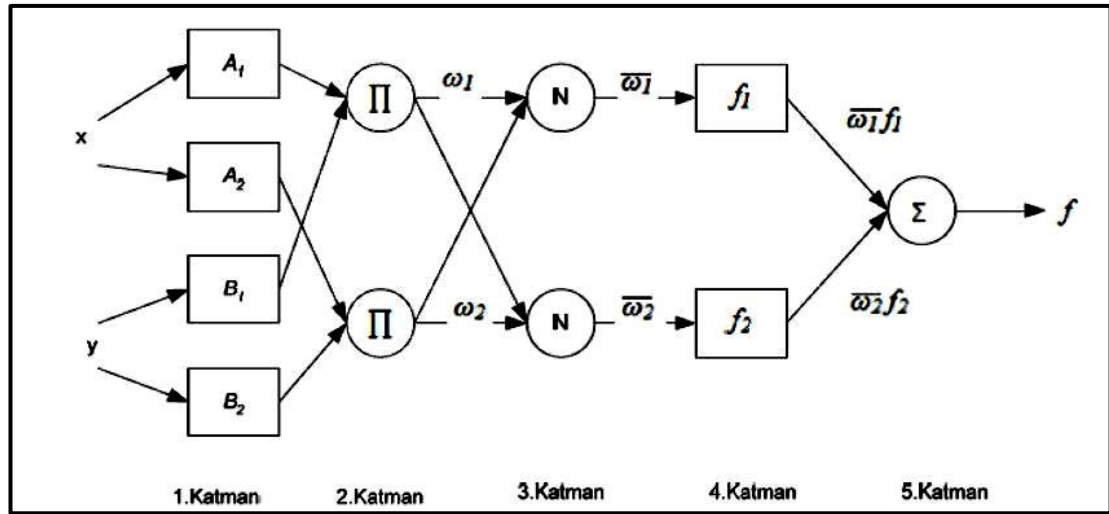
5.4.1 ANFIS modeli

ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System – Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi) yalnızca görev tahmini ya da tek çıktılı doğrusal olmayan fonksiyonların tahmininde kullanılabilir [59]. Ele alınan çalışmada ANFIS, tek çıktı olan sıcaklığı tahmin edilmesinde kullanılmıştır. ANFIS modelinde temel amaç kullanılan parametreleri optimize etmektir. ANFIS, ele alınan problem için oluşturulan yapıya göre olası tüm kuralları atayabilmekte veya kuralların veriler yardımıyla uzman tarafından atanmasına olanak sağlamaktadır. ANFIS’ in kural oluşturabilmesi veya kural oluşturulmasına olanak sağlaması uzman görüşlerinden faydalanması anlamına gelmektedir [60].

ANFIS temel olarak “Bulanık Çıkarım Sistemi”nin adaptif ağlara uyarlanmış halidir. Melez öğrenme algoritması ile birlikte ANFIS, bulanık eğer-ise kuralları ile insan bilgisini yansıtan girdi çıktı yapısını ortaya koymaktadır. MATLAB yazılımındaki Bulanık Mantık Modülü’nde bir kullanıcı arayüzü aracılığı ile kullanılmaktadır. ANFIS yönteminin uygulanabilmesi için elde girdi ve çıktıya dayanan bir veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. Seçilen üyelik fonksiyon adedi ve tipine bağlı olarak kurulan model melez öğrenme algoritması kullanılarak

eğitilmektedir [61]. ANFIS, bulanık mantık ile beraber sinir ağı topolojisi kullanımına da izin veren adaptif bir ağıdır [62]. Ayrıca bu sistemlerin avantajlarını tek bir sistem içerisinde alabilir ve daha iyi sonuçlar verebilir.

Yapı bakımından ANFIS, bulanık çıkarım sistemindeki eğer-ise kuralları ve giriş çıkış bilgi çiftlerinden oluşur. Sistem eğitiminde yapay sinir ağı öğrenme algoritmaları kullanılır. Burada ANFIS yapısını basit bir şekilde anlatabilmek için örnek olarak iki girişli (x ve y) ve tek çıkışlı (f) bir ANFIS yapısı verilmiştir (Şekil 5.7) [63,64].



Şekil 5.7. İki girişli, bir çıkışlı ve 2 kurallı Sugeno tipi bir ANFIS yapısı.

Kural 1: Eğer x değeri A_1 ve y değeri B_1 ise,

$$f_1 = p_1x + q_1y + r_1 \quad (5.17)$$

Kural 2: Eğer x değeri A_2 ve y değeri B_2 ise,

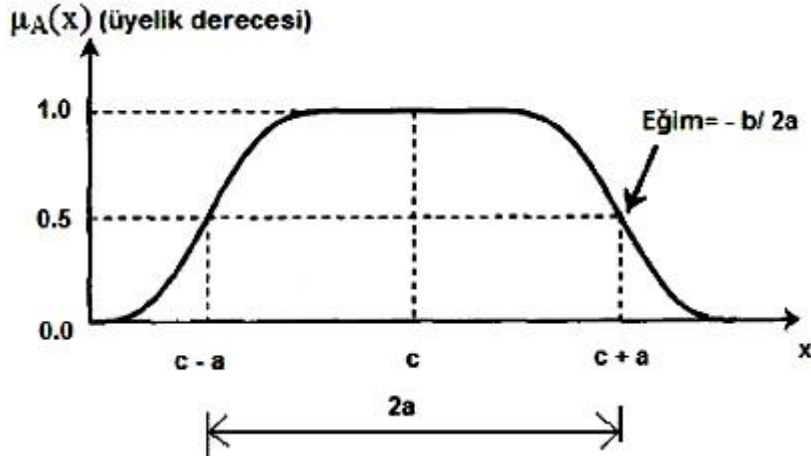
$$f_2 = p_2x + q_2y + r_2 \quad (5.18)$$

Burada A ve B, x ve y üyelik fonksiyonları için tanımlanmış öncül kısımdaki bulanık kümeler; p, q ve r ise soncul parametrelerdir. Böylece her bir kural için bir çıktı değeri elde edilir [65].

1.Katman: Bulanıklaştırma katmanı olarak adlandırılır. Giriş değerlerini bulanık kümelere ayırmada Jang'ın ANFIS modelini, üyelik fonksiyonu şekli olarak Gauss aktivasyon fonksiyonunu kullanmaktadır. Burada, her bir düğümün çıkışı, giriş değerlerine ve kullanılan üyelik fonksiyonuna bağlı olan üyelik derecelerinden oluşmaktadır. Bu katmandaki her i düğümü, bir kare düğümdür.

$$O_{i1} = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1, 2, \dots \quad (5.19)$$

Burada x , düğümün giriş değişkenini; A_i , bu düğümün temsil ettiği bulanık kümeyi gösterir. $\mu_{A_i}(x)$ genellikle maksimumu 1 ve minimumu 0 olan bir Gauss eğrisi şeklinde seçilir. Şekil 5.8’de bu üyelik fonksiyonunun şekli ve parametre tanımları gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Gauss eğrisi tipi üyelik fonksiyonu ve parametre tanımları.

Buna göre, a_i , b_i , c_i parametrelerinin alacağı değere bağlı olarak, düğüm çıkışları, $\mu_{A_i}(x)$ ve $\mu_{B_i}(y)$, aşağıda verilen ifadelerden birine göre hesaplanabilir.

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (5.20)$$

$$\mu_{B_i}(y) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{y - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (5.21)$$

Bu parametreler değiştiğinde, Gauss eğrisi fonksiyonu da bu değişime uygun olarak değişir. Bu da, A_i sözel etiketli kümenin üyelik fonksiyonlarının çeşitli formlarda olması demektir. Gerçekte, bu katmandaki düğüm fonksiyonları için aday fonksiyonlar türevi alınabilen fonksiyonlardır. Bu katmandaki parametreler öncül parametreler olarak isimlendirilir.

2.Katman: Kural katmanıdır. Bu katmandaki her bir düğüm, Sugeno bulanık mantık çıkarım sistemine göre oluşturulan kuralları ve sayısını ifade etmektedir. Her bir kural düğümünün çıkışı μ_i , 1. Katmandan gelen üyelik derecelerinin çarpımı olmaktadır. Her düğüm çıkışı, bir kuralın ateşleme seviyesini gösterir. μ_i değerlerinin elde edilişi ise, ($j=1,2$) ve ($i=1, \dots, n$) olmak üzere, aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\omega_i = \mu_{Ai}(x) * \mu_{Bi}(y), \quad i = 1,2 \dots \quad (5.22)$$

3.Katman: Normalizasyon katmanıdır. Bu katmandaki her bir düğüm, kural katmanından gelen tüm düğümleri giriş değeri olarak kabul etmekte ve her bir kuralın normalleştirilmiş değerini hesaplamaktadır. Bu katmanın çıkışları, normalize edilmiş ateşleme seviyesi olarak adlandırılır. Yani, bu katmandaki her bir düğüm, N etiketli bir sabit düğümdür. i. düğüm, i. kuralın ateşleme seviyesini, bütün kuralların ateşleme seviyeleri toplamına oranlayarak (5.23) numaralı eşitliğe göre hesaplar.

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, \quad i = 1,2 \quad (5.23)$$

4.Katman: Berraklaştırma katmanıdır. Berraklaştırma katmanındaki her bir düğümde verilen bir kuralın ağırlıklandırılmış sonuç değerleri hesaplanmaktadır. Bu katmandaki parametreler, sonuç parametreleri olarak isimlendirilir. Bu katmandaki her i düğümü, bir kare düğümdür. Düğüm çıkışı, Denklem (5.24) ifadesi ile verilen çıkış üyelik fonksiyonudur.

$$O_i^4 = \bar{\omega}_i f_i = \omega_i(p_i x + q_i y + r_i) \quad (5.24)$$

5.Katman: Toplam katmanıdır. Bu katmanda sadece bir düğüm vardır ve Σ ile etiketlenmiştir. Burada, 4. katmandaki her bir düğümün çıkış değeri toplanarak sonuçta, ANFIS sisteminin gerçek değeri elde edilir. Sonuç olarak, ANFIS yapısı fonksiyonel olarak, Sugeno tipi bir FIS yapısının aynısıdır.

5.4.2 Bulanık mantık

1965 yılında Lütü Askerzade (Lotfi Askar Zadeh) tarafından ortaya atılan bulanık küme, mantık ve sistem kavramları bu araştırmacının uzun yıllar boyunca kontrol ve atmosfer olayları konusunda çalışması; istediği kontrolü elde edebilmesi için fazlaca doğrusal olmayan denklemlerin işin içine girmesi; yöntemin karmaşıklaşması ve çözümün zorlaşması neticesinde ortaya çıkmıştır. Bulanık kavram ve sistemlerin dünyanın değişik araştırma merkezlerinde dikkat çekmesi ise 1975 yılında Mamdani ve Assilian tarafından yapılan gerçek bir kontrol uygulaması ile olmuştur [66].

Bulanık mantık belirsiz bir dünyanın gri, sağduyulu resimlerini üretmeleri için bilgisayarlara yardımcı olan makine zekası biçimidir [67]. Bulanık mantık kavramı genel olarak insanın düşünme biçimini modellemeye çalışır. Bulanık mantığın klasik matematiksel yöntemlerden farkı, deterministik olmaması ve niteliksel tanımlamalara olanak sağlamasıdır. Belirsizliklerin matematiksel olarak ifade edilebilmesi,

karmaşık sistemlerin modellenmesine bulanık mantığın getirdiği en büyük kolaylık olarak değerlendirilir. Bulanık mantık kavramında bir üyenin bir kümenin üyesi olup olmadığı üyelik fonksiyonları ile belirlenir. Bu kavram ile bulanık mantığın kullandığı çıkarım yöntemleri kullanılarak olaylar hakkında yorum yapmaya çalışılır [68].

