

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MANİSA SOMA BÖLGESİ İÇİN MESO ÖLÇEK SAYISAL HAVA TAHMİN
MODELİ (WRF) VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELİ
(WINDSIM) KULLANILARAK KISA VADELİ RÜZGAR ENERJİSİ TAHMİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bahtiyar EFE

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

TEMMUZ 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MANİSA SOMA BÖLGESİ İÇİN MESO ÖLÇEK SAYISAL HAVA TAHMİN
MODELİ (WRF) VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELİ
(WINDSIM) KULLANILARAK KISA VADELİ RÜZGAR ENERJİSİ TAHMİNİ.**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bahtiyar EFE
511091005**

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ş. Sibel MENTEŞ

TEMMUZ 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511091005 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Bahtiyar EFE**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Manisa Soma Bölgesi için Meso Ölçek Sayısal Hava Tahmin Modeli (WRF) ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modeli (WindSim) Kullanılarak Kısa Vadeli Rüzgar Enerjisi Tahmini** ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ş. Sibel MENTEŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr.Yurdanur ÜNAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç. Dr.Burak BARUTÇU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **13.07.2012**
Savunma Tarihi : **24.07.2012**

Anneme ve Babama,

ÖNSÖZ

Çalışmanın gerçekleşmesinde katkılarından dolayı başta Doç. Dr. Ş. Sibel MENTEŞ olmak üzere, Prof. Dr. Yurdanur ÜNAL'a, Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU'ya, Yrd. Doç. Dr. Barış ÖNOL'a, Öğr. Gör. Dr. Elçin TAN'a, Fizik Mühendisi Emrah Tuncay ÖZDEMİR'e, Elektrik Mühendisi Sevinç RÜSTEMOĞLU'na, Meteoroloji Yüksek Mühendisi Abdullah KAHRAMAN'a, Meteoroloji Yüksek Mühendisi Umut Gül BAŞAR'a, Meteoroloji Mühendisi Canberk KARADAVUT'a, Meteoroloji Mühendisi Emel ÜNAL'a, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü Öğrencisi Ferat ÇAĞLAR'a, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü Öğrencisi Yaşar Burak ÖZTANER'e, Meteoroloji Mühendisi Serhan YEŞİLKÖY'e, Meteoroloji Mühendisi Özgün İNCEOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim.

Temmuz 2012

Bahtiyar EFE
Meteoroloji Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	3
2. RÜZGARIN TARİHÇESİ, TÜRKİYE’DEKİ VE DÜNYADAKİ RÜZGAR ENERJİSİNİN DURUMU	7
2.1 Rüzgarın Tanımı.....	7
2.2 Tarihçesi, Rüzgar Gücü ve Rüzgar Enerjisi	7
2.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	10
2.3.1 Dünyadaki gelişmeler	10
2.3.2 Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları.....	12
2.4 Rüzgar Enerjisi Pazarındaki Global Gelişmeler.....	12
2.5 Rüzgar Enerjisinde Türkiye’deki Gelişmeler	16
3. RÜZGAR	19
3.1 Atmosferik Sınır Tabaka	19
3.1.1 Atmosferik sınır tabakanın tanımı.....	19
3.1.2 Atmosferik sınır tabakanın özellikleri.....	20
3.1.3 Sınır tabakanın kalınlığı ve yapısı.....	20
3.1.3.1 Sınır tabakanın günlük değişimi.....	21
3.2 Rüzgarın Oluşum Nedenleri	23
3.3 Jeostrofik Rüzgar.....	24
3.4 Rüzgar Enerjisi	25
3.5 İstatistiksel Metodlar	27
3.5.1 Weibull olasılık dağılımı.....	27
4. SAYISAL HAVA TAHMİNİ	29
4.1 Giriş.....	29
4.2 WRF Modeli.....	33
4.2.1 WRF ‘nın özellikleri	35
4.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	35
4.3.1 Genel bilgiler.....	35
4.3.2 Navier-Stokes denklemleri.....	36
4.3.2.1 Temel kabuller	37
4.3.2.2 Gerçek türev	38
4.3.2.3 Korunum kanunları	38
4.3.2.4 Süreklilik denklemi	39
4.3.2.5 Momentumun korunumu.....	40

4.3.2.6 Denklemlerin elde edilişı	41
4.3.3 Kesikli hale getirme yöntemleri	42
4.3.3.1 Sonlu hacim yöntemi.....	42
4.3.3.2 Sonlu elemanlar yöntemi.....	42
4.3.3.3 Sonlu farklar yöntemi.....	43
4.3.4 Türbülans modelleri	43
4.3.4.1 Reynolds-averaged navier–stokes	44
4.4 WindSim Modeli	44
5. SOMA-RES ALAN BİLGİSİ VE TÜRBİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	49
5.1 Soma Hakkında Genel Bilgiler	49
5.2 Manisa İli Meteorolojik Bilgiler	49
5.3 Soma Rüzgar Enerji Santrali	51
6. VERİ ANALİZİ VE KISA SÜRELİ RÜZGAR TAHMİNİ.....	53
6.1 Verilerin Değerlendirilmesi.....	53
6.2 Wrf Model Versiyonunun Seçimi	53
6.3 Wrf Model Konfigürasyonu	54
6.4 Klimatolojik Verilerin Değerlendirilmesi	54
6.5 Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi.....	57
6.6 Soma-RES İçin Ekstrem Rüzgar Hızları İçin Yapılan WRF Simülasyonları İle Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	59
6.7 Soma-RES Sahası İçin 2010 Periyodunu Kapsayan 10 Dakikalık WRF Modeli Simülasyonlarının Gözlem Değerleri İle Karşılaştırılması	68
6.8 Soma-RES İçin WindSim Model Sonuçları	81
6.9 Gözlem Değerleri ile WindSim Sonuçları Arasında İlişki Kurulması	89
SONUÇLAR	93
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ	101

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ACM2	: Asymmetric Convective Model version 2
AFWA	: Air Force Weather Agency
ANEMOS	: Development of A NExt generation wind resource forecasting system for the large-scale integration of Onshore and offshore wind farms
ARW	: Advanced Research WRF
AST	: Atmosferik Sınır Tabaka
AWPT	: Advanced Wind Power Prediction Tool
BAP	: Bilimsel Araştırma Projeleri
CFD	: Computational Fluid Dynamics
ECMWF	: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ED-50	: European Datum 1950
EREC	: European Renewable Energy Council
EWEA	: European Wind Energy Association
FAA	: Federal Aviation Administration
FSL	: Forecast Systems Laboratory
G	: Güney
GB	: Güneybatı
GEM	: Global Environmental Multiscale Model
GME	: Global Modell
GSYİH	: Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
GW	: GigaWatt
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HIRLAM	: High Resolution Limited Area Model
HLA	: High Level Architecture
hPA	: hekto Paskal
IEA	: International Energy Agency
IFS	: Integrated Forecast System,
ISET	: Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
KD	: Kuzeydoğu
KKD	: Kuzey kuzeydoğu
KT	: Karışma Tabakası
kW	: kiloWatt
kWh	: kiloWattsaat
LES	: Large Eddy Simulation
LM	: Lokal Modell
M.Ö.	: Milattan Önce
M.S.	: Milattan Sonra
mb	: milibar
METAR	: METeorologic Airport Report

MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MM5	: PSU/NCAR mesoscale model
MOS	: Model Output Statistics
Mtep	: Milyon ton eşdeğeri petrol
MW	: Mega Watt
NCAR	: National Center for Atmospheric Research
NCEP	: National Centers for Environmental Prediction
NCHPC	: National Center for High Performance Computing
NMM	: Nonhydrostatic Mesoscale Model
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
NRL	: Naval Research Laboratory
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development
PBL	: Planetary Boundary Layer
PV	: Foto Voltaik
RANS	: Reynolds-averaged Navier-Stokes
RES	: Rüzgar Enerji Santrali
RISOE	: Riso Energy
SA	: Serbest Atmosfer
SHT	: Sayısal Hava Tahmini
TKE	: Turbulence Kinetic Energy
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UM	: Unified Model
UYBHM	: Ulusal Yüksek Başarımli Hesaplama Merkezi
WAsP	: The Wind Atlas Analysis and Application Program
WRF	: Weather Research & Forecasting Model
3DVAR	: 3 Dimensional Variational
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynağı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yenilenebilir elektrik kurulu gücü (GW) (Erec,2010).	11
Çizelge 2.2 : Nihai enerji tüketimine yenilenebilir enerji katkısı (Mtep (Milyon ton eşdeğeri petrol)) (Erec, 2010).	12
Çizelge 2.3 : 2003-2010 yılları arasında özel sektör tarafından işletmeye alınan yeni elektrik üretim kapasitesi (Epdk , 2010).	13
Çizelge 2.4 : Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli (Malkoç, 2008).....	18
Çizelge 5.1 : Manisa İline kurulabilecek RES güç kapasitesi (Url-6).....	51
Çizelge 5.2 : Enercon E-44'ün Güç Çıktısı(P) ve Güç Katsayısı(C_p) değerleri (Url-13).	52
Çizelge 6.1 : Ardıçlı Ölçüm Direği Bilgileri (Enlem boylam bilgileri European Datum 1950 (ED-50) formatındadır.)	57
Çizelge 6.2 : Soma-RES Ardıçlı rüzgar verisi için yönler göre şekil ve ölçek parametreleri ile ortalama rüzgar şiddeti ve esme frekansı.....	58
Çizelge 6.3 : Ardıçlı Ölçüm Direği (34m) İçin Sektör bazında yapılan mutlak hata ortalamaları. (V rüzgar şiddeti, Y yön hatalarıdır. Gözlem sayıları 1 yıllık 10 dakikalık gözlem sayısına göre % olarak ifade edilmiştir.).....	77
Çizelge 6.4 : Ardıçlı (34m yükseklik için) Rüzgar Gözlemlerinin Şiddetine Göre Kategorize Edilmiş Mutlak Hatalar. (V rüzgar şiddeti, Y yön hatasıdır. Gözlem sayıları 1 yıllık 10 dakikalık gözlem sayısına göre % olarak ifade edilmiştir.).....	78
Çizelge 6.5 : Ardıçlı Ölçüm Direği (52m) İçin Sektör bazında yapılan mutlak hata ortalamaları. (V rüzgar şiddeti, Y yön hatalarıdır. Gözlem sayıları 1 yıllık 10 dakikalık gözlem sayısına göre % olarak ifade edilmiştir.).....	80
Çizelge 6.6 : Ardıçlı (53m yükseklik için) Rüzgar Gözlemlerinin Şiddetine Göre Kategorize Edilmiş Mutlak Hatalar. (V rüzgar şiddeti, Y yön hatasıdır. Gözlem sayıları 1 yıllık 10 dakikalık gözlem sayısına göre % olarak ifade edilmiştir.).....	80
Çizelge 6.7 : Türbinlere taşınan verilerin a, b ve R^2 değerleri.....	89

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Rüzgar türbini 1888 (Url-7).	8
Şekil 2.2 : Belçika'nın Kuzey Denizindeki rüzgar çiftliği (Url-7).	9
Şekil 2.3 : AB'nin nihai enerji talebi (Erec, 2010).	11
Şekil 2.4 : Küresel yıllık kurulan rüzgar gücü (1996-2011) (Url-9).	13
Şekil 2.5 : Küresel yıllık kümülatif kurulu rüzgar gücü (1996-2011) (Url-9).	13
Şekil 2.6 : Kıtalarla göre yıllık artış (2003-2011) (Url-9).	14
Şekil 2.7 : AB yıllık kurulan rüzgâr kurulu gücü(1995-2011) (Url-10).	14
Şekil 2.8 : AB kümülatif kurulu rüzgar gücü (1995-2011) (Url-10).	15
Şekil 2.9 : RES'lerin Kurulu Güç Bakımından Yıllara Göre Kümülatif Dağılımı....	15
Şekil 2.10 : Rüzgar hız dağılımı (Türkiye Topoğrafyası, 30 m, 50 m, 70 m ve 100 m) (Malkoç, 2008).	16
Şekil 2.11 : İlkbahar Ortalama Rüzgar Şiddeti(Malkoç, 2008).	17
Şekil 2.12 : Yaz Ortalama Rüzgar Şiddeti (Malkoç, 2008).	17
Şekil 2.13 : Sonbahar Ortalama Rüzgar Şiddeti (Malkoç, 2008).	17
Şekil 2.14 : Kış Ortalama Rüzgar Şiddeti (Malkoç, 2008).	17
Şekil 4.1 : T+72 için 10 m. rüzgar haritası (Url-8).	31
Şekil 4.2 : (T+12)–(T+36) arası için 24 saatlik toplam yağış haritası (Url-8).	32
Şekil 4.3 : T+48 için 850 hPa sıcaklık ve deniz seviyesine indirilmiş basınç haritası (Url-8).	32
Şekil 4.4 : T+24 için 500 hPa yükseklik, sıcaklık ve rüzgar haritası (Url-8).	33
Şekil 4.5 : WRF modeli asimilasyonsuz yağış (mm) çıktısı (Url-8).	34
Şekil 4.6 : WRF-3DVAR modeli yağış (mm) çıktısı (Url-8).	34
Şekil 4.7 : Marmara Bölgesi'nde seçilen bir topografya üzerine yapılan çözüm ağı (Uzol, 2009).	37
Şekil 4.8 : Üç boyutlu arazi modelinin kaba bir şekli (Nilsson, 2010).	45
Şekil 4.9 : Üç boyutlu modelin sınırları (Nilsson, 2010).	45
Şekil 4.10 : Üç boyutlu modelin zemini (Nilsson, 2010).	46
Şekil 4.11 : Üç boyutlu modelin tavanı (Nilsson, 2010).	46
Şekil 4.12 : Yüksek eğim sebepli akım ayrışması (Wallbank, 2008).	46
Şekil 4.13 : Lineer modelde görülen orografiye paralel akış (Wallbank, 2008)	47
Şekil 4.14 : Non-lineer modelde görülen orografiye paralel akış(Wallbank, 2008) .	47
Şekil 5.1 : Manisa'da 50 m'deki rüzgar hız dağılımı (Url-11).	50
Şekil 5.2 : Manisa'da 50 m'deki kapasite faktörü dağılımı (Url-6).	50
Şekil 5.3 : Soma-RES fotoğrafları(Url-12).	51
Şekil 5.4 : Enercon E 44 'in güç eğrisi (Url-13).	52
Şekil 6.1 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık ortalama sıcaklık dağılımı.	55
Şekil 6.2 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık maksimum sıcaklık dağılımı.	55

Şekil 6.3 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık minimum sıcaklık dağılımı.....	55
Şekil 6.4 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık ortalama bağıl nem dağılımı.....	56
Şekil 6.5 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık toplam yağış dağılımı.	56
Şekil 6.6 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık ortalama rüzgar şiddeti dağılımı.....	57
Şekil 6.7 : Ardıçlı istasyonu 52m. yükseklikte ölçülen rüzgar şiddeti frekans histogramı.....	58
Şekil 6.8 : Soma-RES bölgesindeki 34m yüksekliğinde rüzgarın alansal dağılımı... ..	59
Şekil 6.9 : 1.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.	60
Şekil 6.10 : 1.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.	60
Şekil 6.11 : 2.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.	61
Şekil 6.12 : 2.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.	61
Şekil 6.13 : 3.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.	62
Şekil 6.14 : 3.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.	62
Şekil 6.15 : 4.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.	63
Şekil 6.16 : 4.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.	63
Şekil 6.17 : 5.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.	64
Şekil 6.18 : 5.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.	65
Şekil 6.19 : 6.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.	65
Şekil 6.20 : 6.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.	66
Şekil 6.21 : 7.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.	66
Şekil 6.22 : 7.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.	67
Şekil 6.23 : 8.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.	67
Şekil 6.24 : 8.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.	68
Şekil 6.25 : Soma Ardıçlı istasyonu 2010 yılı 34 m yükseklik için 10 dakikalık günlük ortalama rüzgar şiddeti gözlemlerinin ilk, ikinci ve üçüncü 24 saat WRF çıktıları ile karşılaştırılması.	69
Şekil 6.26 : Soma (Ardıçlı) istasyonu için 2010 yılı 34m yükseklik için 10 dakikalık günlük ortalama rüzgar yönü gözlemlerinin ilk, ikinci ve üçüncü 24 saat WRF çıktıları ile karşılaştırılması.	70

Şekil 6.27 : Soma (Ardıçlı) istasyonu 2010 yılı 53 m yükseklik için 10 dakikalık günlük ortalama rüzgar şiddeti gözlemlerinin ilk, ikinci ve üçüncü 24 saat WRF çıktıları ile karşılaştırılması.....	70
Şekil 6.28 : Soma (Ardıçlı) istasyonu için 2010 yılı 52 m yükseklik için 10 dakikalık günlük ortalama rüzgar yönü gözlemlerinin ilk, ikinci ve üçüncü 24 saat WRF çıktıları ile karşılaştırılması.....	71
Şekil 6.29 : Soma- Ardıçlı istasyonu için (34m) 2010 yılı WRF rüzgar şiddeti histogramı (gözlem ve WRF model çıktıları).	72
Şekil 6.30 : Soma-Ardıçlı istasyonu için 2010 yılı rüzgar şiddeti rangı (gözlem ve WRF model çıktıları).	72
Şekil 6.31 : Ardıçlı istasyonu rüzgar yönü gözlem ve tahmin değerlerinin histogramı.	73
Şekil 6.32 : Ardıçlı’da rüzgar şiddeti tahminlerinin 24 saatlik ortalamalarının gözlemlerden farkı.T_V24 ilk 24 saatlik tahmin ortalaması; T_V48 25-48 saatleri arası tahmin ortalaması; T_V72 49-72 saatleri arası tahmin ortalaması.74	74
Şekil 6.33 : Ardıçlı’da rüzgar yönü tahminlerinin 24 saatlik ortalamalarının gözlemlerden farkı. T_Y24 ilk 24 saatlik tahmin ortalaması; T_Y48 25-48 saatleri arası tahmin ortalaması; T_Y72 49-72 saatleri arası tahmin ortalaması.74	74
Şekil 6.34 : Soma-RES için WRF modeli rüzgar şiddeti hata histogramı.....	75
Şekil 6.35 : Soma-RES santrali için WRF modeli rüzgar yönü tahmini hata histogramı.....	76
Şekil 6.36 : Soma-RES için WRF modeli rüzgar şiddeti hata histogramı.....	78
Şekil 6.37 : Soma-RES için WRF modeli rüzgar yönü tahmini hata histogramı	79
Şekil 6.38 : Soma-RES sahasında 1 ve 2 no’lu türbin için toplam güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları.....	81
Şekil 6.39 : Soma-RES sahasında 3-10 no’lu türbin için güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları.....	82
Şekil 6.40 : Soma-RES sahasında 11-13 no’lu türbinler için güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları.....	83
Şekil 6.41 : Soma-RES sahasında 14-17 no’lu türbinler için güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları.....	83
Şekil 6.42 : Soma-RES sahasında 18-29 no’lu türbinler için güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları.....	84
Şekil 6.43 : Soma-RES sahasında 30-36 no’lu türbinler için güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları.....	84
Şekil 6.44 : Soma-RES için WindSim modeli ile 1. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı.....	85
Şekil 6.45 : Soma-RES için WindSim modeli ile 2. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı.....	86
Şekil 6.46 : Soma-RES için WindSim modeli ile 3. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı.....	87
Şekil 6.47 : Soma-RES için WindSim modeli ile 4. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı.....	87
Şekil 6.48 : Soma-RES için WindSim modeli ile 5.grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı.....	88
Şekil 6.49 : Soma-RES için WindSim modeli ile 6. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı.....	88
Şekil 6.50 : 1.Türbin İçin Hataların Frekans Histogramı	90
Şekil 6.51 : 1.Türbin İçin Hataların Frekans Histogramı	90

MANİSA SOMA BÖLGESİ İÇİN MEZO ÖLÇEK SAYISAL HAVA TAHMİN MODELİ (WRF) VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELİ (WINDSIM) KULLANILARAK KISA VADELİ RÜZGAR ENERJİSİ TAHMİNİ

ÖZET

İnsanlık tarihine baktığımızda krizler aynı zamanda yeni fırsatların ve yeni düşüncelerin ortaya çıktığı tarihi süreçlerdir. Sanayileşmenin dünya ülkelerinde hızla artması, ülkelerin enerjiye olan ihtiyaçlarını da büyük ölçüde artırmıştır. Yaklaşık 40 yıl öncesinde dünyayı etkileyen petrol krizi sonrasında, ülkelerin fosil yakıtlardan elde ettikleri enerji ihtiyaçlarına alternatifler arayarak yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) yönelmeleri kaçınılmaz olmuştur. Özellikle çevreyle dost ve sonsuz olması nedeniyle rüzgar enerjisi, YEKler arasında ön plana çıkmış ve birçok ülke yatırımlarını bu enerji türünde yapmayı tercih etmişlerdir.

Toplam enerji üretiminde rüzgar gücünden üretilen pay arttıkça rüzgar güç üretim tahminlerine önemli derecede ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrik üretimi sonrasında depolama sistemlerinin söz konusu olmaması, arzın talebi karşılaması için güç sisteminin sürekli olarak iyi yönetilmesini gerekli kılmaktadır. Bu amaçla rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin planlanmasında rüzgar enerjisi santrallerinin bulunduğu bölgelerde kısa süreli rüzgar enerji tahmininin yapılması önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Araştırma Projeleri kapsamında, Doç. Dr. Ş. Sibel MENTEŞ tarafından yürütülen 110Y050 nolu Kısa Vadeli Rüzgar Enerjisi Tahmin Sistemi konulu projeye paralel olarak Manisa ili Soma ilçesi sınırları içinde karmaşık arazi üzerinde kurulu bulunan, Soma Rüzgar Enerji Santrali (RES)'ndeki rüzgar enerjisini birkaç kilometre çözünürlükte ve tipik olarak 0-72 saat tahmin eden, fiziksel bir rüzgar enerjisi tahmin sistemi oluşturulması amaçlanmıştır. Manisa ilinin rüzgar enerjisi tahmini bakımından önemli olmasının sebebi, Manisa'nın Türkiye'deki illerin toplam kurulu güç bakımından sıralamasında ikinci sırada olmasıdır.

Soma-RES, Manisa'nın Soma ilçesinde bulunmaktadır. Soma-RES herbiri 900 kilowatt güce sahip 156 adet rüzgar türbini toplamda 140,4 MegaWatt (MW) kurulu güce sahiptir.

Bu tez kapsamında Soma-RES'e en yakın Manisa İli sınırları içinde bulunan Manisa Meteoroloji İstasyonu'nda ölçülen 1977- 2006 periyodunu kapsayan 30 yıllık aylık ortalama sıcaklık, maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, ortalama bağıl nem, toplam yağış ve ortalama günlük rüzgar değerleri incelenmiştir. Ayrıca santral sahası içinde bulunan ölçüm direğinden elde edilen rüzgar verileri kullanılarak bölgenin rüzgar karakteristikleri oluşturulmuştur.

Çalışma dört aşamayı içermektedir:

1) Meteorolojik parametrelerin analizleri: Bu aşamada rüzgar ile birlikte bölgenin rüzgar karakteristiklerine etki eden meteorolojik parametrelerin zaman serisi analizleri yapılmıştır.

2) Orta ölçek hava tahmin modeli: Üç boyutlu sayısal hava tahmin modeli (SHT), Weather Research & Forecasting Model (WRF), hidrostatik olmayan, topoğrafyayı izleyen düşey koordinatlara sahip atmosferik fiziksel süreçleri içeren sınırlı alan modeli kullanılarak, Soma-RES'i de içeren bölge için rüzgar hızı tahminleri yapılmıştır.

3) Mikro ölçek rüzgar modeli: Yerel topoğrafyanın ve mikro ölçek etkilerinin yer aldığı akışın çözümlenmesi için SHT sonuçları; WindSim isimli Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modeli ile kuple edilmiştir. WRF'den alınan tahminler WindSim kullanılarak türbinlerin bulundukları koordinatlara taşınmıştır.

4) Tahminin doğruluğunun araştırılması: Yapılan simülasyonlar ile yerel gözlemler arasında karşılaştırmalar yapılmış, basit lineer regresyon kullanılarak tahminler ve gözlemler arasında lineer bir ilişki kurulmuş; kurulan bu ilişki ile elde edilen değerlerin tahminleri ne kadar iyileştirdiği ortaya konulmuştur.

Bu tez kapsamında kullanılan SHT modeli WRF'un çalışması ile mikro ölçek HAD modellerinin çalışması için gerekli verilerin elde edilmesi için gerekli bilgisayar hesaplamaları, proje kapsamında kurulan iş istasyonu ile İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi (UYBHM)'ndeki sistemden yararlanılarak yapılmıştır. Ayrıca İTÜ BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) kapsamında 4 çekirdekli iş makinası alınarak çalışmadaki hesaplamaların bir bölümü bu bilgisayarda gerçekleştirilmiş ve modellerin çalıştırılması için gerekli donanım sağlanmıştır

SHORT TERM WIND ENERGY PREDICTION SYSTEM FOR MANISA SOMA REGION BY USING NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODEL(WRF) AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS(WINDSIM) MODEL

SUMMARY

When human history is studied carefully, it is seen that crises are the historical processes that new opportunities and new ideas emerge besides their adverse effects. As a result of the rapid increase of industrialization, energy need has dramatically increased. After the world oil crisis, which started to affect the world approximately 40 years ago, searching new alternatives to fossil fuels has been inevitable for all countries to supply their needs for energy. Wind power is clean, non-polluting energy. It's raw material and transportation costs are low. Production cost of wind energy is free, is produced by using wind which is free in nature. Wind turbines work in a very simple way, can be operated without the need for the operator. Wind turbines don't emit poisonous gases into the atmosphere. Wind energy's, raw material, wind, can't be obtained always but it is abundant. Because of its environmentally friendship and being infinite renewable energy source; wind energy has come into prominence and many country preferred to make their investmensts on this kind of energy.

An increasing ratio of wind energy on total energy production shows that, wind power production estimates have become significantly important. Due to the absence of storage systems after the generation of electricity, the better management of power systems becomes indispensable to satisfy the demand. For this purpose, short-term wind energy forecasting for wind energy power plants is crucial for the planning of power generation.

The most important parameter used in calculations of wind energy is, wind speed. Wind speed is a parameter which changes depending on ,effects of atmospheric and topographic. Therefore, planning the electrical energy going to be produced by estimating the short periods of wind which is going to be converted to electrical energy is necessary for the operation of power systems in safe and economical way. Today, for wind energy generation and distribution of electric power planning, short-term prediction of wind energy has become a very important issue in regions where energy plants are located.

The systems which estimates the wind energy uses the statistical approach, the physical approach or the mixed approach. as a result of the joint use of these approaches. In physical approach, meso and micro scale models are used to correlate weather prediction model outputs and local winds. Process of physical approach starts by acquisition of measurement data or Numerical Weather Prediction (NWP) data. As a second step the wind data is interpolated to the desired height. In This height wind speed is converted to power. Then the effects of residential of wind

turbines are calculated. The second way for physical approach is directly to convert wind data which is obtained from measurements or obtained from the numerical weather forecast to the energy, to the energy. In statistical approach, is tried to establish a correlation between the numerical weather forecast and local winds, by using historical meteorological measurement.

This thesis is a part of the Research Project of TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) conducted by Assoc. Prof. Ş. Sibel MENTEŞ called Short-Term Wind Energy Forecasting System with the project number of 110Y050. A short-term wind energy prediction system that typically predicts the 0-72 hours wind energy for the resolutions starting from a few kilometers to 10 meters is constructed for Soma-RES (Wind Power Plant) which is installed over a complex terrain on Manisa-Soma. It is important to improve a wind power prediction tool for Manisa because this wind farm is ranked as the second in Turkey according to the installed wind energy capacity on city base.

Soma Wind Power Plant (RES) is located in Soma district. of Manisa. It has 156 wind turbines and is completely in progress from January 2012. Each turbine has 900 kilowatts of power so Soma-RES have a total installed capacity of 140.4 MW. It is one of the biggest wind power plant of Turkey and whole Europe constructed on-shore. Soma-RES will meet the annual electricity needs of 200 thousands people by producing 405 million kWh (kiloWatt hours) of electricity by year. Reduction of 297 000 tonnes of CO₂ per year will be held Soma RES.

As one of scope of this thesis, monthly average temperature, maximum temperature, average relative humidity and total precipitation values of Manisa Meteorological Station whose measurement period is between 1977 and 2006 were analyzed. The reason for choosing Soma Meteorological Station is its closeness to the Soma-RES. Also statistical distributions were also provided by using the data obtained from the wind farm.

The study has mainly four stages:

- 1) Analyses of Meteorological Parameters: The parameters that affect the wind characteristics of the region; wind, temoperature, maximum temperature, minimum temperature, humidity, and precipitation of Manisa Meteorology Station and the wind speed distribution of the area were analyzed.
- 2) Running the Mesoscale weather forecast model: Three-dimensional numerical weather prediction model, the Weather, Research & Forecasting Model (WRF), which is non-hydrostatic, it has vertical coordinates following topography, and it involves atmospheric physical processes used as the limited area model is used for the short term wind prediction.
- 3) Running the micro-scale wind model: In order to consider the local topography effects and micro-scale effects in the flow, numerical weather prediction results were coupled with a Computational Fluid Dynamics (CFD) model named WindSim. The results of foecast produced by WRF were translated to the turbines' coordinates by using WindSim.
- 4) Investigation of the prediction accuracy: Reliability range of estimates were calculated by comparisng the simulations and local observations, by using simple linear regression the relationship between estimates and observations was established and improvement of estimates by the relationship were presented.

The work station acquired for the project is used with the sources of the Modeling and Observation Laboratory of the Department of Meteorological Engineering at ITU and the sources of Istanbul Technical University (ITU) National Center for High Performance Computing (NCHPC) Center are used to perform the WRF runs and to obtain the data that are utilized as the initial and boundary conditions of WindSim and WRF models.

1. GİRİŞ

2008 yılında baş gösteren ve halen devam eden finans krizi dünyadaki tüm ülkeleri ekonomik ve sosyal anlamda etkiledi. Ülke yönetimleri, politika belirleyiciler ve iş çevreleri büyük bir çaresizlik içinde kaldı. Bu gelişmelerden en fazla petrol ve doğal gaz sektörleri etkilendi. Mevcut verilere göre, 2030 yılında petrol üretiminin 85-86 milyon varil olacağı öngörüsü yapılmaktadır. Buna göre sadece mevcut petrol üretimindeki azalmayı karşılamak için bugün ile 2030 yılı arasında yıllık 45 milyon varillik bir üretim gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Fakat mevcut petrol yataklarının üretim düzeyleri oldukça düşüktür. Bu senaryoya göre ucuz petrol döneminin sona erdiği söylenebilir. Halihazırda bulunan doğal gaz rezervlerinin yarısı İran ve Rusya bölgesinde bulunmaktadır. Dünyadaki doğal gaz üretimi yıllık 3 trilyon m³ civarında olup, bu miktar 2030 yılında yarı yarıya azalacaktır. Söz konusu bu azalmayı dengelemek ve artan talebi karşılamak için yıllık yaklaşık 2,7 trilyon m³ 'lük yeni üretime ihtiyaç vardır. Avrupa Birliği ülkeleri tarafından belirlenmiş olan, 2020 yılına kadar elektrik enerjisi ihtiyacının %20'sinin YEK' ten elde edilmesi konusunda hedefe ulaşmak, teknik olarak olası görünmekle birlikte finansal kaynak tahsisi konusunda engeller mevcuttur. Akdeniz bölgesinin gerek rüzgâr ve gerekse güneş enerjisi potansiyeli oldukça yüksektir. Ancak bölge ülkelerinin enerji nakil şebekeleri tam uyumlu olmadığı için bu ülkeler arası elektrik enerjisi transferi tam verimli olamamaktadır. Transferdeki verimliliği artırmak için "süper grid" projesinin hayata geçirilmesi gereklidir. Son yıllarda, Avrupa Birliği'nde, enerji politikaları oluşturulurken dikkat edilen en önemli hususlardan biri, başta CO₂ olmak üzere, sera gazlarının azaltılması konusudur. CO₂ emisyonun azaltılması amacıyla enerji paradigmasında değişime gidilmesi halinde Avrupa Birliği enerji sektöründe önemli değişiklikler olacaktır. Bu kapsamda yenilenebilir enerji teknolojilerine önemli yatırımlar yapılması ve söz konusu teknolojilerin yaygınlaşması beklenmektedir. 2009-2030 dönemi arasında elektrik sektörüne yapılacak yeni yatırımların %71'nin yenilenebilir enerji yatırımları olması beklenmektedir. İstatistiksel bir analizde de belirtildiği gibi Türkiye'de artan Gayri Safi Milli Hasıla ve nüfusa paralel olarak enerji tüketimi de artmaktadır. Halen 9000 \$ seviyelerinde olan kişi başına düşen

Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH)'ya karşılık 2700 kiloWattsaat (kWh) /kişi mertebesinde elektrik tüketimi gerçekleşmektedir. Kişi başına düşen GSYİH 20000 \$ seviyelerine ulaştığında Türkiye'nin kişi başına tüketiminin 5000 kWh' ı aşması beklenmektedir (Dektmk, 2010).

Rüzgar enerjisi temiz, çevreyi kirletmeyen bir enerjidir. Rüzgar enerjisinin ham madde ve ulaştırma masrafı yoktur. Rüzgar enerjisinin üretim bedeli ücretsizdir. Doğadaki rüzgar kullanılarak üretilmektedir. Rüzgar türbinleri, gayet basit bir şekilde, operatöre ihtiyaç duyulmadan çalıştırılabilmektedirler. Rüzgar türbinleri, atmosfere zehirli gazlar vermez. Rüzgar enerjisinin, hammaddesi sürekli olmamakla birlikte, boldur. Bu sayılan özelliklerden dolayı rüzgar enerjisi, YEK arasında önemli bir yere sahiptir (Url-1).

Rüzgar enerjisi hesaplarında kullanılan en önemli parametre, rüzgar şiddetidir. Rüzgar şiddeti, atmosferik ve topoğrafik bir çok etkiye bağlı olarak değişen bir parametredir. Bu nedenle elektrik enerjisine çevrilebilecek rüzgar şiddetinin kısa sürelerde tahmin edilerek, üretilecek elektrik enerjisinin planlaması, güç sistemlerinin emniyetli ve ekonomik bir şekilde çalışması için gereklidir. Günümüzde rüzgar enerjisinden elektrik enerjisinin üretilmesi ve dağıtılmasının planlanmasında, rüzgar enerjisi santrallerinin bulunduğu bölgelerde kısa süreli rüzgar enerjisinin tahmini çok önemli bir konu haline gelmiştir.

Türkiye'de YEK olarak rüzgar enerjisinin diğer kaynaklar arasında önemli bir yeri bulunmaktadır. Toplam enerji üretiminde rüzgar gücünden üretilen pay arttıkça rüzgar güç üretim tahminlerine de önemli derecede ihtiyaç duyulacaktır. Elektrik üretimi sonrasında depolama sistemlerinin söz konusu olmaması, arzın talebi karşılaması için enerji güç sisteminin sürekli olarak iyi yönetilmesini gerekli kılmaktadır. Bu amaçla rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin planlanmasında RESlerin bulunduğu bölgelerde kısa süreli rüzgar enerji tahmininin yapılması önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, Manisa İli Soma İlçesi sınırları içinde karmaşık arazi üzerinde kurulu bulunan Soma-RES 'deki rüzgar enerjisini birkaç kilometre çözünürlükte ve tipik olarak 0-72 saat tahmin eden, bir rüzgar enerjisi tahmin sistemi oluşturulması amaçlanmıştır.

Çalışma dört aşamayı kapsamaktadır:

- 1) Meteorolojik parametrelerin analizleri: Bu aşamada rüzgar ile birlikte bölgenin rüzgar karakteristiklerine etki eden meteorolojik parametrelerin zaman serisi analizleri yapılmıştır.
- 2) Orta ölçek hava tahmin modeli: Üç boyutlu sayısal hava tahmin modeli WRF, hidrostatik olmayan, topoğrafyayı izleyen düşey koordinatlara sahip atmosferik fiziksel süreçleri içeren sınırlı alan modeli kullanılmıştır.
- 3) Mikro ölçek rüzgar modeli: Yerel topoğrafyanın ve mikro ölçek etkilerinin yer aldığı akışın çözümlenmesi için sayısal hava tahmin sonuçları; WindSim isimli HAD modeli ile kuple edilmiştir.
- 4) Tahminin doğruluğunun araştırılması: Yapılan simülasyonlar ve yerel gözlemler ile karşılaştırmalar yapılarak, tahminlerin güvenilirlik aralığının hesaplanmasında kullanılmıştır.

1.1 Literatür Araştırması

Rüzgar enerjisi tahmini yapan sistemler, istatistiksel yaklaşım, fiziksel yaklaşım veya bu yaklaşımların ortak kullanımı sonucu oluşan karma yaklaşımlar kullanmaktadır. Fiziksel yaklaşımda; meso ve mikro ölçekli modeller kullanılarak yerel rüzgarlarla nümerik hava tahmini çıktıları ilişkilendirilmeye çalışılır. Tahmin sisteminin çalışması, Sayısal Hava Tahmini (SHT) veya ölçüm verisinin elde edilmesi ile başlar. Rüzgar, istenen yüksekliğe interpolate edilir. Rüzgar hızı güce dönüştürülür. Daha sonra ise türbinlerin yerleşim etkileri hesaplanır. Ya da elde edilen nümerik hava tahminlerini ya da ölçüm verisini direkt olarak güce dönüştürür. İstatistiksel yaklaşımda ise; geçmiş meteorolojik veriler kullanılarak yerel rüzgarlar ve nümerik hava tahmini sonuçları arasında korelasyon kurulmaya çalışılır.

Prediktor isimli tahmin sistemi, RISOE tarafından geliştirilmiş, fiziksel tabanlı bir modeldir. Büyük ölçekli akışlar, High Resolution Limited Area Model (HIRLAM) isimli SHT modeli ile simüle edilir. Rüzgar, jeostrofik rüzgar yaklaşımları ve logaritmik rüzgar profili kullanılarak istenilen yüzeye indirgenir. Daha sonra rüzgar santral sahası ölçeğindeki etkiler(engel, pürüzlülük, vadi, tepe, bina vb.) hesaba katılır. Son olarak ise türbinlerin yerleşim durumlarından dolayı birbirlerine olan etkileri hesaplanarak, enerji tahmini yapılmış olur (Url-2).

Danimarka Teknik Üniversitesi'ne ait Rüzgar Enerjisi Tahmin Modeli, kısa süreli (120 saate kadar) rüzgar enerjisi üretim tahminleri yapmakta kullanılmaktadır.

Sistem çok esnektir ve toplam rüzgar gücünü kapsayacak şekilde yapılandırılabilir (ülke, bölge veya tek bir rüzgar tarlası). Model yapay zeka mantığına göre dizayn edilmiştir. Böylece sistem otomatik olarak gözlemlenen duruma göre kalibre olur. Sistemin girdileri; asgari kurulum seviyesinde sistem rüzgar enerjisi üretiminin çevrimiçi ölçümlerine ihtiyaç duyar. Konfigürasyon durumuna göre; çevrimiçi rüzgar enerjisi ölçümlerine, tüm türbinlerin enerji üretimlerine (bölgesel tahmin için), bölge ve rüzgar tarlasını kapsayan rüzgar hızına, yerel rüzgar hızlarına, kararlılık, aktif türbin sayısı gibi bilgilere ihtiyaç duymaktadır (Url-3).

Zephyr, RISOE ve Danimarka Teknik Üniversitesi'nin ortak çalışmasının ürünü olan bir rüzgar enerjisi tahmin programıdır. Tüm tahmin aralıkları için (0-9 saat 36-48 saat) güvenilir tahminler üretmektedir. Çevrimiçi veri ve ileri istatistiksel metodlar kullanılmaktadır. HIRLAM gibi meteorolojik model çıktıları kullanabilmektedir ve bu da uzun dönemli güvenilir tahminler üretmesine katkı sağlamaktadır (Giebel ve diğ., 2003)

Previento, Oldenburg Üniversitesi, Almanya'ya ait bir modeldir. Geniş alanlar için iki günlüğe kadar (48 saate kadar) güç tahminleri yapar. Modelleme yaklaşımı Prediktor' e benzemekle birlikte Prediktor'un kullandığı HIRLAM verisi yerine Alman Metooroloji Servisi'nin kullandığı geniş ölçekli model olan Lokal Modell (LM) 'in çıktıları kullanılmaktadır (Focken ve diğ.,2001).

eWind, ABD menşeli TrueWindSolutions firmasına ait rüzgar enerjisi tahmin programıdır. Yüksek çözünürlüklü 3 boyutlu fiziksel tabanlı atmosferik nümerik model çıktıları, bölgesel veriler, rüzgar tarlasının güç ve meteoroljik bilgileri ile ölçüm direğinin rüzgar bilgileri bir arada kullanılmaktadır. Adaptif istatistik modeller uygulanarak santralin üretim tahmini gerçekleştirilmektedir(Zack, 2006).

Sipreolico, Carlos Üniversitesi ve Red Electrica de Espana firmasının ortak ürünü olup, İspanya'ya ait bir modeldir. İstatistik tabanlı bir sistemdir. Gerekli bilgiler rüzgar tarlası karakteristik verileri, geçmiş rüzgar kayıtları ve enerji üretimleri, çevrimiçi enerji üretimleri ve meteorolojik tahminler olup meteorolojik tahminler HIRLAM'dan elde edilmektedir. 36 saate kadar saatlik tahminler üretebilmektedir.(Sanchez ve diğ.,2002)

Advanced Wind Power Prediction Tool (AWPT), Almanya menşeli olup ISET(Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik) tarafından üretilmiştir. Üç

farklı tahmin seçeneği vardır. Bunlar, çevrimiçi görüntüleme sistemi, kısa süreli tahmin sistemi (1-8 saat) ve gün aşırı tahminlerdir (Url-4).

ANEMOS (Development of A NExt generation wind resource forecasting system for the large-scale integration of Onshore and offshore wind farms); iki gün ilerisine kadar sağlıklı kısa süreli rüzgar santralı üretim tahminleri üretir. Kompleks araziler, deniz üstü rüzgar santralleri, ekstrem hava koşulları, rüzgar tahminleri kullanılarak, teknik ve ekonomik kazançları göstermek amaçlarıyla kullanılmaktadır. Bu modeller iki ana modelleme tekniği kullanılmaktadır; bunlar istatistiksel ve fiziksel (Rüzgar akışlarını modelleme) tekniklerdir. Tahmin belirsizliklerini hesaplar ve uzun süreli tahmin yapar (Url-4) .

Landberg (2001) yaptığı doktora çalışmasında; HIRLAM tahminleri kullanarak yerel etkileri WAsP programında değerlendirdikten sonra MOS (Model Output Statistics) istatistik uygulayarak Kuzey Avrupa için yerel şartlarda kısa dönem rüzgar hız tahmini yapmıştır.

Torres ve diğ. (2004), yaptıkları çalışmada “AutoRegressive Moving Average” (ARMA) ve persistans modellerini kullanarak gelecek 10 saat için saatlik ortalama rüzgar şiddetini tahmin etmeyi amaçlayan istatistik tabanlı bir çalışma yapmışlar ve ARMA modeli kullanılarak elde edilen tahmin sonuçlarının Persistans modeli kullanılarak yapılan tahmin sonuçlarından daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

Jursa ve Rohrig (2008), yaptıkları çalışmada otomatik yapay zeka modelleri kullanan kısa vade rüzgar enerjisi tahmin sistemlerinde evrimsel algoritmaları kullanarak yapılan rüzgar enerjisi tahmin hatalarının %10’a varan değerlerde azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Louka ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada, farklı iki adet sınırlı alan modeli kullanan iki adet fiziksel rüzgar enerjisi tahmin sisteminde işlem sonrası yöntem olarak olarak Kalman filtresi kullanılması durumunda, her iki sistem için de kullanılan tüm hata parametrelerinin önemli ölçüde azaldığını göstermişlerdir.

Liu ve diğ. (2010), yaptıkları çalışmada, Geliştirilmiş Taylor Kriging metodunu kullanarak rüzgar hızı zaman serisini tahmin etmeyi amaçlamışlar ve Geliştirilmiş Taylor Kriging metoduna göre hesaplanan ortalama mutlak hata değerinin ARIMA modeline göre hesaplanan ortalama mutlak hata değerinden %18.6 daha az, ve yine Geliştirilmiş Taylor Kriging metoduna göre hesaplanan karekök ortalama hata

değerinin ARIMA modeline göre hesaplanan karekök ortalama hata değerinden %15.23 daha az olduğunu göstermişlerdir.

Hodge ve diğ. (2011), yaptıkları çalışmada “AutoRegressive Integrative Moving Average” (ARIMA) isimli istatistik zaman serisi analiz aracını kullanarak gelecekte elde edilecek rüzgar gücünü tahmin etmeye çalışmışlar ve ARIMA modellerinin değişik iklimsel ve mevsimsel verilere kolaylıkla adapte edilebileceğini göstermişlerdir.

Zhu ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada, bulanık model kullanılarak rüzgar gücünün kısa süreli tahmininin başlılı bir şekilde tahmin edilebileceğini, özellikle sürenin 0,5 saate inmesi durumunda kullanılan sistemin hata parametrelerinin en küçük değerlere sahip olduğunu göstermişlerdir.

Tolun ve diğ.(1995) yaptıkları çalışmada; 4 adet ölçüm istasyonunun ölçüm değerlerini kullanarak, çalışmalarının merkez yeri olan Gökçeada ile birlikte Türkiye’nin kuzeybatısında yüksek rüzgar şiddeti ve yüksek güç değerlerinin bulunduğunu açıkça ortaya koymuşlardır. Bu çalışmaları ile rüzgar enerjisi yatırımcılarına rehberlik etmişlerdir.

Bayrakçı ve Delikanlı (2007) yaptığı çalışmada Türkiye’deki rüzgar enerjisi potansiyel belirleme çalışmaları ile ilgili yöntemleri ve mevcut altyapı hakkında bilgi vermişlerdir.

Akdağ ve diğ. (2007) yaptığı çalışmada; YEKlerden olan rüzgar enerjisinin Bandırma Bölgesindeki potansiyeli ve bölgenin rüzgar karakteristiği Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)’nin 1991 yılına ait 12 aylık, saatlik ortalama rüzgar şiddeti verileri kullanılarak istatistik olarak incelenmiştir.

Ahmet ve diğ. (2010) yaptığı çalışmada 14x14 boyutlu dar bölgelerle yapılan veri asimilasyonu ile WRF-Var sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu iki yöntem ile yapılan asimilasyon öncesi ve sonrası hesaplanan tahminlerdeki akış değişkenlerinin fark dağılımları tüm Türkiye coğrafyasında verilmiştir.

Taşcıkaraoğlu ve Uzunoğlu (2011) yapmış olduğu çalışmada oldukça değişken olan rüzgar hızlarını, dalgacık dönüşümü yardımıyla daha kararlı karakteristiklere sahip olan bileşenlere ayırmaktadır ve her bir bileşen ayrı ayrı tahmin edilmeye çalıştırmaktadırlar. Böylece tahmin doğruluğu veya aynı doğruluk sınırları içerisinde tahmin süresi arttırılabilmektedir.

2. RÜZGARIN TARİHÇESİ, TÜRKİYE'DEKİ VE DÜNYADAKİ RÜZGAR ENERJİSİNİN DURUMU

2.1 Rüzgarın Tanımı

Dünyanın eğriliğinden dolayı, güneş ışınları yeryüzünün farklı bölgelerine farklı açılarla gelmektedir. Bu farklılık yeryüzünde homojen olmayan bir sıcaklık dağılımına sebep olur. Dünya yüzeyinin farklı ısınması ve soğuması sonucu meydana gelen basınç ve sıcaklık farkları, havanın, yüksek basınçlardan alçak basınçlara doğru hareket etmesi ile sonuçlanır. Hareket halindeki bu hava rüzgar olarak adlandırılır. Hareket haline geçen hava bir kinetik enerjiye sahip olur, yani potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşür (Menteş, 2009).

2.2 Tarihçesi, Rüzgar Gücü ve Rüzgar Enerjisi

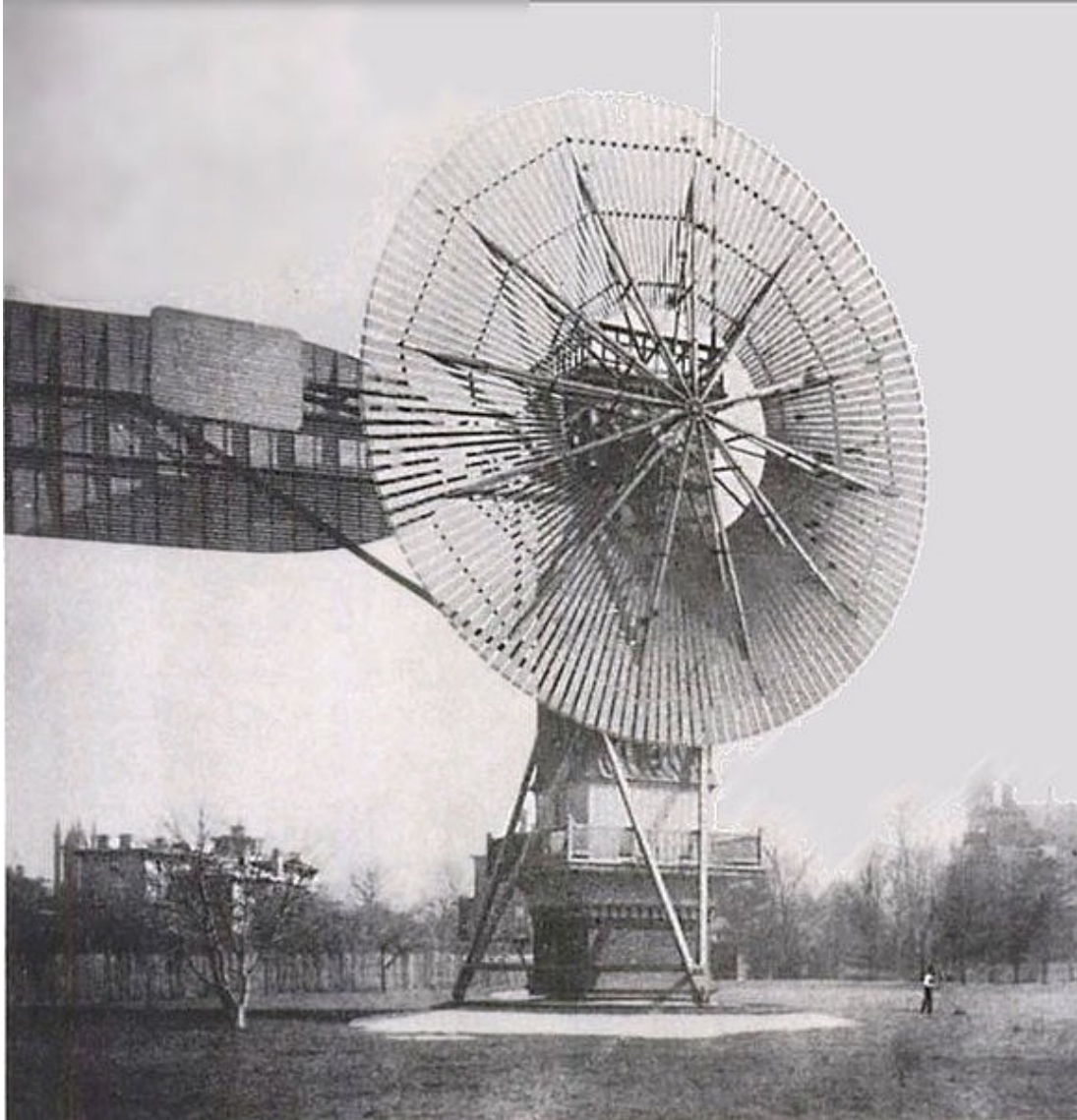
Rüzgar gücünden yararlanmanın tarihi oldukça eski dönemlere dayanır. Rüzgar, öncelikle deniz ulaşımında, yelkenli gemilerde ve Milattan Sonra (M.S.) 12.yy.da yaygınlaşan yel değirmenlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Milattan Önce (M.Ö.) 2000 yıllarında doğu ülkelerinde icat edilen yel değirmenlerinin tahıl öğütme işinde başarıyla kullanıldığı bilinmektedir. Yine M.Ö.17.yy.da, Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanılmıştır. Türkler ve İranlıların ilk yel değirmenlerini, M.S. 7.yy.da kullanmaya başlamalarına karşın, Avrupalılar yel değirmenlerini ilk olarak Haçlı Seferleri sırasında görmüşler ve Avrupa'daki ilk yel değirmenleri, M.S. 12.yy.da, kullanılmaya başlanmıştır (Karabulut, 1999).

Rüzgar gücünün denizlerde ulaşım vasıtasıyla yelkenliler tarafından kullanılması da çok eski tarihlere uzanmaktadır. Tarihte ilk yelkenli kullanımının, Eski Çağ'da Mısırlılar veya Fenikeliler tarafından kullanıldığı sanılmaktadır (Doğanay, 1991).

Tarım ürünlerinden un elde edilmesinde yel değirmenleri uzun süre kullanılmıştır. Yel değirmenleri vasıtasıyla, rüzgâr gücünün kullanılarak Romalıların terk ettikleri madenlerin galerilerinin diplerinde biriken suların boşaltılması ile bu madenlerin

yeniden işletmeye açılabilmesi, Avrupa'nın ekonomik kalkınma süreci içine girmesine önemli bir katkı sağlamıştır (Hayli, 2001).

İskoçyalı Akademisyen Profesör James Blyth 1887 Haziran ayında rüzgar gücü deneylerine başlamış ve 1891'de İngiltere'de patent almıştır (Şekil 2.1). 1887 ile 1888 yılları arasında ise ABD'li Charles Francis Brush, rüzgâr güç makinesi kullanarak elektrik üretmiş ve evinin ve laboratuvarının elektriğini 1900 yılına kadar sağlamıştır. 1890'larda Danimarkalı bilim adamı ve mucit Poul la Cour elektrik üretmek için rüzgâr türbinlerini inşa etmiştir. Modern rüzgâr güç endüstrisi 1979'da, Danimarkalı Kuriant, Vestas, Nordtank ve Bonus şirketlerinin rüzgâr türbinlerini seri üretmesiyle başlamıştır. Türbinlerin her biri 20-30 kilo Watt (kW)'lıktı. Daha sonra kapasiteleri artırılarak birçok ülkeye yayılmıştır (Url-5).



Şekil 2.1 : Rüzgar türbini 1888 (Url-7).

Denizler rüzgâr enerjisi üretimi bakımından karalardan daha elverişlidir. Günümüzde rüzgâr santralleri karalarda olduğu kadar denizlerde de kurulmaktadır (Şekil 2.2). Karadan denize geçiş ilk uygulamalarla teknik alanda başarılmış ve ticari uygulamaları da gerçekleştirilmiştir (Tok, 1999).



Şekil 2.2 : Belçika'nın Kuzey Denizindeki rüzgar çiftliği (Ur1-7).

Rüzgar türbinleri ile enerji elde edilmesi, yel değirmenleri ile un elde edilmesi, rüzgâr pompaları ile suyun yeryüzüne çekilmesi ve yelkenler aracılığıyla gemilerin hareketi rüzgâr enerjisinin uygun formda kullanılması sonucu elde edilir. 2011'in sonunda dünya çapındaki rüzgâr güç jeneratörlerinin kapasitesi 239 GigaWatt (GW) e Avrupa'da kurulu güç toplam 96,5 GW değerine ulaşmıştır. Türkiye'de ise kurulu toplam güç 2011 yılı sonu itibariyle 1.805 MW'a ulaşmıştır.

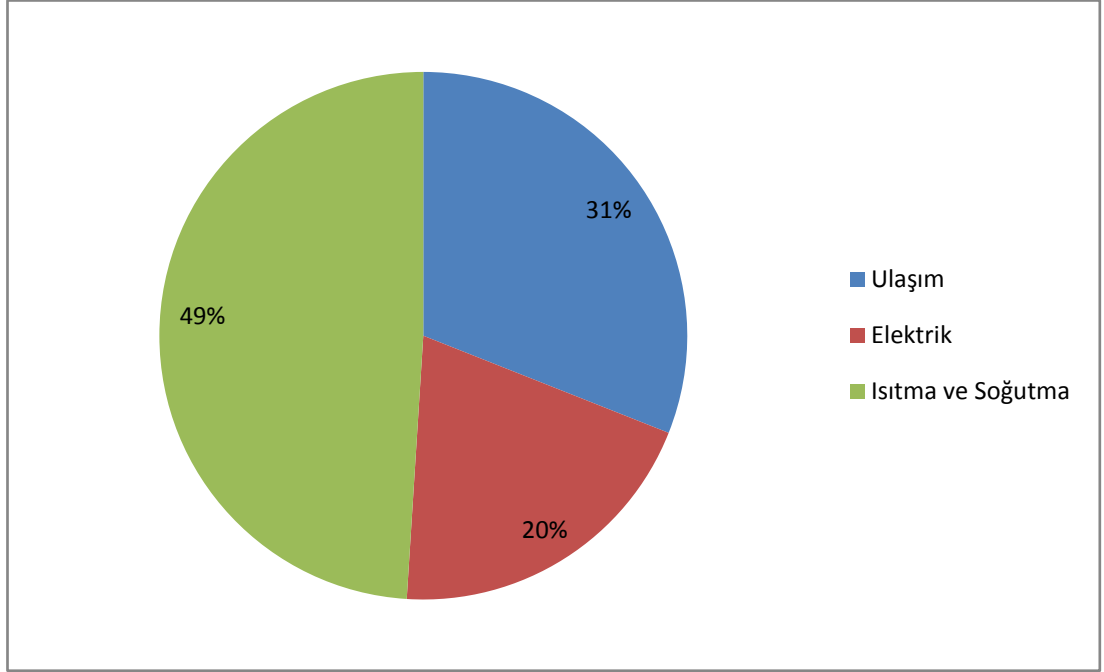
2.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Enerji ihtiyacının günden güne artması, yenilenebilir enerji teknolojilerini yatırımcıların yeni gözdesi haline getirmiştir. Fosil yakıtlardaki azalmalar sonucu ortaya çıkan maliyet artışları ve fosil yakıtların çevreye verdikleri zararlar, yenilenebilir enerji sektörünü stratejik sektör konumuna getirmiştir (Dektmk, 2010).

2.3.1 Dünyadaki gelişmeler

Günümüzde tüm YEK, enerji talebinin %2,5'lik bölümünü karşılarken, International Energy Agency (IEA) 2015 yılında YEK'in toplam talebin %3,3'ünü karşılamasını öngörmektedir. IEA'nın projeksiyonuna göre, 2001-2030 yılları arasındaki dönemde YEK'e 10,5 trilyon dolarlık yatırım gerçekleştirilecektir. Avrupa Birliği (AB) komisyonu da özellikle rüzgar, güneş, biyokütle ve hidrolik enerji gibi YEK'nin gelişmesini, enerji politikalarının merkezine yerleştirmiştir. Yüksek petrol ve doğalgaz fiyatları, YEKlerin daha geniş oranda kullanımını cesaretlendirmektedir. 2030 yılına kadar dünya genelinde hidroelektrik ve diğer yenilenebilir enerji tüketiminde yıllık %3,4'lük artış beklenmektedir. Hidrolik dışında YEKlerin kurulu güçteki oranının %2,5 olan 2007'deki değerinin 2030 yılında %8,6'ya yükseleceği, hidroelektriğin ise aynı dönemde %16'dan %14'e gerileyeceği tahmin edilmektedir. Rüzgar enerjisi, YEKlerdeki bu artışta başı çekecektir. Elektrik üretiminde YEK kullanımının 2030 yılında %22 seviyelerine ulaşması beklenmektedir. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) ülkelerinde YEKlerdeki artışın büyük kısmının rüzgar ve biyokütleyle yapılacak yatırımlarla karşılanması beklenmektedir. CO₂ emisyonunun azaltılması amacıyla enerji politikalarında değişime gidilmesi, Avrupa Birliği enerji sektöründe önemli değişiklikleri beraberinde getirecektir. Bu sebeple 2030'a kadar olan bu süreçte elektrik sektörüne yapılacak yeni yatırımların %71'inin YEKler üzerine olması beklenmektedir. Avrupa Yenilenebilir Enerji Direktifi'ne göre, 2020'de toplam enerji talebinin %20'sinin YEKlerden sağlanması amaçlanmaktadır. 27 üye ülke hızlı bir şekilde bu direktifi uygulamaya koymuşlardır. Avrupa Enerji Portalı (Brüksel, 11 Mart 2010)' na göre, ülkelerden alınan tahminler bu hedefe ulaşılacağını göstermektedir. Bunlardan 21 üye ülke ise bu hedefi aşacaklarını veya bu hedefe ulaşacaklarını belirtmişlerdir. Ulaşım sektöründe de biyoyakıt kullanımının artışı oldukça önemli olacaktır. 2009 yılında tüm dünyada devreye giren enerji üretim sistemlerinin %61ini YEKler

oluşturmuştur. European Renewable Energy Council (EREC), hazırlamış olduğu yeni raporu olan “RE-thinking 2050”de, Avrupa Birliği’nin enerjisi gereksiniminin %100’ünün, yenilenebilir enerjiden nasıl sağlanabileceğine yönelik bir yol haritası sunmaktadır. Rapor, aynı zamanda, AB’nin yenilenebilir enerji potansiyelinin tam olarak değerlendirilmesi için nelerin gerekli olduğuna dair politik önerileri de içermektedir. (Dektmk, 2010). AB’de nihai enerji talebi aşağıdaki gibidir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : AB’nin nihai enerji talebi (Erec, 2010).

“RE-thinking 2050” Raporuna göre, AB, kademeli olarak CO₂ komisyonlarını azaltacak ve 2050 yılında AB, enerjiye bağlı CO₂ emisyonlarını 1990 yılındaki seviyeye göre %90’dan daha fazla azaltmış olabilecektir. Buna ek olarak, AB’yi %100 yenilenebilir enerjiye dayandırmak, iş sahası oluşturmak açısından da önemli bir sosyal yarar sağlamış olacaktır. Yenilenebilir enerji sektöründe 2020’de 2,7 milyon, 2030’da 4,4 milyon insan istihdam edilecektir. 2050’de ise 6,1 milyon kişi işgücüne katılmış olacaktır (Dektmk, 2010) (Çizelge 2.1 ve 2.2).

Çizelge 2.1 : Yenilenebilir elektrik kurulu gücü (GW) (Erec,2010).

YEK Türü	2020	2030	2050
Rüzgar	180	288,5	462
Hidro	120	148	194
PV (Foto Voltaik)	150	397	262
Biomass	50	58	100
Jeotermal	4	21,7	77

Çizelge 2.2 : Nihai enerji tüketimine yenilenebilir enerji katkısı (Mtep (Milyon ton eşdeğeri petrol)) (Erec, 2010).

YEK Türü	2020	2030	2050
Rüzgar	41	72	133,5
Hidro	33	34,2	38,5
PV	15,5	48	116
Bioenerji	175,5	226	359,1
Jeotermal	9,7	35,5	188
Güneş Termal	12	70	122

2.3.2 Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları

2009 sonu itibariyle işletmeye alınan elektrik enerjisi santrallerinin 375 MW’ı rüzgar, 564 MW’ı hidroelektrik, 47,4 MW’ı jeotermal ve 21 MW’ı çöp gazı ve biyogazdır. Türkiye’nin 140 milyar kWh olan yıllık ekonomik hidrolik enerji potansiyelinin %37’lik kısmı işletmede, %15’lik kısmı (özel sektör dahil) inşa halindedir (Dektmk, 2010). YEKlere ilişkin temel hedef, bu kaynakların elektrik enerjisi üretimi içerisindeki payının 2023 yılında en az %30 düzeyinde olmasının sağlanmasıdır. 2009 sonu itibariyle rüzgar kurulu gücü yaklaşık 800 MW, jeotermal kurulu gücü yaklaşık 80 MW düzeyine ulaşmıştır. 2011 yılı itibariyle 1805 MW olan rüzgar enerjisi kurulu gücünün, 2015 yılına kadar 10.000 MW’a çıkarılması hedeflenmektedir. Üretim planlamaları, yenilenebilir enerji kullanım potansiyelindeki değişimler ve teknolojik gelişmeler göz önünde tutularak hazırlanmaktadır. Elektrik iletim sisteminin daha fazla rüzgar enerjisi santrali bağlanmasına imkan verecek şekilde güçlendirilmesi için gerekli çalışmalar hız kazanmaktadır (Etkb, 2010). 2003-2010 yılları arasında özel sektöre işletmeye alınan elektrik üretim sistemleri içinde hidroelektrik ve rüzgardaki artış dikkat çekmektedir (Çizelge 2.3).

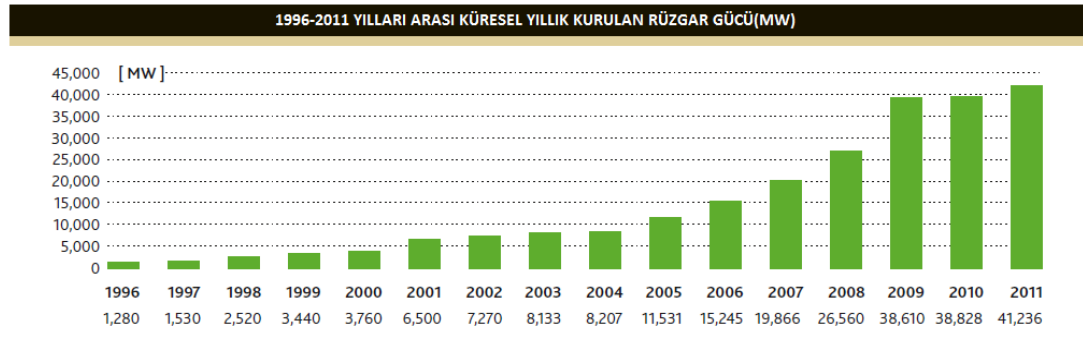
2.4 Rüzgar Enerjisi Pazarındaki Global Gelişmeler

1996’dan beri kümülatif rüzgar kurulu gücü logaritmik olarak artış göstermektedir. 2011 yılında eklenen 41 GW’lık yeni kapasite ile yılsonu itibariyle küresel rüzgar enerjisi kurulu gücü 238 GW’a yükselmiştir (Şekil 2.4 ve 2.5).

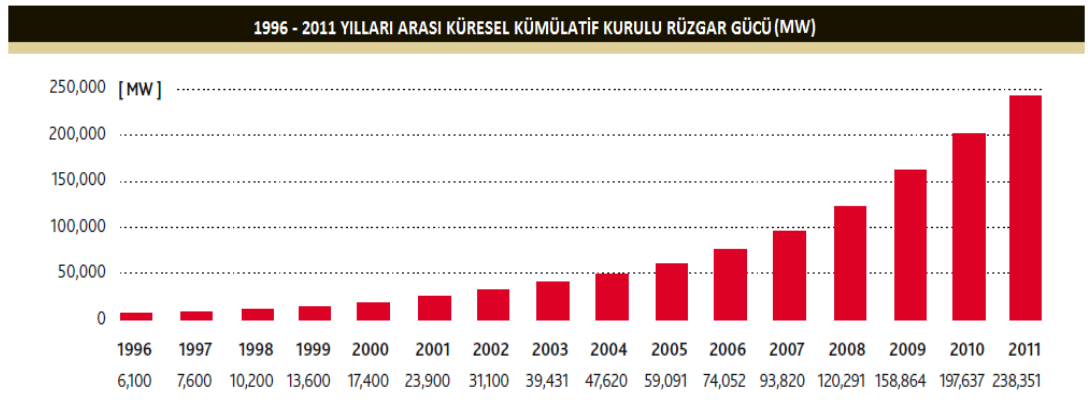
2011 yılında 41.236 MW gücünde RES devreye alınmıştır. Kıtalarla göre 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 ve 2011 yıllarında eklenen kurulu güçler aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 2.6).

Çizelge 2.3 : 2003-2010 yılları arasında özel sektör tarafından işletmeye alınan yeni elektrik üretim kapasitesi (Epdk , 2010).

Yakıt Cinsi	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Genel Toplam (MW)
Asfaltit							135,0		135,0
Biogaz				0,8			6,3	1,4	8,5
Çöp Gazı				5,2	1,4	17,0	15,6	15,6	54,7
Doğal Gaz	179,0	329,2	977,1	460,8	228,8	363,8	1415,9	1750,1	5704,7
Hidroelektrik	58,3	66,7	45,6	105,4	31,5	327,1	465,8	1097,0	2197,4
İthal Kömür		45,0	141,0				270,0	1360,0	1816,0
Jeotermal				8,0		6,9	47,4	17,0	79,3
Rüzgar			1,2	38,9	76,4	217,1	438,6	528,6	1300,8
Fuel Oil	87,9	68,3	6,8		29,6	14,8			207,4
Linyit	20,0				16,0			30,0	66,0
Diğer	43,2	60,2	11,5			16,4	39,2	10,0	177,5
Genel Toplam	388,4	569,4	1183,1	619,1	383,7	963,1	2834,1	4809,7	11750,6

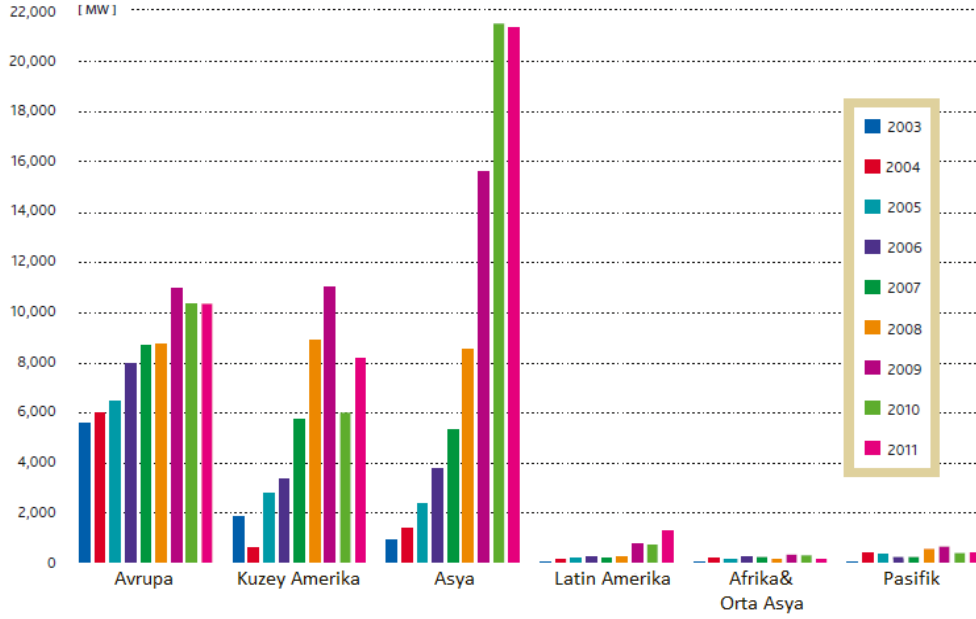


Şekil 2.4 : Küresel yıllık kurulan rüzgar gücü (1996-2011) (Url-9).



Şekil 2.5 : Küresel yıllık kümülatif kurulu rüzgar gücü (1996-2011) (Url-9).

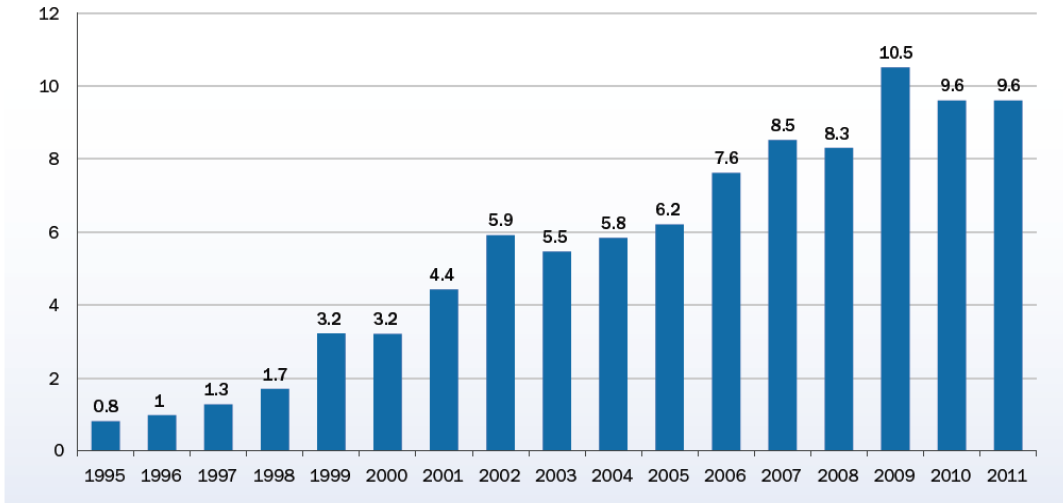
2003 - 2011 YILLARI ARASI KITALARA GÖRE YILLIK ARTIŞ(MW)



Şekil 2.6 : Kıtalaraya göre yıllık artış (2003-2011) (Url-9).

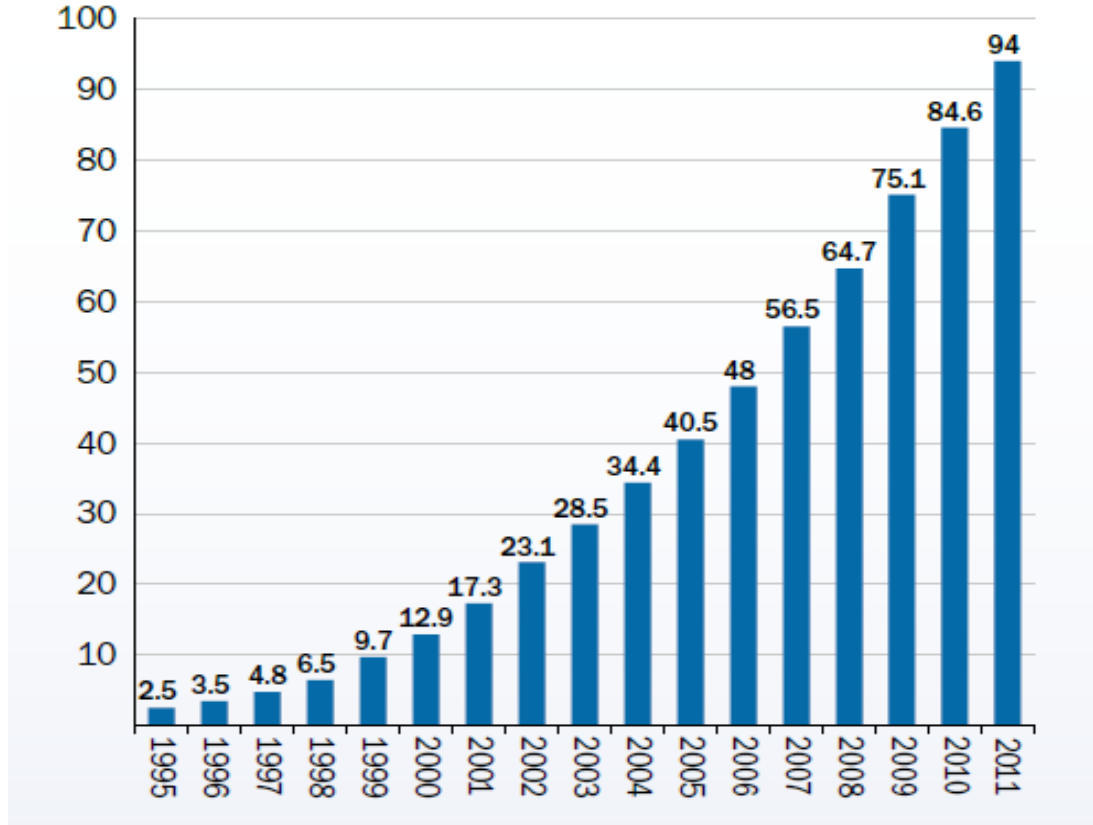
Şubat 2012 tarihinde European Wind Energy Association (EWEA) yayınladığı rapora göre AB Ülkelerinin 2011 yılı sonu verilerine göre, yeni kurulan 9.6 GW'lık kapasite ile AB ülkelerinin toplam kapasitesi 94 GW olmuştur (Şekil 2.7 ve Şekil 2.8) (Url-10).

1995 - 2011YILLARI ARASI AVRUPA'DA YILLIK KURULAN RÜZGÂR GÜCÜ (GW)



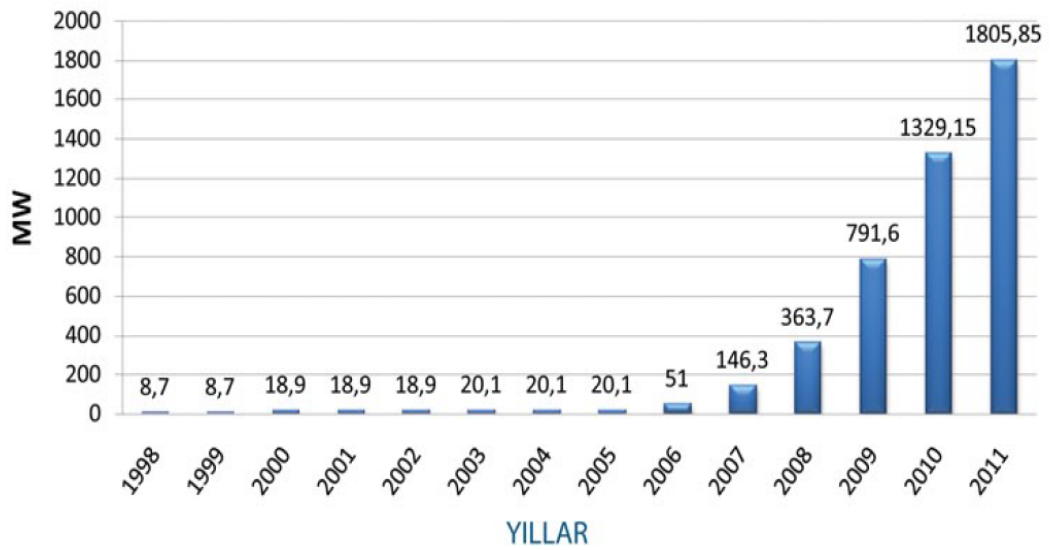
Şekil 2.7 : AB yıllık kurulan rüzgâr kurulu gücü(1995-2011) (Url-10)

1995 - 2011 YILLARI ARASI AB KÜMÜLATİF KURULU RÜZGAR GÜCÜ



Şekil 2.8 : AB kümülatif kurulu rüzgar gücü (1995-2011) (Url-10)

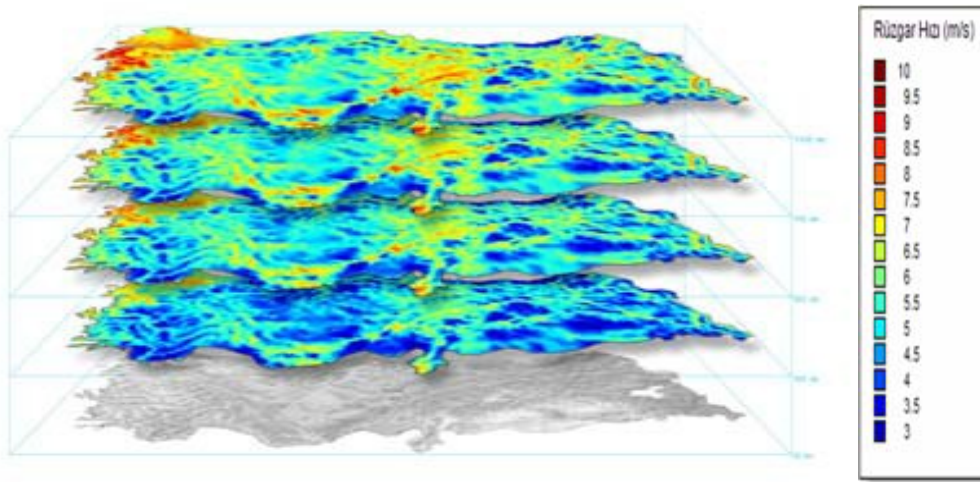
Son olarak Türkiye'ye baktığımızda ise toplam kurulu rüzgar gücünün 2011 yılı sonu itibariyle 1805 MW olduğunu görmekteyiz (Şekil 2.9)



Şekil 2.9 : RES'lerin Kurulu Güç Bakımından Yıllara Göre Kümülatif Dağılımı

2.5 Rüzgar Enerjisinde Türkiye’deki Gelişmeler

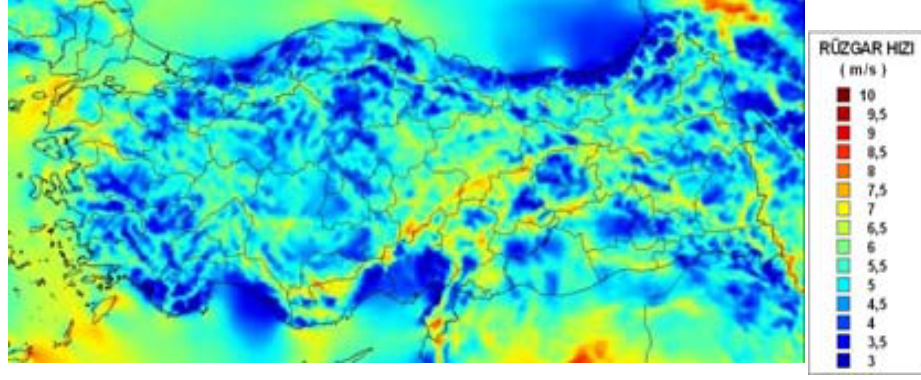
Yıllık ortalamalar incelendiğinde, Türkiye’de en iyi rüzgar kaynağı bölgeleri Ege ve Marmara sahilleri olarak görülmektedir. Ege denizinin kuzeydoğusunda şiddetli rüzgarlar görünmekle birlikte Orta Toroslar, İç Anadolu Bölgesinin doğusu, Akdeniz Bölgesi’nin kuzeydoğusundaki bazı alanlarda ortalama rüzgar şiddeti değerlerinin 7.5 m/s üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Marmara Bölgesinin özellikle Avrupa yakasında ve bu alanların Karadeniz kıyısında rüzgar şiddetleri yüksek değerler almaktadır. Orta Karadeniz’in sahil bölgesi ve yine Akdeniz’in orta kesimlerinin sahillerinde rüzgar şiddetleri, enerji yatırımları için araştırma yapılacak bölgeler sınıfına girmektedir (Şekil 2.10) (Malkoç, 2008).