Bulanık sistemlerin en temel elemanı bulanık kümedir. Bulanık bir küme, değişik üyelik yani ait olma derecelerine sahip elemanları olan bir küme türüdür. Böyle bir küme, elemanlarının her birine 0 ile 1 arasında üyelik değeri atayabilen bir üyelik fonksiyonu ile karakterize edilebilir [69]. Burada 1'in değeri tam üyeliği gösterir, 0'a yakın değer ise bulanık kümedeki nesne üyeliğinin zayıf olduğunu belirtir. Dolayısıyla değeri 0 olan nesne bulanık kümenin üyesi değildir [68]. Bulanık küme teorisinin, üyelikten üye olmamaya dereceli geçişi ifade etmesindeki yeteneği, belirsizlikleri tanımlamada önemli bir yere sahiptir. Bulanık küme teorisi; belirsizliğin ölçülmesinde güçlü ve anlamlı araçlar sunmasına ek olarak, dilimizde ifade edilen belirsiz kavramların anlamlı bir biçimde temsilini sağlar [70].

Klasik olan kümelerde bir öğeden diğerine geçiş keskin ve aniden değişen üyelik dereceleri sayesinde olmaktadır. Ancak bulanık kümelerde bu geçiş yumuşak ve sürekli bir şekilde olmaktadır. Bu geçişte bulanıklık, belirsizlik, hayal gücü, sezgi gibi görüşler rol oynar. Aslında üyelik derecesi fonksiyonu bu tür görüşlerin karışık bir şekilde öğelere yayılmasını temsil eder. Buradan ortaya çıkan önemli noktalardan biri klasik kümelerde bir öğenin kümeye ait olması için üyelik derecesinin mutlaka 1'e eşit olması gerekirken, bulanık kümede nerede ise bütün öğelerin değişik derecelerle kümeye ait olmaları mümkündür [71]. Klasik sayısal (0,1) mantığının ötesine geçmiş bir yaklaşım olan bulanık mantık bu iki değer arasında çok seviyeli değerler üretilmesi sonucunda denetimin daha doğru kararlar üretmesini, böylece başarımın ve verimin artmasını sağlamaktadır [72].

Gerçek dünyaya daha yakın olduğundan, bulanık mantık doğrusal olmayan denetim için alternatif bir yaklaşım olarak kullanılabilir. Sistemlerin doğrusal olmayan karakteristikleri kurallar, üyelik fonksiyonları ve sonuca varma işlemi ile temsil edilir. Bulanık mantık yaklaşımının kullanılmasıyla sistem başarımı artar, uygulama basitleşir ve mali giderler azalır. Gerçek sisteme daha yakın olan, daha doğal bir kural tabanı kullanılarak doğrusal olmayan denetim alışlagelmiş yöntemlere göre daha iyi biçimde gerçekleştirilebilir. Bu durumda sistem başarımı

mükemmel bir şekilde iyileştirilip daha etkili ve duyarlı bir denetim elde edilebilir [69]. Bu yüzden bulanık mantığın uygulama alanları çok geniştir. Sağladığı en büyük fayda ise “insana özgü tecrübe ile öğrenme” olayının kolayca modellenebilmesi ve belirsiz kavramların bile matematiksel olarak ifade edilebilmesine olanak tanımasıdır. Bu nedenle bulanık mantık lineer olmayan sistemlere yaklaşım yapabilmek için özellikle uygundur. Günümüzde, bulanık uzman sistemler, bulanık mantığın en sıklıkla kullanıldığı alandır. Bu sistemler lineer ve lineer olmayan kontrol, örnek kabulü, finansal sistemler, yöneylem araştırmaları, veri analizleri gibi çok geniş alanlarda kullanılırlar [73].

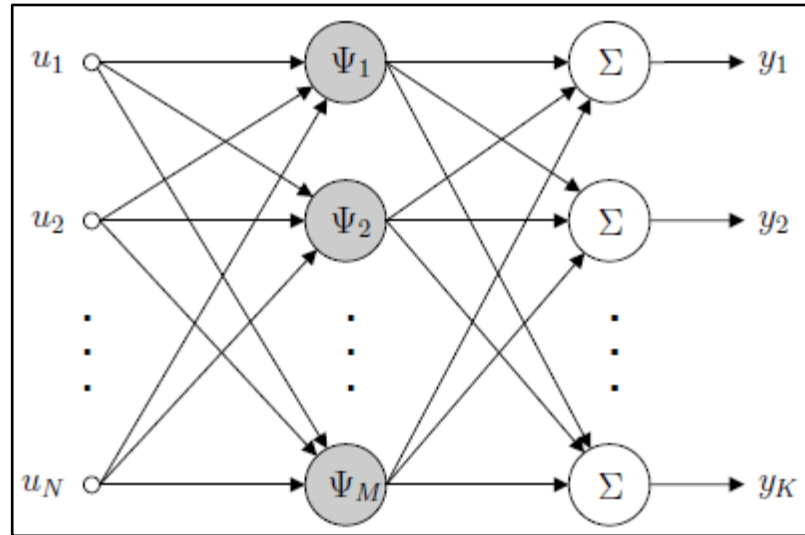
6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1 Dalgacık sinir ağı

Dalgacık sinir ağı, dalgacık teorisi ile sinir ağı teorisini bir araya getirmiştir. Bir dalgacık sinir ağı, aktivasyon fonksiyonu orthonormal dalgacık ailesinden seçilmiş, tek gizli katmanlı bir ileri beslemeli sinir ağından oluşur [74].

Dalgacık sinir ağlarının bir uygulaması da bu orthonormal fonksiyonun tahmin edilmesidir. Bir fonksiyonun bir dizi gözlenen değeri verildiğinde, dalgacık ağı o fonksiyonun yapısını öğrenebilecek şekilde eğitilebilir ve verilen rastgele girişler için beklenen değerleri hesaplayabilir [74].

Dalgacık sinir ağı yapı olarak $(1 + \frac{1}{2})$ katman sinir ağına çok benzer. Bu yapı; bir veya daha fazla girişi olan, tek gizli katmanlı, ileri beslemeli bir ağıdır ve çıkış katı, bir veya daha çok doğrusal birleştirici ya da toplayıcı içerir (Şekil 6.1). Gizli katmanda bulunan nöronların aktivasyon fonksiyonları dalgacık tabanlıdır. Bu dalgacık nöronları genellikle “wavelon” olarak isimlendirilir [74].



Şekil 6.1. Dalgacık sinir ağı yapısı.

Dalgacık sinir ağını oluşturmak için iki temel yaklaşım vardır.

- İlkinde dalgacık ve sinir ağı işlemleri ayrı ayrı gerçekleştirilir. Öncelikle giriş sinyali, gizli katmandaki dalgacık tabanlı nöronlar kullanılarak ayrıştırılır.

Öğrenme algoritmasına uygun olarak giriş ağırlıkları değiştirilen bir ya da daha fazla toplayıcıdan dalgacık katsayıları çıkış olarak verilir.

- İkincisinde ise iki teori bir araya getirilir. Bu durumda; dalgacıkların öteleme ve genişlemesi, toplayıcı ağırlıkları ile birlikte, bazı öğrenme algoritmalarına uygun olarak, değiştirilir.

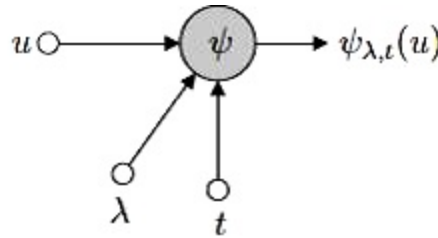
Genel olarak, ilk yaklaşım kullanıldığında, sadece ana dalgacığın ikili genişlemesi ve ötelemesi dalgacık temelini oluşturmaktadır. Bu tip dalgacık sinir ağları genellikle “wavenet” olarak anılmaktadır. İkinci tip yapı ise “dalgacık ağı” olarak adlandırılmaktadır [74].

6.1.1 Tek boyutlu dalgacık sinir ağı

Dalgacık sinir ağının en basit formu tektir ve bir giriş ile bir çıkıştan oluşur. Gizli katmanda, giriş parametreleri, muhtemelen sabittir, dalgacığın öteleme ve genişleme katsayılarını içeren dalgacık nöronları bulunur. Bu dalgacık nöronları; girişler, giriş kümesinin küçük bir alanı içinde kaldığında, sıfırdan farklı bir çıkış üretir. Dalgacık sinir ağının çıkışı, dalgacık aktivasyon fonksiyonlarının ağırlıklı doğrusal bileşimidir. Şekil 2’de tek çıkışlı dalgacık nöronun yapısı gösterilmektedir. Çıkış;

$$\psi_{\lambda,t}(u) = \psi\left(\frac{u-t}{\lambda}\right) \quad (6.1)$$

şeklinde ifade edilir. λ ve t sırasıyla öteleme ve genişleme parametreleridir.



Şekil 6.2. Dalgacık nöronu.

6.1.1.1 Dalgacık ağı

Tek giriş tek çıkış dalgacık ağı mimarisi Şekil 6.3’te gösterilmiştir. Gizli katman M adet dalgacık nöronu içerir. Çıkış nöronu bir toplayıcıdır ve dalgacık nöronlarının çıkışlarının ağırlıklı toplamını çıkış olarak verir.

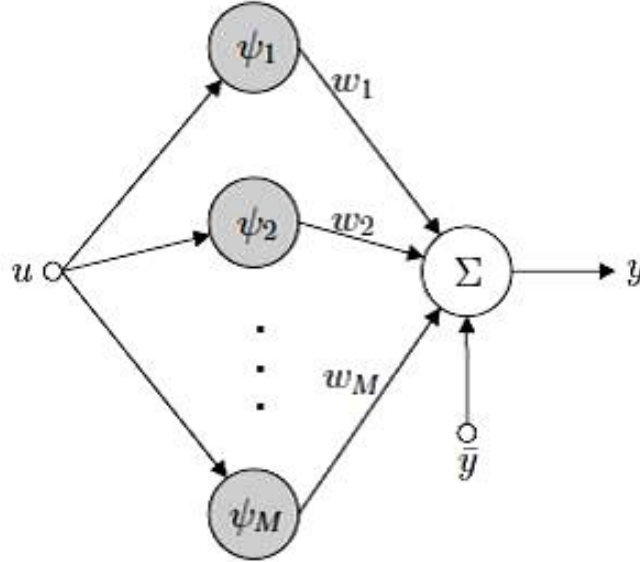
$$y(u) = \sum_{i=1}^M w_i \psi_{\lambda_i t_i}(u) + \bar{y} \quad (6.2)$$

$\bar{y}$, ölçekleme fonksiyonu için bir yer değiştirme değeridir. $\bar{y}$ değerinin eklenmesinin sebebi, dalgacık fonksiyonu $\psi(u)$ sıfır ortalamalı olduğu sürece, ortalaması sıfırdan farklı fonksiyonlarla başa çıkmak içindir

Bir dalgacık ağa ait tüm parametreler bazı öğrenme algoritmaları ile ayarlanabilir [74].

6.1.1.2 Wavenet

Wavenet mimarisi dalgacık ağı ile aynıdır fakat t_i ve λ_i parametreleri başlangıçta sabittir ve herhangi bir öğrenme prosedürü ile değişmez [74].



Şekil 6.3. Dalgacık sinir ağı.

Bu kısıtlamanın ana sebeplerinden biri dalgacık analizinden gelmektedir. Yani, aşağıda verilen herhangi bir $f(\cdot)$ fonksiyonu için yeterince büyük bir L değeri seçilerek keyfi bir ayrıntı seviyesine yaklaştırılabilir.

$$f(u) \approx \sum_k \langle f, \varphi_{L,k} \rangle \varphi_{L,k}(u) \quad (6.3)$$

burada $\varphi_{L,k}(u) = 2^{L/2} \varphi(2^L u - k)$ ölçekleme fonksiyonu 2^L ile genişletilmiş ve 2^{-L} ikili aralığı ile ötelenmiştir.

Bu nedenle wavenet'in çıkışı;

$$y(u) = \sum_{i=1}^M w_i \varphi_{\lambda_i, t_i}(u) \quad (6.4)$$

şeklinde olacaktır. Burada M, analiz edilecek fonksiyonun kümesini kapsayacak derecede büyük olmalıdır. Şunu da eklemek gerekir ki, ölçekleme fonksiyonunun ortalama değeri sıfırdan farklı olduğu sürece düzeltme değeri olan $\bar{y}$ değerine ihtiyaç olmayacaktır [74].

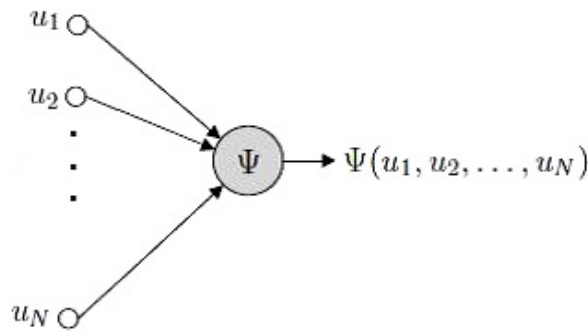
6.1.2 Çok boyutlu dalgacık sinir ağı

Bu tip dalgacık sinir ağında, giriş çok boyutlu bir vektördür ve dalgacık nöronları çok boyutlu aktivasyon fonksiyonları içermektedir. Giriş vektörü, çok boyutlu giriş uzayının küçük bir alanında kaldığı sürece, dalgacık nöronları sıfırdan farklı bir çıkış üretir. Dalgacık sinir ağının çıkışı, bu çok boyutlu dalgacıkların bir tanesinin veya daha fazlasının doğrusal bileşiminden oluşur [74].

Şekil 6.4'te çok boyutlu dalgacık sinir ağı için dalgacık nöronun yapısı gösterilmiştir. Çıkış;

$$\psi(u_1, \dots, u_N) = \prod_{n=1}^N \psi_{\lambda_n, t_n}(u_n) \quad (6.5)$$

şeklinde ifade edilir. Bu dalgacık nöronun etkisi, çok boyutlu bir dalgacığa eşdeğerdir.



Şekil 6.4. Çok boyutlu dalgacık aktivasyon fonksiyonlu dalgacık nöronu.

Çok boyutlu dalgacık sinir ağının mimarisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Gizli katman M adet dalgacık nöronu, çıkış katmanı ise K adet toplayıcı içerir. Ağın çıkışı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$y_j = \sum_{i=1}^M w_{ij} \psi_i(u_1, \dots, u_N) + \bar{y}_j \quad (j = 1, \dots, K) \quad (6.6)$$

Burada, $\bar{y}_i$ değerine, ortalaması sınırdan farklı fonksiyonlarla başa çıkabilmek için ihtiyaç duyulmaktadır.

Dolayısıyla, ağın giriş – çıkış ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$y(u) = \sum_{i=1}^M w_i \psi_i(u) + \bar{y} \quad \text{burada} \quad \begin{cases} y = (y_1, \dots, y_K) \\ w_i = (w_{i1}, \dots, w_{iK}) \\ u = (u_1, \dots, u_N) \\ \bar{y} = (\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_K) \end{cases} \quad (6.7)$$

6.2 Sinir Ağı Mimarisinin Belirlenmesi

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kurupelit yerleşkesine konuşlandırılan ölçüm istasyonundan alınan 10 dakika aralıklı sıcaklık, nem, basınç ve 40 m yükseklikteki hız verileri kullanılarak öncelikli olarak çok kısa vadeli rüzgar hızı tahmini yapılmaya çalışılmıştır. Ayrıca kullanılan yöntemin kısa, orta ve uzun vadeli tahmin dönemleri için başarımının test edilmesi de ihmal edilmemiştir.

Bu çalışmada, dalgacık sinir ağı (DSA) aktivasyon fonksiyonlarının, yaygın olarak kullanılan yapay sinir ağı (YSA) aktivasyon fonksiyonlarına karşı, rüzgar hızı tahmininde ne derece başarımlı sağladıkları gözlemlenmeye çalışılmıştır. Bu nedenle yapay sinir ağı ile dalgacık sinir ağı için aynı mimaride ağ yapıları oluşturulmuş, aynı veri setleri ile aynı öğrenme algoritmaları kullanılarak ileri beslemeli yapay sinir ağı ve dalgacık sinir ağı ile 40 m yükseklik için rüzgar hızı tahmini yapılmıştır. Ayrıca, dalgacık sinir ağının genel mimarisi ile benzerlik gösteren radyal tabanlı fonksiyon sinir ağında aynı veri seti ile tahmin yapılarak dalgacık sinir ağı başarımı için ikinci bir karşılaştırma referansı kullanılmıştır.

Seçilen mimari basınç, sıcaklık ve nem için birer giriş, rüzgar hızı için bir çıkış olacak şekilde bir girdi katmanı, bir çıktı katmanı ve bir gizli katmanlı ağ yapısı şeklindedir. Gizli katmandaki nöron sayısı ile ilgili hesaplamalarda literatürde birden fazla yöntemin olduğu ve tam olarak kaç olması gerektiğine ilişkin belirli bir kural olmadığı görülmektedir [75]. Bir girdi katmanı, bir gizli katman ve bir çıktı katmanından oluşan üç katmanlı bir YSA için, gizli nöron sayısının, girdi katmanındaki nöron sayısının %75'i olması gerektiğini ileri sürmüştür. Katz, en uygun gizli nöron sayısının, giriş katmanındaki nöron sayısının 1,5 katı ile 3 katı

arasında olduğunu ileri sürmektedir [76]. Doig'e göre ise gizli katmanda olması gereken nöron sayısının gizli katman sayısına göre çok daha fazla alternatife sahip olduğundan uygun sayıyı belirlemek üzere aşağıdaki formülden yararlanılabileceğini söylemiştir [77].

$$N_s = \frac{\frac{1}{2}(N_g + N_{\check{c}}) + \sqrt{N_d}}{N_b} \quad (6.8)$$

N_s : Gizli katmandaki nöron sayısını

N_g : Girdi katmanındaki nöron sayısını

$N_{\check{c}}$: Çıktı katmanındaki nöron sayısını

N_d : Gözlem sayısını

N_b : Katman sayısını göstermektedir.

Bu formüle göre çalışmada oluşturulan yapay sinir ağı modellerinde 40 m yükseklikteki rüzgar hızı tahmin eden model için 144 gözlem sayısı için bir gizli katmandaki nöron sayısı 14 olarak hesaplanmıştır.

Gizli katmandaki nöron sayısı öncelikle 14 olarak denenmiştir ve daha sonra sayı azaltıp artırılarak tahmin sonuçları birbirleriyle kıyaslanmıştır. En iyi tahmin sonuçlarının 10 gizli nöron sayısına sahip modelde olduğu görülmüştür. Böylelikle bir girdi katmanı, bir çıktı katmanı ve bir gizli katmanlı ağ yapısı için tüm modellerde 10 nöron ya da 10 dalgacık nöronu kullanılmıştır.

6.3 Veri Setinin Hazırlanması

6.3.1 Normalizasyon

Yapay sinir ağlarında, ağ giriş ve çıkışlarına belirli ön işlem adımları uygulayarak yapay sinir ağına sunulan verilerin eğitimi daha verimli hale getirilebilir. Ağ giriş işlem fonksiyonları, ağ kullanımını daha iyi bir forma dönüştürür. Normalleştirme işlemi ham verilere uygulanarak ve bu verilerin eğitim için uygun veri setinin hazırlanmasına etkisi vardır. Yapay sinir ağların eğitimi, ham veri setine normalizasyon yöntemi uygulanmadan çok yavaş olabilir. Normalleştirme işlemlerinde farklı teknikler kullanılabilir. Literatürde birçok veri normalizasyon çeşidi vardır. Bunlar; Min kuralı, Max kuralı, Medyan, Sigmoid ve Z-Score gibi kurallar olarak sıralanabilir [78].

Seçilen modelin girdi ve çıktıların ölçeklendirilmesi (normalizasyon) ağı başarımını yakından etkilemektedir. Çünkü normalizasyon, veri setindeki değerlerin dağılımını düzenli hale getirmektedir. YSA girdileri arasında aşırı büyük veya küçük değerler görülebilir. Bunlar yanlışlıkla girdi setine girmiş olabilir. Net girdiler hesaplanırken bu değerler aşırı büyük veya küçük değerlerin doğmasına neden olarak ağı yanlış yönlendirebilirler. Bütün girdilerin belirli aralıkta (çoğunlukla 0-1 aralığında) ölçeklendirilmesi hem farklı ortamlardan gelen bilgilerin aynı ölçek üzerine indirgenmesine hem de yanlış girilen çok büyük ve küçük şeklindeki değerlerin etkisinin ortadan kalkmasına neden olur. Bazı araştırmacılar ise kendi problemlerine özgü ölçeklendirme yöntemleri geliştirmektedir. Her problem için farklı bir ölçeklendirme yöntemi kullanılabilir. Tasarımcılar, ellerindeki verileri normalize edecek bir yaklaşımı kendileri belirleyebilir. Bu konuda bir standart koymak doğru olmayacaktır [79].

Bu çalışmada hazırlanan basınç, sıcaklık, nem ve rüzgar hızı verilerinin normalizasyonu için farklı teknikler üzerinde denemeler yapılmış ve en başarılı sonuçlar D_Min_Max Normalizasyonu tekniğinde ortaya çıkmıştır. Öncelikle modelin uygulanması için aşağıda verilen denklem ile tüm veriler 0,1 ile 0,9 arasında normalize edilmiştir. Normalizasyon yapılarak veriler boyutsuz hale getirilmiş olur [80]. Bu yöntem için (6.9) numaralı eşitlik kullanılır.

$$x' = 0,8 * \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} + 0,1 \quad (6.9)$$

Bu eşitlikte;

x' = Normalize edilmiş veriyi,

x_i = Girdi değerini,

x_{min} = Girdi seti içerisinde yer alan en küçük sayıyı,

x_{max} = Girdi seti içerisinde yer alan en büyük sayıyı,

ifade etmektedir.

6.4 Dalgacık Sinir Ağı Aktivasyon Fonksiyonlarının Belirlenmesi

Dalgacık sinir ağını oluştururken seçilen dalgacık aktivasyon fonksiyonları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Seçilen her bir fonksiyon, daha önceden belirlenmiş olan bir girdi, bir gizli ve bir çıkış katmandan oluşan; üç girişi, on gizli katman nöronu ve bir çıkışı olan mimari ile on iki ay için test edilmiştir.

6.5 Sinir Ağlarının Eğitilmesi

Seçilen ağ mimarisinde ileri beslemeli yapay sinir ağına ait nöronların ve dalgacık sinir ağına ait wavelon'ların eğitilmesi için Levenberg-Marquardt algoritması tercih edilmiştir. Geriye yayılım algoritması, yapay sinir ağlarında en çok kullanılan algoritmadır. Geriye yayılım öğrenmesi sırasında ağ, her giriş örüntüsünü, çıkış nöronlarında sonuç üretmek üzere gizli katmanlardaki nöronlardan geçirir. Daha sonra çıkış katmanındaki hataları bulabilmek için, beklenen sonuçla, elde edilen sonuç karşılaştırılır. Bundan sonra, çıkış hatalarının türevi çıkış katmanından geriye doğru gizli katmanlara geçirilir. Hata değerleri bulunduğundan sonra, nöronlar kendi hatalarını azaltmak için ağırlıklarını ayarlar. Ağırlık değiştirme denklemleri, ağdaki performans fonksiyonunu en küçük yapacak şekilde düzenlenir.

İleri beslemeli ağlarda kullanılan öğrenme algoritmaları, performans fonksiyonunu en küçük yapacak ağırlıkları ayarlayabilmek için, performans fonksiyonunun gradyenini kullanırlar. Geriye yayılım algoritması da, ağ boyunca gradyen hesaplamalarını geriye doğru yapar. En basit geriye yayılım öğrenme algoritması gradyen azalması algoritmasıdır. Bu algoritmada ağırlıklar, performans fonksiyonunun azalması yönünde ayarlanır. Fakat bu yöntem, pek çok problem için çok yavaş kalmaktadır. Bu algoritmadan daha hızlı, daha yüksek performanslı algoritmalar da vardır.