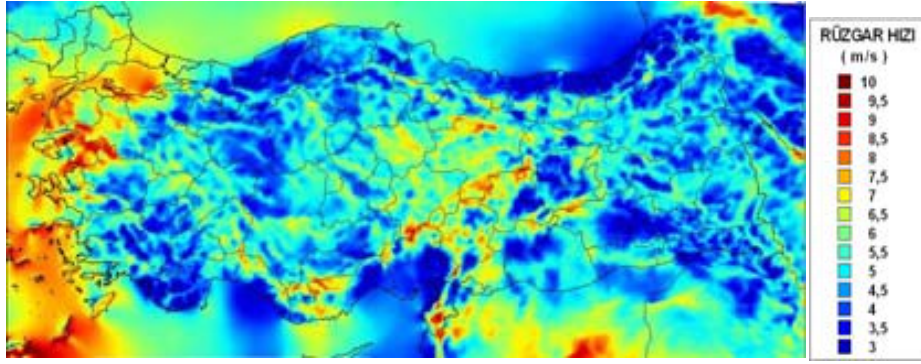
Şekil 2.10 : Rüzgar hız dağılımı (Türkiye Topoğrafyası, 30 m, 50 m, 70 m ve 100 m) (Malkoç, 2008).

Rüzgar kaynağındaki mevsimsel değişim, ülkeyi etkileyen sinoptik sistemlere bağlıdır. Birçok bölgede, özellikle sahil boyunca ve doğudaki dağlarda kışları daha güçlü rüzgar hızları gözlemlenmektedir. Yaz aylarında ortalama rüzgar şiddetinin fazla olduğu bölgelerde ise termal sirkülasyon önemlidir. Türkiye’nin orta kesimleri boyunca, çoğu alanda rüzgar şiddeti değerleri mevsimden mevsime nispeten sabittir (Şekil 2.11, 2.12, 2.13 ve 2.14).

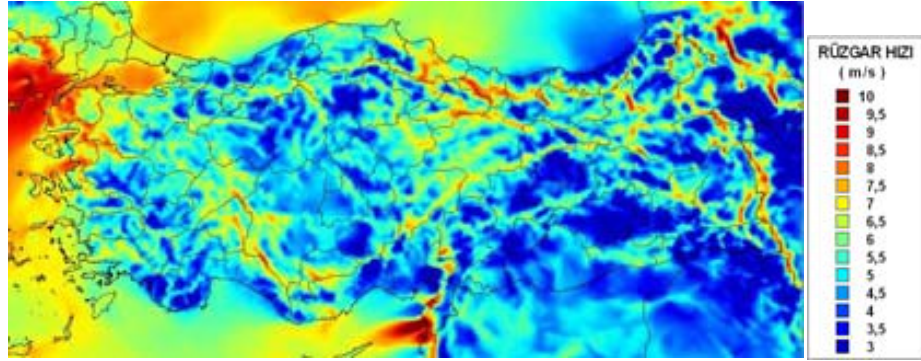
Rüzgar enerjisi ile ilgili tüm parametreler detaylı bir şekilde incelendikten sonra ve yapılan bazı kabuller sonucunda rüzgar sınıfı orta ile sıradışı arasında olan rüzgarlı arazilerin potansiyelinin 131.756,40 MW olduğu görülmüştür. Potansiyel içerisinde derinliği 50 m’ye kadar olan deniz alanları da bulunmaktadır. Bu araziler Türkiye toplamının %3.57’lik kısmına denk gelmektedir (Çizelge 2.4) (Malkoç, 2008).



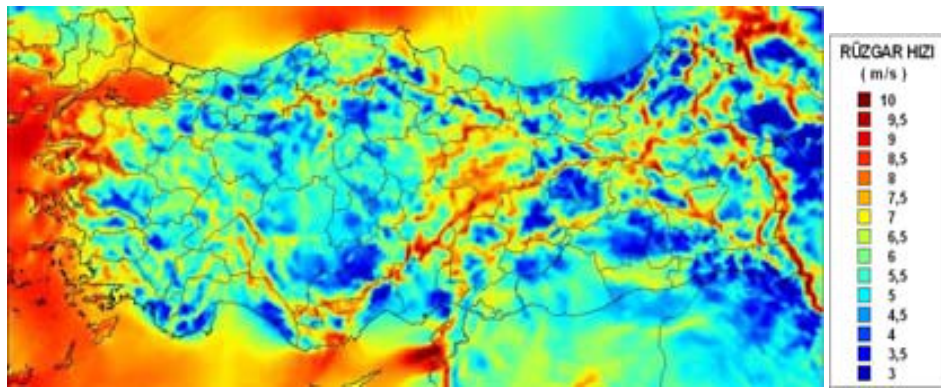
Şekil 2.11 : İlkbahar Ortalama Rüzgar Şiddeti(Malkoç, 2008).



Şekil 2.12 : Yaz Ortalama Rüzgar Şiddeti (Malkoç, 2008).



Şekil 2.13 : Sonbahar Ortalama Rüzgar Şiddeti (Malkoç, 2008).



Şekil 2.14 : Kış Ortalama Rüzgar Şiddeti (Malkoç, 2008).

Çizelge 2.4 : Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli (Malkoç, 2008).

Rüzgar Kaynak Derecesi	Rüzgar Sınıfı	50 m’de Rüzgar Gücü (W/m²)	50 m’de Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Alan (km²)	Rüzgarlı Arazi Yüzdesi	Toplam Kurulu Güç (MW)
Orta	3	300-400	6.5 - 7.0	16.781,39	2,27	83.906,96
İyi	4	400-500	7.0 - 7.5	5.851,87	0,79	29.259,36
Harika	5	500-600	7.5 – 8.0	2.598,86	0,35	12.994,32
Mükemmel	6	600-700	8.0 – 9.0	1.079,98	0,15	5.399,92
Sıradışı	7	>800	>9.0	39,17	0,01	195,84
Toplam				26.351,28	3,57	131.756,40

3. RÜZGAR

3.1 Atmosferik Sınır Tabaka

Rüzgarın Atmosferik Sınır Tabaka (AST) içindeki yapısı rüzgar enerjisi çalışmaları açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle AST'nin yapısını ve AST içindeki süreçlerin, meso ve mikro ölçek modeller için de simüle edilmesi gereklidir.

3.1.1 Atmosferik sınır tabakanın tanımı

AST, atmosferin yeryüzü yakınında bulunan termik ve dinamik etkisinin doğrudan hissedildiği kesimdir. İkinci bir tanım yapılacak olursa, AST, yer yüzeyinden direkt olarak etkilenen ve yaklaşık 1 saat veya daha az bir zaman ölçeği ile, yüzeyin etkisine cevap veren troposfer parçası olarak tanımlanabilir. Bu etkiler, sürtünme, buharlaşma ve terleme, ısı transferi, kirlilik emisyonu, düşey türbülans taşınımını içerir (Menteş, 1996).

Aşağı troposfer seviyelerinde yapılan sıcaklık değişim analizleri, yer yakınındaki sıcaklığın günlük değişiminin, daha büyük yüksekliklerde belirgin olmadığını göstermiştir. Bu günlük değişim, kara üzerindeki sınır tabakanın anahtar karakteristiklerinden biridir. Bu değişim, sınır tabaka üzerindeki güneş radyasyonunun direkt etkisiyle oluşmaz. Az miktarda güneş radyasyonu sınır tabakada absorblanır ve çoğu yeryüzeyine taşınır (Güneş enerjisi yaklaşık %90 oranında yüzey tarafından absorblanır.). Yer yüzeyinden ısı taşınımı ile de sınır tabaka ısınır ve soğur. Türbülans, taşınım işlemlerinin en önemlilerinden biridir ve bazen sınır tabakanın tesbiti için de kullanılır (Menteş, 1996).

Yüzey sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey nemi gibi yüzey karakteristikleri, tabakanın ve hatta tüm troposferin uzun süreli davranışını kuvvetle etkiler. Tüm troposferin yüzey karakteristiklerine olan uyum süresi değişebilir. Bu nedenle sınır tabaka tanımlaması, yaklaşık 1 saatlik bir zaman ölçeğinin bilinmesini kapsar. Ancak bu, sınır tabakanın bu süre içinde dengeye ulaştığı anlamını taşımaz, bu süre 1 gün

olarak kabul edilebilir. Bu süre, yüzeyde ısınma-soğuma döngüsü olması nedeniyle sınır tabaka için önemli bir periyottur (Arya, 1998; Stull,1988).

3.1.2 Atmosferik sınır tabakanın özellikleri

Atmosferik sınır tabakanın en alt seviyesi olan yüzey tabaka yatay basınç gradyanları, kayma gerilmeleri ve coriolis kuvvetlerinin etkisi altındadır. Atmosferik sınır tabakanın en belirgin termik özelliği ise, ısı akısının değişken bir karaktere sahip olmasıdır. Bu nedenle atmosferik sınır tabaka, termik bakımdan, güneş radyasyonunun günlük değişiminin doğrudan algılanabilir olduğu, yer yakınındaki atmosfer bölgesidir. Bu termik ve dinamik özellikler birbirlerini, dünyanın dönmesi, yeryüzeyinin homojen olmaması gibi faktörler ile beraber karşılıklı olarak sürekli bir şekilde etkilemektedir. Atmosferde yapılan çok sayıdaki deneylerden, sınır tabaka içinde akımın hemen hemen stasyoner kabul edilebileceği görüşüne varılmıştır. Bunun yanı sıra, sınır tabakanın alt kesiminde yaklaşık 50-100 m kadar bir kalınlığa sahip bölge içinde, dünyanın eksenini etrafında dönüşü ile oluşan coriolis kuvveti ile basınç gradyan kuvvetinin de ortalama hareket üzerine olan etkisinin ihmal edilebilir mertebede olduğu saptanmıştır. Bu kabul ve hipotezler genel hareket denklemlerinde dikkate alındığında, atmosferik sınır tabakanın yere yakın kesiminde ısı ve momentum akılarının yükseklik ile çok fazla değişmediği görülmektedir. Bu büyüklüklerin yüzeydeki ilk değerlerinden itibaren yükseklikle değişimlerinin genellikle %30'dan daha az olduğu ve akıların yaklaşık olarak sabit kabul edilebileceği söylenebilir. Atmosferik yüzey tabakadaki hafif bir meltem olayından, planeter ölçekte atmosferin genel sirkülasyonuna kadar havanın çeşitli ölçeklerdeki hareketleri türbülanslı karakterdedir. Türbülans, özellikle ısı, nem ve kirleticilerin hava kütleleri yardımıyla taşınmasında önemli bir rol oynamaktadır (Stull, 1994).

3.1.3 Sınır tabakanın kalınlığı ve yapısı

AST, troposferde 100-3000 m'lik bir kalınlığa sahiptir. AST türbülanslı olup, yüzey akıları ve yüzeyin pürüzlülüğünden etkilenir. AST'nin kalınlığının okyanuslar üzerinde, yersel ve zamansal değişimi yavaş olur. Deniz yüzeyi sıcaklığının günlük salınımı, okyanus yüzeyine doğru olan kuvvetli karışımdan dolayı azdır. Su, büyük ısı kapasitesine sahiptir. Bağlı olarak küçük bir sıcaklık değişimi ile güneş radyasyonunun büyük miktarlarını absorblayabilmektedir. Böylece yavaşça değişen su yüzeyi sıcaklığı, sınır tabakanın tabanına doğru yavaş değişen bir etki gösterir.

Okyanus üzerindeki sınır tabaka içindeki çoğu değişimler, deniz yüzeyi üzerindeki farklı hava kütlelerinin adveksiyonu ve düşey hareketin sinoptik ve meso ölçek süreçlerinden etkilenir. Okyanusa göre farklı bir sıcaklığa sahip olan bir hava kütlesi, sıcaklığının deniz yüzeyi sıcaklığı ile dengelenmesi için bir modifikasyona uğrayacaktır. Dengeye ulaşıldığında oluşan sınır tabakanın derinliği 1000 km'lik bir yatay mesafe üzerinde sadece %10'luk bir değişime uğrar. Farklı sıcaklıklardaki iki okyanus akıntısı arasındaki sınırlar bu yavaş değişime bir istisna oluşturabilir (Stage ve Weller, 1976).

Kara yüzeyleri üzerinde sınır tabakanın kalınlığı, güneşsel ısınmanın günlük çevrimine uyumlu olarak zamansal ve yersel bir değişim gösterir. Kuvvetli bir kararlı tabaka veya sıcaklık enverziyonu genellikle AST'nin üst sınırını belirler ve serbest atmosfer (SA) olarak adlandırılan troposferin tabanındaki türbülans karışımı, AST'nin tepesinde bulunan sıcaklık enverziyonu nedeni ile, troposferin üst seviyelerine göre daha soğuk olan bir karışım tabakasını oluşturur. Enverziyon, AST içindeki türbülansın büyük bir kısmını karışma tabakasının (KT) altına sıkıştırır (Menteş, 1996).

AST'dan olan ayrılma bölgesi, geniş ölçekli çökmenin belirgin olduğu antisiklonik şartlarda oldukça belirgindir. Kara ve okyanus alanlarının her ikisi üzerinde, sınır tabakalarının genel yapısı, yüksek basınç bölgelerinde, alçak basınç alanlarındakinden daha ince olur (Stull 1994). Çökme ve yüksek basınçla ilgili olan düşük seviye yatay diverjans, sınır tabaka içindeki havanın yüksek basınçtan alçak basınca doğru hareketini sağlar. Yüksek nem, adyabatik lapse-rate ve yüksek kirlilik konsantrasyonu AST'nin üst sınırını belirler (Menteş, 1996).

Siklon alanlarında ise, yükselici hareketler, sınır tabakanın içindeki havanın troposfer boyunca yerden çok geniş yüksekliklere taşınımını sağlar. AST ve (SA) arasındaki sınır süreksiz, eğimli ve lineer değildir. Bu şartlarda sınır tabakanın üst sınırını tespit etmek güçtür (Menteş, 1996).

SA'dan AST'ya hava geçişi, KT'nin tepesinden türbülanslı hareket vasıtası ile olur. Sonuç olarak AST'nin kütlesi, hacmi ve derinliğinde bir artış olur (Menteş, 1996).

3.1.3.1 Sınır tabakanın günlük değişimi

Kara yüzeyleri üzerinde yerin ısınmasının günlük salınımına paralel olarak, AST'nin belirgin bir günlük değişimi söz konusudur. Oluşan bu yapının üç ana bileşeni, KT,

kalıntı tabaka ve kararlı sınır tabakadır. KTdeki bulutların bulunması durumunda bu tabaka ayrıca bir bulut tabakası ve bir alt tabakası olarak yeniden bölünür (Menteş, 1996).

Yüzey tabaka, sınır tabakanın en altında yer alan kısmıdır. Bu tabaka içinde türbülans akıları ve gerilmelerin yükseklikle değişimleri ihmal edilebilecek mertebededir. Bu tabaka içinde türbülanslı taşınım, moleküler taşınımına nazaran büyüktür (Menteş, 1996).

Karışma tabakası (KT)

Açık günlerde KT'nin büyümesi yer yüzeyinin ısınmasına bağlıdır. Güneşin yükselmeye başlamasından yaklaşık yarım saat sonra bir türbülanslı KT gelişmeye başlar. Bu gelişme, yüzeyden sıcak hava termallerinin yükselmesi ve statik olarak kararsız bir durumdaki kuvvetli karışma ile karakterize edilir. KT öğleden sonra geç saatlerde maksimum yüksekliğe ulaşır. KT, yukarıdaki daha az türbülanslı havanın katılımı ile de büyür. Türbülans, konveksiyon vasıtası ile termal olarak ve rüzgar kayması tarafından da mekanik olarak üretilir. Türbülansın mevcudiyeti, momentum, nem ve ısının düşey olarak uniform bir şekilde karışımını sağlar (Menteş, 1996).

Gün batımında, yüzeyin radyatif soğuması başladığı zaman termal konveksiyon durur ve KT'nin büyük bir kısmında türbülans azalır. Bu tabaka kalıntı tabaka olarak adlandırılır. Gece boyunca kayma oluşturan türbülans için, atmosferden radyatif olarak soğuyan yere ısı transferinin olması esnasında, kalıntı tabakanın tabanı kısmen kararlı bir sınır tabakaya dönüşür (Stull,1994).

KT'nin üzerinde bulunan kararlı tabaka, termallerin yükselişini ve böylece türbülans alanının gelişmesini engelleyici bir rol oynar. Bu tabaka, katılım zonu olarak adlandırılır. Kararlı tabakanın olduğu zamanlarda sıcaklık enverziyonu oldukça kuvvetlidir. KT'nin yüksekliği, enverziyon tabanının ortalama yüksekliğini göstermektedir. Rüzgar hızları KT boyunca, izobarlarla küçük bir açı yaparak, alçak basınca doğru sapar. KT'nin orta kısımları genelde hemen hemen sabit rüzgar yön ve şiddetine sahiptir. Yüzey tabaka içinde, yükseklikle hemen hemen logaritmik bir rüzgar hız profili durumunda rüzgar şiddeti yer yakınında sıfıra yaklaşır. Rüzgar vektörleri yere doğru yaklaştıkça gittikçe artan açılarla izobarları keser (Menteş, 1996).

Karışma oranları, KT'nın orta bölümü içinde de yükseklikle azalmaya meyyleder. KT'nın üst kısmında nem azalması çok belirgindir. Potansiyel sıcaklık ve nem oranı profilleri rawinsonde sondajları vasıtası ile KT'nın üst sınırını belirleyici rol oynar. Kaynakları yer yüzeyine yakın olan kirlilik konsantrasyonları, SA'da bağlı olarak küçük kalırken, KT içinde gelişebilir. Kirleticiler, “eddy”lerle (girdap) taşınır. Kirleticileri alt seviyelerde tutan enverziyon tabakası, genelde yüksek basınç alanlarında bulunur ve bu durum yoğun şehirleşme alanlarında kirliliği kritik değerlere ulaştırabilir (Menteş, 1996).

Bulut miktarının fazla olduğu durumlarda, yer seviyesindeki güneş ışıının etkisini azaltacağından KT'nın büyümesi yavaşlayacaktır. Bu durumda türbülanssız veya nötr tabakalaşma söz konusudur (Stull, 1988).

3.2 Rüzgarın Oluşum Nedenleri

Yere yakın seviyede 10 m yüksekliğinde rüzgarın oluşumuna etkileyen dört neden vardır. Bunlar:

- a) Gradyan rüzgar.
- b) Yeryüzü üzerindeki yatay sıcaklık farklılıkları. Örneğin; deniz ve kara meltemleri.
- c) Eğimli yüzeylerin gün içinde güneşe maruz kalan yüzeylerinin farklı ısınmaları. Örneğin; katabatik ve anabatik rüzgarlar.
- d) Kararsız atmosfer şartları. Örneğin; orajlar ve tropikal siklonlar (Linacre, 1992).

Gradyan rüzgar, coriolis kuvvet, merkezkaç kuvvet ve yatay basınç gradyanı kuvveti arasında üç yönlü bir dengedir. Gradyan rüzgar genellikle gerçek rüzgara jeostrofik rüzgardan daha iyi bir yaklaşımdır (Holton, 2004).

Gün esnasındaki basınç farklılıkları, diğer rüzgar sistemlerine oranla çok daha kısa sürede kendini gösteren rüzgarları oluştururlar. Gün içerisindeki basınç değişimleri daha çok karalarla denizler ve dağlarla vadiler arasında kendilerini gösterirler. Çünkü bu gibi yerler gün içerisinde farklı ısınıp farklı soğumaktadırlar. Bu rüzgarlar kara ile deniz arasında meydana geliyorsa kara ve deniz meltemleri, dağ ile vadi arasında meydana geliyorsa dağ ve vadi meltemleri adını alırlar. Bu tür rüzgarlar oluşumları bakımından musonlara benzerler. Fakat musonlar mevsimlik değişimlerden meydana gelirler ve daha geniş bir alanı etkileyebilirler. Meltemler ise günlük değişimlerden

meydana gelir ve daha küçük alanı etkilerler. Meltemler hemen hemen her yerde eserler. Yalnız kutuplarda günlük sıcaklık değişimleri az olduğu için orada görünmezler (Menteş, 2009).

Etrafı dağlarla çevrili yüksek platolar, katabatik rüzgar oluşumu için en uygun ortamı oluşturur. Kış mevsiminde plato üzerindeki kar örtüsü, hemen üzerindeki havayı soğutur. Bunun sonucunda yüzey yakınında sık bir yüksek basınç alanı oluşur. Platonun kenar kısımlarında yatay basınç gradyanı, soğuk havanın aşağılara doğru akmasına neden olacak kadar güçlüdür. Katabatik rüzgarlar dünyanın çeşitli bölgelerinde sıklıkla görülürler (Kocak, 2009).

Kararsızlık özellikle şiddetli fırtınaların, orajların ve tornadoların oluşmasında önemli bir rol oynar (Kocak, 2009).

3.3 Jeostrofik Rüzgar

Rüzgar hızı, vektörel bir parametre olup cismin zamanla konumundaki değişme oranının miktarıdır. Toplam ve yatay hız vektörleri kartezyen koordinatlarda,

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad (3.1)$$

$$\vec{V}_h = u\vec{i} + v\vec{j} \quad (3.2)$$

olarak gösterilir. Burada i, j, k kartezyen koordinatlarda birim vektörler olup, sırasıyla batı-doğu, güney-kuzey ve dikey birim vektörlerdir. $\vec{V}$, toplam hız vektörü, u, toplam hızın batı doğu bileşeni, v, toplam hızın güney kuzey bileşeni, w, toplam hızın dikey bileşeni, $\vec{V}_h$ ise, Yatay hız vektörüdür. Rüzgar hızının büyüklüğü onun şiddetidir. (3.3) ve (3.4) sırasıyla rüzgar şiddetini ve yatay rüzgar şiddetini göstermektedir.

$$|V| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (3.3)$$

$$|\vec{V}_h| = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.4)$$

Rüzgar yönleri rüzgarların doğuş yönlerine göre adlandırılır. Pozitif büyüklükte ve güney-kuzey bileşenleri bulunmayan u hızı batılı, benzer olarak pozitif büyüklüğe sahip ve batı-doğu bileşeni olmayan v hızı güneyli rüzgardır (Menteş, 2009).

Sürtünmenin olmadığı, akışın izobarlara paralel ve düzgün olduğu durumdaki rüzgara jeostrofik rüzgar denir ve (3.5) ile ifade edilir.

$$V_g = \frac{1}{f} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} \right) \quad (3.5)$$

Burada, V_g , jeostrofik rüzgar, ρ havanın yoğunluğu, $\frac{\partial P}{\partial n}$, basınç gradyan kuvveti, f ise koriolis parametresidir ($f=2\Omega \sin \phi$, ϕ enlem, Ω ise dünyanın açısal hızı, 7.29×10^{-5} rad/sn) (Menteş, 2009).

Birim hava kütlesi için basınç gradyan kuvveti, $\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} \right)$: Bu kuvvet hava kütlesini daha düşük basınç değerlerine doğru hareket ettirir. Hava kütlesi, bir hız kazandığında koriolis kuvveti (fV) etkisiyle kuzey yarımkürede sağa doğru saptırılır. Sonuçta basınç gradyanı ile koriolis kuvvetleri arasında denge oluşur ve hareket izobarlara paralel bir şekilde devam eder. Jeostrofik rüzgar atmosferin türbülanslı açık tabakalarında ve tropik bölgelerde gerçek rüzgara iyi bir yaklaşım değildir. (Menteş, 2009).

3.4 Rüzgar Enerjisi

Rüzgar, dünyanın eğriliği, dönme ekseninin eğimi ve dünya yüzeyinin homojen olmayan yapısı nedeniyle, güneşten gelen enerjiyle, yer yüzeyinin eşit olmayan ısınma ve soğuması sonucu ortaya çıkan basınç farklılıkları yüzünden oluşan hava hareketidir. Hareket halindeki her bir cisim kinetik enerjiye sahip olduğundan, hareket halindeki hava olan rüzgar da bir kinetik enerjiye sahiptir. Kinetik enerji denklemi kullanılarak rüzgarın sahip olduğu enerji hesaplanabilir:

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \quad (3.6)$$

(3.6) denkleminde m , kütle v ise yatay rüzgar şiddetidir. Buradaki kütle (m),

$$m = \rho H \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada ρ , havanın yoğunluğu, H ise hacimdir. A rüzgarın esme yönüne dik alan ve L rüzgar yönündeki uzunluk olmak üzere, hacim,

$$H = AL \quad (3.8)$$

olur. Yolun, hız ve zamanın çarpımına eşit olduğu bilindiğine göre, L mesafesini rüzgar şiddetine ve zamana bağlı olarak,

$$L = vt \quad (3.9)$$

şeklinde yazılır. Burada V , hızı temsil etmektedir. (3.9) denklemini (3.8) yerine yazılırsa,

$$H = Avt \quad (3.10)$$

elde edilir. (3.10) denkleminde (3.7) de yerine yazılırsa, kütle (3.11)'deki gibi ifade edilebilir:

$$m = \rho Avt \quad (3.11)$$

Kütle ifadesi de (3.1) yerine yazılırsa enerji denklemi (3.12) gibi olur.

$$E = \frac{1}{2} \rho A t v^3 \quad (3.12)$$

Birim zamanda ve birim alandaki enerji, (3.12) 'i A ve t ye bölerek (3.13) elde edilir.

$$E = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (3.13)$$

Eşitlikteki ρ , deniz seviyesinde standart atmosfer şartlarında kabul edilen yoğunluk olup değeri $1,223 \text{ kg/m}^3$, v ise rüzgar şiddetidir ve birimi m/sn 'dir. E 'nin birimi W/m^2 'dir (Menteş, 2009).

3.5 İstatistiksel Metodlar

Rüzgarın günlük, aylık, yıllık, uzun dönem ve yersel dağılımı incelendiğinde, her ne kadar farklı dağılım fonksiyonlarına uygun bir yapı göstermiş olsa da, uluslararası literatürdeki genel kabul rüzgarın Weibull dağılımına uygun bir dağılım gösterdiği şeklindedir. Bu çalışmada kullanılan WindSim modeli de hesaplamalarında Weibull dağılım fonksiyonunu kullanmaktadır.

3.5.1 Weibull olasılık dağılımı

Bir istasyona ait rüzgar hızı verisi bağıl frekanslarının temsilinde en çok Weibull dağılım fonksiyonu kullanılmaktadır (Justus ve diğ., 1978). Çift değişkenli Weibull dağılımı, V rüzgar hızı için ihtimal yoğunluk fonksiyonu (rüzgar hızı frekans eğrisi) matematiksel olarak Justus ve diğ. (1978) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir (3.14):

$$p(V)d(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k \right] dv \quad (3.14)$$

Weibull dağılımının birikimli (kümülatif) olasılık yoğunluk fonksiyonu ise (3.15)'de verildiği gibidir.

$$F(v) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k \right] \quad (3.15)$$

Burada c rüzgar hızı ile aynı birime sahip bir ölçek parametresi, k ise boyutsuz şekil parametresidir. Ölçek değişkeni rüzgarın ortalaması ile doğru orantılıdır. Bu durum istasyonun rüzgar karakteristiğinin belirlenmesinde ölçek parametresinin önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. Weibull dağılımının şekil parametresi ise rüzgarın ortalaması ile doğru fakat standart sapması ile ters orantılıdır. O halde ortalama rüzgar şiddeti $\bar{V}$ ve standart sapmanın σ bilinmesi durumunda k ve c parametreleri aşağıdaki bağıntılar kullanılarak bulunabilir:

$$\bar{V} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.16)$$

Burada, Γ genel gamma fonksiyonu ve $\bar{V}$ ise ortalama rüzgar şiddetidir.

$$\left(\frac{\sigma}{\bar{V}}\right)^2 = \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) / \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \quad (3.17)$$

Bu eşitlikte ise σ standart sapmadır. Bu denklemler kullanılarak k ve c parametreleri (3.18) ve (3.19) belirtilen formüller yardımıyla bulunabilir.

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{V}}\right)^{-1.086} \quad (3.18)$$

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3.19)$$

Gamma fonksiyonun değerleri ise aşağıdaki formül yardımıyla yaklaşık olarak kolayca hesaplanabilir. Bu yaklaşım $n = 1/k$ olmak üzere,

$$\Gamma(n + 1) = n! e^{-n} \sqrt{2\pi n} \left(1 + \frac{1}{12n} + \frac{1}{288n^2} + \dots\right) \quad (3.20)$$

dir. Burada, $\Gamma(n+1)$ için yukarıdaki denklemin ilk terimi iyi bir yaklaşımdır. Weibull dağılımı k şekil parametresinin değişik değerlerine göre farklı dağılımları gösterir ve k=2 için Rayleigh dağılımı şeklini alır. k=1 durumunda, eksponansiyel dağılım özelliği ortaya çıkar. Bununla birlikte, Weibull dağılımı k=3,6 için Gauss dağılımına (normal dağılıma) çok benzer bir özellik göstermektedir. Şekil parametresi k doğrudan persistans ile ilişkilidir. Yüksek k değerleri yüksek persistansa ve düşük k değerleri de düşük persistansa karşılık gelmektedir (Menteş, 2009).

4. SAYISAL HAVA TAHMİNİ

4.1 Giriş

SHT, atmosferin durumunu gösteren sıcaklık, rüzgar, nem ve basınç değişkenlerinin yere ve zamana bağlı değişimlerini ifade eden denklemlerin (hareket, termodinamik, süreklilik, hidrostatik eşitlik) matematik çözümleri yapılarak gelecekteki durumunu tahmin etme işlemi olarak tanımlanabilir. SHT'nin başlangıcı 1850'lere dayanmaktadır. Dinamik meteorolojinin başlangıcı, Ferrel'in rüzgar ve genel sirkülasyon üzerine bu yıllarda yaptığı çalışmalar olarak gösterilmektedir. İzleyen yıllarda, atmosfer termodinamiğine kuru ve nem adyabatik süreçlerin dahil olmasını takiben 1904'te V.Bjerknes hava tahmininde fizik ve matematiğin temelleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Radiosonde gözlemlerinin 1920'lerde gerçekleştirilmeye başlamasıyla birlikte sonra 1933'te ilk olarak yukarı seviye ve çeşitli basınç seviyelerinin haritaları çizilmeye başlanmıştır. 1940lı yılların sonunda radarların meteorolojide kullanılmaya başlanması kuvvetli hava olaylarının, orajların, fırtınaların gözlenmesi açısından bir devrim olmuştur. SHT konusundaki ilk deneme 1922 yılında L.F. Richardson tarafından gerçekleştirilmiş fakat başarıya ulaşamamıştır. 1940 yıllarına gelindiğinde ise, yine Richardson öncülüğündeki bir ekip, Richardson'un ilk versiyonundan daha basit bir modelde barotropik vortisite eşitliğini kullanarak, 500 milibar (mb)'ın dinamik olarak tahminini yapmayı başarmışlardır. Şu anda ise dünyanın birçok yerinde yapılan sinoptik, deniz, radiosonde, uçaklardan yapılan gözlemlerle uydu ve radar ölçümleri bu modellerde kullanılmaktadır (Url-8). Günümüzde kullanılan modelleri temel olarak iki gruba ayırabiliriz:

A) Global Modeller:

Yatay çözünürlüğün, spektral (yatay çözünürlüğün dalga sayısı ile orantılı olduğu) veya grid (yatay çözünürlüğün iki grid noktası arasındaki mesafeyle orantılı olduğu) olarak çözümlendiği bu model türünde basit hidrostatik eşitlik kullanılmaktadır. Yani

havanın ağırlığıyla düşey basınç gradyan kuvveti arasında bir denge olduğu kabul edilmektedir. Bu model türünde, düşey ivme hesaplamalarda ihmal edilir. Global atmosferik modeller ve genel sirkülasyon modelleri global modellere örnek olarak verilebilir. Dünyada kullanılan belli başlı global modeller ve bu modelleri geliştiren ülkeler:

IFS (Integrated Forecast System), ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts);

UM (Unified Model), İngiltere;

GME (Global Modell) , Almanya;

ARPEGE, Fransa;

AVN/MRF, ABD;

GEM (Global Environmental Multiscale Model), Kanada;

JMA, Japonya'dır (Url-8).

B) Sınırlı Alan Modelleri

Bu tür modellerde global modellerin tersine yatay çözünürlük dalga sayısı ile değil grid noktaları arasındaki mesafe ile orantılıdır. Yani sınırlı alan modellerinde grid sayısı artınca çözünürlük artmaktadır. Sınırlı alan modellerin bazılarında hidrostatik denge kabul edilirken (Sinoptik /Mezo ölçek modeller) bazılarında ise hidrostatik denge eşitliği kabul edilmez. Bunlar genellikle çok yüksek çözünürlük gerektiren tahmin problemlerinde kullanılmaktadır. Dünyada kullanılan belli başlı sınırlı alan modelleri ve bu modelleri geliştiren ülkeler;

ALADIN, Fransa ve ALADIN Konsorsiyumu;

Eta, MM5 ve WRF, ABD;

LM , Almanya ve Cosmo Konsorsiyumu;

HIRLAM, HIRLAM Konsorsiyumu'dur (Url-8).

Hem global hem de sınırlı alan modeller tahminlerinde bir takım hatalar meydana gelmektedir. Bu hataları iki grupta toplayabiliriz:

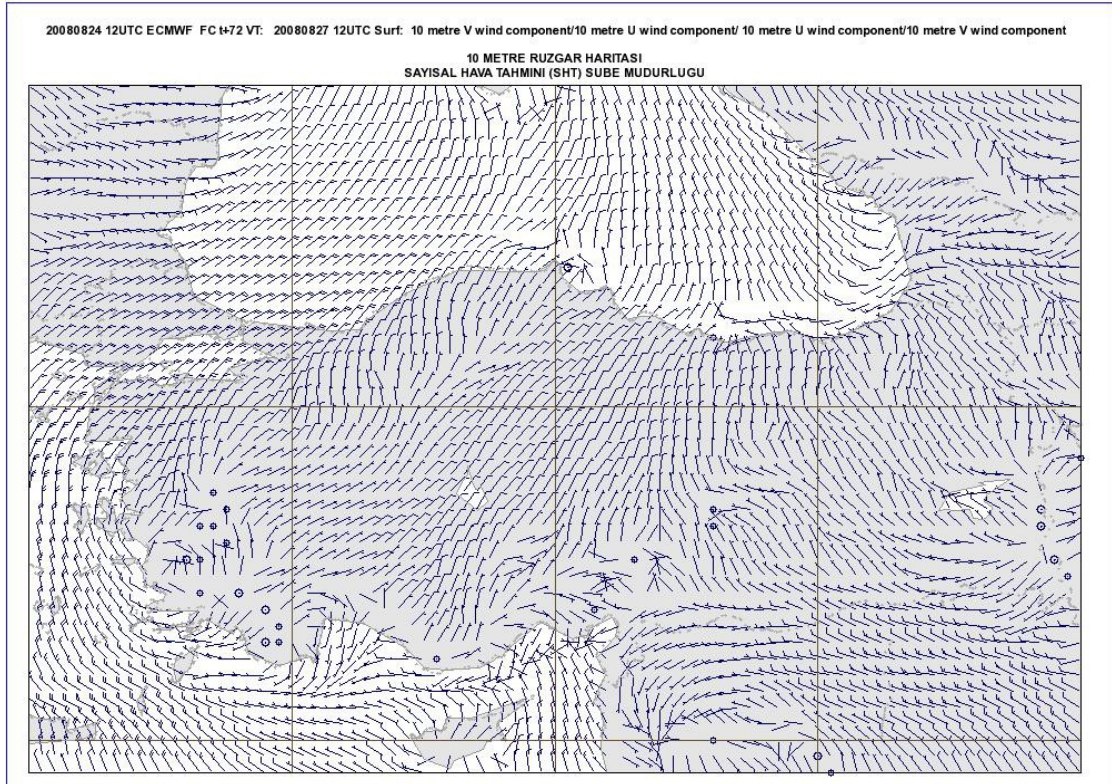
Sistemik Hatalar: Modelin gerek fiziksel parametrisasyon problemlerinden, gerek yatay çözünürlüğünün az olmasından, gerekse topografya verisinin gerçek

topografyayı tam olarak ifade edememesinden dolayı meydana gelen ve süreklilik arz eden hatalardır. Bu tür hataların düzeltilmesi için modelin kendisine müdahale edilmesi gerekmektedir (Url-8).

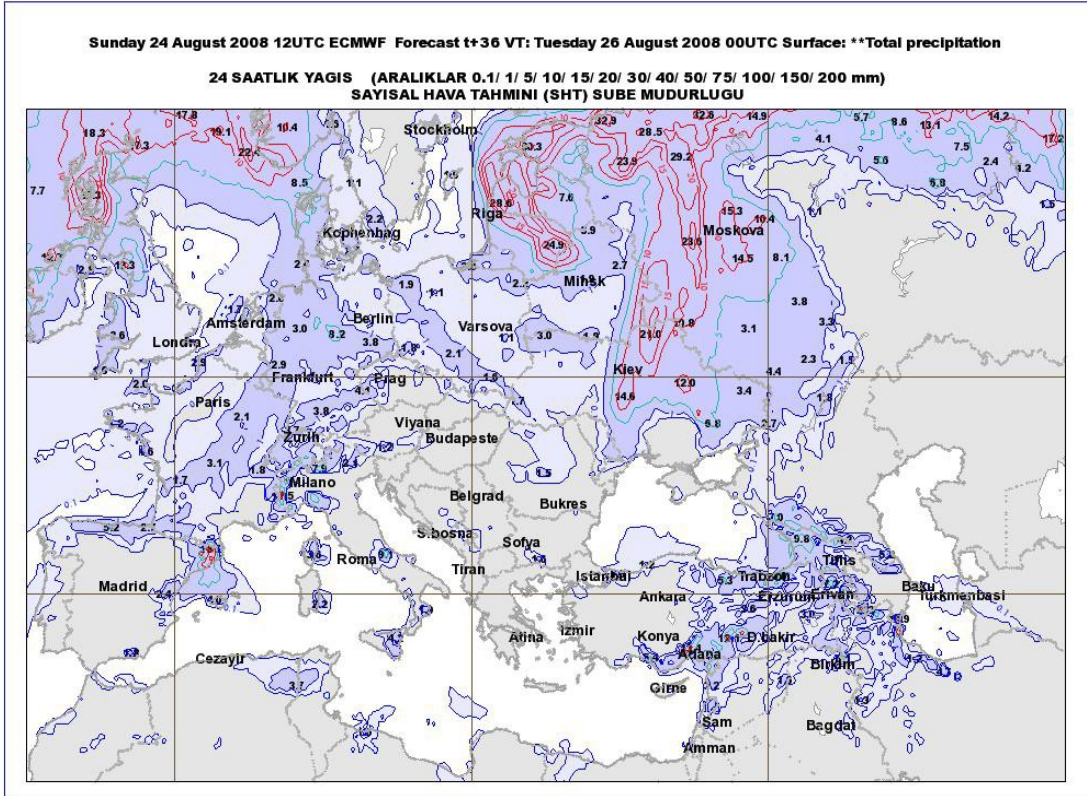
Sistemik Olmayan Hatalar: Modele giren başlangıç koşullarındaki hatalardan kaynaklanan ve devamlılık arz etmeyen hatalardır. Bu tür hataların düzeltilmesi için başlangıç verisinin asimilasyon çalışmalarıyla iyileştirilmesi gerekmektedir (Url-8).