Hızlı algoritmalar genel olarak iki kategoriye ayrılabilir. İlk kategorideki algoritmalar, deneme yanılma tekniklerini kullanarak, standart gradyen azalması (steepest descent) yönteminden daha iyi sonuçlar verebilir. Deneme-yanılma işlemlerini kullanan geriye yayılım algoritmaları; momentum terimli geriye yayılım, öğrenme hızı değişen geriye yayılım ve esnek geriye yayılım algoritmalarıdır. Hızlı algoritmaların ikinci kategorisindeki algoritmalar, standart sayısal optimizasyon yöntemlerini kullanır. Bu algoritmalar; eşlenik gradyen öğrenme algoritması, Newton öğrenme algoritmaları ve Levenberg - Marquardt öğrenme algoritmasıdır.

Öğrenme algoritmaları, kendisinden önce geliştirilen algoritmalara alternatif olarak ortaya çıkmıştır ve önceki algoritmaların iyi yönlerini geliştirip, kötü yönlerini azaltmaya yönelmiştir. Levenberg - Marquardt algoritması da, Newton ve Gradyen Azalması algoritmalarının en iyi özelliklerinden oluşur ve kısıtlamalarını ortadan kaldırır [81].

Radyal tabanlı fonksiyon sinir ağı için ise danışmanlı öğrenme algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, gizli katmandaki işlemci elemanlarının (nöronların) otomatik olarak oluşturulmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu işlemci elemanlarının sayısı arttıkça hata oranı azalmaktadır. İşlemci elemanlarının oluşturulması, toplam karesel hata istenen hata düzeyine düşüncüye kadar veya maksimum deneme-yanılma sayısına varıncaya kadar devam etmektedir. Bu çalışma kapsamında MATLAB programının newrb fonksiyonu kullanılarak radyal tabanlı yapay sinir ağı oluşturulmuştur.

6.6 Dalgacık Sinir Ağı Uygulaması

Bu çalışmada, Dalgacık Sinir Ağı (DSA) çok kısa vadeli rüzgar hızı tahmini amacıyla kullanılmıştır. Oluşturulan mimari ve Çizelge 6.1’de verilmiş olan dalgacık aktivasyon fonksiyonları kullanılarak yapılan tahmin modelinde; basınç, nem, sıcaklık ve 40 metre yükseklikteki rüzgar hızı verileri 1 saat geri yayımlı olarak ağı eğitilmesinde kullanılmıştır. Ağı eğitimi tamamlandıktan sonra 10 dakika ilerideki rüzgar hızı tahmin edilmeye çalışılmıştır. MATLAB programı kullanılarak hazırlanan program kodları **Şekil 6.5’de** verilmiştir.

```
%-----
% "B",normalize edilmiş basınç verisi.
% "S",normalize edilmiş sıcaklık verisi.
% "N",normalize edilmiş nem verisi.
% "H40",normalize edilmiş 40 metre yükseklikteki rüzgar hızı.
%-----
% "Z",sıfır matrisi 24 saat süresince yapılacak her 10 dakikalık
% tahmini bir araya getirebilmek için oluşturulan matristir.
%-----
B=0.8*(basinc-min(basinc))/(max(basinc)-min(basinc))+0.1;
S=0.8*(sicaklik-min(sicaklik))/(max(sicaklik)-min(sicaklik))+0.1;
N=0.8*(nem-min(nem))/(max(nem)-min(nem))+0.1;
H40=0.8*(ocak40m-min(ocak40m))/(max(ocak40m)-min(ocak40m))+0.1;
%-----
% "a", yapılmak istenilen tahmin sayısı, saatte 60dk/10dk=6 veri,
% 24 saat boyunca tahminleme için 24*6=144
%-----
a=144
Z=zeros(1,a);
x=1;
while x<=a
    b=[B(x:x+5)];
    s=[S(x:x+5)];
    n=[N(x:x+5)];
    input=[b s n]';
    output=[H40(x:x+5)]';
    x=x+5;
end
```

Şekil 6.5. Dalgacık sinir ağı program kodları

```

y=x+1;
b=[B(y:y+5)];
s=[S(y:y+5)];
n=[N(y:y+5)];
data=[b s n]';
%-----
% "transfer_function" wavelonlarda kullanılacak aktivasyon
% fonksiyonunun ismidir. Aşağıda adresi verilen dizin
% içerisinde "template_transfer" dosyasına tanımlanan ve bu
% matlab kodlarının çalışacağı dizine yerleştirilen aktivasyon
% fonksiyonuna ait dosyanın ismidir.
% C:\Program Files\MATLAB\R2008a\toolbox\nnet\nnet\nncustom
%-----
net=newff(input,output,10,{'transfer_function'},'trainlm');
net.trainParam.epochs=1000;
net.trainParam.goal=1E-5;
net.trainParam.max_fail=5;
net.trainParam.mem_reduc=1;
net.trainParam.min_grad=1e-010;
net.trainParam.mu=0.001;
net.trainParam.mu_dec=0.1;
net.trainParam.mu_inc=10;
net.trainParam.mu_max=1E100;
net.trainParam.time=inf;
net.performFcn = 'msereg';
net=train(net,input,output);
target=sim(net,data);
Z(1,x)=Z(1,x)+target(1,6);
x=x+1;
end
%-----
% 40m yükseklikteki rüzgar hızlarını içeren H40 matrisinin ilk 6
% elemanı ağı eğitmek için kullanıldığından, yapılan tahminler 7.
% elemandan itibaren karşılaştırılacaktır. O nedenle tahmin yapılmış
% olan 24 saate ait 144 tahminin gerçek değerleri H40 matrisinin
% 7. ile 150. elemanları arasındaki 144 değerdir.
%-----
speed=[H40(7:150)]';
estimate=[Z(2:145)];
error=speed-estimate;
rmse = sqrt(sum((speed(:)-estimate(:)).^2)/numel(speed));
mse = sum(error.^2) / (144);
plot(estimate, 'DisplayName', 'estimate', 'YDataSource',
'estimate'); hold all; plot(speed, 'DisplayName', 'speed',
'YDataSource', 'speed'); hold off; figure(gcf)
ylabel('Rüzgar Hızı, m/sn')
xlabel('Zaman, t/10dk')
legend('tahminlenen hız','gerçek hız')
clc

```

Şekil 6.5. (devam) Dalgacık sinir ağı program kodları

Bu tez çalışmasında çok kısa vadeli rüzgar hızı tahmin modeli üzerinde durulmuş olunması rağmen, ortaya konulan ağ modelinin farklı zaman aralıklarındaki tahminleme yeteneği de ayrıca test edilmiştir. Ocak ayı verileri pilot seçilerek kısa vadeli (30 dakikalık), orta vadeli (6 saatlik) ve uzun vadeli (1 günlük) tahminlerde yapılmıştır.

6.7 Dalgacık Sinir Ağı Başarımı

Model başarımının ölçümü için kullanılan birinci ölçü, (6.10) eşitliği ile verilen toplam karesel hatanın ortalaması alınarak aşağıdaki gibi hesaplanır (ortalama karesel hata, mean squared error, MSE). Hata kareleri ortalaması sayısal kestirimler için en çok kullanılan başarı ölçülerinden biridir. Bu değer, her hesaplanan değer ve onun karşılık gelen doğru değer arasındaki farkın karelerinin ortalaması alınarak hesaplanır.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (6.10)$$

Model başarımının ölçümü için kullanılan ikinci ölçü (6.10) eşitliği ile verilen ortalama karesel hatanın karekökünün alınması suretiyle belirlenen hatadır (Hata Karelerinin Ortalamasının Karekökü, Root Mean Squared Error-RMSE). RMSE model veya kestirimci tarafından kestirimi yapılan değerler ve modellenen veya kestirimi yapılandan elde edilen gerçek değerler arasındaki farkın ölçüsü olarak sıklıkla kullanılır [82].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (6.10)$$

RMSE basitçe MSE'nin kareköküdür. RMSE hata değerini gerçek ve kestirilen değerdeki gibi aynı boyutta verir.

Çizelge 6.1'de verilen aktivasyon fonksiyonları için hesaplanmış olan MSE ve RMSE değerleri Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'de verilmiştir. Pilot olarak seçilen Ocak ayına ait kısa, orta ve uzun vadeli dönemler için hesaplanan RMSE ve MSE değerleri de Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Dalgacık Aktivasyon Fonksiyonları

Mexican Hat	$f(x) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\pi^{1/4}\right)e^{-\frac{x^2}{2}}(1-x^2)$
Polywog1	$f(x) = x * e^{-\frac{x^2}{2}}$
Polywog2	$f(x) = e^{-\frac{x^2}{2}}(-3x + x^3)$
Polywog3	$f(x) = e^{-\frac{x^2}{2}}(3 - 6x^2 + x^4)$
Polywog4	$f(x) = e^{-\frac{x^2}{2}}(1 - x^2)$
Polywog5	$f(x) = e^{-\frac{x^2}{2}}(3x^2 - x^4)$
Rasp1	$f(x) = \frac{x}{(1+x^2)^2}$
Rasp2	$f(x) = \frac{x\cos[x]}{1+x^2}$
Rasp3	$f(x) = \frac{\sin\pi x}{-1+x^2}$
Slog1	$f(x) = -\frac{1}{1+e^{-3-x}} + \frac{1}{1+e^{-1-x}} + \frac{1}{1+e^{1-x}} - \frac{1}{1+e^{3-x}}$
Slog2	$f(x) = -\frac{1}{1+e^{-3-x}} + \frac{3}{1+e^{-1-x}} - \frac{3}{1+e^{1-x}} + \frac{1}{1+e^{3-x}}$

Çizelge 6.2. İlk altı aylık süreçte her bir aktivasyon fonksiyon için hesaplanan RMSE ve MSE değerleri.

		OCAK		ŞUBAT		MART		NİSAN		MAYIS		HAZİRAN	
Ağ Tipi	Aktivasyon Fonksiyonu	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE
Radyal Tabanlı Fonksiyon Sinir Ağı	Radyal Tabanlı Fonksiyon	0,0821	0,0067	0,0498	0,0025	0,0540	0,0029	0,1128	0,0127	0,0357	0,013	0,1278	0,0163
Yapay Sinir Ağı (YSA)	TANSIG	0,0869	0,0075	0,0510	0,0026	0,0343	0,0012	0,1246	0,0155	0,0565	0,0032	0,0947	0,0090
	LOGSIG	0,0843	0,0071	0,0604	0,0036	0,0372	0,0014	0,1129	0,0127	0,0428	0,0018	0,0913	0,0083
Dalgacık Sinir Ağı (DSA)	MEXICAN HAT	0,0773	0,0060	0,0627	0,0039	0,0337	0,0011	0,0925	0,0085	0,0441	0,0019	0,0853	0,0073
	POLYWOG1	0,0685	0,0047	0,0542	0,0029	0,0318	0,0010	0,0997	0,0099	0,0415	0,0017	0,0860	0,0074
	POLYWOG2	0,1693	0,0287	0,0532	0,0028	0,0572	0,0033	0,1594	0,0254	0,0806	0,0065	0,1248	0,0156
	POLYWOG3	0,2210	0,0488	0,1132	0,0128	0,0762	0,0058	0,2740	0,0751	0,1230	0,0151	0,2255	0,0508
	POLYWOG4	0,0897	0,0080	0,0524	0,0027	0,0300	0,0009	0,0991	0,0098	0,0528	0,0028	0,0912	0,0083
	POLYWOG5	0,1072	0,0115	0,0696	0,0048	0,0397	0,0016	0,1093	0,0119	0,0592	0,0035	0,0923	0,0085
	RASP1	0,0832	0,0069	0,0556	0,0031	0,0342	0,0012	0,1039	0,0108	0,0418	0,0017	0,0789	0,0062
	RASP2	0,0881	0,0078	0,0611	0,0037	0,0341	0,0012	0,0953	0,0091	0,0417	0,0017	0,0777	0,0060
	RASP3	2,1497	4,6213	1,0599	1,1234	0,8481	0,7193	2,0290	4,1169	1,9193	3,6835	4,5100	20,3398
	SLOG1	0,1124	0,0126	0,0615	0,0038	0,0388	0,0015	0,1106	0,0122	0,0510	0,0026	0,0824	0,0068
	SLOG2	0,0911	0,0083	0,0690	0,0048	0,0400	0,0016	0,1410	0,0199	0,0532	0,0028	0,0933	0,0087

Çizelge 6.3. İkinci altı aylık süreçte her bir aktivasyon fonksiyon için hesaplanan RMSE ve MSE değerleri.

		TEMMUZ		AĞUSTOS		EYLÜL		EKİM		KASIM		ARALIK	
Ağ Tipi	Aktivasyon Fonksiyonu	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE
Radyal Tabanlı Fonksiyon Sinir Ağı	Radyal Tabanlı Fonksiyon	0,0870	0,0076	0,0444	0,0020	0,0569	0,0036	0,0621	0,0039	0,0197	0,0004	0,0266	0,0007
Yapay Sinir Ağı (YSA)	TANSIG	0,0948	0,0090	0,0627	0,0039	0,0701	0,0049	0,0787	0,0062	0,0231	0,0005	0,0356	0,0013
	LOGSIG	0,0928	0,0086	0,0694	0,0048	0,0777	0,0060	0,0748	0,0056	0,0227	0,0005	0,0289	0,0008
Dalgacık Sinir Ağı (DSA)	MEXICAN HAT	0,0895	0,0080	0,0528	0,0028	0,0551	0,0030	0,0598	0,0039	0,0235	0,0006	0,0286	0,0008
	POLYWOG1	0,0823	0,0068	0,0426	0,0018	0,0642	0,0041	0,0627	0,0039	0,0189	0,0004	0,0286	0,0008
	POLYWOG2	0,1239	0,0154	0,0832	0,0069	0,1167	0,0136	0,0910	0,0083	0,0327	0,0011	0,0479	0,0023
	POLYWOG3	0,2057	0,0423	0,1239	0,0154	0,1912	0,0366	0,1622	0,0263	0,0575	0,0033	0,0755	0,0057
	POLYWOG4	0,1036	0,0107	0,0469	0,0022	0,0774	0,0060	0,0519	0,0027	0,0223	0,0005	0,0287	0,0008
	POLYWOG5	0,1167	0,0136	0,0643	0,0041	0,0888	0,0079	0,0893	0,0080	0,0261	0,0007	0,0342	0,0012
	RASP1	0,0903	0,0081	0,0440	0,0019	0,0669	0,0045	0,0639	0,0041	0,0199	0,0004	0,0348	0,0012
	RASP2	0,0727	0,0053	0,0479	0,0023	0,0787	0,0062	0,0627	0,0039	0,0170	0,0003	0,0300	0,0009
	RASP3	3,7583	14,124	1,8472	3,4121	1,4302	2,0454	0,0995	0,9899	0,5631	0,3171	0,5565	0,3097
	SLOG1	0,0951	0,0090	0,0539	0,0029	0,0761	0,0058	0,0745	0,0056	0,0256	0,0007	0,0371	0,0014
	SLOG2	0,0968	0,0094	0,0627	0,0039	0,0711	0,0051	0,0800	0,0064	0,0294	0,0009	0,0396	0,0016

Çizelge 6.4. Pilot olarak seçilen Ocak ayı için kısa, orta ve uzun vadeli dönemler için hesaplanan RMSE ve MSE değerleri.

		KISA VADELİ		ORTA VADELİ		UZUN VADELİ	
Ağ Tipi	Aktivasyon Fonksiyonu	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE
Radyal Tabanlı Fonksiyon Sinir Ağı	Radyal Tabanlı Fonksiyon	0,1340	0,0179	0,1863	0,0347	0,1863	0,0347
Yapay Sinir Ağı (YSA)	TANSIG	0,1143	0,0131	0,2115	0,0447	0,1826	0,0333
	LOGSIG	0,1123	0,0126	0,1982	0,0393	0,1720	0,0296
Dalgacık Sinir Ağı (DSA)	MEXICAN HAT	0,1030	0,0106	0,1682	0,0283	0,1480	0,0219
	POLYWOG1	0,1684	0,0284	0,2225	0,0495	0,2343	0,0549
	POLYWOG2	0,2649	0,0702	0,3014	0,0908	0,2716	0,0737
	POLYWOG3	0,1191	0,0142	0,1882	0,0354	0,1737	0,0302
	POLYWOG4	0,1339	0,0179	0,2219	0,0492	0,2036	0,0414
	POLYWOG5	0,1036	0,0107	0,1733	0,0300	0,1807	0,0326
	RASP1	0,1185	0,0140	0,1644	0,0270	0,1837	0,0338
	RASP2	2,8407	8,0698	0,5247	0,2753	0,8350	0,6972
	RASP3	0,1414	0,0200	0,2606	0,0679	0,1310	0,0172
	SLOG1	0,1598	0,0255	0,2258	0,0510	0,1790	0,0320
	SLOG2	0,1145	0,0131	0,1980	0,0392	0,1814	0,0329

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kurupelit Kampüsüne yerleştirilen meteorolojik ölçüm istasyonundan alınan 10 dakika çözünürlüklü ortalama basınç, sıcaklık, nem ve 40 metre yükseklikteki rüzgar hız verileri değerlendirilerek öncelikli olarak çok kısa vadeli rüzgar hızı tahmini için yeni bir tahmin modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Sahip olduğumuz veri seti içerisinde 50 metre ve 60 metre yükseklikler içinde veriler bulunmasına rağmen, yükseklik arttıkça rüzgar hızlarının daha düzenli yapılar sergilemesi nedeniyle, alçak seviyelerde yapılacak başarılı rüzgar hızı tahminleri, daha yüksek seviyelerde çok daha kararlı sonuçlar verebileceği düşüncesindeyiz. Çalışmamız, bu düşüncemizi destekler şekilde başarılı sonuçlar vermiştir.

Sürekli ve düzensiz verilerin gelecek değerlerinin tahmin edilmesinde defalarca başarımlarını kanıtlamış olan dalgacık ve yapay sinir ağı modelleri bir araya getirilerek, ülkemizde ilk kez, rüzgar hızının gelecek değerlerinin tahmin edilmesi için dalgacık aktivasyon fonksiyonlarını kullanan yapay sinir ağı modeli ile rüzgar hızı verilerinin tahminlenmesi yapılmış ve bu yeni hibrit sinir ağı modeli ile geleneksel yapay sinir ağı başarımları karşılaştırılmıştır. Başarım etmeni olarak belirlenen MSE ve RMSE değerleri ayrıntılı olarak Çizelge 6.2, 6.3 ve 6.4’de verilmiştir. Ağların test edilmesi sırasında giriş verisi içerisinde eğitim verileri de kullanılmıştır. Ancak ağın başarımı hesaplanırken, sadece eğitim verileri dışında yapılan tahmin edilen değerler kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; dalgacık aktivasyon fonksiyonları, geleneksel yapay sinir ağı fonksiyonlarından seçilen tanjant sigmoig (tansig) ve logaritmik sigmoid (logsig) fonksiyonlarına göre, 12 ay boyunca yapılan çok kısa vadeli tahminlerde, neredeyse en az bir kez daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Özellikle; Polywog1 fonksiyonu 12 ayda, Mexican Hat ve Rasp1 fonksiyonları 10’ar ayda, Polywog4 ve Rasp2 fonksiyonları 8’er ayda, tansig ve logsig fonksiyonlarına göre daha iyi tahmin sonuçları vermiştir. Radyal tabanlı sinir ağı ile dalgacık sinir ağının başarım sonuçları incelendiğinde ise Aralık ayı dışındaki tüm aylarda dalgacık sinir ağı, radyal tabanlı sinir ağına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Aralık ayı

sonuçlarında ise iki yöntem arasında büyük bir uçurum bulunmamaktadır. Dalgacık sinir ağı'nın wavelon sayısı ya da gizli katman sayısında yapılabilecek birkaç ayarlama ile bu sorunda üzerinde gelinebileceği düşüncemiz.

En başarılı dalgacık aktivasyon fonksiyonları kullanılarak yapılan tahminlerden her birine ait ikişer adet tahmin grafiği ekler kısmında verilmiştir. Polywog1 fonksiyonuna ait grafikler Ek A'da, Mexican Hat fonksiyonuna ait grafikler Ek B'de, Rasp1 fonksiyonuna ait grafikler Ek C'de, Polywog4 fonksiyonuna ait grafikler Ek D'de ve Rasp2 fonksiyonuna ait grafikler Ek E'de verilmiştir.

Geleneksel yapay sinir ağı modeli ile tahmin yapılırken, başarılı sonuçlar elde edebilmek için çok sık yapılan işlem, ağı en iyi öğrenme derecesine gelene kadar sürekli eğitmek ve bu noktaya ulaşıldığında nöron ağırlıkları kaydedilerek simülasyon işlemini bu ağırlık değerleri ile yapmaktır. Ancak ortaya koymuş olduğumuz dalgacık sinir ağı yapısında, tahmin edilecek her bir an için, o anki veriden geri yayılım yapılarak, sadece ve sadece bir kez eğitilerek tahminleme yapılmış ve yukarıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

Elde edilen veriler sonucunda, DSA kullanılarak yapılan tahminlerin, YSA ve RTFA kullanılarak yapılan tahminlere göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmamız göstermiştir ki; rüzgar hızının gelecek değerleri için yapılan başarılı tahmin işlemi rüzgar türbinlerinde elde edilecek enerjinin önceden tespit edilerek, enerji güvenilirliğinin artışı ve sisteme girebilecek rüzgar kaynaklı aşırı zorlamaları önceden öngörülerek, sistem güvenliğini sağlayacaktır. Bu sayede daha etkin enerji üretimi yapılabilecek, rüzgar tarlalarındaki türbinlerin çalışma güvenliği arttırarak olası kazaların önüne geçilebilecek ve ayrıca makro düzeyde enerji piyasasında oluşabilecek dalgalanmaların öngörülebilmesine imkan sağlayacaktır.

Çalışmamızda Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kurupelit Yerleşkesi'ne ait basınç, sıcaklık, nem ve rüzgar hızı verileri, ortaya koymuş olduğumuz dalgacık sinir ağı tabanlı tahminleme için kullanılmasına karşın, aynı yöntem ile farklı bir coğrafik noktanın, farklı zaman dilimlerindeki rüzgar hızlarının tahmini de yapılabilir. Bu çalışma, değişen atmosfer koşullarına hızlı uyum sağlanması hedeflenen rüzgar enerjisi sağlayan sistemleri için bir öngörü modeli oluşturacaktır. Bununla beraber, rüzgar gibi süresiz ve değişken bir veri yapısı için bu denli iyi sonuçlar vermiş olan dalgacık sinir ağı modelinin kullanım alanları açısından herhangi bir kısıtlama görmemekteyiz. Meteorolojik verilere göre daha kararlı

yapılara sahip veri grupları için DSA tahmin modelinin çok daha iyi sonuçlar ortaya koyacağını öngörmekteyiz.

KAYNAKLAR

- [1] Koç, E., Şenel M.C., 2013, Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu - Genel Değerlendirme, *Mühendis ve Makina*, cilt 54, 32-44.
- [2] Koç, E., Kaplan E., 2008, Dünyada ve Türkiye’de Genel Enerji Durumu-I Dünya Değerlendirmesi, *Termodinamik Dergisi*, 187, 70-80.
- [3] Koç, E., Kaplan, E. 2008, Dünyada ve Türkiye’de Genel Enerji Durumu-II Türkiye Değerlendirmesi, *Termodinamik Dergisi*, 188, 106-118.
- [4] Şenel M.C., 2012, Rüzgar Türbinlerinde Güç İletim Mekanizmalarının Tasarım Esasları-Dinamik Davranış, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 321520.
- [5] BP Statistical Review of World Energy, June 2013. *British Petroleum (BP)*, London, UK.
- [6] Enerji Tabii ve Kaynaklar Bakanlığı, 2012. “2012 Yılı Enerji Dengesi,” http://www.enerji.gov.tr/EKLENTI_VIEW/index.php/raporlar/raporVeriGir/72222/2, (Ziyaret tarihi: 15 Nisan 2014).
- [7] Türkyılmaz O., Özgiresun C. 2013. Türkiye’nin Enerji Görünümü Mayıs 2013, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası*, Ankara.
- [8] Mavi Kitap, 2013, Enerji Tabii ve Kaynaklar Bakanlığı ile Bağlı ve İlgili Kuruluşlarının Amaç ve Faaliyetleri, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara.
- [9] World Nuclear Association, 2014. “World Nuclear Power Reactors&Uranium Requirements,” <http://www.world-nuclear.org/info/Facts-and-Figures/World-Nuclear-Power-Reactors-and-Uranium-Requirements/>, (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2014).
- [10] REN21, 2013. Renewables 2013 Global Status Report, *Renewables Energy Policy Network for the 21st Century (REN21)*, Paris, France.
- [11] The International Geothermal Association(IGA), 2012. “Geothermal in the World,”http://www.geothermalenergy.org/226,installed_generating_capacity.html, (Ziyaret tarihi: 15 Nisan 2014).
- [12] Çanka F., Kılıç, F. 2011, Türkiye’deki Yenilenebilir Enerjilerde Mevcut Durum ve Teşviklerdeki Son Gelişmeler, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 52, 103-115.
- [13] World Wind Energy Associaton, 2012. Worldwide Wind Energy Statistics 2012-Half Year Report, *World Wind Energy Associaton*, Bonn, Germany.
- [14] Özdamar, A., 2000, Dünya ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Araştırma, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6, 133-145.
- [15] Rebecca, M., 2011, *Wind Power*, San Jose State University, France.