ECMWF Deterministik Model

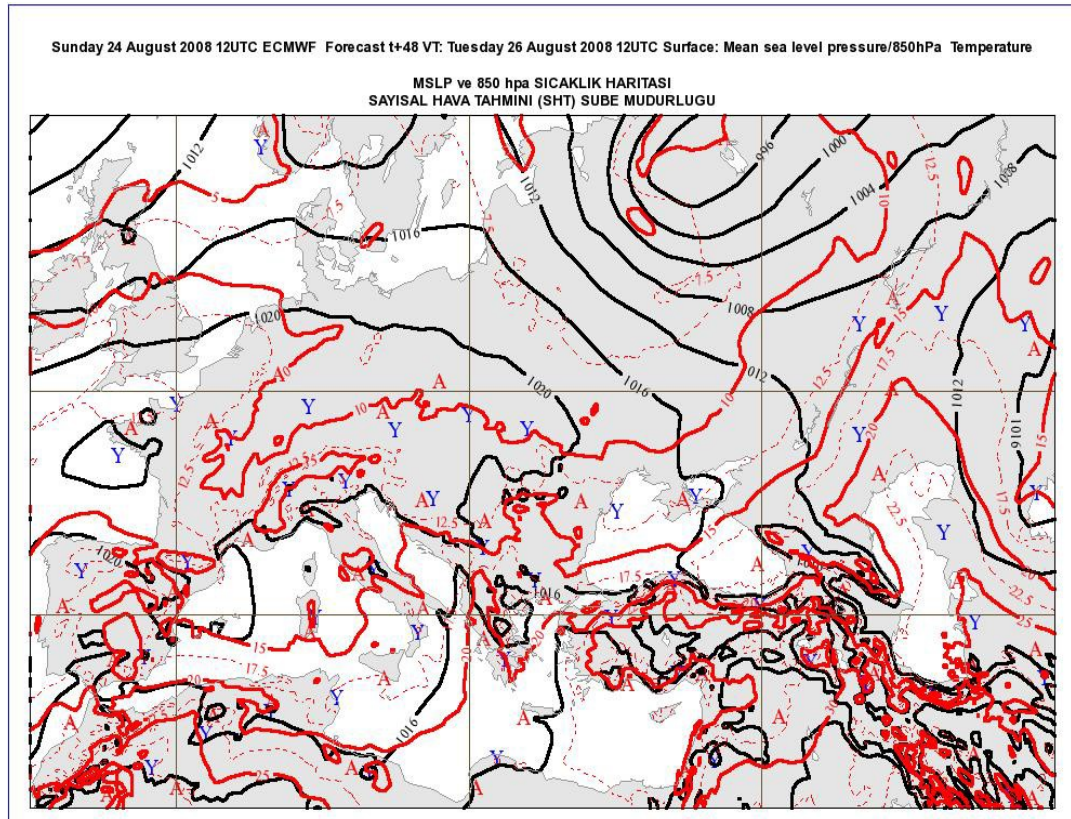
Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi Türkiye'nin de aralarında bulunduğu 17 Avrupa ülkesi tarafından 11 Kasım 1973'te kurulmuştur. Yapılan araştırma ve çalışmalar sonucu ECMWF Deterministik Modeli ortaya çıkarılmıştır ve 1 Ağustos 1979 tarihinden itibaren de operasyonel hale getirilmiştir. Yer seviyesinden itibaren 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150 ve 100 hPa seviyelerine ait bilgiler ilk 3 güne kadar üçer saat aralıklarla, 3 günden 10 güne kadar ise 6'şar saat aralıklarla üretilir (Url-8). Modelin ürettiği haritalardan bazıları 10m.rüzgar haritası, 24 saatlik toplam yağış haritası, 850 hPa sıcaklık ve deniz seviyesine indirilmiş basınç haritası, 500 hPa yükseklik, sıcaklık ve rüzgar haritası'dır (Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4).



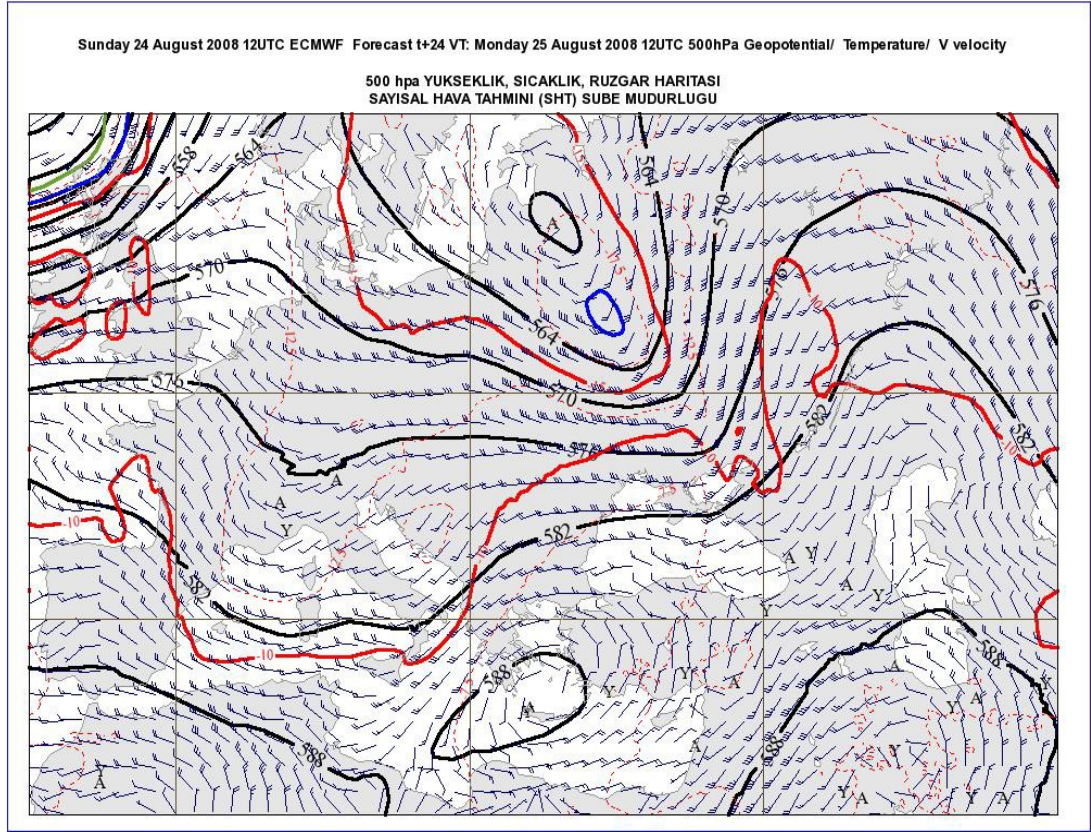
Şekil 4.1 : T+72 için 10 m. rüzgar haritası (Url-8).



Şekil 4.2 : (T+12)–(T+36) arası için 24 saatlik toplam yağış haritası (Url-8).



Şekil 4.3 : T+48 için 850 hPa sıcaklık ve deniz seviyesine indirilmiş basınç haritası (Url-8).



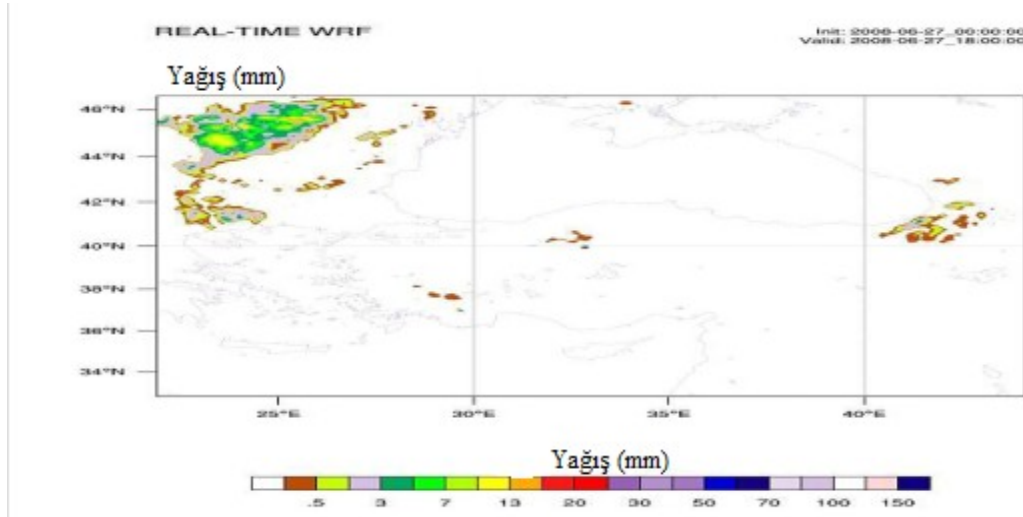
Şekil 4.4 : T+24 için 500 hPa yükseklik, sıcaklık ve rüzgar haritası (Url-8).

4.2 WRF Modeli

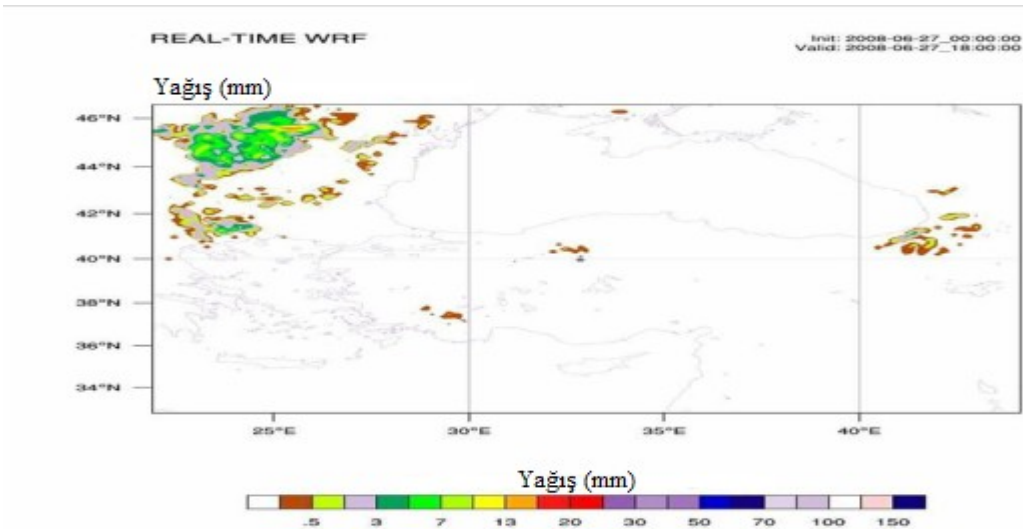
WRF modeli, operasyonel öngörüler kadar atmosferik araştırmalara yanıt verebilecek yeni nesil bir SHT modelidir. Birden fazla dinamik merkez koduna sahiptir, 3DVAR (3 Dimensional Variational) adıyla anılan bir veri asimilasyonu sistemine sahiptir, ve paralel hesaplama yapısına olanak veren, gelişmeye açık bir yazılım mimarisi kullanır. Bölgesel öngörülerde geniş spektrumlu (sinoptik ve orta ölçekli) atmosferik olayların incelenmesine olanak verir. Aslında model daha önce benzer amaçlarla kullanılan, ancak son yıllarda terkedilen MM5 modelinin geliştirilerek yenilenmiş bir versiyonudur. En önemlisi, modelin arkasında geniş bir geliştirici ve kullanıcı desteği vardır ve bu yönüyle gerçek bir “community model” (kullanıcı grubu modeli) niteliği taşır. Modelin gelişmesi, Amerika Birleşik Devletleri’nde NCAR, National Oceanic and Atmospheric Administration - National Centers for Environmental Prediction (NOAA-NCEP), Forecast Systems Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory (NRL), University of Oklahoma, Federal Aviation Administration (FAA) gibi kuruluşların işbirliği ile gerçekleştirilmiştir. Fiziksel, sayısal ve veri asimilasyonu alanlarındaki gelişmeler, modelin hesaplama

verimliliği ve esnekliği sayesinde bu araştırma grubunun desteği ile modele kolayca uygulanabilmektedir. Modelin bir özelliği de hidrostatik varsayım kullanmadan orta ölçek topoğrafya etkilerini daha gerçeğe yakın temsil edebilmesidir. Ayrıca hesaplama paralel yürütüldüğü için, model alanı içinde çözünürlüğü farklı birden fazla alt-bölge seçilebilir (Url-9).

WRF Sayısal Model ve WRF-3DVAR veri asimilasyonu kodları çalıştırılmakta ve sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmaktadır. Veri asimilasyonunda gözlem verileri olarak METAR (METeorologic Airport Report), SİNOPTİK, TEMP ve SHIP rasatları kullanılmaktadır. (Url-8). Şekil 4.5’de WRF tarafından üretilen veri asimilasyonsuz yağış, Şekil 4.6’da ise 3D-VAR modeli yağış çıktısı görülmektedir.



Şekil 4.5 : WRF modeli asimilasyonsuz yağış (mm) çıktısı (Url-8).



Şekil 4.6 : WRF-3DVAR modeli yağış (mm) çıktısı (Url-8).

4.2.1 WRF ‘nın özellikleri

ARW (Advanced Research WRF) ve NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) olmak üzere 2 farklı dinamik çekirdeğe sahiptir. 3-boyutlu varyasyonel (3DVAR) veri asimilasyon sistemi mevcuttur. Parallelleştirme seçenekleri ve optimum sistem kullanımı yapılabilmektedir. Birkaç metreden binlerce kilometreye varan geniş bir ölçek spektrumunda, çok çeşitli uygulamalara uygunluk göstermektedir. İdeal ve gerçek veri kullanma opsiyonuna sahiptir. WRF uygulama alanları, ideal simülasyonlar (Large Eddy Simulation (LES) , konveksiyon, baroklinik dalgalar, vb.), parametrizasyon araştırmaları, veri asimilasyon araştırmaları, tahmin araştırmaları, gerçek zamanlı SHT, çift-model uygulamaları ve eğitim olarak sıralanabilir (Skamarock ve diğ., 2008).

Tam sıkıştırılabilir, Euler nonhidrostatik denklemler (Hidrostatik opsiyon mevcut) kullanılmakta olup, skaler değişkenler korunmaktadır. Prognostik değişkenleri; kartezyen koordinatlarda u ve v hız değişkenleri, düşey hız w, pertürbe potansiyel sıcaklık, pertürbe jeopotansiyel, kuru havanın pertürbe yüzey basıncıdır. Opsiyonel olarak, türbülans kinetik enerjisi ve çeşitli skalerler; su buharı karışma oranı, yağmur/kar karışma oranı, ve bulut kar/buz karışma oranı gibi değişkenleri de kullanmaktadır. Model tepesi sabit basınç seviyesidir. Kullanılan yatay grid: Arakawa C-grid, zaman integrasyonu ise 3. dereceden Runge-Kutta yöntemidir. Uzaysal ayrıklaştırma; yatay ve dikeyde 2 ila 6’ıncı dereceden adveksiyon opsiyonları mevcuttur. Küre tasarımı sayesinde; gerçek veri simülasyonu için üç harita projeksiyonu desteklenmektedir. Bunlar, Polar Stereographic, Lambert-conformal, ve Mercator’dur. Denklemlere eğrilik terimleri dahildir. Tek-yönlü, İki-yönlü, hareketli nestler mevcuttur (Skamarock ve diğ., 2008).

4.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

4.3.1 Genel bilgiler

Birçok mühendislik uygulama alanında karşılaşılan akışlar, karmaşık geometriler etrafında olup, üç-boyutlu, zamana bağlı olarak değişen, kopmalı ve türbülanslı akışlardır. Bu tür üç-boyutlu karmaşık akış problemlerinin paralel bilgisayar öbeklerinin daha yaygın kullanımı HAD ve yüksek başarılı hesaplamalar ile çözümü ve simülasyonları günümüzde mümkün olmaya başlamıştır. Böylece HAD

simülasyonları artık bütün bilim ve mühendislik alanlarında önemi artan bir rol oynamaktadır. Ancak hala bu yöntemler ile tasarım aşamasında istenilen hızda çözümlerin elde edilememesi, bu simülasyonların tasarım aşamasında sadece sınırlı sayıda akış koşulları için yapılmasına ve daha çok akademik amaçlı sayısal deneyler olarak kullanılmasına da neden olmaktadır (Uzol, 2009).

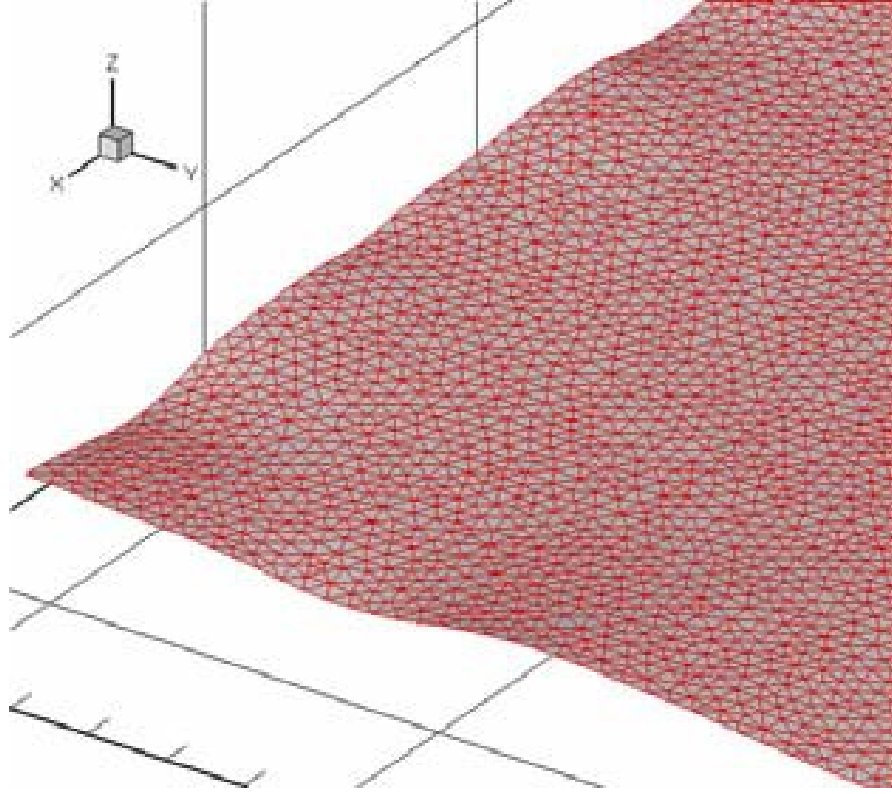
Hemen hemen tüm HAD problemlerinin temelinde herhangi bir tek fazlı sıvı akışını tanımlayan Navier-Stokes denklemleri vardır. Bu denklemlerden, viskoziteyi içeren terimler atılarak sadeleştirilebilir ve Euler denklemleri elde edilir. Daha fazla sadeleştirme ise vortisiteyi ifade eden terimlerin çıkarılması ile yapılabilir. Böylece tam potansiyel denklemler elde edilmiş olur. Son olarak da bu ses altı ve ses üstü akışlardaki pertürbasyonlar lineerleştirilerek lineerleştirilmiş potansiyel denklemleri elde edilir (Url-10).

Çözüm yaklaşımlarının hepsinde aynı temel prosedür izlenir:

- Önileme sırasında,
 - Problemin geometrisi (fiziksel sınırları) tanımlanır.
 - Akışkan tarafından işgal edilen hacim kesikli hücrelere(mesh) bölünür (Şekil 4.7). Mesh homojen olabilir de olmayabilir de.
 - Fiziksel model tanımlanır.
 - Sınır koşulları tanımlanır.
- Simülasyon başlatılır ve denklemler bir kararlı durum ya da geçici bir durum için olarak iteratif olarak çözülür.
- Son olarak, bir son işlemci çözüm analizi ve görüntüleme için kullanılır (Url-10).

4.3.2 Navier-Stokes denklemleri

Navier-Stokes denklemleri, ismini Claude-Louis Navier ve George Gabriel Stokes'tan almış olan, sıvılar ve gazlar gibi akışkanların hareketini tanımlamaya yarayan bir dizi denklemden oluşmaktadır. Bu denklemler; akışkan içerisindeki birim kütleye etki eden momentum (ivmelenme) değişimlerinin, basınç değişimleri ve sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerin toplamına eşit olduğunun doğruluğunu ortaya koymaktadır. Bu viskoz kuvvetler moleküller arası etkileşimlerden meydana gelmekte ve akışkanın akmaya ne kadar dirençli olduğunu göstermektedir. Böylece, Navier-Stokes denklemlerinin, verilen akışkanın herhangi



Şekil 4.7 : Marmara Bölgesi'nde seçilen bir topografya üzerine yapılan çözüm ağı (Uzol, 2009).

bir bölgedeki kuvvetler dengesinin dinamik ifadesi olduğu söylenebilir. Bu denklemler en kullanışlı denklemlerin başında gelmektedirler. Çünkü gerek akademik gerekse ekonomik birçok fenomenin fiziğini açıklamaktadır. Hava akımları ve okyanus akıntılarının, boru içindeki su akışının, galaksideki yıldız hareketlerinin, kanat etrafındaki hava akımlarının modellenmesinde ve hesaplarında sıkça kullanılırlar (Url-11).

4.3.2.1 Temel kabuller

Navier-Stokes denklemlerinin detayına girmeden önce, akışkanlar hakkında bazı kabuller yapılması gereklidir. Öncelikle akışkanın sürekli olduğu kabul edilir. Yani akışkanın tamamının aynı özellikte olduğu içinde farklı biçimler (formlar) bulunmadığı kabul edilir. Bir başka gerekli kabulde konu ile ilgili tüm alanların basınç, hız, yoğunluk, sıcaklık vs., diferansiyel olduğudur (Url -11).

Denklemler, momentum ve enerji ve kütle korunumunun temel prensiplerinden elde edilir. Bunun için, bazı hallerde kontrol hacmi adı verilen, rastgele seçilmiş sonlu bir hacim belirlemek gereklidir, bu hacim üzerinde bu prensipler kolayca uygulanabilir. Bu sonlu hacim Ω ile gösterilir ve yüzeyi sınırlandırılır $\partial\Omega$. Kontrol hacmi, sabit

kalabilir veya akışkan ile hareket edebilir. Temel kabuller bunlardır, bununla beraber, farklı uygulamalarda özel kabuller de yapılabilir (Url -11).

4.3.2.2 Gerçek türev

Hareket eden akışkanın özelliklerinin değişiminin ölçülebilmesi için iki yol vardır. Örneğin dünya atmosferindeki rüzgar hızının değişimleri ele alınacak olursa; bu değişiklikler bir meteoroloji istasyonu ölçüm cihazı (anemometre) veya bir hava balonu yolu ile ölçülebilir. Şüphesiz, ilk durumdaki anemometre boşlukta sabit bir nokta boyunca geçiş yapan tüm hareketli parçacıkların hızını ölçerken, ikinci durumda bahsedilen aygıt akışkan ile beraber hareket ederken hızdaki değişimi ölçer. Aynı durumda, yoğunluk, sıcaklık vb. değişimler de ölçümü etkileyecektir. Bu nedenle, bu iki hal için bir ayırım yapılmalıdır. Bir alanın boşluktaki sabit bir pozisyona göre türevi uzaysal veya Euleryen türev olarak adlandırılır. Hareketli bir parçacığın izlenmesi türevi gerçek, Lagrangyan veya maddi türev olarak adlandırılır. Gerçek türev şu şekilde tanımlanır (4.1):

$$\frac{D}{Dt}(A) = \frac{\partial(A)}{\partial t} + v \cdot \nabla(A) \quad (4.1)$$

Burada v akışkanın hızıdır. Denklemin sağ tarafındaki ilk terim alışılmış Euleryen türevi (sabit bir referans üzerindeki türev) iken, ikinci terim akışkan hareketi ile oluşan değişiklikleri ifade eder. Bu etki adveksiyon olarak adlandırılır (Url -11).

4.3.2.3 Korunum kanunları

Navier-Stokes denklemleri, kütle, enerji, momentumun korunumu ve açıksal momentumun korunumu kanunlarından türetilir. En genel biçimde, bir korunum kanunu şunu ifade eder, bir kontrol hacmi üzerinde tanımlanmış hacim özelliği değişiminin oranı L hacim sınırları boyunca hareket eden akışkanın dışarı taşıdığı kayıp ve artı kontrol hacminin iç tarafındaki kazançlar ve kayıplara eşit kabul edilir. Bu, aşağıdaki integral denklemi ile ifade edilir (4.2):

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} L d\Omega = - \int_{\partial\Omega} Lv \cdot nd\partial\Omega + \int_{\Omega} Qd\Omega \quad (4.2)$$

Bu denklemde v akışkanın hızı ve Q akışkan içindeki kazançlar ve kayıplar olarak ifade edilir. Eğer kontrol hacmi boşluk içinde sabitlenmiş ise bu integral denkleminden aşağıdaki şekilde bir ifade yazılabilir (4.3).

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} L d\Omega = - \int_{\partial\Omega} \nabla \cdot (Lv) d\partial + \int_{\Omega} Q d\Omega \quad (4.3)$$

Ayrıca, kontrol hacminin içinde, bu son denklemde elde edilmiş olan sağ taraftaki ilk terimin ifade edilmesi için diverjans teoremi kullanılmıştır. Böylece integral denklemi (4.4) halini alır:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} L d\Omega = - \int_{\partial\Omega} (\nabla \cdot (Lv) - Q) d\partial \quad (4.4)$$

Yukarıdaki ifade boşlukta sabit kalan bir kontrol hacminde Ω için geçerlidir. Çünkü Ω , zaman içinde sabittir, değişmez. Bu sayede " $\frac{d}{dt}$ " ve " $\int_{\Omega} d\Omega$ " ifadeleri birbirinin yerine yazılabilir. Böylece ifade tüm alanlar için geçerli olur, ve integral çıkartılabilir (Url -11). Gerçek türev, $Q = 0$ olduğunda (kazanç ve kayıp yokken) elde edilir (4.5).

$$\frac{\partial}{\partial t} L + \nabla \cdot (Lv) = \frac{D}{Dt} L + L(\nabla \cdot v) = 0 \quad (4.5)$$

4.3.2.4 Süreklilik denklemi

Kütlenin korunumu şu şekilde yazılır (4.6):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot v + v \cdot \nabla \rho = 0 \quad (4.7)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (4.8)$$

Burada ρ kütle yoğunluğu (birim hacim başına kütle), v akışkanın hızıdır.

Sıkıştırılmaz bir akışkan için ρ akış hattı boyunca değişmez ve denklem şu hale indirgenir (Url -11) **(4.9)**:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (4.9)$$

4.3.2.5 Momentumun korunumu

Momentumun korunumu, yoğunluk yerine momentumun vektör bileşenleri ve akışkan üzerine etkiyen kuvvetler ile, süreklilik denkleminde benzer bir yaklaşım yapılarak ifade edilir. Süreklilik denkleminde ρ yerine belirli bir yönde birim hacim başına net momentum yazılır, ρv_i , burada v_i hızın i^{n} . bileşenidir **(4.10)** (hız x, y veya z yönleri boyunca olmak üzere).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \nabla \cdot (\rho v_i v) = \rho f_i \quad (4.10)$$

ρf_i , akışkan üzerine etkiyen kuvvetin i^{n} . bileşenidir (her birim hacim başına gerçek kuvvet). Genel kuvvetler yerçekimi ve basınç gradyanlarını kapsar. Bu durum, şu şekilde de ifade edilebilir **(4.11)**:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \otimes v) = \rho f \quad (4.11)$$

Ayrıca, $v \otimes v$ bir tensor'dür, $\otimes$ tensor çarpımını ifade eder.

Süreklilik denkleminin kullanımı daha da basitleştirilebilir ve şu hale gelir **(4.12)**:

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = \rho f_i \quad (4.12)$$

Genel kullanımda aşağıdaki gibi de yazılabilir **(4.13)**:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho f \quad (4.13)$$

Bu bağlamda $F=ma$ ifadesi doğrulanmış olur (Url -11)..

4.3.2.6 Denklemlerin elde edilişı

Momentumun korunumu için Navier-Stokes denklemlerinin genel biçimi (4.14) :

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot \mathbb{P} + \rho f \quad (4.14)$$

Burada ρ akışkan yoğunluğu, v hız vektörü ve f kitle kuvvet vektörüdür.

$\mathbb{P}$ tensörü, akışkan parçacığı üzerine uygulanmış yüzey kuvvetleri olarak tanımlanır (gerilme tensörü). Akışkan girdap gibi bağımsız bir eğme bükme hareketi yapmadıkça, $\mathbb{P}$ simetrik bir tensördür. Genel olarak, biçim (4.15):

$$\mathbb{P} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{xx} + p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} + p & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} + p \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Burada σ normal gerilmeler, τ teğetsel gerilmeler ve p gerilme tensörünün izotropik parçası ile birleştirilmiş statik basınçtır. $\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = 0$ matris izi akışkanın dengede olup olmadığının bir ölçüsüdür. Sonuç olarak (4.16) denklemi elde edilir:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbb{T} + \rho f \quad (4.16)$$

Burada $\mathbb{T}$, $\mathbb{P}$ 'nin izsiz parçasıdır. Akış, sürekli ve diferansiyel kabul edilmiş ve korunum kanunları çerçevesinde kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilmiştir. Akışın sıkıştırılamaz olduğu durumda, değişkenler, basınç ve hız bileşenleri için çözülmüştür. Bu değişkenler, Navier-Stokes denklemlerinin üç bileşenine, kütle korunumu ilave edilerek, kapalı bir sistem için kısmi diferansiyel denklemler ile , sınır şartlarına uygun olarak çözülebilir. Sıkıştırılamaz akış durumunda, yoğunluk sistem için diğer bir bilinmeyen haline gelir, sistem için bir durum denklemi ilavesi ile saptanır. Durum denkleminde genelde akışkanın sıcaklığı işin içine girer, o yüzden denklem enerjinin korunumu için de mutlaka çözülmelidir. Bu denklemler non-lineer'dir (yani lineer değildir) ve kapalı formdaki analitik çözümleri sadece çok basit sınır şartları için bilinir (Url-11).

Denklemler, akım ve girdap fonksiyonu ikinci değişkenleri için Wilkinson denklemlerine dönüştürülebilir. Çözüm akışkan özelliklerine (viskozite, özgül ısı ve ısı iletkenlik gibi) ve çalışma alanındaki sınır şartlarına bağlıdır (Url-11).

4.3.3 Kesikli hale getirme yöntemleri

Ayrıklaştırma işlemi için genelde analitik yöntemler yerine sayısal yöntemler tercih edilmektedir. Ayrıklaştırma işlemi yapılırken seçilen ayrıklaştırma yönteminin süresiz çözümleri de sağlaması gerektiğine dikkat edilmelidir. Euler denklemleri ve Navier-Stokes denklemlerinin her ikisi de hem şokları hem de temas yüzeylerini içermektedir (Url-10). Kullanılan ayrıklaştırma yöntemlerinin bazıları şunlardır:

4.3.3.1 Sonlu hacim yöntemi

Sonlu hacim yöntemi HAD kodlarında yaygın kullanılan bir yaklaşımdır. Denklemler ayrı kontrol hacimleri üzerinden çözülür. Sonlu hacim yöntemleri, korunumlu formda, idare eden kısmi diferansiyel denklemlerde (genellikle Navier-Stokes denklemleri) değişiklik yapar ve sonra yeni denklemi kesikli hale getirir. Bu belirli bir kontrol hacmi boyunca akıların korunmasını garanti eder. Sonuç olarak sonlu hacim yöntemi idare eden denklemleri (4.17) şeklinde sunmaya olanak sağlar:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint Q dV + \iint F dA = 0 \quad (4.17)$$

Burada Q, korunumlu büyüklüklerin vektörü, F akıların vektörü, V kontrol hacmi elemanının hacmi, A ise kontrol hacmi elemanının alanıdır (Url-10).

4.3.3.2 Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar metodu, daha çok katıların yapısal analizinde kullanılmakla birlikte, aynı zamanda akışkanlar için de uygulanabilir. Ancak, sonlu elemanlar metodu formülasyonunda, korunumlu bir çözüm sağlamak için özel gayret gerektirir. Buna rağmen, sonlu hacimler yöntemine göre daha tutarlıdır. Ancak sonlu elemanlar yöntemi çözüm esnasında daha fazla bellek kapasitesine ihtiyaç duyar. Bu yöntemde ağırlıklı artan denklemi (4.18) :

$$R_i = \iiint w_i Q dV^e \quad (4.18)$$

Şeklinde olup burada; R_i elemanın i. köşesinde kalan eşitlik artanı, Q elemanı esas alan korunum denklemi, W_i , ağırlık faktörü ve V^e de kullanılan elemanın hacmidir (Url-10).

4.3.3.3 Sonlu farklar yöntemi

Sonlu farklar yöntemi programlama için oldukça basit bir yöntemdir. Şu an sadece gömülü sınırların ya da üztüste geçmiş gridlerin olduğu özel durumlarda kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan denklem

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad (4.19)$$

şeklinde olup burada Q korunumlu büyüklüklerin vektörü, F, G, H ise sırası ile x, y, ve z yönündeki akılardır (Url-10).

4.3.4 Türbülans modelleri

Türbülanslı akımlar incelenirken, hız ya da benzeri bir büyüklükte olacak değişimi ifade edecek bir teori elde etmek ya da model oluşturabilmektir. Türbülanslı akışta, uzunluk ölçülerinin aralığı ve olayların karmaşıklığı çoğu yaklaşımı kullanılamaz hale getirmektedir. Bu durumda öncelikli yaklaşım, ilgilenilen büyüklüğün özelliklerini hesaplamak için sayısal modeller oluşturmaktır.

Türbülanslı akış modellemelerinde başlıca zorluk, türbülanslı akışın geniş olan ilgili uzunluk ve zaman ölçeklerinden geliyor. Sonuç olarak, türbülans modelleri bu uzunluk ve zaman ölçeklerinin ne kadarının çözümlendiğine ve ne kadarının modellendiğine bağlı olarak sınıflandırılabilir. Çözümlemelerin bu zaman ve yersel ölçeğin çoğunluğunu kapsamaması durumunda simülasyonun çözünürlüğü artmakta, bu durum da maliyetleri çok artırmaktadır. daha çalkantılı ölçekler, ince simülasyon çözünürlüğü ve dolayısıyla daha yüksek hesaplama maliyeti. Çözümlemeler bu ölçeklerin daha az kısmını kapsar ise, hesaplama maliyeti oldukça düşüktür fakat bu bu sefer sonuçlardaki doğruluk azalmaktadır.

Uzunluk ve zaman ölçekleri ile ilgili hesaplama maliyetlerinin yanında, akışkanlar dinamiğinin korunum denklemleri, doğrusal olmayan bir konveksiyon terimi ve hem doğrusal hem de yerel olmayan basınç gradyan kuvveti terimi içerir. Bu denklemler uygun sınır ve başlangıç koşulları ile sayısal olarak çözülmelidir.

4.3.4.1 Reynolds-averaged navier–stokes

Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) denklemleri türbülans modelleme için uygulanan en eski yaklaşımdır. Navier-Stokes denklemlerinin, zamana bağlı ortalaması alınırsa denklemler zaman ortalaması alınmış, Navier-Stokes denklemlerine dönüştürebilir. Bu denklemlere RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemleri denir. Hareket denklemlerinin zaman ortalamasının alınması karşımıza ek terimler çıkarır. Bu ek terimler türbülanslı harekete ait gerilmelerdir. Bu terimlerin ana akış değişkenleri cinsinden ifade edilmeleri gerekmektedir.

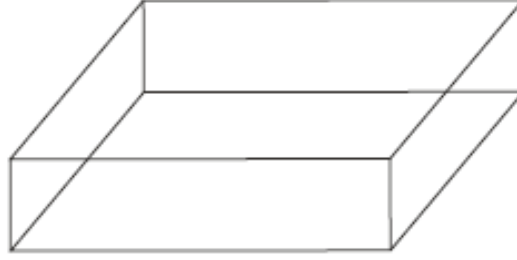
4.4 WindSim Modeli

WindSim bir HAD rüzgar simülasyonudur. Non-lineer (lineer olmayan) modelleme ile çalışır. Program 2000’li yılların başında Vector AS, Tonsberg, Norveç tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. 1988 yılında Vector AS engebeli Norveç kıyılarının rüzgar koşullarını araştırmak ile ilgili Norveç Meteoroloji Enstitüsü ile bir çalışmaya başlamıştır ve böylece WindSim’in ilk adımı atılmıştır. UNIX Beta sürümü 2003’te üretilmiş, ilk ticari Windows tabanlı üretim 2005’te gerçekleşmiştir ve böylelikle firma adını WindSim olarak değiştirmiştir. Bu gün WindSim’in 200’e yakın lisanslı kullanıcısı bulunmaktadır. Program rüzgar tarlası üretkenliği ve verimliliğinin tahmini ve optimizasyonunda ve rüzgar kaynaklarının haritalandırılmasında kullanılmaktadır. Program engebeli arazi veya karmaşık klimatolojilerde iyi performans ortaya koyması ile bilinir. Ancak dijital harita oluşturamadığından bu konuda diğer programlara bağlıdır (Nilsson, 2010).

WindSim’de kullanılan non-lineer model bir HAD modelidir ve RANS eşitliğini temel alır (Gravdahl, 1998). Eşitlikler lineer değildir, kısmi diferansiyel eşitliklerdir ve bu da modelin iteratif olarak çalıştığını yani nümerik olarak sonuçlar bulunduğunu göstermektedir. Navier-Stokes eşitliği sürekli cisimlerde kütlenin, momentumun ve belirli bir kontrol hacminde enerjinin korunumu esaslarına dayanır (Wallbank, 2008). RANS, Navier-Stokes eşitliklerinin basitleştirilmiş bir versiyonunu kullanır ve türbülans etkilerini de hesaplara katabilmek için bir türbülans modeli gerekmektedir. Aksi halde bilinmeyen değerler eşitlik sayısından fazla olacaktır (Nilsson, 2010).

İterasyonlar ile çözümlenen altı adet akışkan değişkeni bulunmaktadır. Bunlar basınç, üç hız bileşeni, türbülans kinetik enerjisi ve türbülansın dağılma etkisi

(dissipation)'dur. Sonuca yaklaşılmaması için her değişkenin çözülmesi gerekmektedir. Üç boyut modelinin önceden tanımlı eksenleri bulunur. Bunlar uzunluk, genişlik ve yüksekliktir. Model daha sonra önceden tanımlanmış sayıdaki üç boyutlu hücrelere bölünür. Yukarıda tanımlanan altı akışkan değişkeni her hücre için ayrı ayrı hesaplanır. Bu modelin kaba bir gösterimi Şekil 4.8'de görülmektedir (Nilsson, 2010).

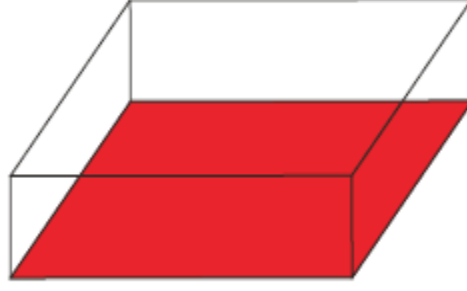


Şekil 4.8 : Üç boyutlu arazi modelinin kaba bir şekli (Nilsson, 2010).

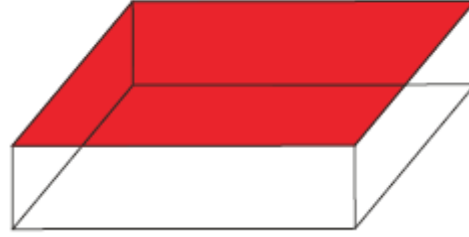
WindSim'de akışkan hesaplamaları sınır başlangıcı ile başlar ve istenen yakınlığa ulaşıncaya kadar iterasyon devam eder. Sınırı bağı olarak farklı sınır koşulları uygulanabilir. Şekil 4.9'da gösterilen düşey sınırlar görülmektedir. Türbülans modelinde de kullanılan k ve ε profilleri de yine bu düşey sınırlarda geçerlidir. Şekil 4.10'da verilen zemin için içinden hiçbir hava parselinin geçemeyeceği varsayılan duvar fonksiyonu kullanılır. Şekil 4.11'de gösterilen üst yüzeyde ise sınır koşullarını tanımlamak için iki yol vardır. Bu ya sürtünmenin sıfır olduğu ve içinden hiçbir hava parselinin geçmediği varsayılan bir yüzey olarak tanımlanır ya da bu yükseklikte sabit bir basınç yüzeyi olarak kabul edilir. Bu üst sınırın üzerinde jeostrofik denge koşulu geçerlidir ve sabit bir rüzgar şiddeti ile temsil edilir (Nilsson, 2010).



Şekil 4.9 : Üç boyutlu modelin sınırları (Nilsson, 2010).