- [16] Şen, Z., 2009, İklim Değişikliği Tatlı Su Kaynakları, Su Vakfı Yayınları, 272.
- [17] Özpınar, M.A., 2007, Yenilenebilir Enerji Santrallerinde Yapay Sinir Ağları Yöntemiyle Enerji Üretiminin Modellenmesi ve Planlanması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, 200862.
- [18] Ecoenerji, 2013, “Türkiye Rüzgar Haritası”, http://www.ecoenerji.net/haber_detay.asp?haberID=16, (Ziyaret tarihi: 16 Eylül 2013).
- [19] Repa, 2013, “Rüzgar Enerjisi Potansiyeli”, <http://www.repa.eie.gov.tr>, (Erişim Tarihi: 18 Ağustos 2013).
- [20] Çetin, N.S., 2006, Şebeke Bağlantısız PM Generatörlü Rüzgar Türbinlerinin YSA ile Sistem Optimizasyonu, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 197361.
- [21] Öztürk, H.H., 2008, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı*, Teknik Yayınevi, Ankara.
- [22] EİE, 1992, *Rüzgar Enerjisi*, Elektrik İşleri Etüt İdaresi, Ankara.
- [23] Güngör, M. ve Fırat, M., 2003, Türkiye’de rüzgar enerjisi potansiyeli ve geliştirilmesi, *I. Ege Enerji Sempozyumu Kitapçığı*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Denizli, 22-24 Mayıs, 373-379.
- [24] Özgener, Ö., 2002, Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgar Enerjisi Kullanımı, *EÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4, 159-173.
- [25] Toklu, M., 2002, Rüzgar Enerjisi ve Elazığ Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 116652.
- [26] Özdamar, A., 2001, Rüzgar enerjisi ve rüzgar türbinlerine genel bakış, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Kitapçığı*, İzmir, 18-20 Ocak, 242-254s.
- [27] Özdamar, A., 2002, Dünya ve Türkiye’de rüzgar enerjisinden yararlanılması üzerine bir araştırma, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2-3):109-285.
- [28] Patel, M.R., 2006, *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press, Boca Raton, Second Edition, London.
- [29] Çetin, N.S., 2006, Şebeke Bağlantısız PM Generatörlü Rüzgar Türbinlerinin YSA ile Sistem Optimizasyonu, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 197361.
- [30] Çetin, N.S., Özdamar, A., Çolak, M. ve Özbalta, N., 2003, Rüzgar türbinlerinde optimum dizayn devirlilik sayısının enerji üretimine etkisinin belirlenmesi, *I. Ege Enerji Sempozyumu Kitapçığı*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Denizli, 57-63s.
- [31] Çetin, N.S., 2001, Küçük güçlü bir rüzgar türbini tasarımı ve elektrik enerjisi eldesi, VI. Türk-Alman Sempozyumu CD’si, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir.
- [32] Shepherd, W. and Shepherd, D. W., 2003, *Energy Studies*, Imperial College Press, Second Edition, London.

- [33] Taşçıkaraoğlu A., Uzunoglu M., “Dalgacık Dönüşümü ve Yapay Sinir Ağları ile Rüzgar Hızı Tahmini”, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu FEEB 2011*, Fırat Üniversitesi-Elazığ, 5-7 Ekim 2011.
- [34] Khalid, M and Savkin A.V., 2010, A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage, *Renewable Energy*, 35,1520-1526,
- [35] Soman S. S., Zareipour H., Malik O., and Mandal P., 2010, A review of wind power forecasting methods with different time horizons, *North American Power Symposium*, Arlington, Texas, Sep. 26-28 Sep.
- [36] Milligan M., Schwartz M., and Wan Y., 2003, Statistical wind power forecasting models: Results for U.S. wind farms, *Windpower 2003*, Austin, Texas, 18–21 May.
- [37] Lange M., and Focken U., “New developments in wind energy forecasting,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting 2008 - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1-8, 20-24 July 2008.
- [38] Potter C. W., and Negnevitsky M., 2006, “Very short-term wind forecasting for Tasmanian power generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 21-2, 965- 972.
- [39] B. Candy, S. J. English, and S. J. Keogh, 2009, A Comparison of the impact of QuikScat and WindSat wind vector products on met office analyses and forecasts, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 47-6, 1632-1640.
- [40] MM5 Hava Tahmin Modeli, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Resmi Web Sitesi, <http://www.dmi.gov.tr/files/kurumsal/ekitap/esintiler4/9mm5.pdf> , (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2014)
- [41] Giebel, G., Landberg, L., Nielsen T. S. ve Madsen H., 1999. The Zephyr Project-The Next Generation Prediction System. Global Wind Power Conference, 2-5 April, Paris, France.
- [42] Malkoç Y. RESİAD Rüzgar Enerjisi ve Su Santralleri İşadamları Derneği, http://www.ressiad.org.tr/doc/EIE_Numerical_Weather_Prediction_for_TSO.pdf, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2013).
- [43] Güçlüer D., 2010, Kısa Süreli Rüzgar Enerjisi Tahminleri ve Ülkemiz İçin Önemi, *16th International Energy and Environment Fair and Conference*, İstanbul, Türkiye, 12-14 Mayıs.
- [44] Focken, U., Lange, M. ve Heinemann D., 2002. Regional Wind Power Prediction with Risk Control, *World Wind Energy Conference*, Germany, 2-6 July.
- [45] Giebel, G., Landberg, L., Kariniotakis, G. and Brownsword, R., 2003. State-of-the-Art on Methods and Software Tools for Short-Term Prediction of Wind Energy Production. *Proc. Of the European Wind Energy Association Conference, EWEC 2003*, Madrid, Spain 16-19 July.
- [46] Kariniotakis, G., Stavrakakis, G.S., Nogaret, E.F., 1996. Wind power forecasting using advanced neural network models. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 11, 4.

- [47] Kalogirou, S. A., 2000. Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5, 373 – 401.
- [48] Kalogirou, S.A., 1999. Applications of artificial neural networks in energy systems a review, *Energy Conversion & Management*, 40, 1073-1087.
- [49] Fu, L.M., 1994. *Neural Networks in Computer Intelligence*, McGraw-Hill International Editions.
- [50] Rumelhart D.E., Hinton, G.E., ve Williams, R.J. 1986. *Learning internal representation by error propagation. Parallel distributed processing*, Vol. 1: Foundations, MIT Press, Cambridge, Mass.
- [51] Cadenas E., and Rivera W., 2007, Wind speed forecasting in the South Coast of Oaxaca, Mexico, *Renewable Energy*, 32(12), 2116-2128.
- [52] Cadenas E., Jaramillo O.A., and Rivera W., 2010, Analysis and forecasting of wind velocity in chetumal, quintana roo, using the single exponential smoothing method, *Renewable Energy*, 35(5), 925-930.
- [53] Deng J. L., 1982, Control Problems of Grey System, *Syst. And Contr. Lett.*, 1, 288-294.
- [54] Deng J. L., 1989, Introduction to Grey System Theory, *The Journal of Grey System*, 1, 1-24.
- [55] Guo P., 2009, Research of a New MPPT Strategy Based on Gray Wind Speed Prediction, *Second International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling, KAM'09*, Wuhan, China, 3, 120-123, 30 Nov-1 July.
- [56] Chang P. S., and Li L., 1998, Ocean surface wind speed and direction retrievals from the SSM/I, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36(6), 1866-1871.
- [57] Alexiadis M. C., Dokopoulos P. S., and Sahsamanoglou H. S., 1999, Wind speed and power forecasting based on spatial correlation models, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 14(3), 836-842.
- [58] Damousis I. G., Alexiadis M. C., Theocharis J. B., and Dokopoulos P. S., 2004, A fuzzy model for wind speed prediction and power generation in wind parks using spatial correlation, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 19(2), 352- 361.
- [59] Giovanis E., 2012, Study of Discrete Choice Models and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System in the Prediction of Economic Crisis Periods in USA, *Economic Analysis & Policy*, 42(1).
- [60] Hoccoğlu F. O., Kurban M., 2005, Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi ile Eskişehir Bölgesi İçin Güneşlenme Süreleri Tahmini, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi ve Fuarı*, İstanbul, 22-25 Eylül, 292-295.
- [61] Yücel A., Güneri A. F., 2010, Application of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System to Supplier Selection Problem, *Journal of Engineering and Natural Sciences-Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 28, 224-234.
- [62] Atmaca H., Cetişli B., Yavuz H. S., 2010, The Comparison of Fuzzy Inference Systems and Neural Network Approaches with ANFIS Method for Fuel Consumption Data, *ELECO'2001 Second International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 7-11 Nov, Bursa, Turkey.

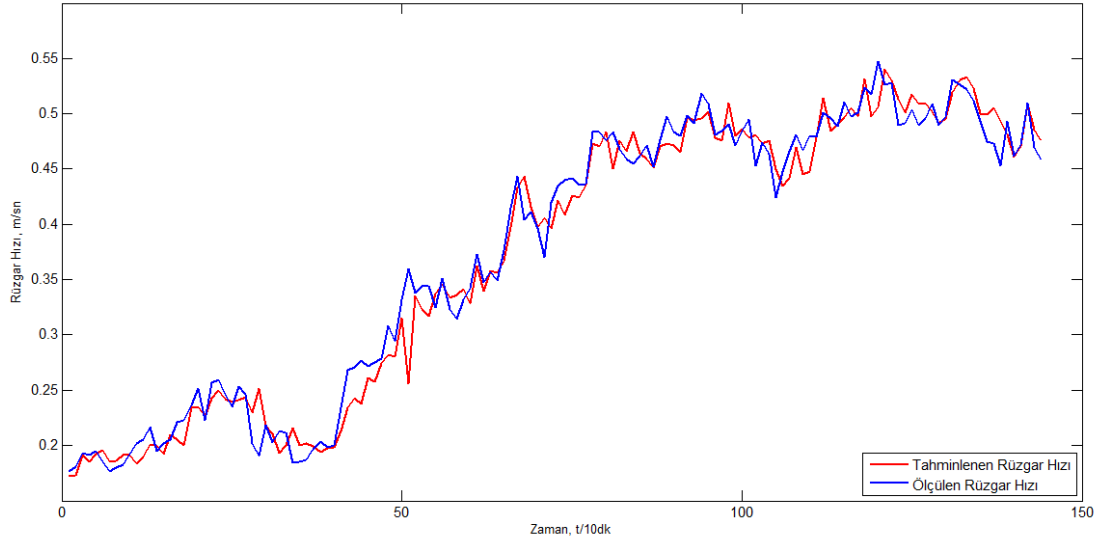
- [63] Avcı E., Türkoğlu İ., Poyraz M., 2005, An Intelligent Target Recognition System Based On Periodogram For Pulsed Radar Systems, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 18(2), 259-272.
- [64] Kabur L. SlideServe Web Site, <http://www.slideserve.com/makara/anfis>, (Ziyaret tarihi: 02 Şubat 2014).
- [65] Sarı N. İ., Arslan E., 2007, Geoit Yüksekliğinin ANFIS ile Adım Adım Hesaplanması, *Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, 1, 96.
- [66] Paksoy T., Yapısı Pehlivan N., Özceylan E., 2011, *Bulanık Küme Teorisi*, Nobel Akademi Yayınevi, Ankara.
- [67] Alcı M., Karatepe E., 2002, *Bulanık Mantık ve Matlab Uygulamaları*, Ege Üniversitesi Yayınları, İzmir.
- [68] Yıldırım E., Doğan E., Karavul C., Aşçı M., Özcep F., Arman H., 2007, Bulanık Mantık Modeli ile Zeminlerin Sınıflandırılması, *International Earthquake Symposium*, Koceli, Türkiye, 22-24 Ekim.
- [69] Altaş İ.H., “Bulanık Mantık: Bulanıklılık Kavramı”, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, Temmuz 1999, Sayı 62, Sayfalar: 80-85, Bilesim yayıncılık A.Ş., İstanbul.
- [70] Sarı M., Murat Y.Ş. ve Kırabalı M., 2005, Fuzzy modelling approach and applications, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9, 77-92.
- [71] Esendal H, 2007, Eğirdir Gölü Su Seviyesi Mevsimsel Değişiminin Bulanık Mantık Metoduyla Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 200553.
- [72] Akyazı Ö., Zenk H., Akpınar A. S., 2011, Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanarak Sürekli Mıknatıslı DA Motorunun Hız Denetiminin Gerçeklenmesi, *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Türkiye, 16-18 May.
- [73] Karahan Ç., 2007, Bulanık Küme Teorisi ile Yüksek Seviyede Buzlanma Potansiyelini Tahmin Eden Program Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 212863.
- [74] Veitch D., 2005, Wavelet Neural Networks and their application in the study of dynamical systems, Yüksek Lisans Tezi, York Üniversitesi, Matematik Bölümü, York /İngiltere.
- [75] Baily, D., Thomson, D., 1990, Developing Neural Network Application, *AI Expert*, 33-41.
- [76] Katz, J. O., 1992, Developing Neural Network Forecasters for Trading, *Technical Analysis of Stocks and Commodities*, 58-70.
- [77] Doig, G., “Severity of Illness Scoring in the Intensive Care Unit: A Comparison of Logistic Regression and Artificial Neural Networks”, PhD , The University of Western Ontario, 1999.
- [78] Jayalakshmi, T. and Santhakumaran A., 2011, Statistical Normalization and Back Propagation for Classification, *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 3(1), 1793-8201.

- [79] Öztemel, E, *Yapay Sinir Ağları*, Birinci Baskı, Papatya Yayıncılık, İstanbul, 2003.
- [80] Doğan, E., Işık S. ve Mehmet Sandalcı M., 2007, Günlük Buharlaştırmanın Yapay Sinir Ağları Kullanarak Tahmin Edilmesi, *İMO Teknik Dergi*, 4119-4131.
- [81] Bolat, S. ve Kalenderli, Ö. 2003. Levenberg-Marquardt Algoritması Kullanılan Yapay Sinir Ağı ile Elektrot Biçim Optimizasyonu. *International XII. Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks – TAINN*, Çanakkale, Türkiye, 02-04 Temmuz.
- [82] Challagulla, V.U.B. , Bastani, F.B., I-Ling Yen, Paul, 2005, Empirical assessment of machine learning based software defect prediction techniques, *10th IEEE International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems, WORDS 2005*, 2-4 Feb, 263-270.

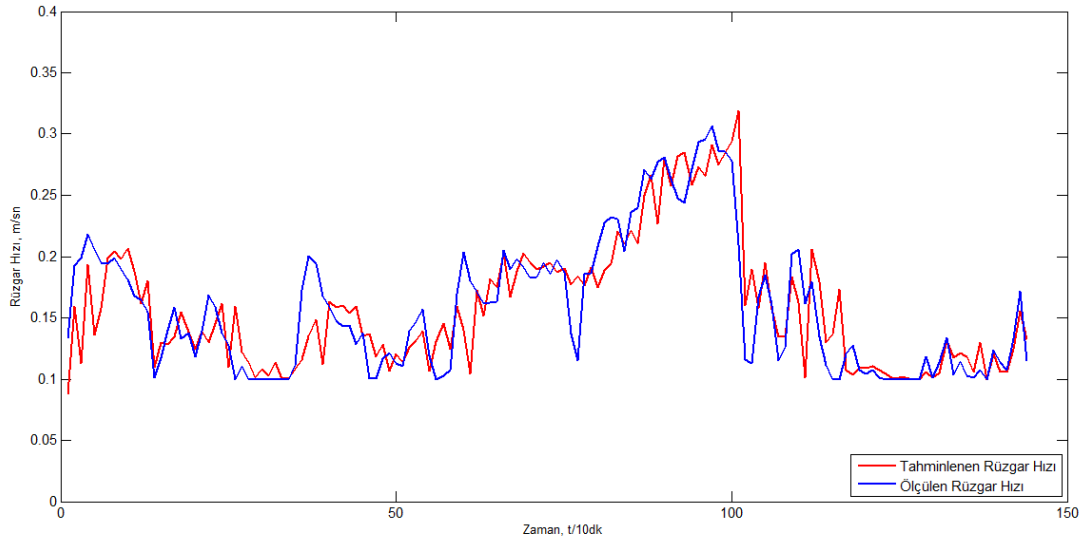
EKLER

- EK A** : Polywog1 fonksiyonunda ait rüzgar hızı tahmin grafikleri
- EK B** : Mexican Hat fonksiyonunda ait rüzgar hızı tahmin grafikleri
- EK C** : Rasp1 fonksiyonunda ait rüzgar hızı tahmin grafikleri
- EK D** : Polywog4 fonksiyonunda ait rüzgar hızı tahmin grafikleri
- EK E** : Rasp2 fonksiyonunda ait rüzgar hızı tahmin grafikleri

EK A

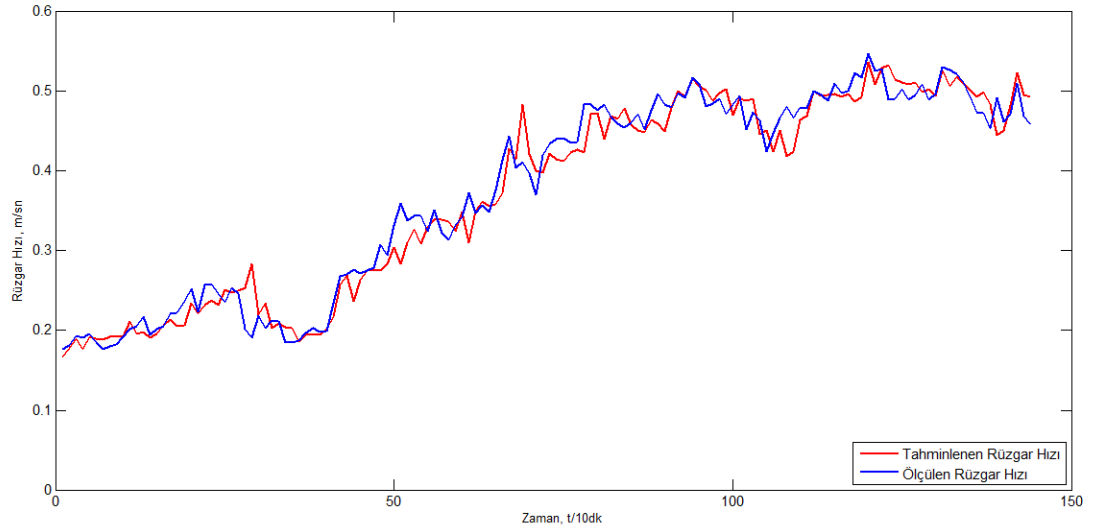


Şekil A.1. Kasım ayına ait Polywog1 transfer fonksiyonu ile rüzgar hızı tahmini

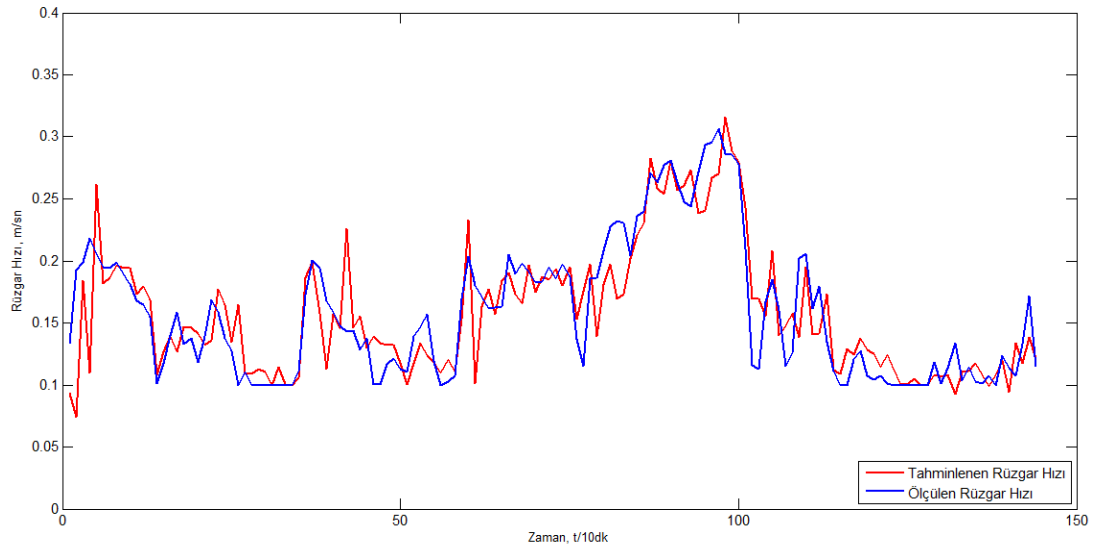


Şekil A.2. Aralık ayına ait Polywog1 transfer fonksiyonu ile rüzgar hızı tahmini

EK B

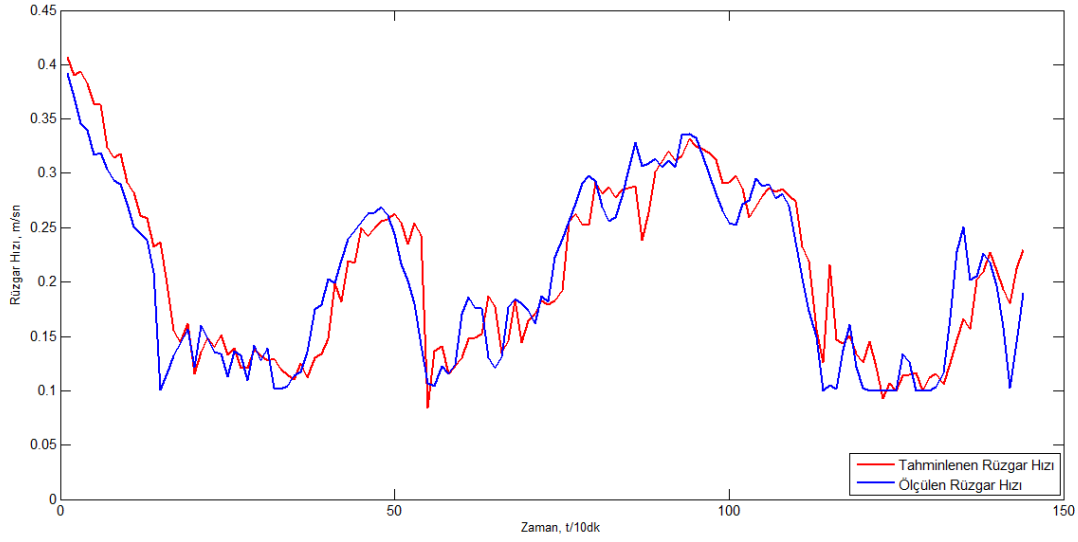


Şekil B.1. Kasım ayına ait Mexican Hat aktivasyon fonksiyonu ile rüzgar hızı tahmini.