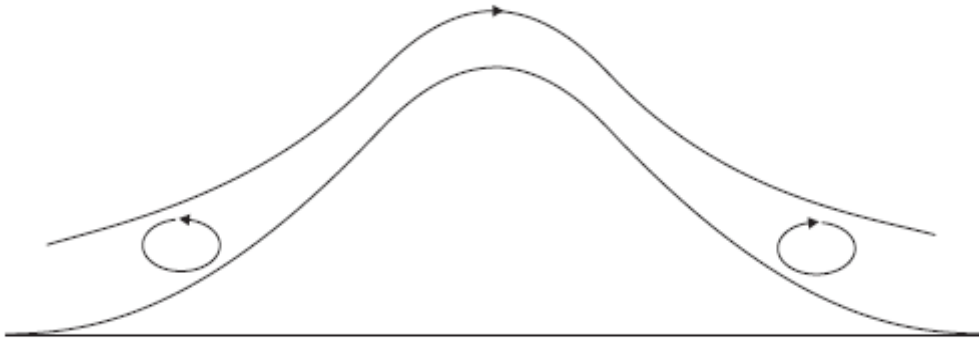


Şekil 4.10 : Üç boyutlu modelin zemini (Nilsson, 2010).



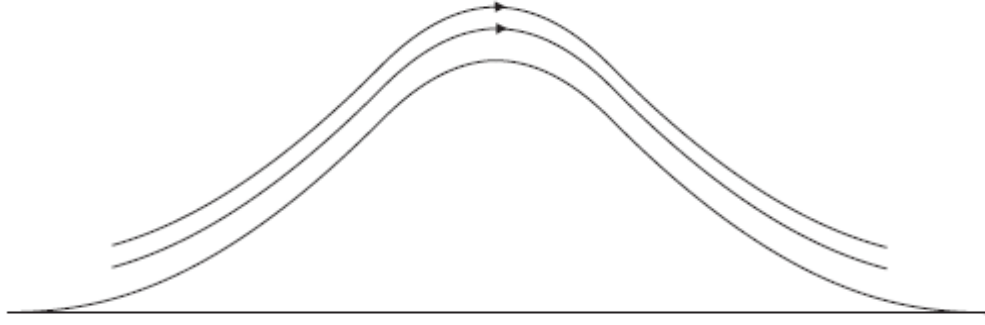
Şekil 4.11 : Üç boyutlu modelin tavanı (Nilsson, 2010).

Modellerin farklarını incelemek için bir tepenin en yüksek noktasına yerleştirilmiş bir rüzgar ölçüm aletini düşünelim. Eğer eğim 17° veya %30 ‘dan düşük ise, rüzgar tepenin zirvesine doğru hızlanır. Bu sayede ölçüm aleti yüksek bir rüzgar şiddeti ölçecektir. Eğer eğim 17° ’den büyük ise rüzgarın akım çizgisi şekil 4.12’deki gibi bölünecektir ve böylece aletin ölçtüğü şiddet düşecektir. İki program arasındaki ana fark bu akımın ana akımdan olan bu ayrılmasına nasıl yaklaştığı ile ilgilidir.



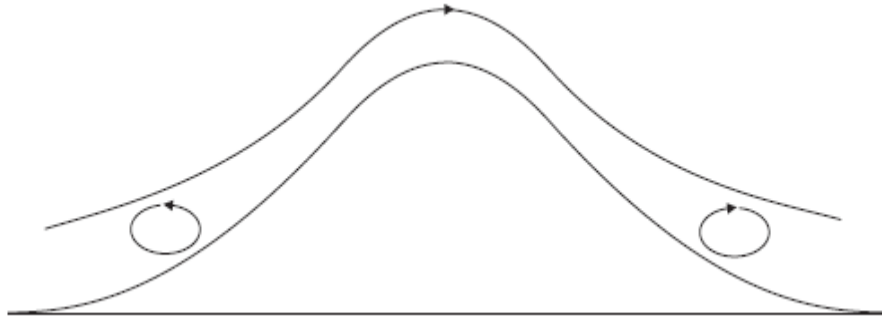
Şekil 4.12 : Yüksek eğim sebebiyle akım ayrışması (Wallbank, 2008)

Lineer yaklaşım bu ayrılmayı hesaba katmaz ve akışı şekil 4.13’de gösterildiği gibi tepeye paralel sürdürecektir. Bu da tepenin eğiminin 17° ‘den fazla olduğu durumlarda rüzgar hızının olandan fazla tahmin edilmesine sebep olacaktır.



Şekil 4.13 : Linear modelde görülen orografiye paralel akış (Wallbank, 2008)

Non-linear model ise türbülans modelinin kullanılması ile bu akım ayrışmasını hesaba katar (Şekil 4.14). Bu sayede eğimi 17° 'den fazla olan tepelerde de rüzgar tahmini gerçek değere daha yakındır (Wallbank, 2008).



Şekil 4.14 : Non-linear modelde görülen orografiye paralel akış(Wallbank, 2008)

Eşitlik (4.24)'den de görüldüğü üzere enerji rüzgar hızının küpü ile orantılıdır.

$$E_{kin} = ku^3 \quad (4.20)$$

Rüzgar hızının 10m/s olduğu bir durumda enerji, (4.25)'de olduğu gibi bulunur:

$$E_{kin}(u = 10) = k10^3 = k1000 \quad (4.21)$$

Rüzgar hızı gerçek değerinin %10'u daha fazla tahmin edilirse yeni enerji (4.22)'daki gibi olacaktır.

$$E_{kin}(u = 11) = k11^3 = k1331 \quad (4.22)$$

Enerjinin bu durumda yüzde olarak değişimi eşitlik (4.23)'de verilmiştir.

$$\frac{E_{kin}(u = 11) - E_{kin}(u = 10)}{E_{kin}(u = 10)} * 100 = 33,1\% \quad (4.23)$$

Rüzgar hızındaki ölçümün küçük bir değişiminin enerji hesabında ne denli farklılıklara yol açtığı görülmektedir. Bu sebepten rüzgar hızını azaltan etmenlerden biri olan türbülansın da hesaba katılması önemlidir. Bu hesaplar doğrultusunda rüzgarın daha verimli olduğu noktalar daha doğru bir biçimde görülebilmektedir. (Nillson 2010)

5. SOMA-RES ALAN BİLGİSİ VE TÜRBİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

5.1 Soma Hakkında Genel Bilgiler

Manisa İlinin en kuzeyindeki ilçesi olan Soma'nın doğusunda Kırkağaç, batısında Bergama, kuzeyinde Savaştepe (Balıkesir) ve İvrindi ilçeleri ile güneyinde Palamut Bucağı bulunmaktadır. 27.36 doğu boyları ve 39.11 kuzey enlemleri arasında bulunan ilçenin rakımı ortalama 175 m ve yüzölçümü ise yaklaşık 826 km²'dir (Url-15).

Soma'da bulunan arazinin yarısından fazlası dağlıktır. İlçe güneyi sık ve dik tepeler ve yüksek dağlarla kaplıdır. Doğusunda yüksek dağlar, birkaç yayla ve kimi dağ üstlerinde zamanla oluşan yerleşim alanı olmaya uygun sırtlar vardır. Batıda ise Bakırçay bulunmaktadır. Bakırçay'ın beslediği akarsular ve bu akarsuların kollarının etkisi ile araziler bölünmüş, vadiler oluşmuş birkaç noktada düzlükler meydana gelmiştir (Url-15).

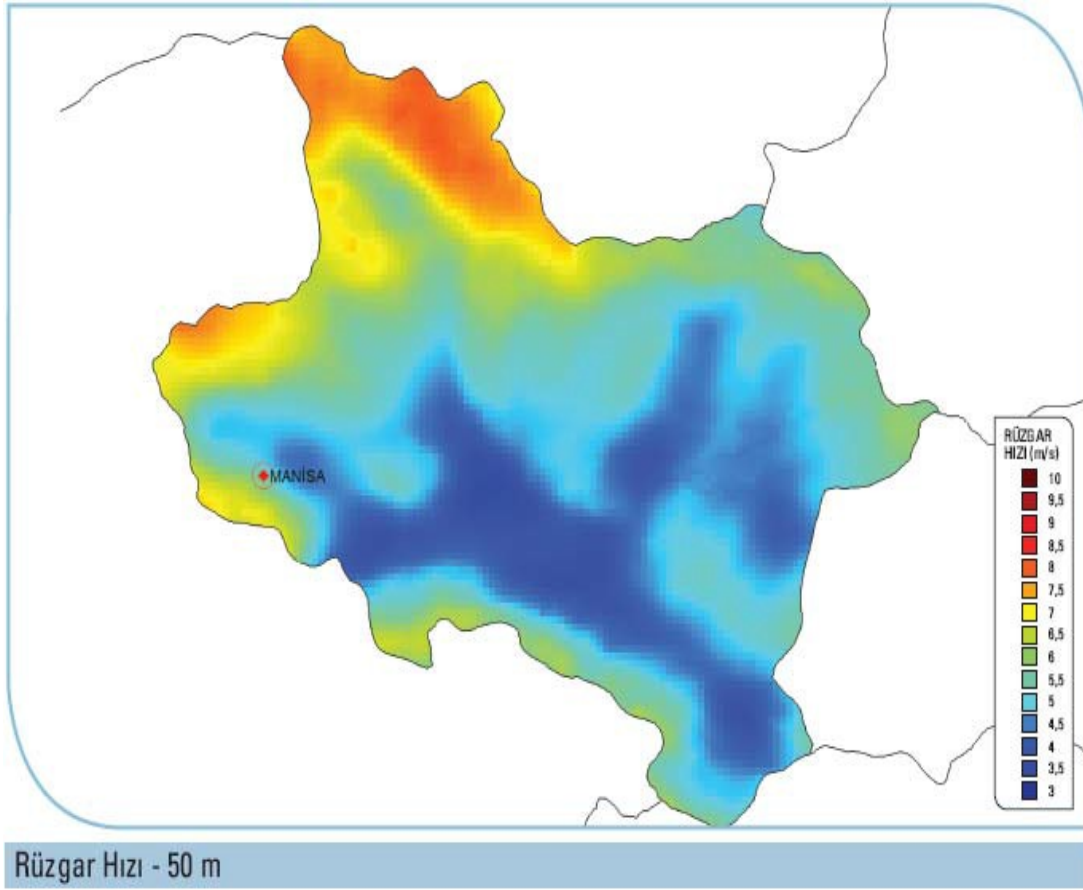
5.2 Manisa İli Meteorolojik Bilgiler

Manisa'da Akdeniz iklimi ile beraber İç Anadolunun karasal iklim özellikleri hakimdir. Manisa'da Yaz ayları oldukça sıcak geçer. Yıllık ortalama sıcaklık 17.5 °C dir. Yaz aylarında sıcaklık yükselirken yağışlar kış aylarında yoğunlaşır (Url-16).

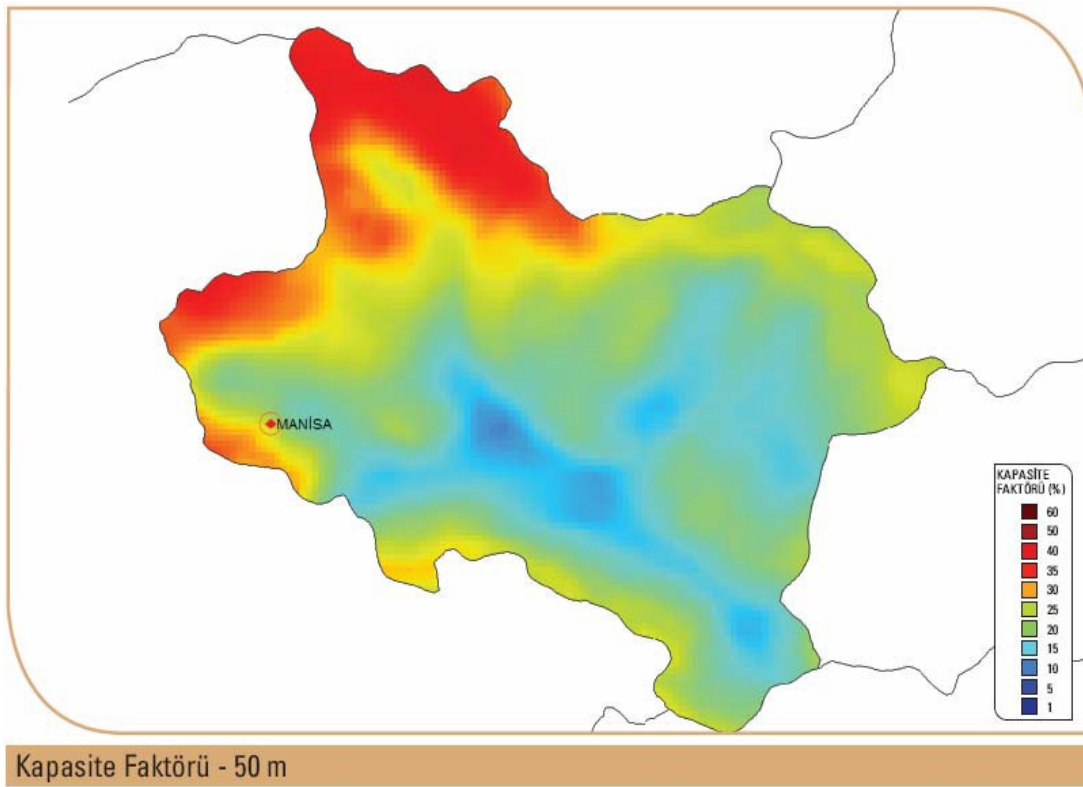
Ekonomik RES yatırımı için 7 m/s veya üzerinde rüzgar hızı gerekmektedir. Soma-RES'in bulunduğu bölge ise Şekil 5.1'de görüldüğü gibi bu değerin üzerindedir (Url-6).

Ekonomik RES yatırımı için %35 veya üzerinde kapasite faktörü gerekmektedir. Soma-RES'in bulunduğu bölgede ise Şekil 5.2 'de görüldüğü gibi kapasite faktörü bu değerin üzerindedir (Url-6).

Çizelge 5.1' de Manisa İline kurulabilecek RES güç kapasitesinin değerlerini göstermektedir (Url-11).



Şekil 5.1 : Manisa’da 50 m’deki rüzgar hız dağılımı (Url-11).



Şekil 5.2 : Manisa’da 50 m’deki kapasite faktörü dağılımı (Url-6).

Çizelge 5.1 : Manisa İline kurulabilecek RES güç kapasitesi (Url-6).

50 m'de Rüzgar Gücü (W/m ²)	50 m'de Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Alan (km ²)	Toplam Kurulu Güç (MW)
300 – 400	6.8 – 7.5	474,35	2.371,76
400 – 500	7.5 – 8.1	301,57	1.507,84
500 – 600	8.1 – 8.6	193,86	969,28
600 – 800	8.6 - 9.5	90,69	453,44
> 800	> 9.5	0,00	0,00
		1.060,46	5.302,32

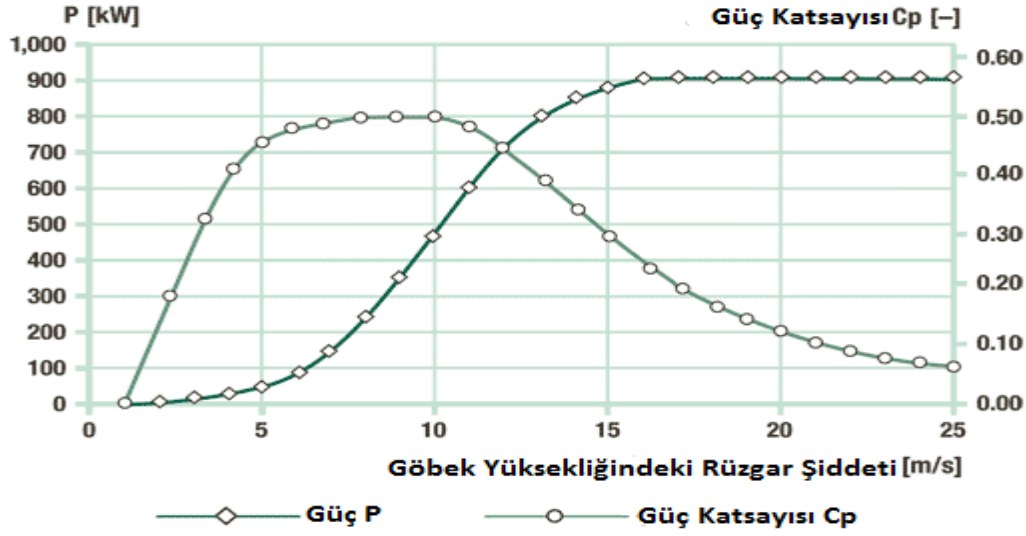
5.3 Soma Rüzgar Enerji Santrali

Tamamı Polat Enerji'ye ait olan Soma Enerji Elektrik Üretim A.Ş. tarafından Manisa'da kurulan Soma-RES (Şekil 5.3), 2012 yılı Ocak ayında tamamen devreye alınmıştır. 140,1 MW güce ulaşarak ve 119 adet rüzgar türbini ile Türkiye'nin ve Avrupa'nın karada inşa edilmiş en büyük RESlerden birisidir. Yıllık üretim miktarı 405 milyon kWh olup, 297.000 ton CO₂ azaltımı gerçekleştirilecektir. Soma-1 ve Soma-2 olmak üzere iki kısımda inşa edilen santral, 200 bin kişinin yıllık elektrik ihtiyacını karşılayacaktır (Url-12).



Şekil 5.3 : Soma-RES fotoğrafları(Url-12).

Soma-RES ‘te kullanılan türbin Enercon Firmasına ait E44 tipi rüzgar türbini olup bu türbine ait güç eğrisi Şekil 5.4’te gösterilmektedir.



Şekil 5.4 : Enercon E 44 ‘in güç eğrisi (Url-13).

Güç eğrisi hazırlanırken kullanılan Güç ve Güç Katsayısı değerleri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : Enercon E-44’ün Güç Çıktısı(P) ve Güç Katsayısı(C_p) değerleri (Url-13).

Rüzgar Şiddeti (m/s)	Güç Çıktısı P (kW)	Güç Katsayısı Cp [-]
3	4	0.16
4	20	0.34
5	50	0.43
6	96	0.48
7	156	0.49
8	238	0.50
9	340	0.50
10	466	0.50
11	600	0.48
12	710	0.44
13	790	0.39
14	850	0.33
15	880	0.28
16	905	0.24
17	910	0.20
18	910	0.17
19	910	0.14
20	910	0.12
21	910	0.11
22	910	0.09
23	910	0.08
24	910	0.07
25	910	0.06

6. VERİ ANALİZİ VE KISA SÜRELİ RÜZGAR TAHMİNİ

6.1 Verilerin Değerlendirilmesi

Manisa iline ait MGM'den temin edilerek gerekli analizleri yapılmıştır. Temin edilen verilerden aylık ortalama sıcaklık, maksimum sıcaklık, ortalama bağıl nem ve toplam yağış değerleri hesaplanmıştır.

Ayrıca tez kapsamında değerlendirilmek üzere Soma-RES alanındaki kısa vadeli rüzgar enerjisi tahmini çalışması yapabilmek için; bu bölgeye ait ölçüm direği ve türbin verilerinin bu santrali işleten Enerji Şirketinden (Polat Holding) temini sağlanmıştır.

Tez kapsamında kullanılmış olan WRF ile WindSim modellerinin kurulumu ve çalıştırılması için gerekli bilgisayar hesaplamaları proje kapsamında kurulan iş istasyonu ile İTÜ UYBHM'deki sistemden yararlanılarak yapılmıştır. Ayrıca İTÜ BAP kapsamında 4 çekirdekli iş makinası alınarak çalışmadaki hesaplamaların bir bölümü bu bilgisayarda gerçekleştirilmiş ve modellerin çalıştırılması için gerekli donanım sağlanmıştır. WRF modelinin çalışması için gerekli derleyici bilgisayar sistemine yüklenmiştir. Açık bir kod olan WRF modeli (Url-14) internet adresinden temin edilerek, bilgisayara kurulmuş ve model alanları, sınır koşulları ve fizik ile dinamik opsiyonlar belirlenerek WRF model simülasyonları yapılmıştır. Ayrıca Soma-RES alanı için sayısal topografik haritaların (eş yükselti ve pürüzlülük) temini, ilgili şirketten ve Harita Genel Komutanlığı'ndan temin edilmiştir.

6.2 Wrf Model Versiyonunun Seçimi

WRF modelinin ARW ve NMM olmak üzere iki farklı dinamik çekirdeğe sahiptir. NMM çekirdeği genellikle operasyonel amaçlar için kullanılır. Fakat , NMM ARW' ye nazaran bazı kısıtlamalar içerir. Tez çalışmasında atmosferik araştırmalarda yaygın olarak kullanılan ARW tercih edilmiştir. Modelin 6 Nisan 2011 'de yayınlanan 3.3 versiyonu kullanılmıştır.

6.3 Wrf Model Konfigürasyonu

Tez çalışmasında kullanılan bölgesel modelin başlangıç ve sınır koşullarını oluşturmak üzere 0.25 derece çözünürlüklü ECMWF-IFS tahmin verileri kullanılmıştır. Modelin zaman adımı ise 54 saniye olarak belirlenmiştir.

WRF modeli grid noktaları arasında kalan olayların modele entegrasyonu için hazırlanmış birçok parametrizasyona sahiptir. Bunların başlıcaları, mikrofizik, kümülüs, atmosferik sınır tabaka, radyasyon ve yeryüzeyi parametrizasyonlarıdır. Bu alt modeller birbirleri ile etkileşim halindedirler.

Model parametrizasyon konfigürasyonunun belirlenmesi için çeşitli duyarlılık testleri yapılmıştır. Modelin rüzgar çıktısının hesaplanmasında önemli katkısı olan sınır tabaka(Planetary Boundary Layer (PBL)) şemalarından, YSU (Yonsei University), Mellor-Yamada-Janjic TKE (Turbulence Kinetic Energy), Quasi-Normal Scale Elimination PBL, MYNN 2.5 level TKE, ACM2 (Asymmetric Convective Model version 2) Pleim PBL ve MRF şemaları kullanılmıştır.

Bütün model alanları için bulut mikrofiziğinin hesaplanmasında “WSM 3-class simple ice” (Hong ve Lim, 2006), yeryüzeyi fiziği için termal difüzyon şeması, uzun dalga boylu radyasyon için “rapid radiative transfer modeli” (Mlawer ve diğ., 1997), kısa dalga boylu radyasyon için Dudhia (1989), yeryüzü tabakası parametrizasyonu için Monin-Obukhov (Janjic, 1996, 2002) şemaları tercih edilmiştir. 9 km çözünürlüklü model alanı için kümülüs parametrizasyonu olarak Kain-Fritsch (Kain, 2004) şeması kullanılmıştır. Ancak yuvalanmış 3 km çözünürlüklü model alanı için çalışmaması nedeniyle hiçbir kümülüs parametrizasyon kullanılmamıştır.

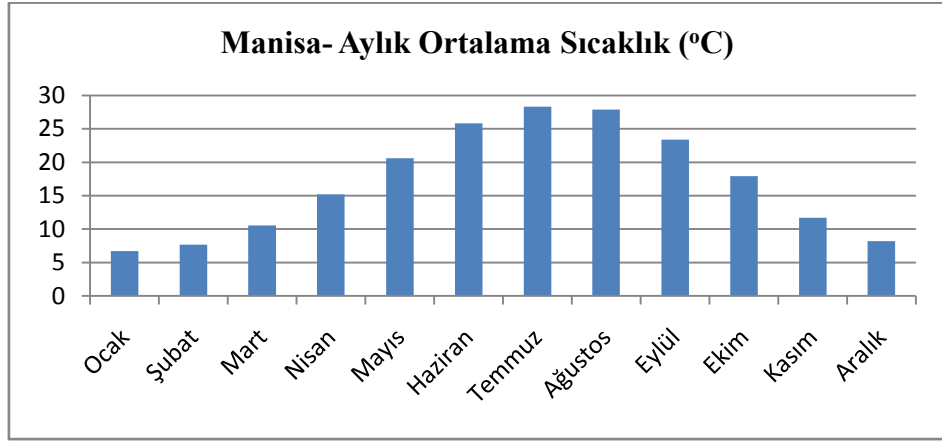
6.4 Klimatolojik Verilerin Değerlendirilmesi

MGM’den temin edilen Manisa Meteoroloji İstasyonu’na ait meteorolojik parametrelerin ölçüm periyodu 1977 – 2006 arası olup toplam ölçüm süresi 30 yıldır.

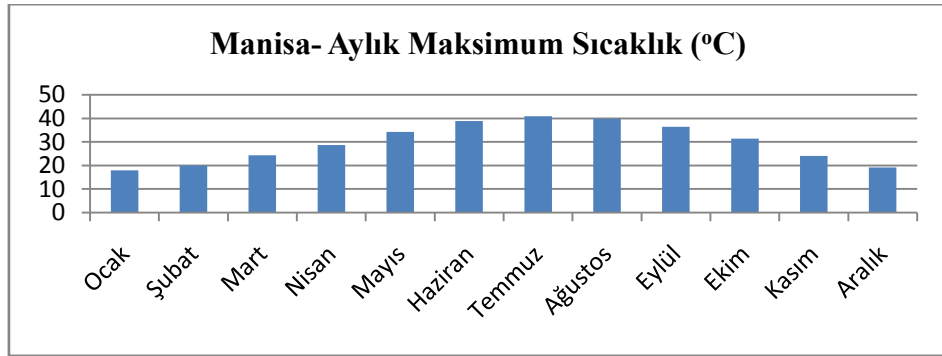
Manisa Meteoroloji İstasyonuna ait aylık ortalama sıcaklık dağılımı Şekil 6.1’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek değer 28 °C ile temmuz ayında gözlemlenirken, en düşük değer ise 7 °C ile Ocak ayında gözlemlenmektedir.

Şekil 6.2’de Manisa Meteoroloji İstasyonuna ait maksimum sıcaklıkların aylık ortalama dağılımı verilmektedir. Maksimum sıcaklık değerlerinin aylık

ortalamalarının dağılımı incelendiğinde, en yüksek değer 41 °C ile Temmuz ayında, en düşük değer ise 18 °C ile Ocak ayında görülmektedir.

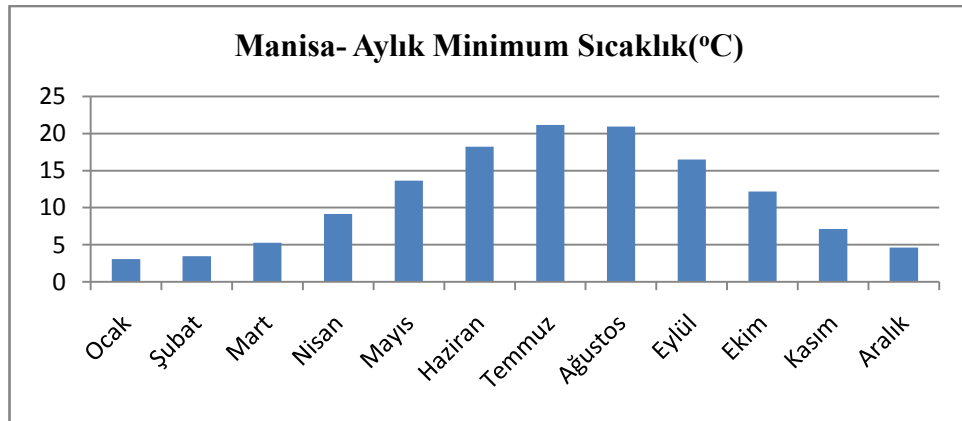


Şekil 6.1 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık ortalama sıcaklık dağılımı.



Şekil 6.2 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık maksimum sıcaklık dağılımı.

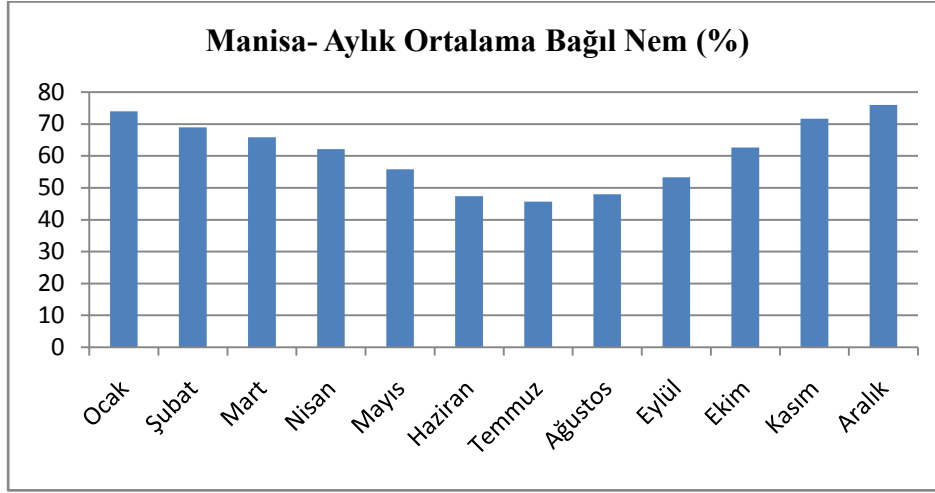
Şekil 6.3’de Manisa Meteoroloji İstasyonuna ait minimum sıcaklıkların aylık ortalama dağılımı verilmektedir



Şekil 6.3 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık minimum sıcaklık dağılımı

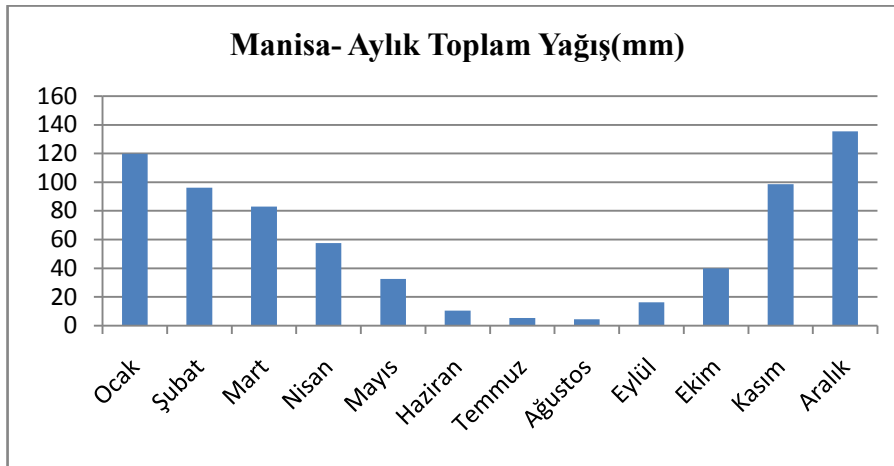
Minimum sıcaklıkların aylık ortalamalarının dağılımı incelendiğinde, Ocak ayının ortalama minimum sıcaklık değerinin 3 °C ile en düşük değer olduğu; Temmuz ayının ortalama minimum sıcaklık değerinin ise 21 °C ile en yüksek değer olduğu sonucuna varılmaktadır.

Manisa meteoroloji gözlem istasyonunun aylık ortalama nem değerleri kış aylarında %75 değerlerine ulaşırken, yazın % 45 değerlerine düşmektedir (Şekil 6.4).



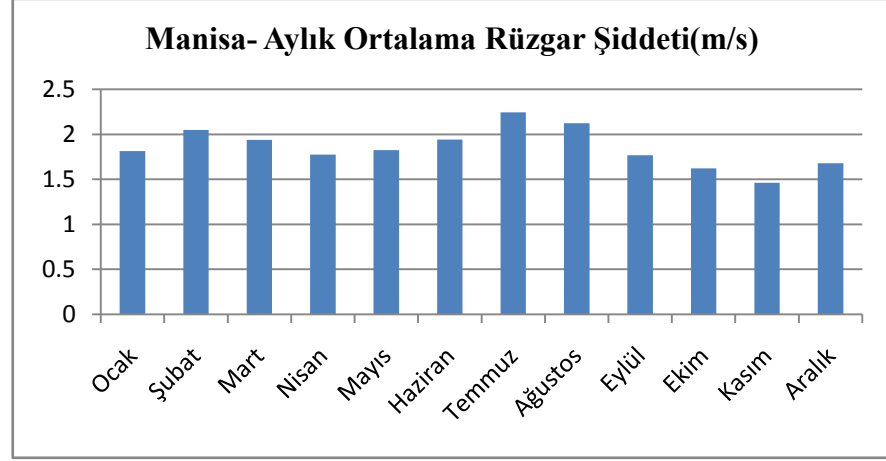
Şekil 6.4 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık ortalama bağlı nem dağılımı.

Yüksek yağış değerleri özellikle Aralık ayı olmak üzere kış aylarında gözlemlenirken (135 mm), yaz aylarında 5 mm'ye kadar düşmektedir. Bölge kış mevsiminde Akdeniz cephesel zonunun etkisi altında bulunmaktadır. Bu nedenle kış döneminde cephesel yağışlar etkili olmaktadır. Yazın ise Akdeniz cephesel zonu etkisini kaybederek yerini kurak bir periyoda bırakmaktadır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık toplam yağış dağılımı.

Uzun dönem aylık rüzgar şiddeti dağılımı 1.4 m/sn ile 2.3 m/sn arasında görülmektedir (Şekil 6.6). Şehirleşme etkisi nedeniyle bu istasyonda rüzgar şiddetinde düşük değerler gözlenmektedir.



Şekil 6.6 : 1977-2006 yılları arasında Manisa iline ait aylık ortalama rüzgar şiddeti dağılımı.

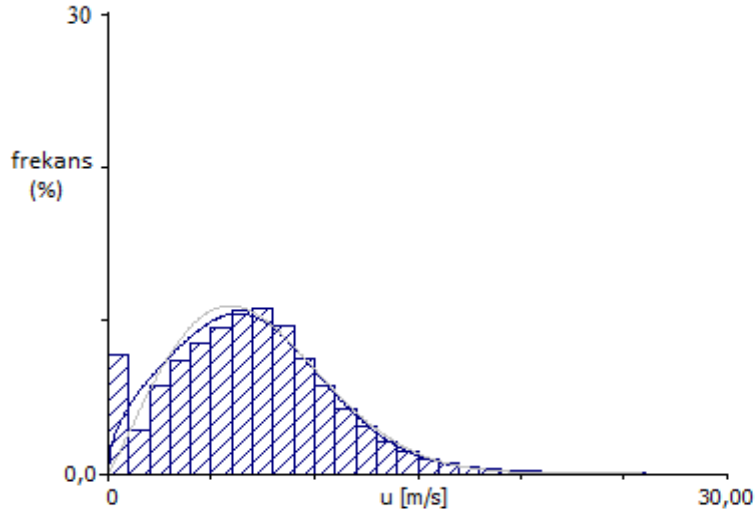
6.5 Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi

Bilgileri Çizelge 6.1’de verilen Ardıçlı ölçüm istasyonunda 52 m yükseklikte kurulu anemometre ve 45 m yükseklikteki yön sensörüne ait 2010 periyodunu kapsayan rüzgar hız ölçüm verisi kullanılarak rüzgar karakteristikleri belirlenmiştir.

Çizelge 6.1 : Ardıçlı Ölçüm Direği Bilgileri (Enlem boylam bilgileri European Datum 1950 (ED-50) formatındadır.)

Ölçüm Direği İsmi	Ardıçlı
Enlem	4.354.971 m
Boylam	565.219 m
Yükseklik	772 m
Kule tipi	Lateks
Kule yüksekliği	54 m

Ölçüm periyodu boyunca 52m yükseklikteki kurulu anemometreden ölçülen rüzgar şiddetine ait histogram incelendiğinde 6 m/sn ile 10 m/sn aralığında rüzgar en yüksek esme frekansına sahiptir. Bu aralıktaki verilerin toplan frekansı %40 civarında olup, en yüksek frekansa sahip aralık 7 m/sn ile 8 m/sn aralığıdır (Şekil 6.7). Ardıçlı ölçüm istasyonundan elde edilen verilerle oluşturulmuş rüzgar gülü Şekil 6.8’de görülmektedir.



Şekil 6.7 : Ardıçlı istasyonu 52m. yükseklikte ölçülen rüzgar şiddeti frekans histogramı

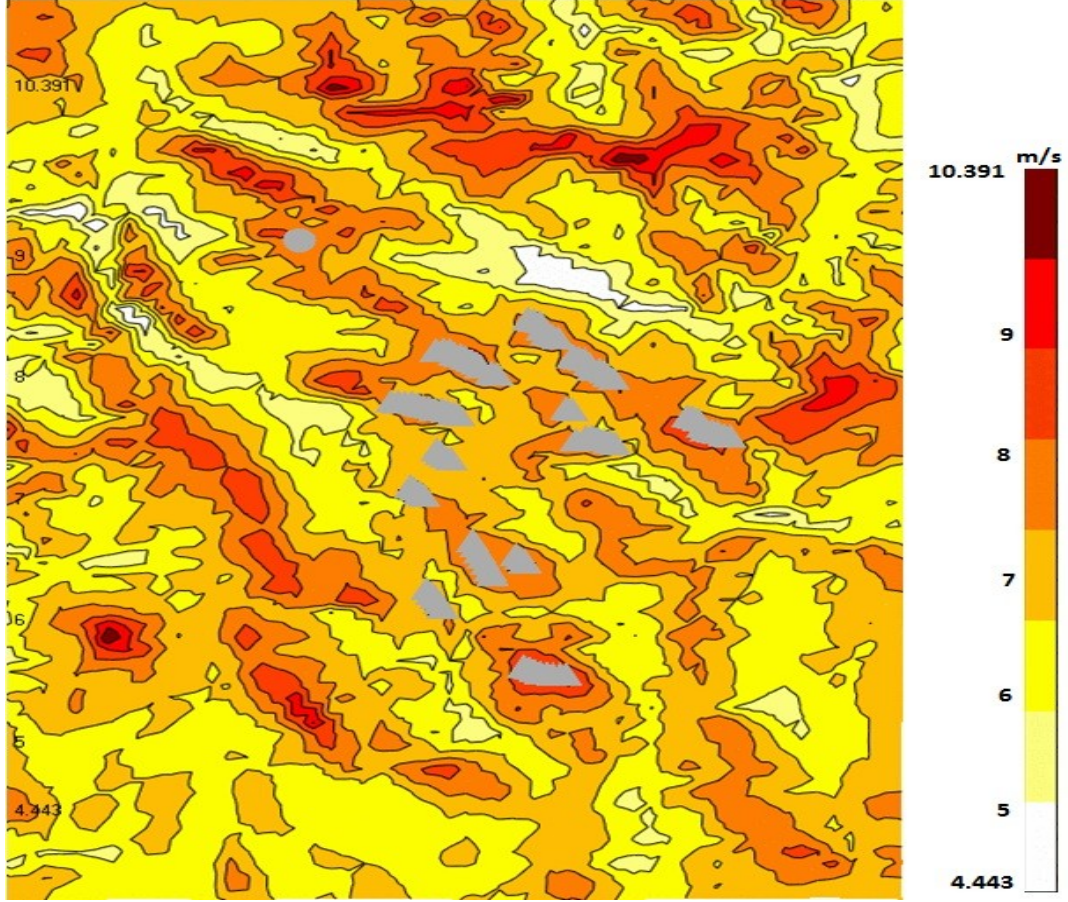
Rüzgar gülü incelendiğinde Soma bölgesindeki hakim rüzgar yönünün kuzeydoğu ile kuzey kuzeydoğu arası olduğu görülmektedir. Buradaki rüzgar esme sayısı toplam rüzgarın %35'ine karşılık gelmektedir. Şekilden görüldüğü üzere İkinci hakim yön ise güneylidir.

Yönlere göre rüzgarın esme frekansı, ortalama rüzgar ile Weibull şekil ve ölçek parametreleri Çizelge 6.2' de verilmektedir.

Çizelge 6.2 : Soma-RES Ardıçlı rüzgar verisi için yönlere göre şekil ve ölçek parametreleri ile ortalama rüzgar şiddeti ve esme frekansı.

Sektör Merkez Açısı	k parametresi	A parametresi	frekans	Ortalama Rüzgar Şiddeti
0	2,28	8,99	6,8	7,77
30	4,18	10,09	37,5	9,04
60	3,48	6,79	7,5	5,95
90	2,32	4,03	2,7	3,58
120	1,93	3,05	3,1	2,81
150	0,94	3,97	2,4	4,58
180	2,61	12,78	13,7	11,22
210	1,98	9,81	12,8	8,81
240	2,4	7,87	8,3	7
270	1,71	4,86	2,3	4,4
300	1,84	3,32	1,4	2,98
330	1,52	4,2	1,5	3,97
Hepsi	2,16	9,19	100	8,04

Görüldüğü 30° sektörünün esme frekansı en fazla olup onu sırası ile 180° ve 210° sektörleri izlemektedir. Rüzgar şiddeti ile ölçek parametrelerinin en yüksek olduğu yönler de sırası ile 180° ile 30° sektörleridir. Şekil 6.8’de Soma-RES bölgesindeki rüzgarın alansal dağılımı görülmektedir.



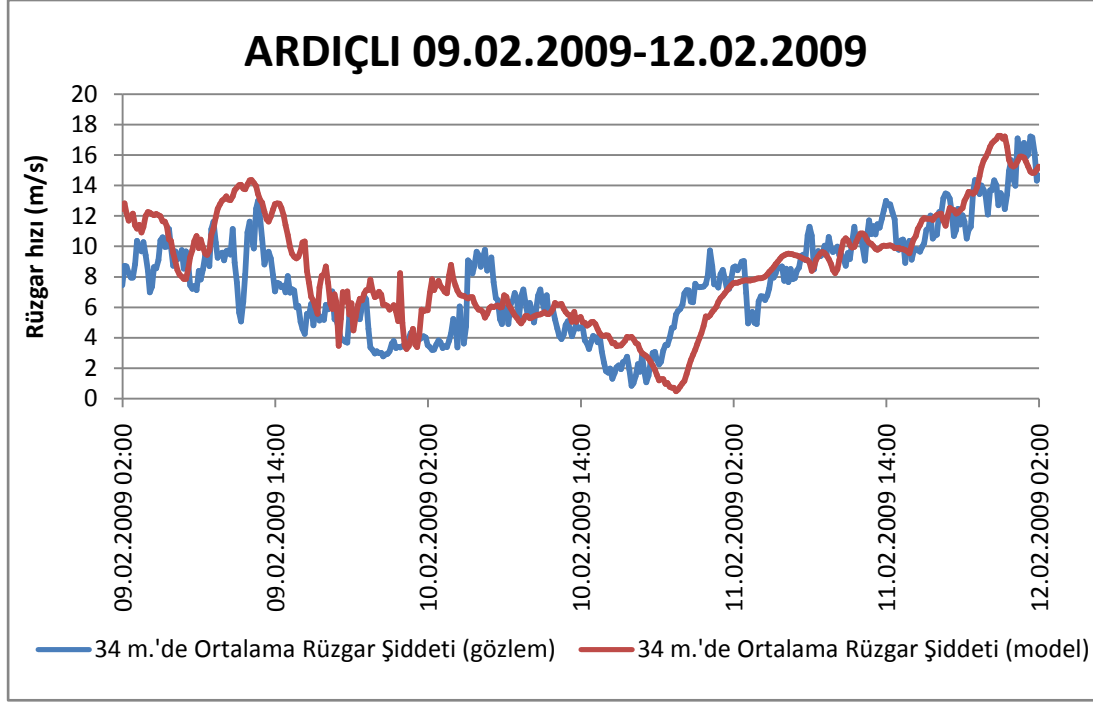
Şekil 6.8 : Soma-RES bölgesindeki 34m yüksekliğinde rüzgarın alansal dağılımı.

Şekilden görüldüğü gibi 6m/sn’den şiddetli rüzgarlar bölgenin geniş bir alanında etkili olurken nerede ise bölgenin tamamında ortalama rüzgar şiddeti değerleri 5 m/sn değerinin üstündedir..

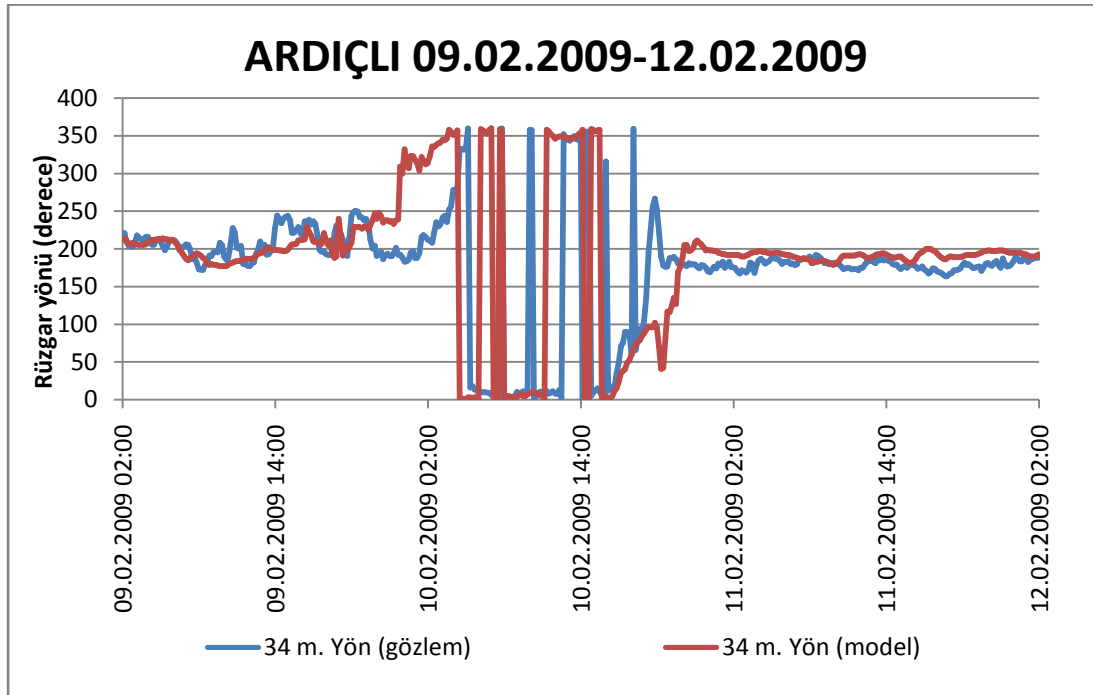
6.6 Soma-RES İçin Ekstrem Rüzgar Hızları İçin Yapılan WRF Simülasyonları İle Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

2009-2011 dönemi içinde yaz ve kış aylarında seçilen ve zayıf ve kuvvetli rüzgarları temsil eden üçer günlük 8 ayrı örneklem için model ve gözlem karşılaştırmaları santral sahasında bulunan Ardıçlı ölçüm direğindeki 34m yükseklikteki rüzgar şiddet ve yönleri için yapılmıştır. Soma-RES sahasında bulunan Ardıçlı ölçüm direği için kış dönemine ait 34m için karşılaştırmalar Şekil 6.19 ile Şekil 6.16 arasındaki

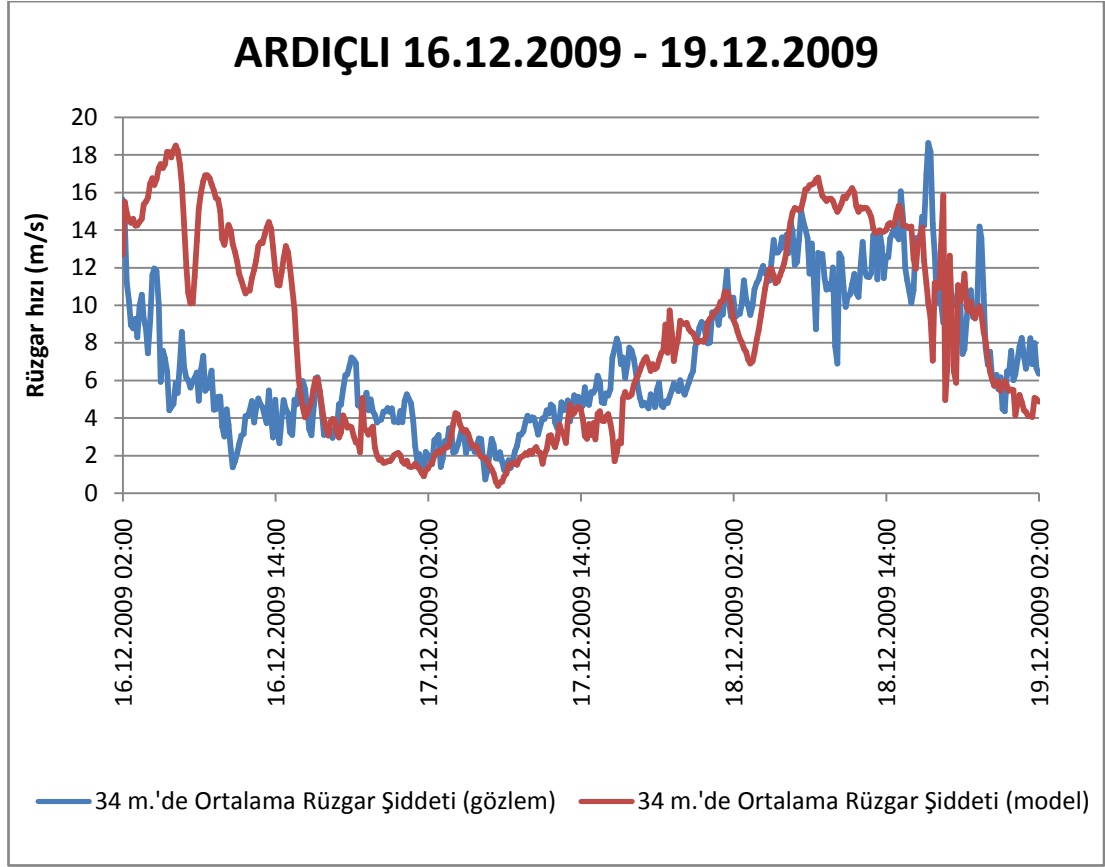
şekillerde verilmektedir. Burada 1. periyot, 09.02.2009 ile 12.02.2009 tarihleri arasını, 2. periyot, 16.12.2009 ile 19.12.2009 tarihleri arasını, 3. periyot 19.12.2009 ile 22.12.2009 tarihleri arasını, 4. periyot ise 22.11.2010 ile 25.11.2010 tarihleri arasını kapsamaktadır.



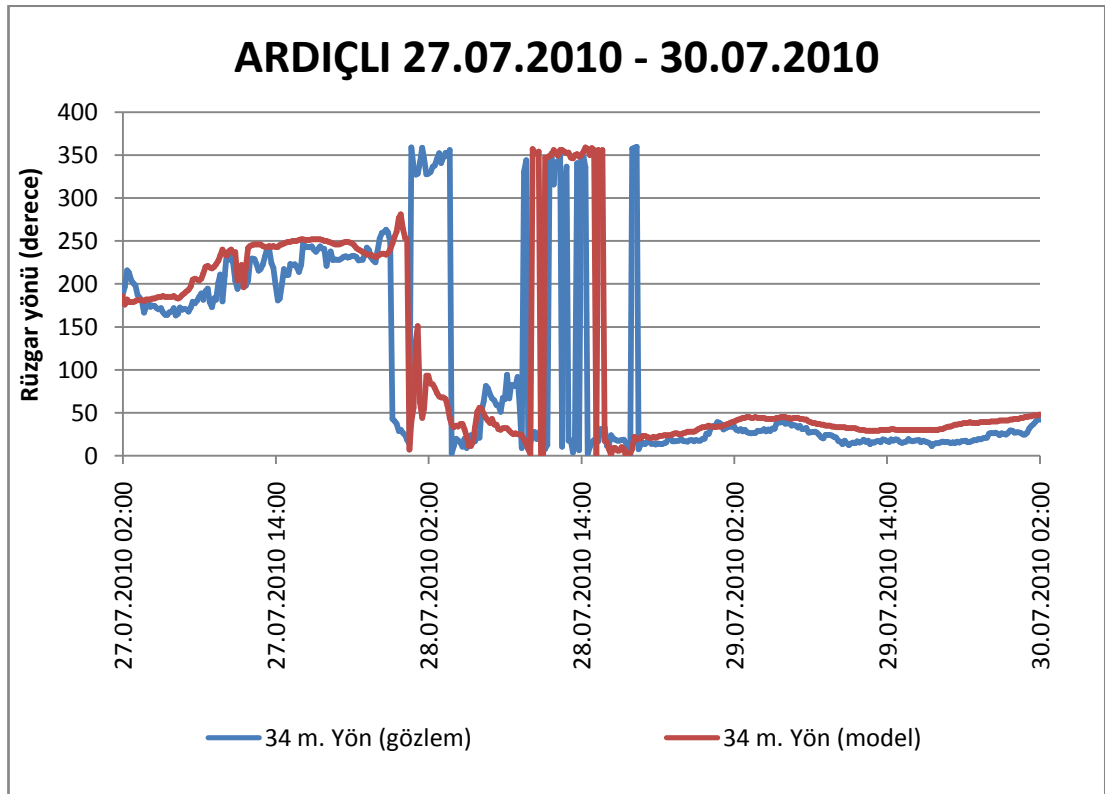
Şekil 6.9 : 1.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.



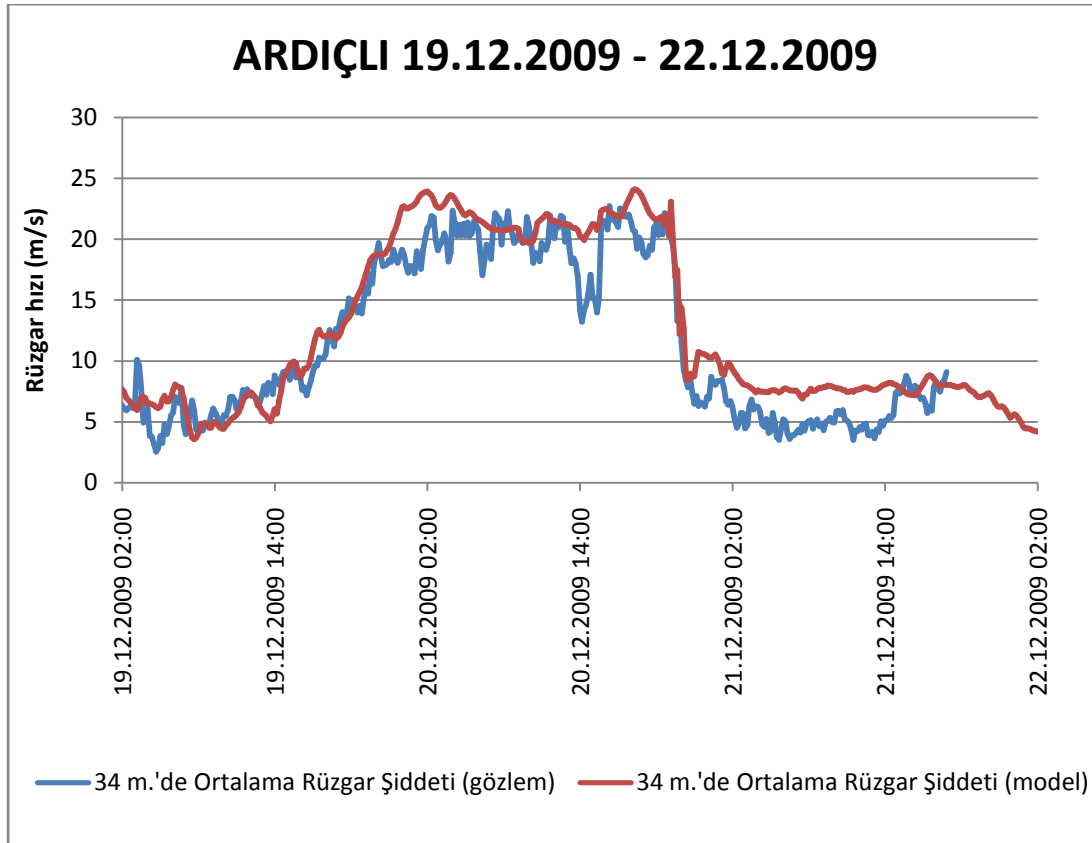
Şekil 6.10 : 1.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.



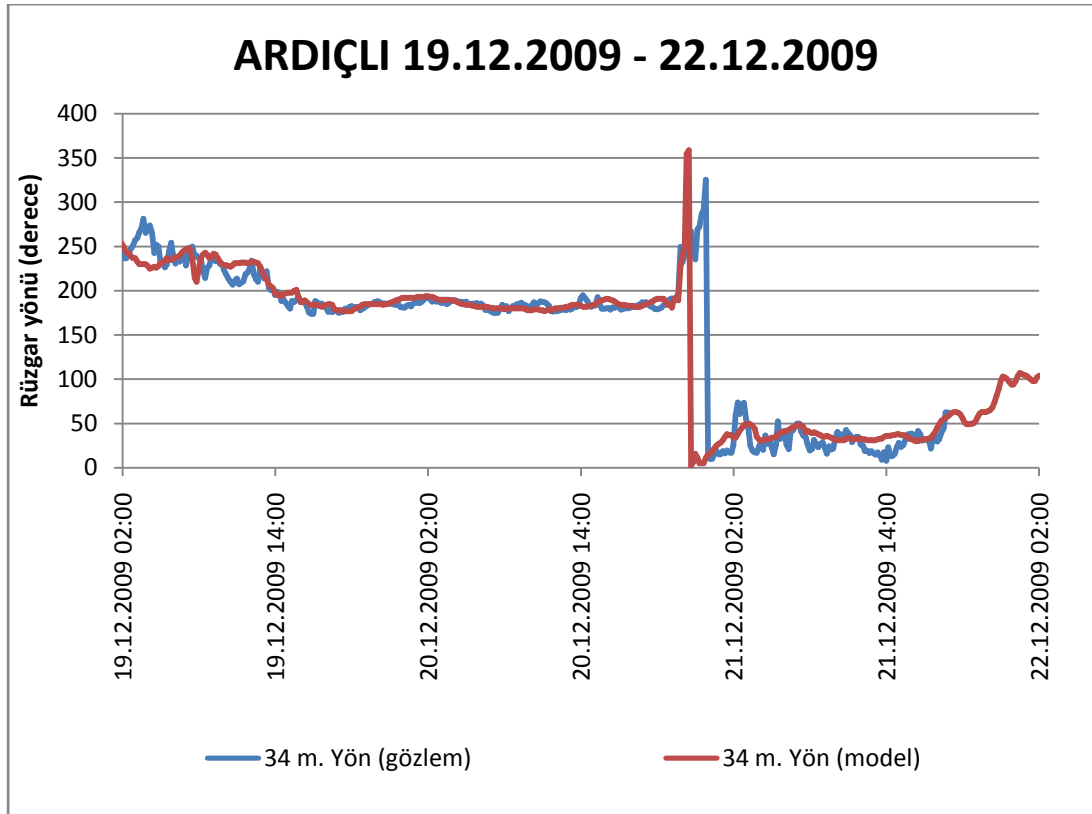
Şekil 6.11 : 2.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.



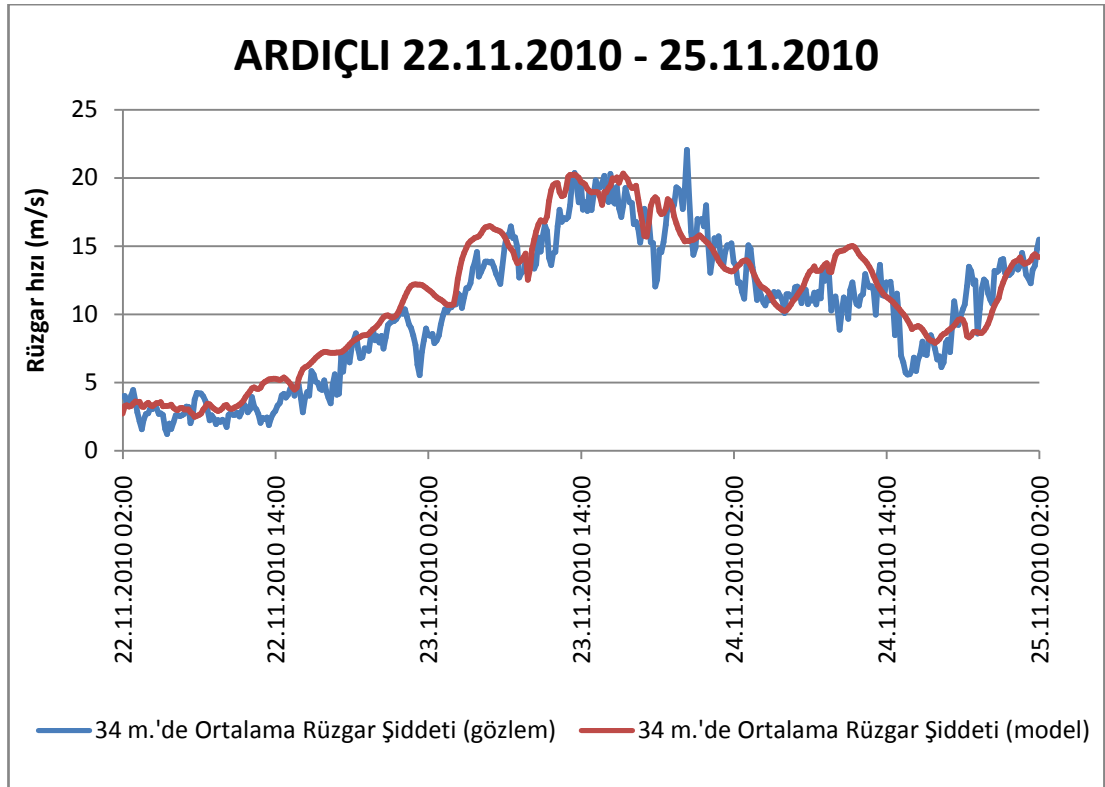
Şekil 6.12 : 2.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.



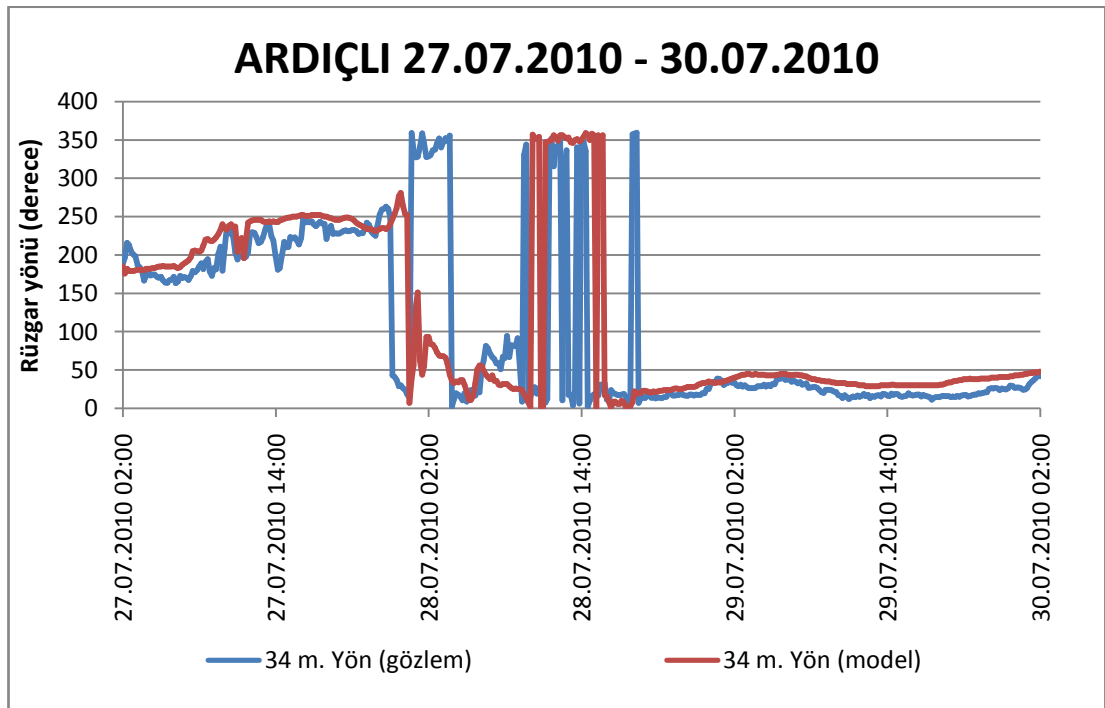
Şekil 6.13 : 3.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.



Şekil 6.14 : 3.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.



Şekil 6.15 : 4.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.



Şekil 6.16 : 4.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.

Şekil (6.10 - 6.17) Soma-RES sahası için kış mevsim şartlarını temsil eden 72 saatlik dört ayrı örnekleme göstermektedir. Her bir durum için rüzgar şiddeti ve rüzgar yönünün WRF ve gözlem karşılaştırmaları incelendiğinde;

*Genelde modelle gözlemlerin aynı salınım gösterdiği,

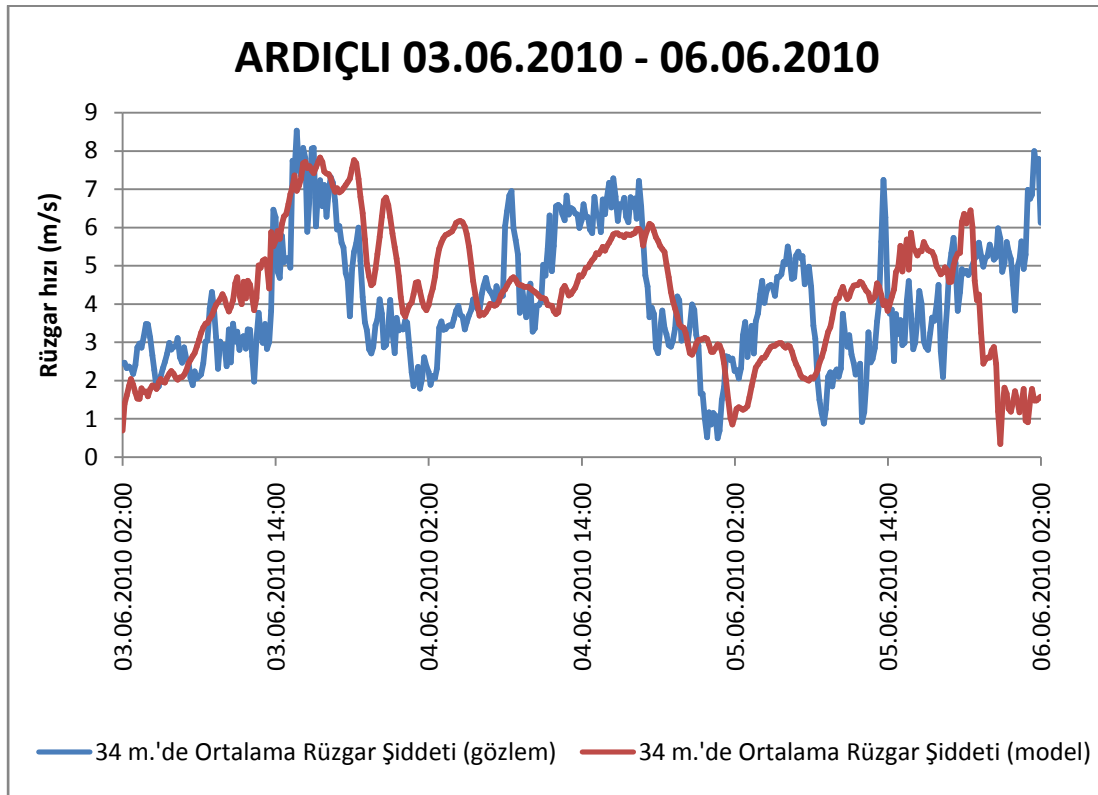
*İlk 48 saat model performansı daha iyi iken son 24 saatlik periyotta model ile gözlem arasındaki farkın arttığı,

*Model çıktılarının genelde gözlem değerlerinden daha yüksek olduğu (over estimate),

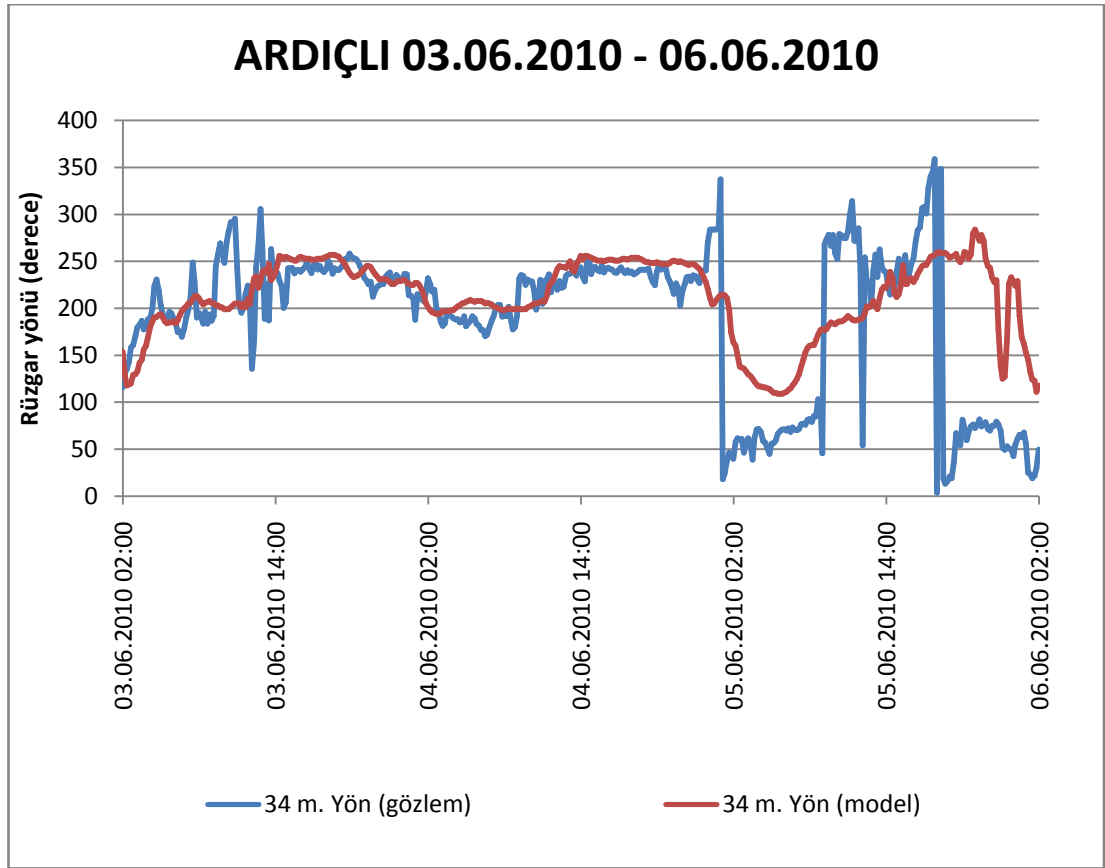
*Özellikle gözlem değerlerinin yüksek rüzgar şiddeti değerlerinden düşük değerlere doğru değişim gösterdiği saatlerde modelin aynı performansı göstermediği,

*Rüzgar yönünde gözlem değerlerindeki ani yön değişiminde, modelin bu değişimi yakalama süresinde bir gecikme olduğu, ancak genel olarak rüzgar yönü için model ve gözlem değerleri arasında uyumlu bir gidiş olduğu görülmektedir.

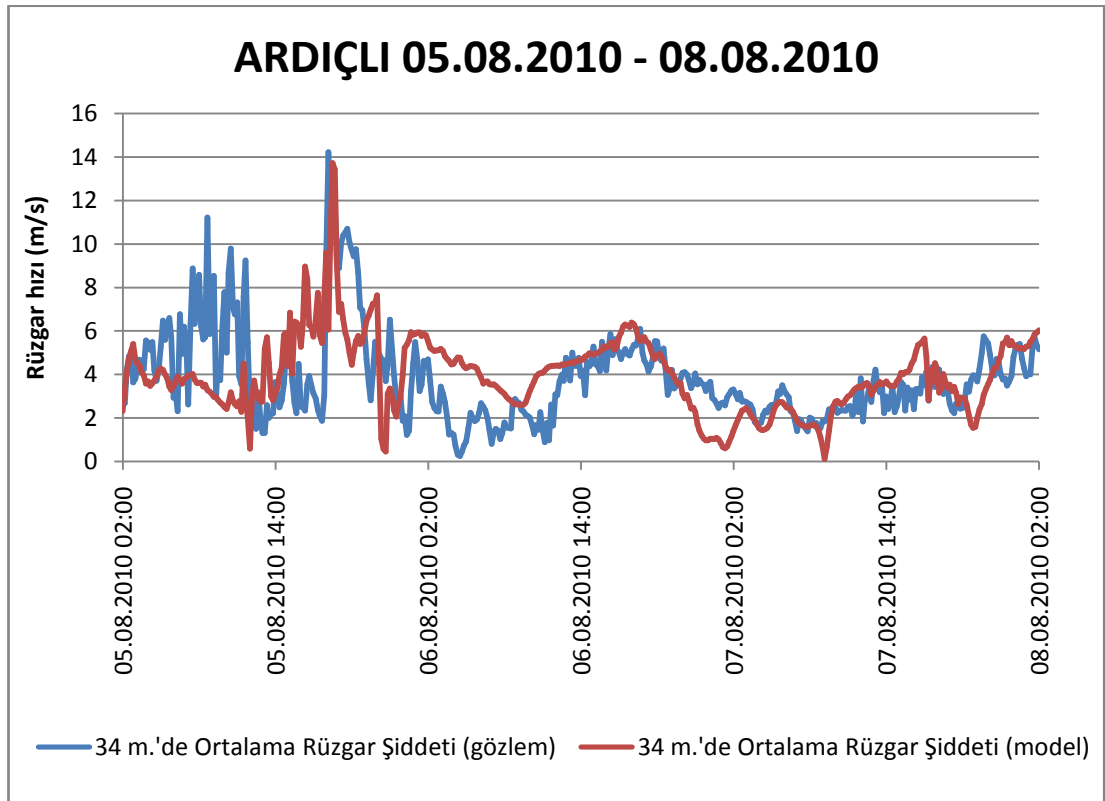
Soma-RES sahasında bulunan Ardıçlı ölçüm direği için yaz dönemine ait 34m yüksekliğinde yapılan gözlemler için karşılaştırmalar Şekil 6.17 ile Şekil 6.24 arasındaki şekillerde verilmektedir. Burada 5. periyot, 03.06.2010 ile 06.06.2010 tarihleri arasını, 6. periyot, 05.08.2010 ile 08.08.2010 tarihleri arasını, 7. periyot 22.07.2010 ile 25.07.2010 tarihleri arasını, 8. periyot ise 27.07.2010 ile 30.07.2010 tarihleri arasını kapsamaktadır.



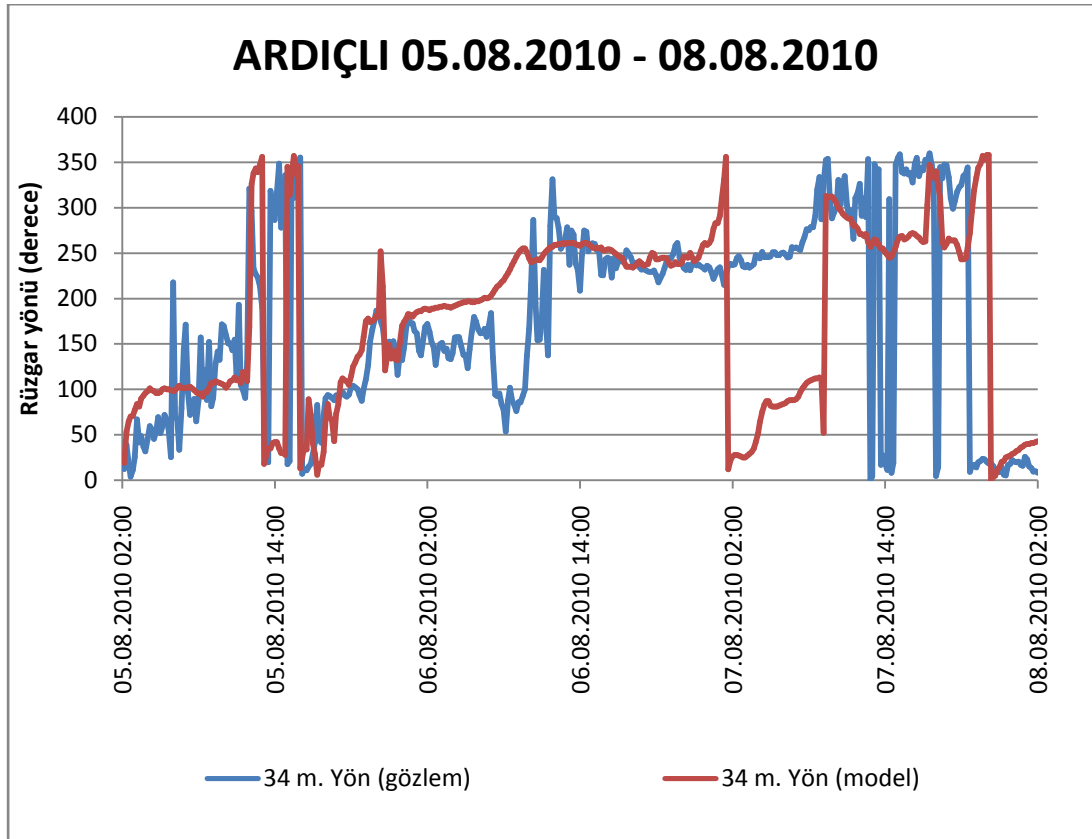
Şekil 6.17 : 5.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.



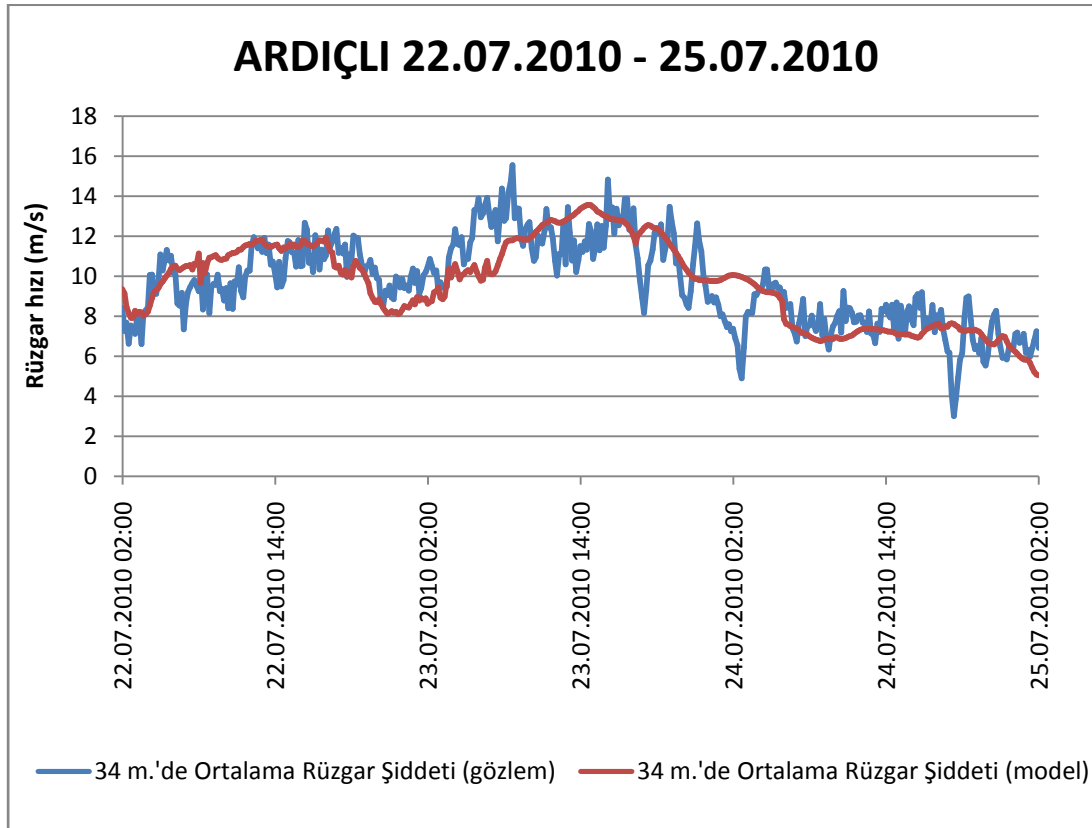
Şekil 6.18 : 5.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.



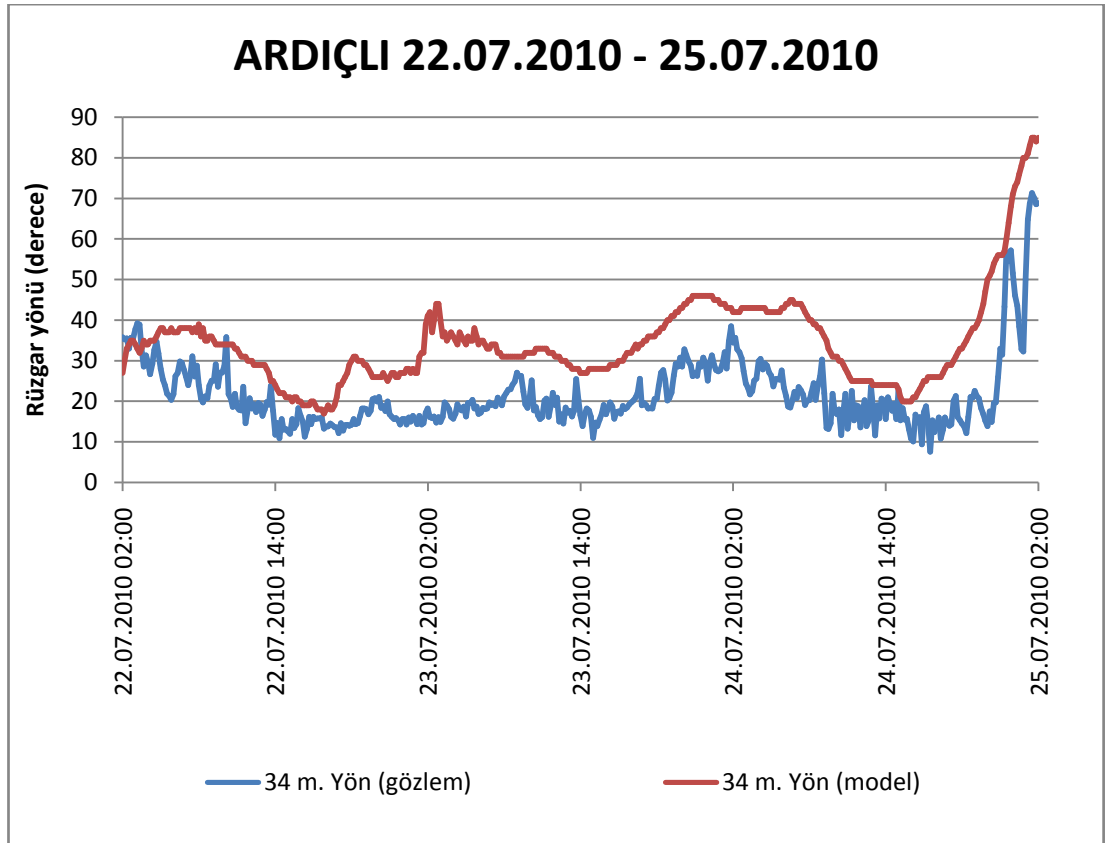
Şekil 6.19 : 6.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.