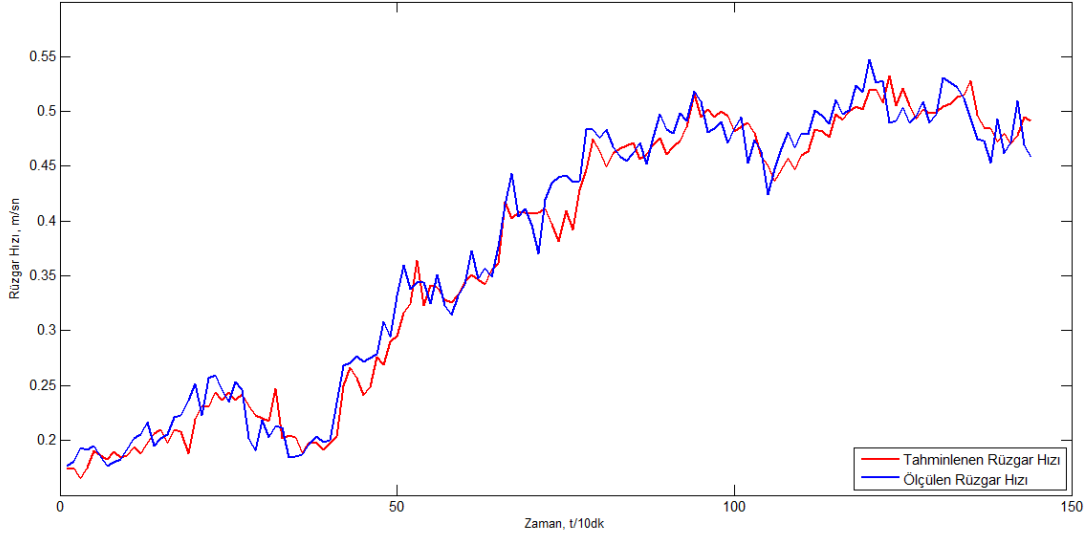


Şekil B.2. Aralık ayına ait Mexican Hat aktivasyon fonksiyonu ile rüzgar hızı tahmini.

EK C

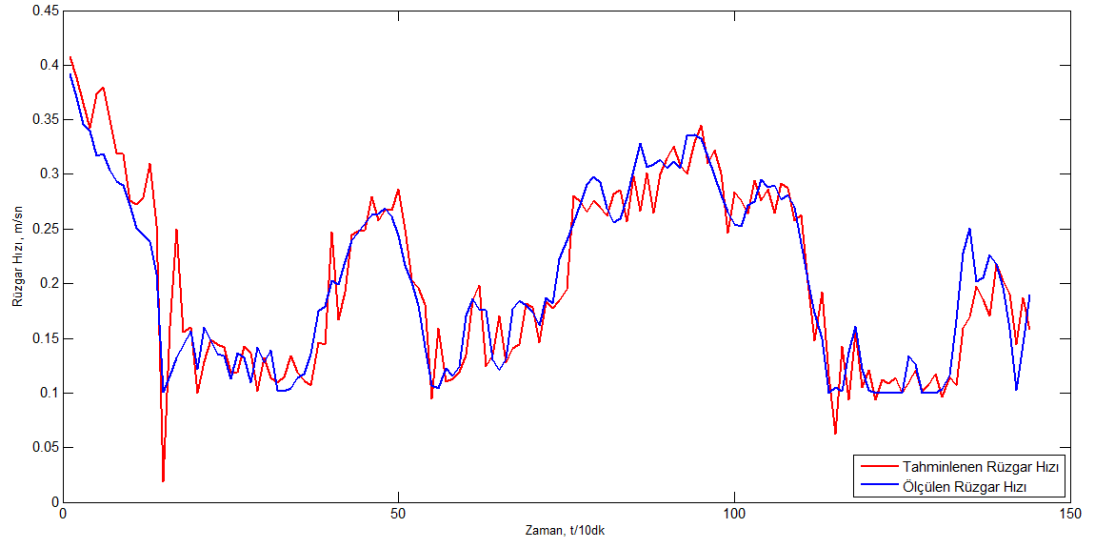


Şekil C.1. Mart ayına ait Rasp1 aktivasyon fonksiyonu ile rüzgar hızı tahmini.

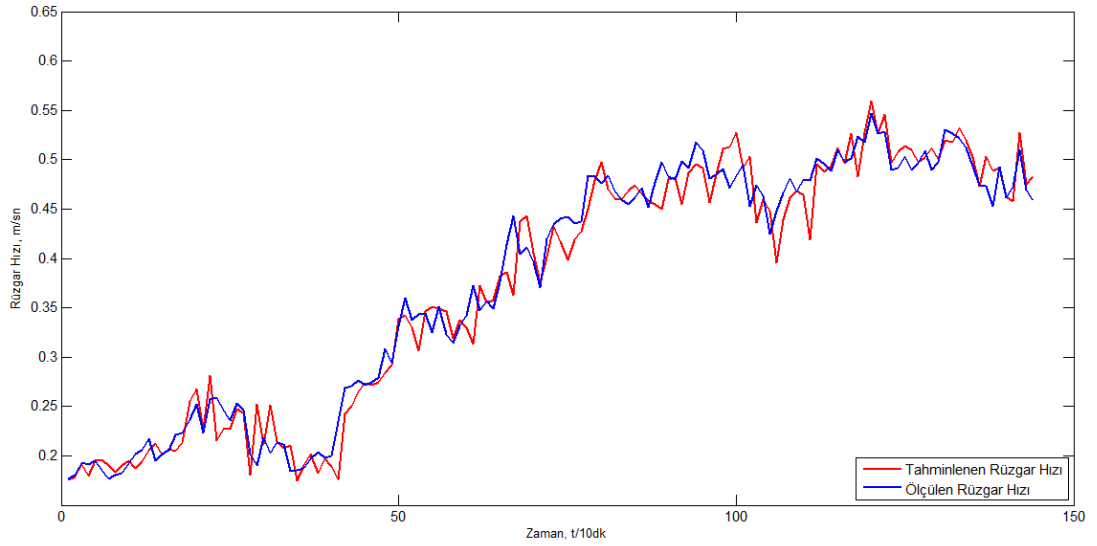


Şekil C.2. Kasım ayına ait Rasp1 aktivasyon fonksiyonu ile rüzgar hızı tahmini.

EK D

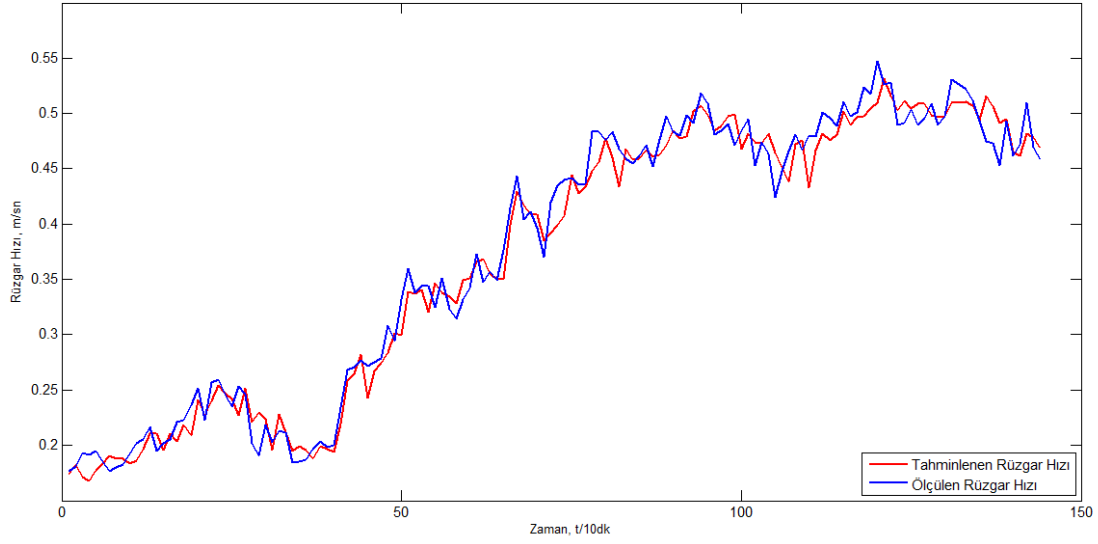


Şekil D.1. Mart ayına ait Polywog4 aktivasyon fonksiyonu ile rüzgar hızı tahmini.

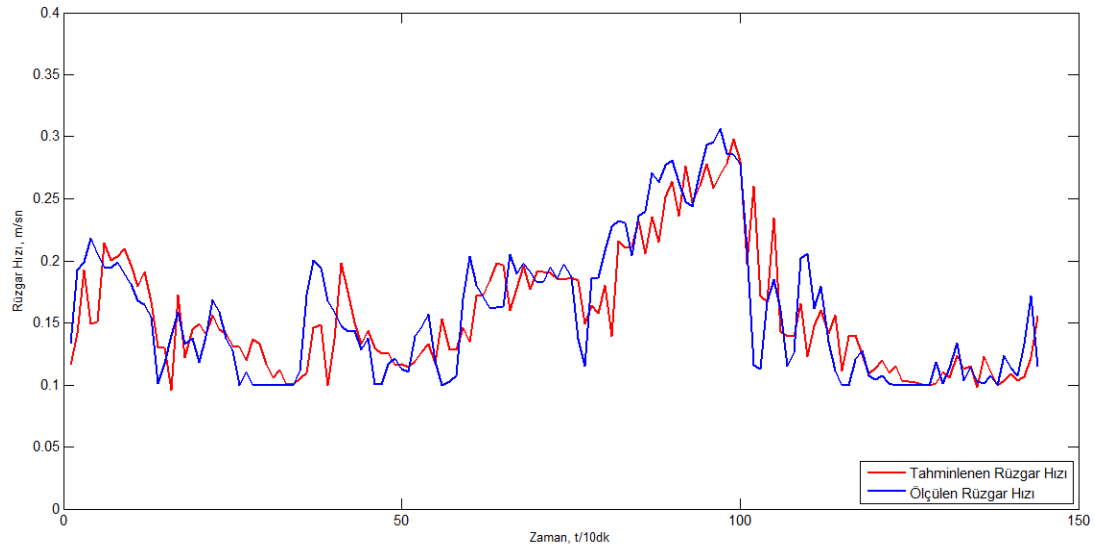


Şekil D.2. Kasım ayına ait Polywog4 aktivasyon fonksiyonu ile rüzgar hızı tahmini.

EK E



Şekil E.1. Kasım ayına ait Rasp2 transfer fonksiyonu ile rüzgar hızı tahmini



Şekil E.2. Aralık ayına ait Rasp2 transfer fonksiyonu ile rüzgar hızı tahmini

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Serkan ŞENKAL

Doğum Yeri ve Tarihi : Amasya / 1979

E-Posta : serkansenkal@gmail.com

Lisans : Kocaeli Üniversitesi,
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Mesleki Deneyim :

- 2003 - 2003 Baykaltech Instruments - İzmit / Kocaeli
Tasarım Mühendisi
- 2003 – 2004 19 Mayıs Üniversitesi, Amasya MYO - Merkez / Amasya
Öğretim Görevlisi (Sözleşmeli)
Mikroişlemciler ve Mikrodenetleyiciler Dersi
- 2004 - 2004 Merzifon Elektromotor A.Ş - Merzifon/Amasya
Üretim Müdürü
- 2004 – 2006 19 Mayıs Üniversitesi, Amasya MYO - Merkez / Amasya
Öğretim Görevlisi (Sözleşmeli)
- 2007 – 2009 Amasya Üniversitesi, MYO - Merkez / Amasya
Öğretim Görevlisi (Sözleşmeli)
- 2009 – 2011 Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Turhal MYO - Turhal / Tokat
Öğretim Görevlisi

Ödüller :

- TÜBİTAK Alternatif Enerjili Araç Yarışları, Formula-G 2009, Kurul Özel
Ödülü
- TÜBİTAK Alternatif Enerjili Araç Yarışları, Formula-G 2010, Kurul Özel
Ödülü

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Senkal,S. ; Ozgonenel,O., 2013. Performance Analysis of Artificial and Wavelet Neural Networks for Short Term Wind Speed Prediction. *Electrical and Electronics Engineering (ELECO) 8th International Conference*, November 27-29,2013 Bursa, Turkey.