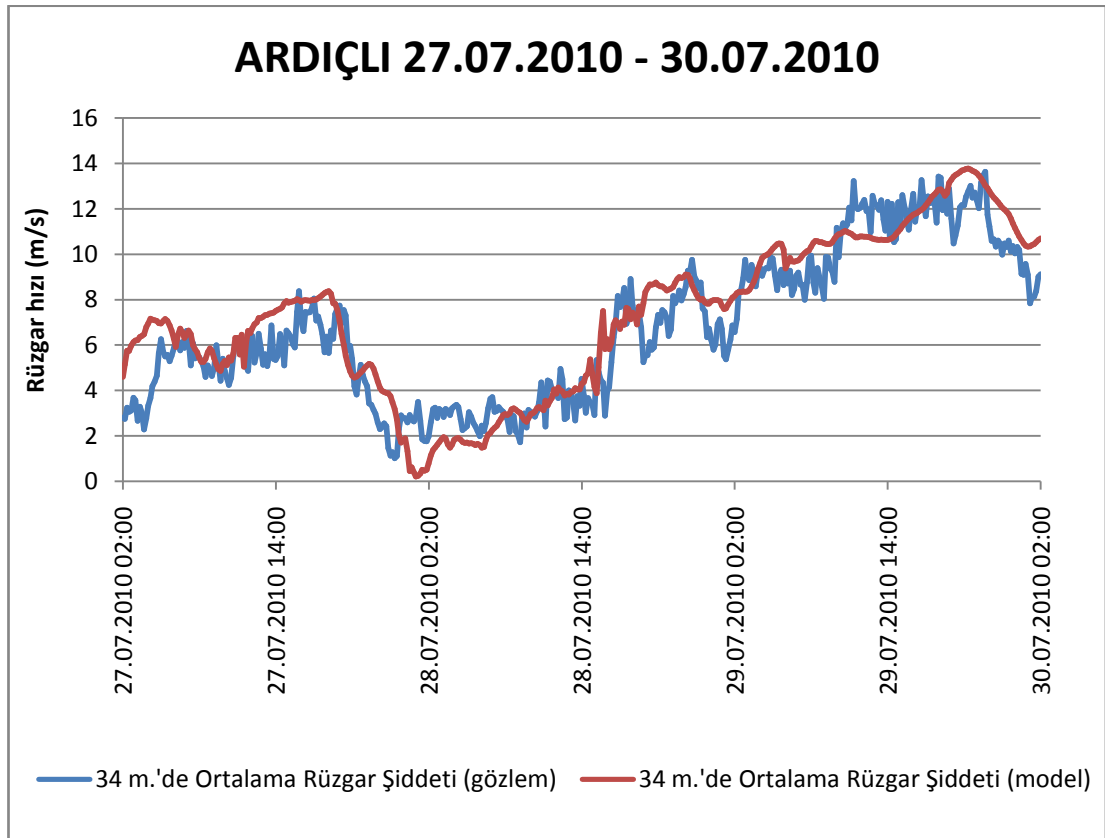
Şekil 6.20 : 6.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.



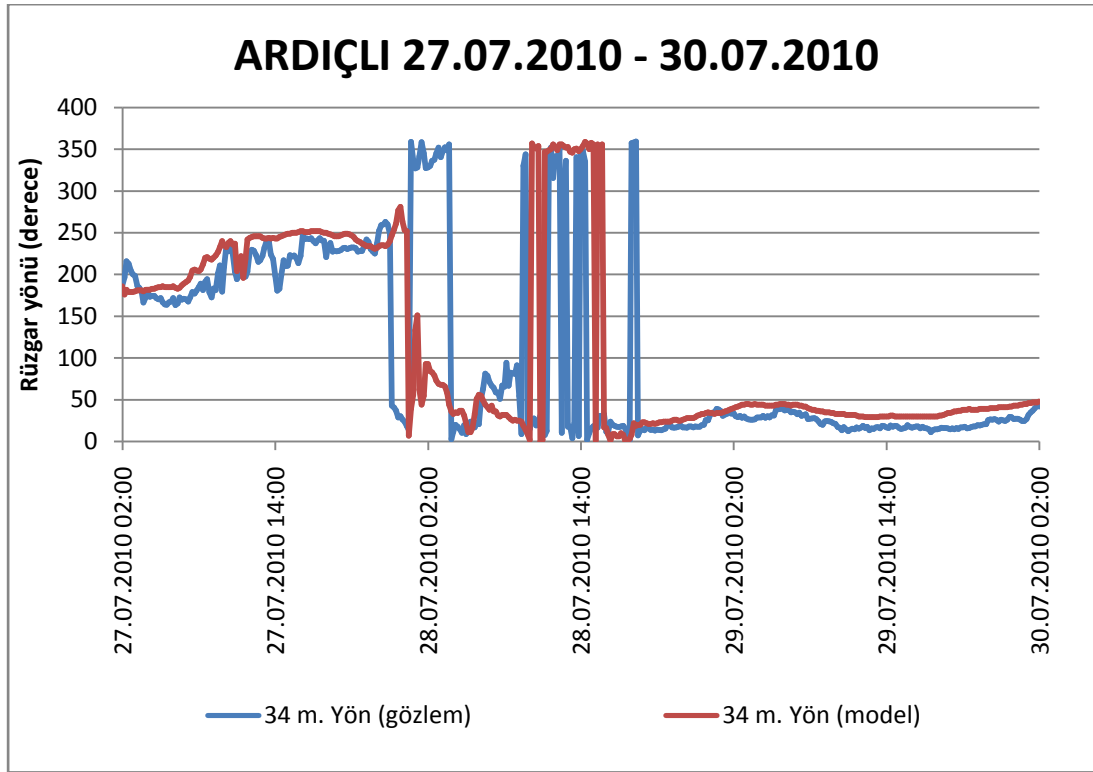
Şekil 6.21 : 7.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.



Şekil 6.22 : 7.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.



Şekil 6.23 : 8.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar şiddeti gözlemleri.



Şekil 6.24 : 8.Periyot için 34m.'de WRF simülasyonları ile rüzgar yönü gözlemleri.

Şekil 6.18 ile Şekil 6.25 arasındaki şekiller, Soma-RES sahası için yaz mevsim şartlarını temsil eden 72 saatlik dört ayrı örnekleme göstermektedir. Her bir durum için rüzgar şiddeti ve rüzgar yönünün WRF ve gözlem karşılaştırmaları incelendiğinde;

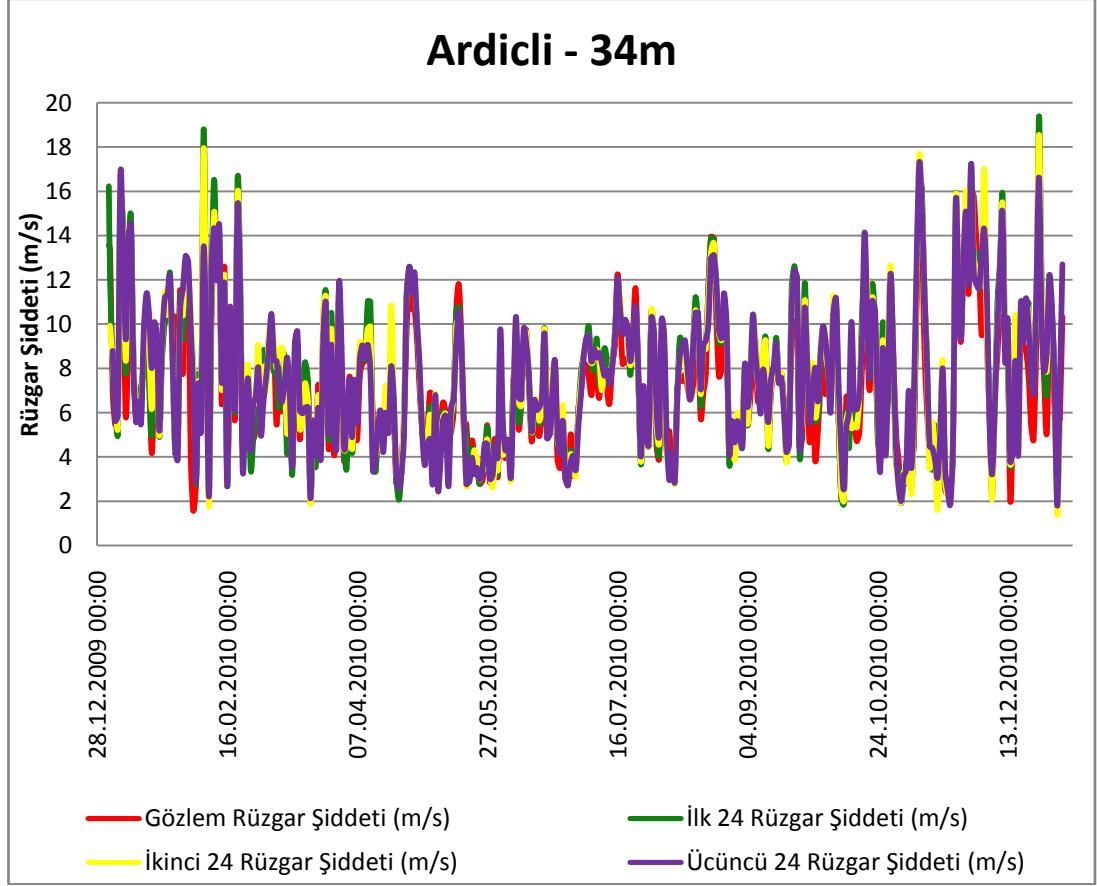
*Rüzgar şiddetinin Model ve gözlem değerleri genelde paralel bir salınım gösterdiği,

*Rüzgar şiddeti ve yönünün gözlem değerlerinin ani değişim gösterdiği saatlerde model sonuçlarının bu ani değişimi yakalamada performansının düşük olduğu görülmektedir.

6.7 Soma-RES Sahası İçin 2010 Periyodunu Kapsayan 10 Dakikalık WRF Modeli Simülasyonlarının Gözlem Değerleri İle Karşılaştırılması

WRF modeli 01.01.2010 ile 31.12.2010 periyodunu kapsayan bir yıl süreli (72 saatlik tahmin çalışması tamamlanan Soma-RES için performans analizi yapmak üzere onar dakikalık model çıktıları görselleştirilmiş ve 24, 48 ve 72 saatlik WRF simülasyonları gözlem noktalarına interpolate edilip, gözlem değerleri ile karşılaştırılarak modelin genel performansı değerlendirilmiştir. Ardıçlı gözlem

direğine ait 34 m yükseklikteki rüzgar şiddetinin 1 yıl süre ile 10 dakikalık günlük ortalama gözlem ve 24, 48, 72 saatlik tahmin değerlerinin oluşturduğu zaman serisi Şekil 6.26’da görülmektedir.

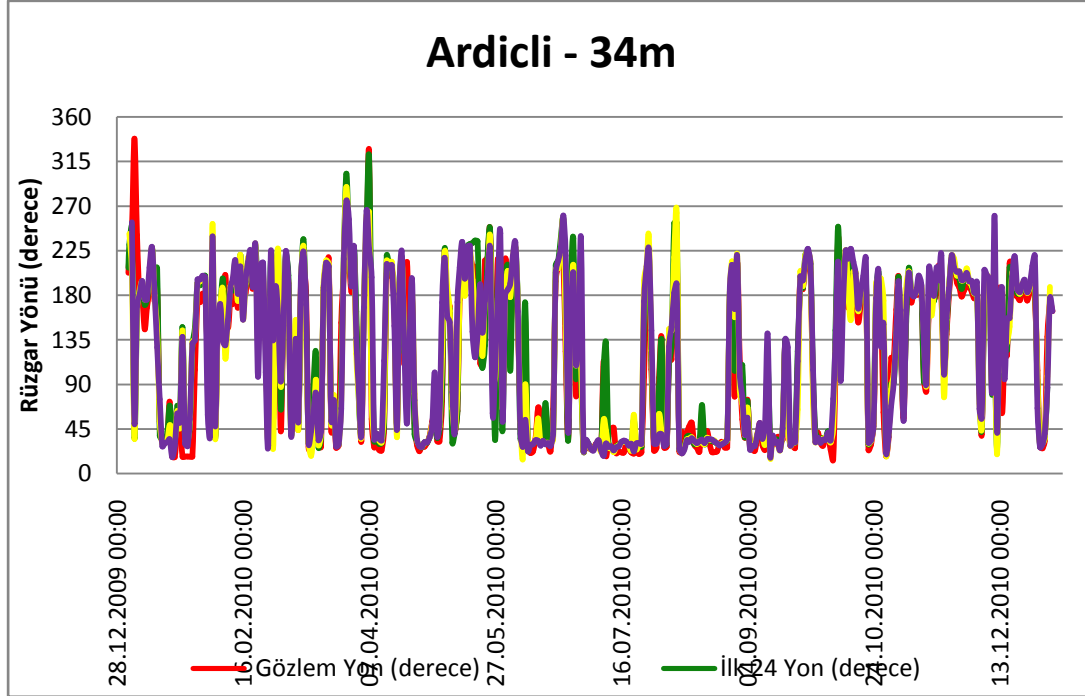


Şekil 6.25 : Soma Ardıçlı istasyonu 2010 yılı 34 m yükseklik için 10 dakikalık günlük ortalama rüzgar şiddeti gözlemlerinin ilk, ikinci ve üçüncü 24 saat WRF çıktıları ile karşılaştırılması.

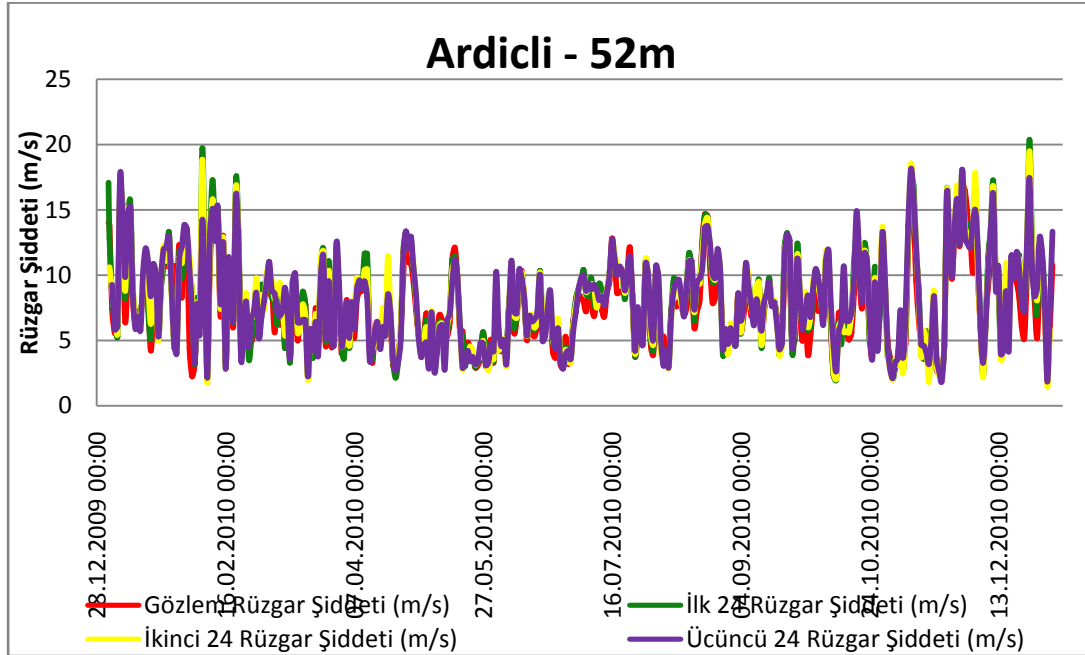
Şekil 6.25’de Ardıçlı gözlem direğine ait 34 m yükseklikteki rüzgar şiddetinin 1 yıl süre ile 10 dakikalık günlük ortalama gözlem ve 24, 48, 72 saatlik tahmin değerlerinin oluşturduğu zaman serisi incelendiğinde, gözlem ve tahminlerin 2 m/sn ile 18 m/sn arasında değer aldığı, genelde aynı salınımı göstermekte olduğu, ancak ani artış ve azalışlarda model çıktılarının gözlemlere göre olan farkın arttığı ve üçüncü 24 saatlik tahmin değerlerinde bu sapmanın daha büyük olduğu görülmektedir.

Aynı seviye rüzgar yönü için incelendiğinde ise göre rüzgar yönü için gözlem ve tahmin değerlerinin 20^0 ile 320^0 arasında değer aldığı, kuzey doğulu rüzgarlarda tahmin ve gözlem farkının azaldığı, buna karşın güneyli akımlarda farkın arttığı görülmektedir (Şekil 6.26).

Ardıçlı istasyonu için 52m yükseklikte rüzgar şiddetinin 1 yıl süre ile 10 dakikalık günlük ortalama rüzgar gözlem ve 24, 48, 72 saatlik tahmin değerlerinin oluşturduğu zaman serisi şekil.6.27’de verilmektedir.



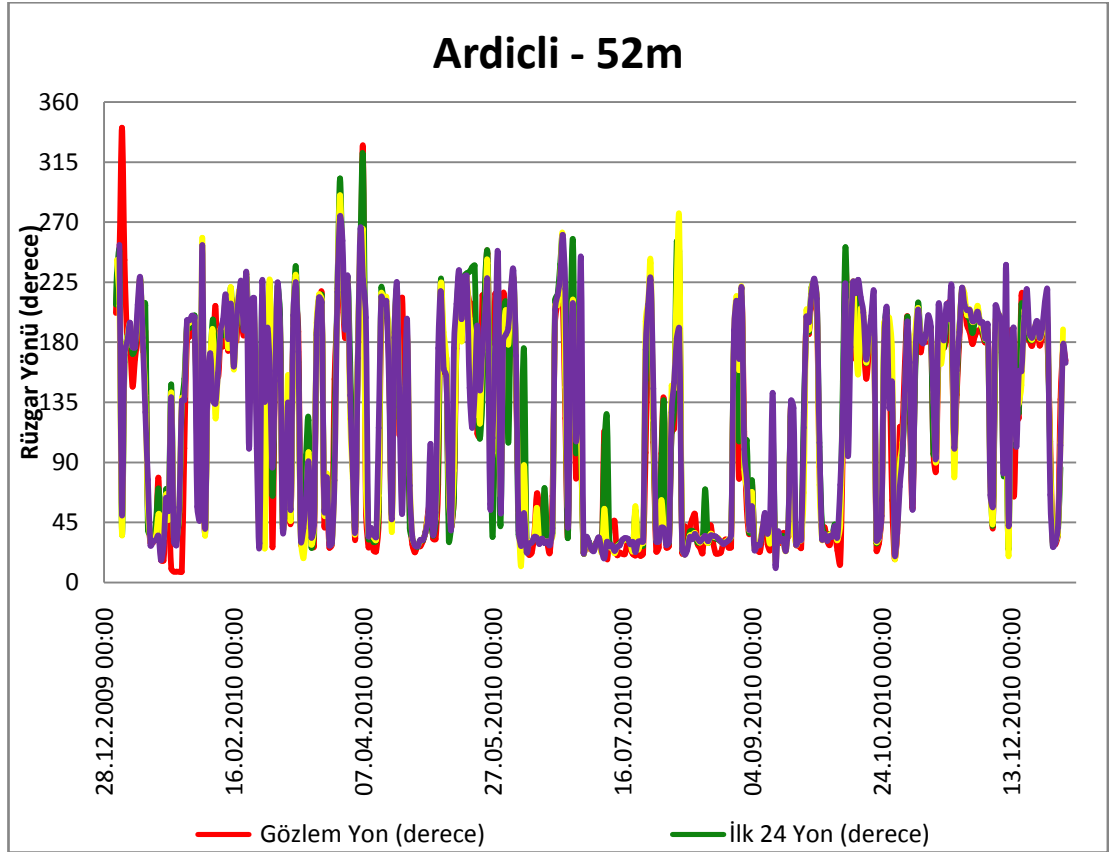
Şekil 6.26 : Soma (Ardıçlı) istasyonu için 2010 yılı 34m yükseklik için 10 dakikalık günlük ortalama rüzgar yönü gözlemlerinin ilk, ikinci ve üçüncü 24 saat WRF çıktıları ile karşılaştırılması.



Şekil 6.27 : Soma (Ardıçlı) istasyonu 2010 yılı 53 m yükseklik için 10 dakikalık günlük ortalama rüzgar şiddeti gözlemlerinin ilk, ikinci ve üçüncü 24 saat WRF çıktıları ile karşılaştırılması.

Şekilden görüldüğü gibi, 52 m yükseklikteki rüzgar şiddeti gözlem ve tahmin değerleri 2 m/sn ile 20 m/sn değerleri arasında salınım göstermekte ancak model simülasyon değerleri gözlemlere göre daha yüksektir.

Aynı seviyedeki rüzgar yönünün 1 yıl süreli 10 dakikalık günlük ortalama gözlem ve 24, 48, 72 saatlik tahmin değerlerine ait zaman serisi ise Şekil 6.28’ de verilmektedir.

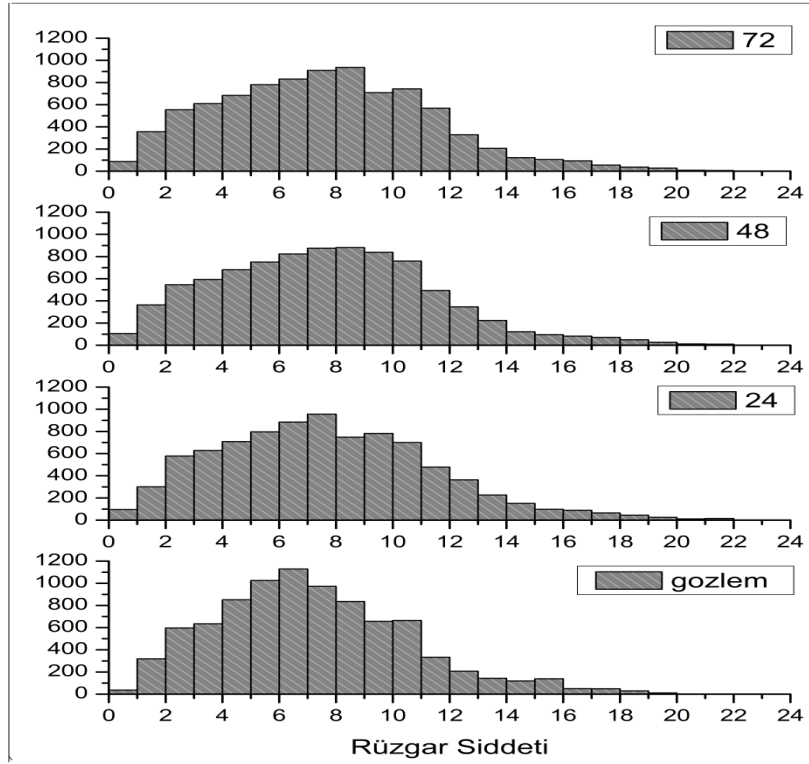


Şekil 6.28 : Soma (Ardıçlı) istasyonu için 2010 yılı 52 m yükseklik için 10 dakikalık günlük ortalama rüzgar yönü gözlemlerinin ilk, ikinci ve üçüncü 24 saat WRF çıktıları ile karşılaştırılması.

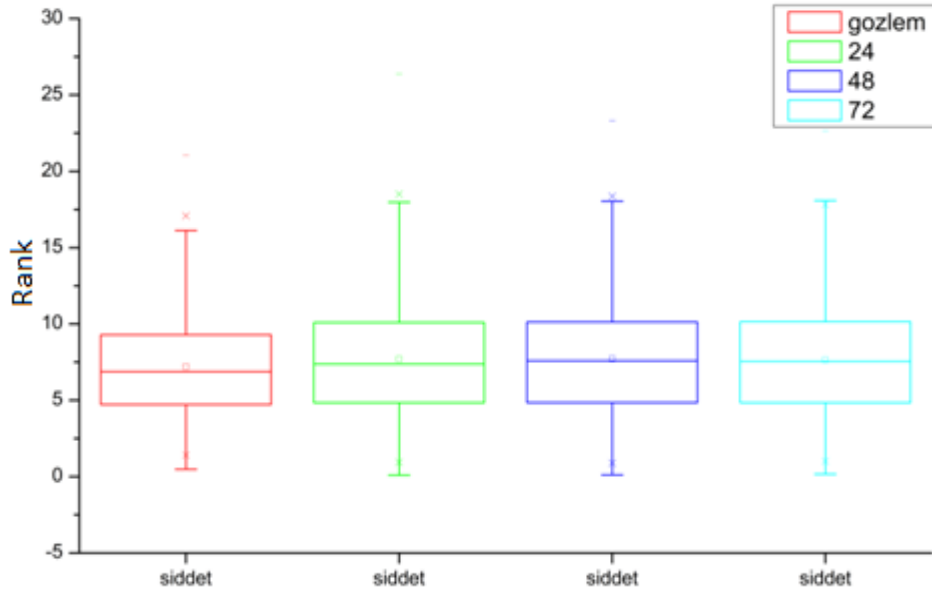
Soma-Ardıçlı istasyonu için 2010 yılı içinde gözlem ve WRF simülasyonları için rüzgarın belirli şiddet aralıklarında esme sayısı Şekil 6.29’da verilmektedir.

Ardıçlı istasyonuna ait rüzgar şiddeti histogramı incelendiğinde en fazla esme sayısının 6-7 m/sn aralığında olduğu, 4 m/sn ile 9 m/sn arasında yığılma olduğu görülmektedir. 24 saatlik ilk tahmin değerleri incelendiğinde, en fazla esme sayısının 7-8 m/sn aralığında olduğu, ancak tahmin değerlerinin gözlem değerlerine göre düşük ve yüksek rüzgar şiddeti değerlerine doğru daha homojen bir esme sayısına sahip olduğu görülmektedir. Uç değerlere doğru esme sayısının benzer dağılımı son iki 24 saatte de görülmektedir.

Şekil 6.30’da rüzgar şiddeti rangı görülmektedir.



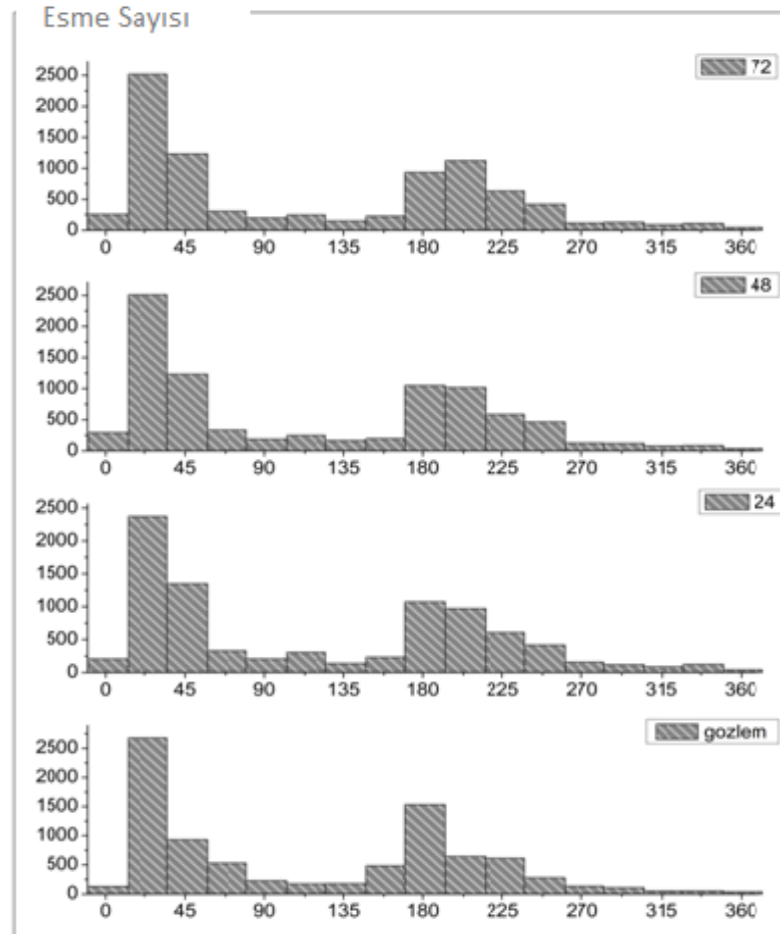
Şekil 6.29 : Soma- Ardıçlı istasyonu için (34m) 2010 yılı WRF rüzgar şiddeti histogramı (gözlem ve WRF model çıktıları).



Şekil 6.30 : Soma-Ardıçlı istasyonu için 2010 yılı rüzgar şiddeti rangı (gözlem ve WRF model çıktıları).

Şekil 6.30'dan görüldüğü gibi rüzgar şiddetinin gözlem değerleri ile tahmin değerlerinin ortalaması birbirine yakın değerler gösterirken, tahminlere ait standart sapma değerleri artış göstermektedir. Gözlem ve tahmine ait minimum değerler sıfıra yakın iken, her üç 24 saatlik tahmine ait maksimum değer gözleme göre daha yüksektir.

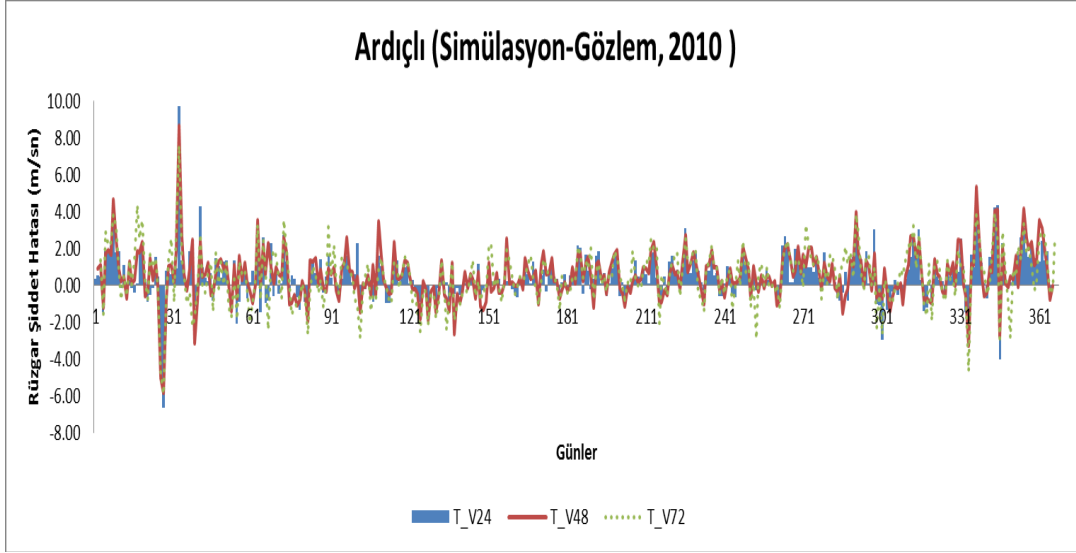
Ardıçlı istasyonu için rüzgar yönü gözlem ve tahmin değerlerine ait histogram ise Şekil 6.31' de verilmektedir.



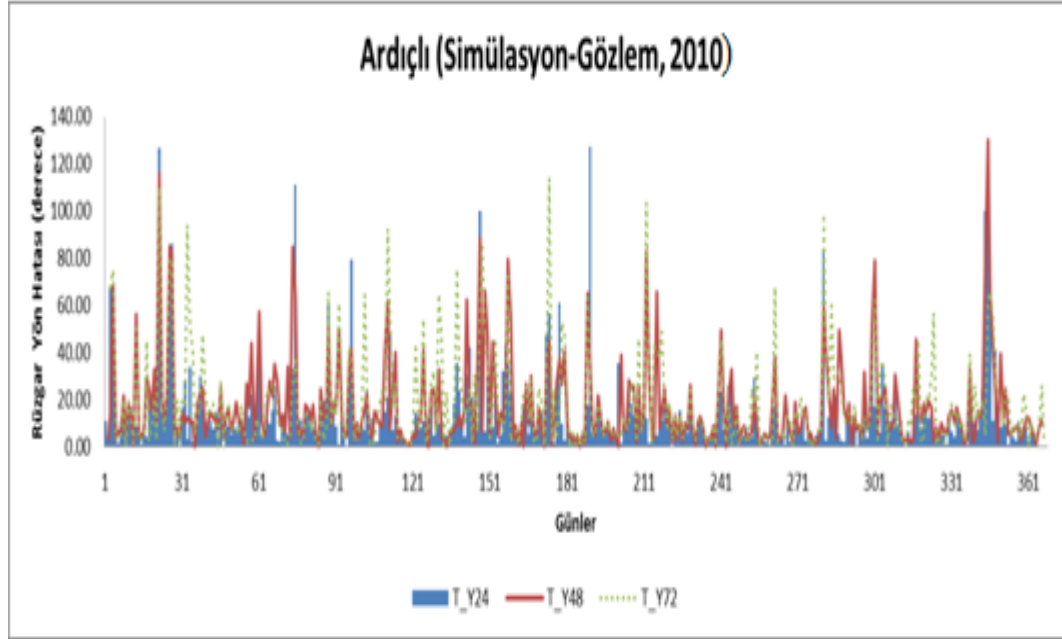
Şekil 6.31 : Ardıçlı istasyonu rüzgar yönü gözlem ve tahmin değerlerinin histogramı.

Şekilden görüldüğü gibi rüzgar yönüne ait gözlem değerleriyle paralel olarak birinci, ikinci ve üçüncü 24 saatlik tahmin değerlerinde de en fazla 20^0 - 45^0 arasında esmekte, ikinci olarak ise 180^0 - 240^0 aralığında dağılmaktadır. Ancak kuzey ve kuzey doğulu yönlerde tahmin ve gözlem sıklığı birbirine yakınken güneyli yönler için aradaki fark artmaktadır..

24 saatlik ortalama rüzgar şiddet ve yönlerinin 24 saatlik gözlem ortalamaları ile olan farklarının 2010 yılı boyunca değişimi Şekil 6.32 ve Şekil 6.33'de gösterilmiştir.



Şekil 6.32 : Ardıçlı'da rüzgar şiddeti tahminlerinin 24 saatlik ortalamalarının gözlemlerden farkı. T_V24 ilk 24 saatlik tahmin ortalaması; T_V48 25-48 saatleri arası tahmin ortalaması; T_V72 49-72 saatleri arası tahmin ortalaması.

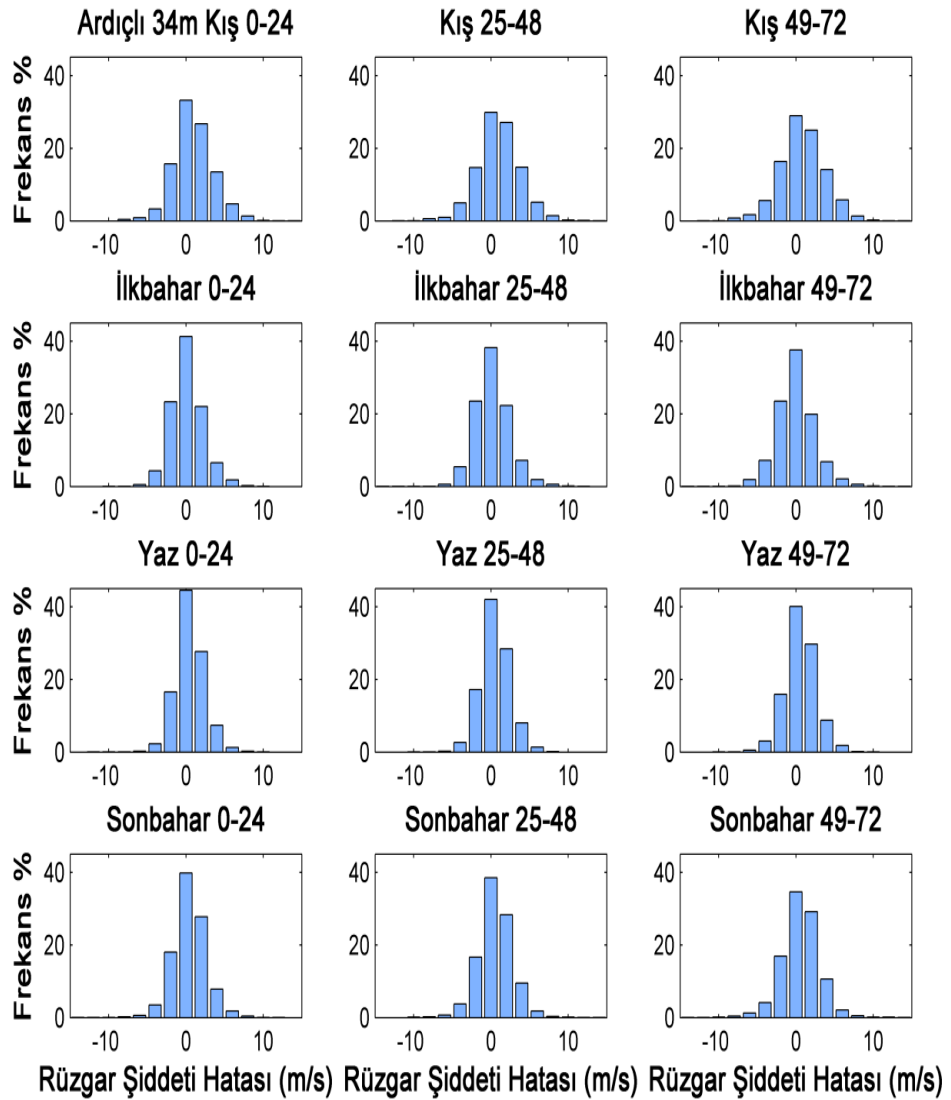


Şekil 6.33 : Ardıçlı'da rüzgar yönü tahminlerinin 24 saatlik ortalamalarının gözlemlerden farkı. T_Y24 ilk 24 saatlik tahmin ortalaması; T_Y48 25-48 saatleri arası tahmin ortalaması; T_Y72 49-72 saatleri arası tahmin ortalaması.

Simülasyonlar 1 Ocak 2010 saat 14:00 da başlatılmıştır. Dolayısıyla T_V24 ve T_Y24, 72 saatlik simülasyonların ilk 24 saatlik ortalamalarının hatasını göstermektedir. Bir yıllık simülasyon boyunca günlük ortalama rüzgar şiddetlerinin mutlak hatalarının bir yıllık ortalaması ilk 24 saatte 0,97 m/sn, ikinci 24 saatte 1,05 m/sn ve üçüncü 24 saatte 1,19 m/sn'dir. Mutlak hataların standart sapmaları her üç

gün içinde 1 civarındadır. Eğer onar dakikalık aralıklar ile yapılan mutlak hataların günlük ortalamaları alınırsa bu değerlerin bir yıllık ortalamaları sırasıyla 1,68 m/sn, 1,78 m/sn ve 1,90 m/sn olmaktadır. Genel olarak simülasyonlarda pozitif yanlılık mevcuttur ve tahmin edilen rüzgar şiddetleri gözlemlerden fazladır. İlk 24 saat içerisinde 52.489 tahminin %58'i, ikinci 24 saatin %59'u ve 3. 24 saatin %58'si rüzgar şiddetini daha fazla tahmin etmiştir. Şekil 6.34' den de görüleceği üzere rüzgar şiddetinde yapılan hatalar Mayıs-Ekim ayları arasında daha az iken kış mevsiminde bazı özel günlerde 8-9 m/sn seviyelerine ulaşmaktadır.

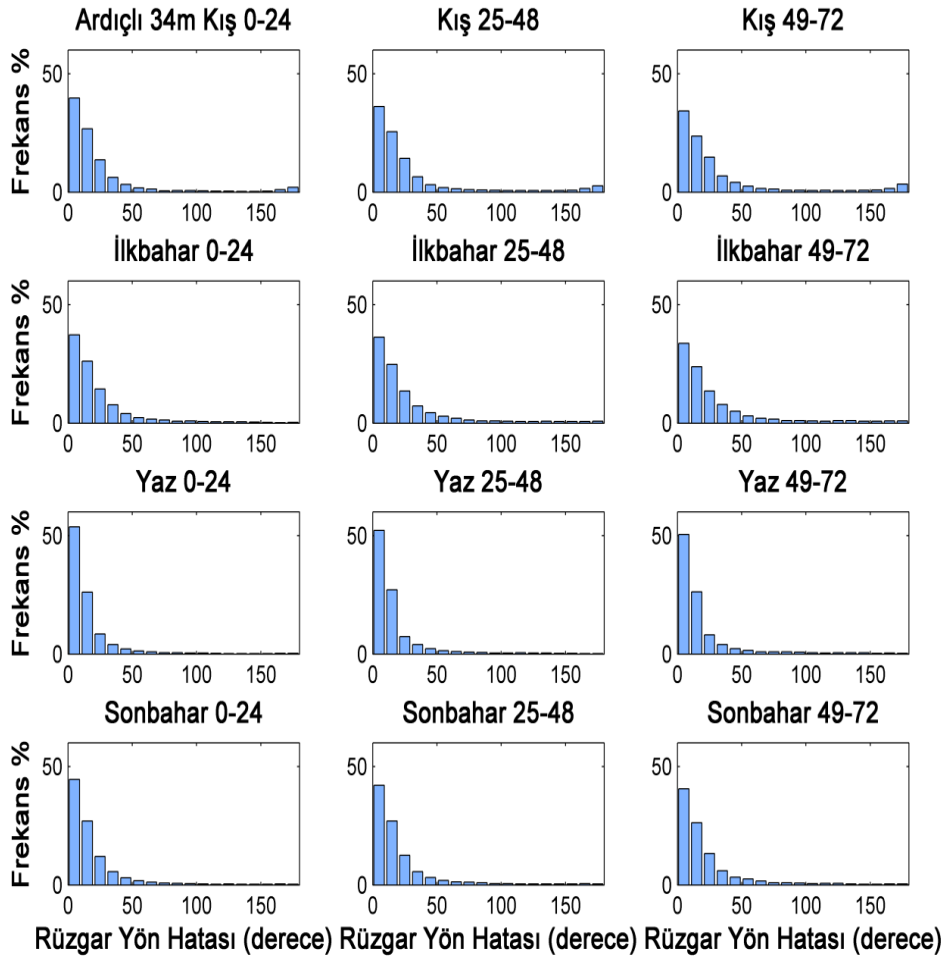
Soma-RES için 34m WRF model sonuçlarına göre rüzgar şiddeti için hesaplanan hata frekans histogramı Şekil 6.34'te gösterilmektedir.



Şekil 6.34 : Soma-RES için WRF modeli rüzgar şiddeti hata histogramı.

Histogram bir yıllık süreyi kapsayan tüm mevsimler için üç günlük tahmin için yapılmıştır. Tüm mevsimlerde rüzgar şiddetinin her üç günlük tahmininde en yüksek hata yüzdesi ± 2 m/sn aralığındadır. Bu aralıktaki hata frekansı ilkbahar ve yaz döneminde %40 değerinde iken kış döneminde daha yüksek aralıktaki hata yüzdesi artmakta ve ± 2 m/sn aralığındaki hata frekansı %30'a düşmektedir. Rüzgar şiddetindeki ± 4 m/sn den daha büyük olan hata yüzdesi ise kış mevsiminin dışında %10 civarındadır. Genel olarak model gözleme göre daha yüksek değerlerde tahmin etmektedir. Tahminin ilk 24 saatinde hata aralığı daha küçükken, son 24 saatte aralık büyümektedir.

Yön için hesaplanan hata frekans histogramı Şekil 6.35'te gösterilmektedir.



Şekil 6.35 : Soma-RES santrali için WRF modeli rüzgar yönü tahmini hata histogramı.

Soma-RES için WRF modeli rüzgar yönü hata histogramı incelendiğinde her dört mevsim için en yüksek hata frekansının sırası ile 0-10 ve 10-20 derecelik hata

aralığında olduğu, özellikle yazın bu aralıktaki frekans değerinin %80' i aştığı, daha yüksek hata aralığı yüzdesinin ise düşük olduğu görülmektedir.

Rüzgar şiddeti ve yönü için sektör bazında yapılan mutlak hata ortalamaları Çizelge 6.3'de verilmektedir.

Çizelge 6.3 : Ardıçlı Ölçüm Direği (34m) İçin Sektör bazında yapılan mutlak hata ortalamaları. (V rüzgar şiddeti, Y yön hatalarıdır. Gözlem sayıları 1 yıllık 10 dakikalık gözlem sayısına göre % olarak ifade edilmiştir.).

	Mutlak Hatalar						Gözlem Sayısı %
	V 0-24	Y 0-24	V 25-48	Y 25-48	V 49-72	Y 49-72	
0-30	1.41	11.82	1.45	12.87	1.60		28.0
30-60	1.74	11.68	1.85	13.68	1.96	15.46	16.0
60-90	1.78	26.50	1.86	31.70	2.01	33.92	6.7
90-120	1.70	38.60	1.87	46.07	1.89	52.67	2.0
120-150	1.89	33.92	2.06	37.55	2.48	45.33	2.2
150-180	1.92	20.86	2.09	24.07	2.23	27.21	12.2
180-210	2.05	25.81	2.19	29.06	2.21	29.52	15.9
210-240	1.57	27.10	1.75	32.43	1.84	33.96	8.8
240-270	1.46	40.47	1.57	45.93	1.70	48.00	3.2
270-300	1.39	59.20	1.51	63.11	1.51	59.35	1.6
300-330	1.46	48.51	1.45	54.13	1.37	57.02	1.2
330-360	1.23	32.94	1.51	35.28	1.43	39.22	2.1

İlk 24 saat WRF tahminlerinde rüzgar şiddetindeki en yüksek hatalar rüzgarın (180⁰-210⁰) güneyden estiği durumlara karşı gelmektedir. En iyi tahminler ise kuzey batılı (330⁰-360⁰) atmosferik akışlarda tahmin edilmektedir. Yön tahminlerinde ise batılı (240⁰-330⁰) atmosferik akışlarda 40 derecenin üzerinde rüzgar yönünde hatalar mevcuttur. Bu yönde bir yıl boyunca rüzgarın esme sıklığı %3.3 civarındadır.

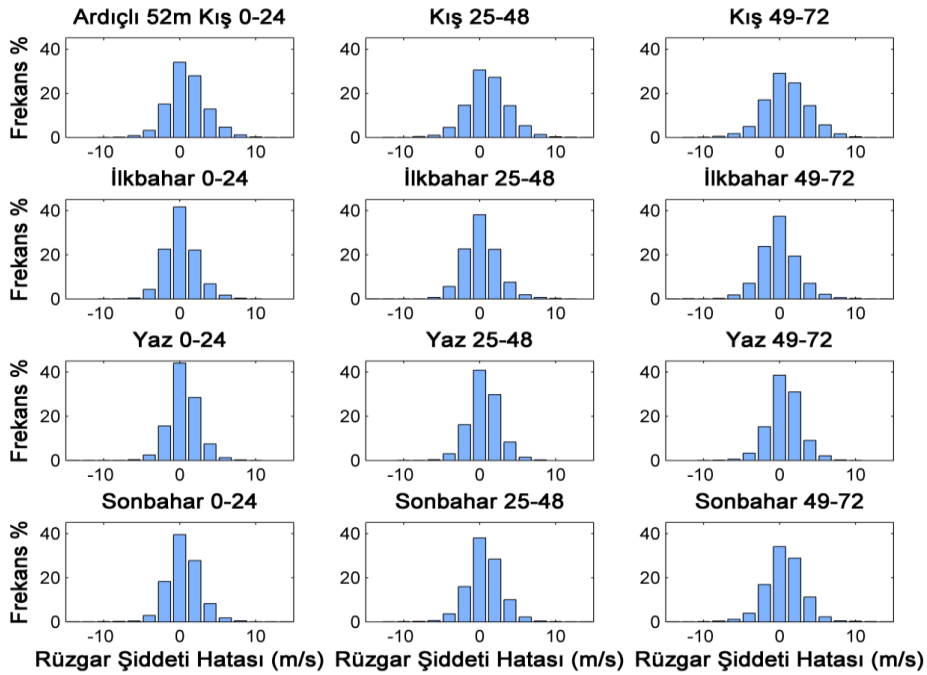
İkinci 24 saat tahminlerinde rüzgar şiddetindeki en yüksek hatalar rüzgarın ilk 24 saatte olduğu gibi güneyden (180⁰-210⁰), üçüncü 24 saatte ise güney güneydoğu ve güney güneybatı(120⁰-210⁰) aralığında estiği durumlara karşı gelmektedir. En küçük hata değeri ise 300⁰-030⁰ rüzgar yönleri için tahmin edilmektedir. İkinci ve üçüncü 24 saat rüzgar yönü tahminlerinde ise hata oranı ilk 24 saate göre artış göstermektedir. Rüzgar şiddet aralığına göre kategorize edilen mutlak hatalar Çizelge 6.4'de verilmektedir.

Çizelge 6.4 : Ardıçlı (34m yükseklik için) Rüzgar Gözlemlerinin Şiddetine Göre Kategorize Edilmiş Mutlak Hatalar. (V rüzgar şiddeti, Y yön hatasıdır. Gözlem sayıları 1 yıllık 10 dakikalık gözlem sayısına göre % olarak ifade edilmiştir.).

V (m/sn)	Mutlak Hatalar						Gözlem Sayısı %
	V 0-24	Y 0-24	V 25-48	Y 25-48	V 49-72	Y 49-72	
0-5	1.50	36.62	1.69	41.05	1.82	44.00	28.8
5-10	1.66	13.83	1.76	16.29	1.86	18.22	51.8
10-15	1.92	18.46	1.92	20.06	2.05	21.05	16.0
15-20	2.36	11.72	2.43	13.73	2.63	13.74	3.3
20-25	3.50	19.38	3.32	20.29	3.96	25.46	0.1

WRF, gözlenen rüzgarın 20 m/sn - 25 m/sn olması durumunda Ardıçlı'da rüzgarı 3 m/sn nin üzerinde hatalar ile tahmin edebilmektedir. 20 m/sn - 25 m/sn arasındaki rüzgarların sıklığı bir yılın binde birini teşkil etmektedir. Bununla birlikte daha zayıf rüzgarlarda (0 m/sn - 5 m/sn arasında) rüzgar yönündeki hatalar çok daha büyüktür.

Soma-RES için 52 m seviyesinde WRF model sonuçlarına göre rüzgar şiddeti için hesaplanan hata frekans histogramı Şekil 6.36'da gösterilmektedir.

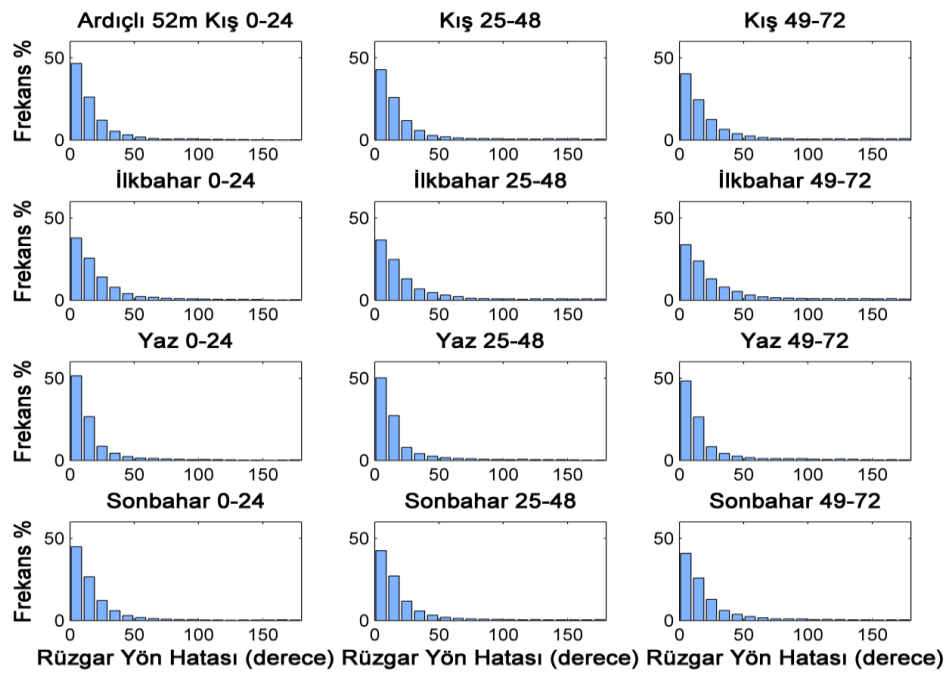


Şekil 6.36 : Soma-RES için WRF modeli rüzgar şiddeti hata histogramı.

52 m seviyesi için histogram bir yıllık süreyi kapsayan tüm mevsimler için üç günlük tahmin için yapılmıştır. Tüm mevsimlerde rüzgar şiddetinin her üç günlük tahmininde en yüksek hata yüzdesi 34 m seviyesinde olduğu gibi +/- 2 m/sn

aralığındadır. Bu aralıktaki hata frekansı ilkbahar ve yaz döneminde %40 değerinin üzerinde iken kış döneminde daha yüksek aralıktaki hata yüzdesi artmakta ve +/- 2 m/sn aralığındaki hata frekansı %35'e düşmektedir. Rüzgar şiddetindeki +/- 4m/sn den daha büyük olan hata yüzdesi ise kış mevsiminin dışında %10 civarındadır. Genel olarak model gözleme göre daha yüksek değerlerde tahmin etmektedir. Tahminin ilk 24 saatinde hata aralığı daha küçükken, son 24 saatte aralık büyümektedir.

Yön için hesaplanan hata frekans histogramı Şekil 6.37' de gösterilmektedir.



Şekil 6.37 : Soma-RES için WRF modeli rüzgar yönü tahmini hata histogramı

Soma-RES için WRF modeli rüzgar yönü hata histogramı incelendiğinde 34m seviyesinde olduğu gibi her dört mevsim için en yüksek hata frekansının sırası ile 0-10 ve 10-20 derecelik hata aralığında olduğu, özellikle yazın bu aralıktaki frekans değerinin %80'i aştığı, daha yüksek hata aralığı yüzdesinin ise düşük olduğu görülmektedir. 52m seviyesinde kış mevsiminde 0-10 derecelik hata oranı 34m ye göre özellikle ilk 24 saat içinde daha yüksek frekansa sahip olduğu görülmektedir.

52 m seviyesi için rüzgar şiddeti ve yönü için sektör bazında yapılan mutlak hata ortalamaları Çizelge 6.5'de verilmektedir.

İlk 24 saat WRF tahminlerinde rüzgar şiddetindeki en yüksek hatalar rüzgarın güneyden (150^0 - 210^0) estiği durumlara karşı gelmektedir. En iyi tahminler ise kuzey batılı (330^0 - 360^0) atmosferik akışlarda tahmin edilmektedir. Yön tahminlerinde ise batılı (270^0 - 300^0) atmosferik akışlarda 60^0 civarında hatalar mevcuttur. Bu yönde bir yıl boyunca rüzgarın esme sıklığı %1.7 civarındadır.

Çizelge 6.5 : Ardıçlı Ölçüm Direği (52m) İçin Sektör bazında yapılan mutlak hata ortalamaları. (V rüzgar şiddeti, Y yön hatasıdır. Gözlem sayıları 1 yıllık 10 dakikalık gözlem sayısına göre % olarak ifade edilmiştir).

	Mutlak Hatalar						Gözlem Sayısı %
	V0-24	Y0-24	V 25-48	Y 25-48	V 49-72	Y 49-72	
0-30	1,41	11,67	1,48	12,60	1,64	14,24	27,96
30-60	1,78	11,65	1,91	13,81	2,04	15,60	16,32
60-90	1,80	26,88	1,88	31,97	2,05	34,46	6,71
90-120	1,62	36,09	1,84	44,08	1,85	51,39	2,03
120-150	1,84	33,33	2,10	37,72	2,46	45,13	2,04
150-180	1,96	20,34	2,12	23,54	2,30	26,86	11,73
180-210	1,90	18,03	2,10	21,21	2,10	21,81	15,80
210-240	1,59	25,31	1,82	31,21	1,89	33,45	9,02
240-270	1,58	38,68	1,70	44,19	1,81	46,21	3,34
270-300	1,43	58,98	1,56	62,78	1,55	59,58	1,69
300-330	1,46	47,48	1,47	53,77	1,41	56,54	1,20
330-360	1,28	32,45	1,62	35,64	1,51	39,34	2,16

İkinci 24 saat tahminlerinde rüzgar şiddetindeki en yüksek hatalar rüzgarın ilk 24 saatte olduğu gibi güneyden (150^0 - 180^0), üçüncü 24 saatte ise güney güneydoğu aralığında estiği durumlara karşı gelmektedir. En küçük hata değeri ise (300^0 - 030^0 derece) rüzgar yönleri için tahmin edilmektedir. İkinci ve üçüncü 24 saat rüzgar yönü tahminlerinde ise en yüksek hata yine batılı (270^0 - 330^0) akışlarda görülmektedir.

Ardıçlı (52 m) için Rüzgar şiddet aralığına göre kategorize edilen mutlak hatalar Çizelge 6.6' de verilmektedir.

Çizelge 6.6 : Ardıçlı (52m) Rüzgar Gözlemlerinin Şiddetine Göre Kategorize Edilmiş Mutlak Hatalar. (V şiddeti, Y yön hatasıdır. Gözlem sayıları 1 yıllık 10 dakikalık gözlem sayısına göre % olarak ifade edilmiştir.).

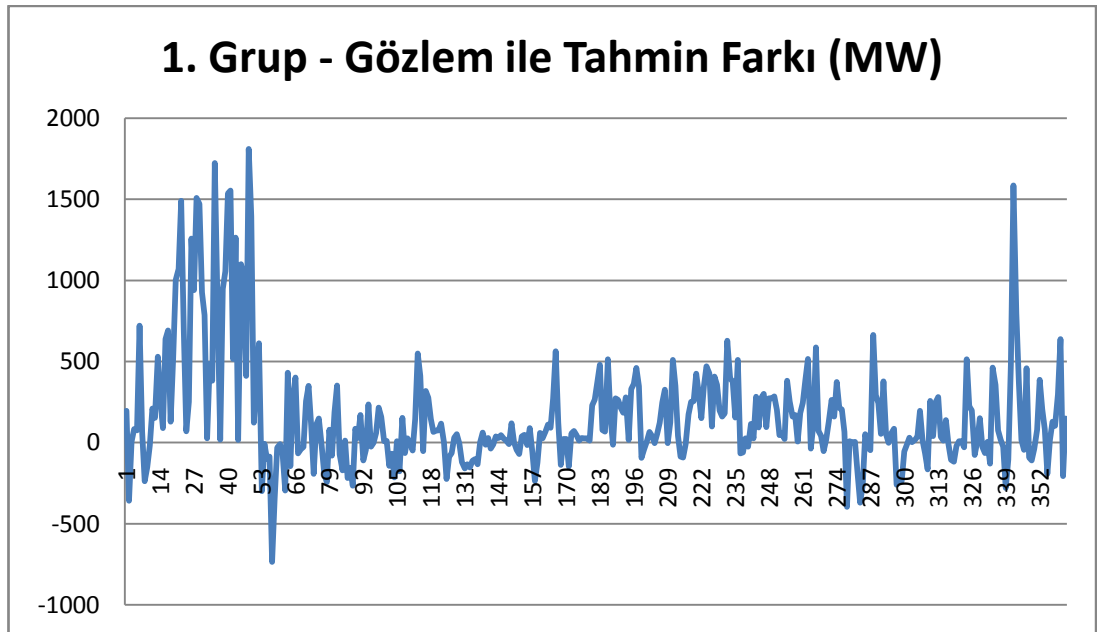
V m/sn	Mutlak Hatalar						Gözlem Sayısı %
	V 0-24	Y 0-24	V 25-48	Y 25-48	V 49-72	Y 49-72	
0-5	1,45	37,46	1,67	42,59	1,82	45,19	26,24
5-10	1,70	14,15	1,84	16,67	1,93	18,68	26,24
10-15	1,78	10,34	1,81	11,66	1,96	12,95	17,79
15-20	2,27	10,10	2,35	11,80	2,44	12,60	3,52
20-25	2,92	14,47	2,90	15,38	3,29	17,96	0,22

WRF, 52 m yükseklik için gözlenen rüzgarın 20 m/sn-25 m/sn olması durumunda Ardıçlı'da rüzgarı 2,92 m/sn nin üzerinde hatalar ile tahmin edebilmektedir. 20 m/sn-25 m/sn arasındaki rüzgarların sıklığı bir yılın binde ikisini teşkil etmektedir. Bununla birlikte daha zayıf rüzgarlarda (0 m/sn-5m/sn arasında) rüzgar şiddeti için hata üç günlük tahmin için yaklaşık 1,6 m/sn iken, rüzgar yönündeki hatalar 40^0 civarındadır.

6.8 Soma-RES İçin WindSim Model Sonuçları

WRF modeli ile seçilen en yakın grid noktalarında hesaplanan 2010 yılını kapsayan 10 dakikalık tahmin aralıklı 72 saatlik rüzgar şiddeti tahminleri, ortak gözlem tarihleri dikkate alınarak WindSİM modeli ile Soma-RESdeki farklı koordinatlarda ve farklı topografik ve pürüzlülük özelliklere sahip türbin gruplarına taşınmıştır. Güç tahminleri gözlem değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu için gözlem ve tahmin arasındaki mutlak hata ve karesel hata değerleri de belirtilmiştir. Bu analizlerde kullanılan türbinlerin bilgileri Çizelge'de 6.7'de verilmiştir.

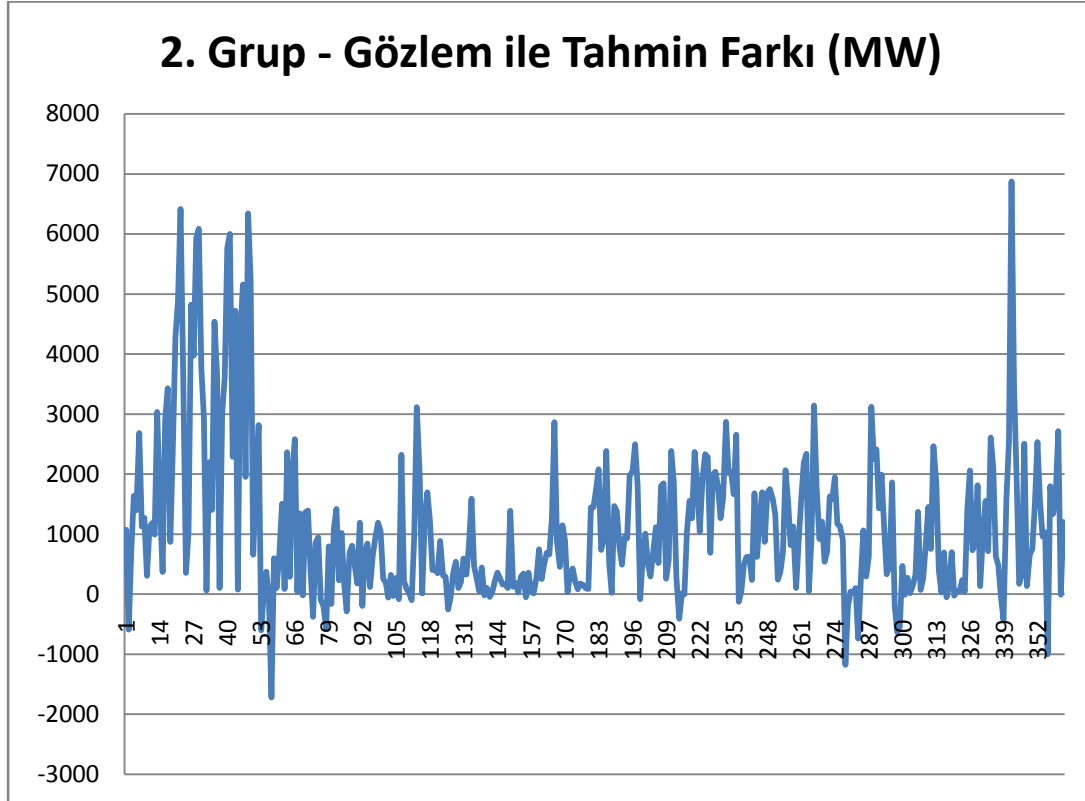
1.grup türbinler için 24 saatlik güç değerlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamalarının 2010 yılı boyunca değişimi Şekil 6.38'de gösterilmiştir.



Şekil 6.38 : Soma-RES sahasında 1 ve 2 no'lu türbin için toplam güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları.

İki türbine ait toplam güç değerlerinin günlük ortalama hata değerleri incelendiğinde model simülasyonlarında genelde pozitif yanlılığın olduğu görülmektedir. Hata değeri kış mevsiminin dışında maksimum +500/-300 kW aralığında iken, kışın 1500 kW değerine kadar çıkmaktadır.

3-10 no'lu türbinler için tahmin edilen toplam gücün gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamalarının 2010 yılı boyunca değişimi Şekil 6.39'da gösterilmiştir.



Şekil 6.39 : Soma-RES sahasında 3-10 no'lu türbin için güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları

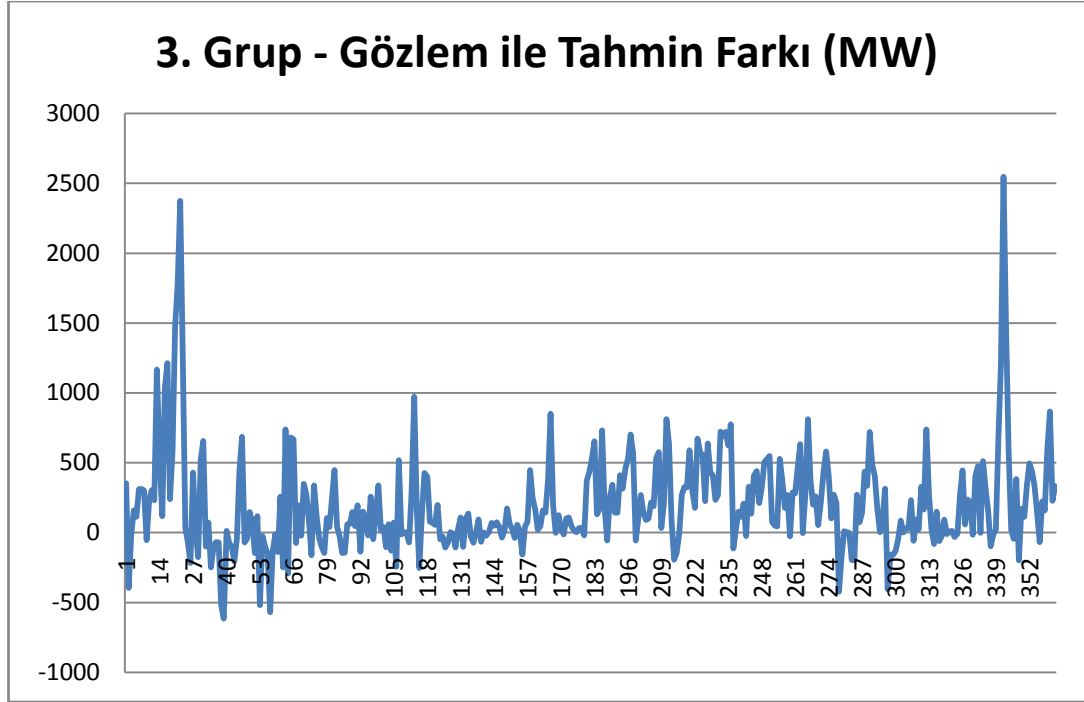
8 adet türbine ait toplam güç değerlerinin günlük ortalama hata değerleri incelendiğinde model simülasyonlarında pozitif yanlılığın olduğu görülmektedir. Hata değeri kış mevsiminin dışında maksimum +3000 kW iken, kışın 6000 kW değerine kadar çıkmaktadır.

11-13 no'lu türbinler için tahmin edilen toplam gücün gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamalarının 2010 yılı boyunca değişimi Şekil 6.40'da gösterilmiştir.

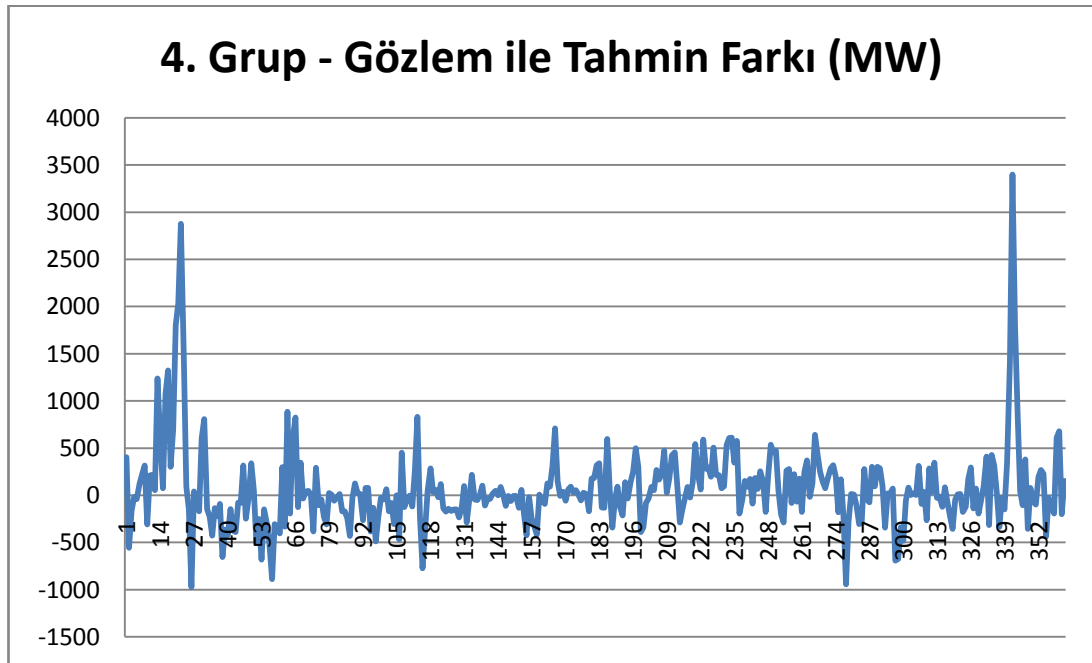
3 adet türbine ait toplam güç değerlerinin günlük ortalama hata değerleri incelendiğinde model simülasyonlarında pozitif yanlılığın olduğu görülmektedir.

Hata değeri kış mevsiminin dışında maksimum +1000 kW/-200 kW iken, kışın 2500 kW değerine kadar çıkmaktadır.

14-17 no'lu türbinler için tahmin edilen toplam gücün gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamalarının 2010 yılı boyunca değişimi Şekil 6.41'de gösterilmiştir.



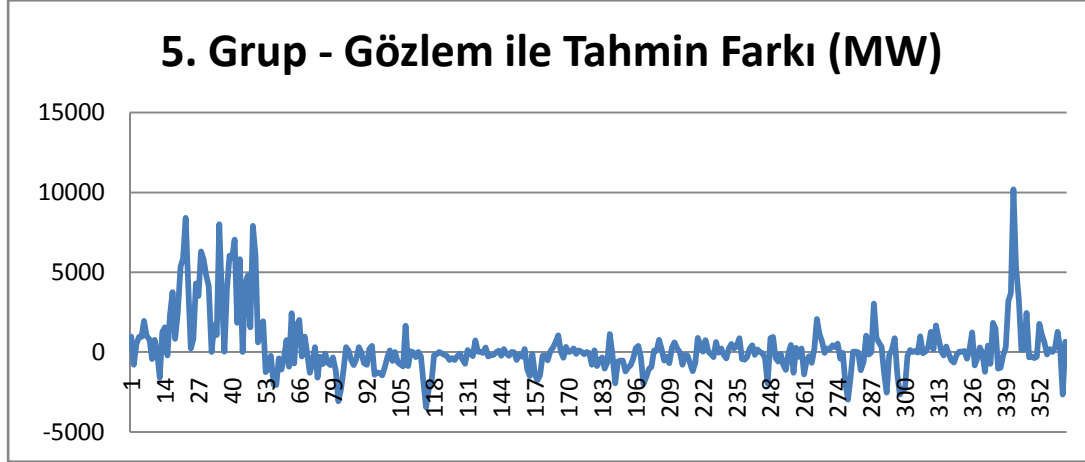
Şekil 6.40 : Soma-RES sahasında 11-13 no'lu türbinler için güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları.



Şekil 6.41 : Soma-RES sahasında 14-17 no'lu türbinler için güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları.

4 adet türbine ait toplam güç değerlerinin günlük ortalama hata değerleri incelendiğinde hata değeri kış mevsiminin dışında maksimum +700 kW/-700 kW iken, kışın 3000 kW değerine kadar çıkmaktadır.

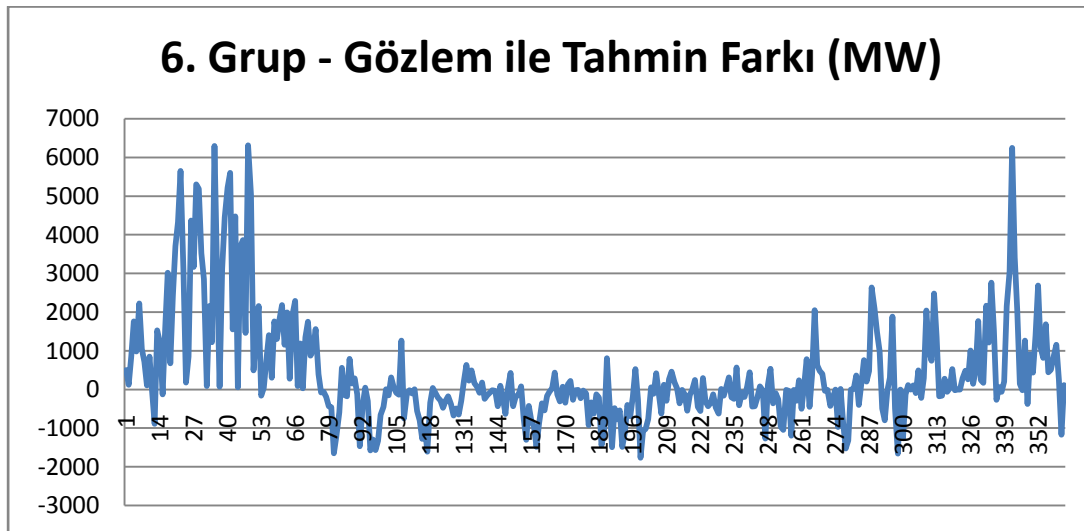
18-29 no'lu türbinler için tahmin edilen toplam gücün gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamalarının 2010 yılı boyunca değişimi Şekil 6.42'de gösterilmiştir.



Şekil 6.42 : Soma-RES sahasında 18-29 no'lu türbinler için güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları.

12 adet türbine ait toplam güç değerlerinin günlük ortalama hata değerleri incelendiğinde hata değeri kış mevsiminin dışında maksimum +2000 kW/-3000 kW iken, kışın 8000 kW değerine kadar çıkmaktadır.

30-36 no'lu türbinler için tahmin edilen toplam gücün gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamalarının 2010 yılı boyunca değişimi Şekil 6.43'de gösterilmiştir.

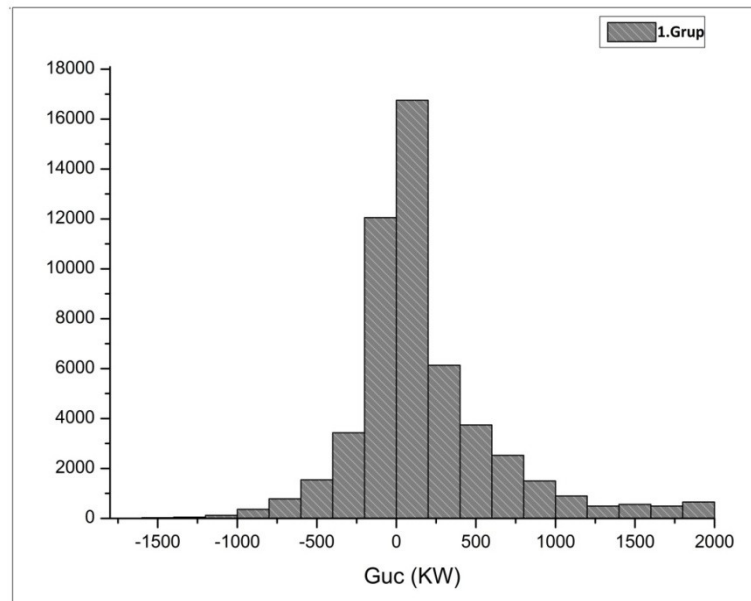


Şekil 6.43 : Soma-RES sahasında 30-36 no'lu türbinler için güç tahminlerinin gözlemlerden farkının 24 saatlik ortalamaları.

7 adet türbine ait toplam güç değerlerinin günlük ortalama hata değerleri incelendiğinde hata değeri kış ve sonbahar mevsiminde 6000 kW değerine kadar yükselirken, diğer mevsimlerde maksimum hata değeri +500/-1500 kW arasındadır.

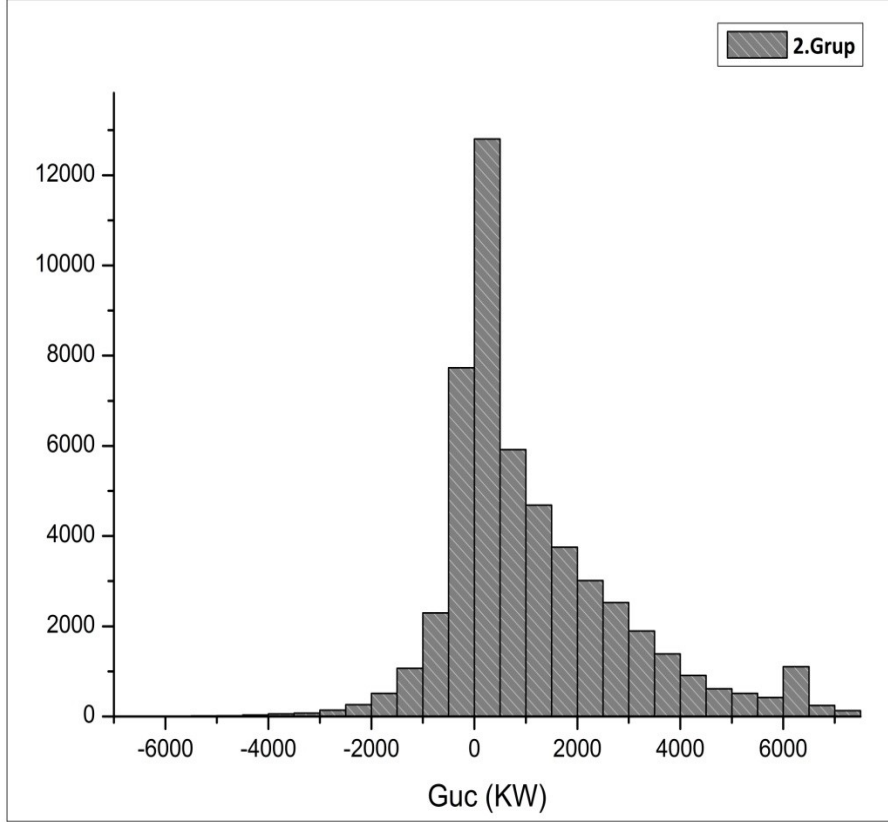
Tüm türbin grupları için durum analizi yapıldığında 17-49 ve 337-353 günler arasında model ile üretim değerleri arasında oldukça büyük fark görülmektedir. Tanımlanan günler kış dönemine karşı gelmektedir. WRF simülasyonları kış döneminde rüzgar şiddeti değerlerini gözlem değerlerine göre daha yüksek tahmin etmektedir.. Ayrıca tek tek türbin üretim değerlendirmesi yerine türbinlerin konumuna göre yapılan grup değerlendirmesi bu farkı arttırmaktadır. Türbinler rüzgar şiddeti türbinin çalışma aralığını aştığı zaman üretim yapmamaktadır. Rüzgar şiddetinin tahminlerinde türbin için kritik değer civarında yapılan 1-2 m/sn mertebesindeki düşük bir tahminde türbin üretimi durduğu, yani sıfır üretim olduğu anda, tahmin değerine göre türbin güç eğrisi dikkate alınarak hesaplanan güç değeri o türbin için maksimum değerde olacaktır. Ya da tam tersi bir durumda yani tahmin değeri kritik değerin üzerinde olduğu bir durumda tahmini güç değeri sıfır iken, türbin üretim değeri maksimum olabilir. Bu da rüzgar farkı büyük olmasa bile güç farkının maksimum olmasına neden olacaktır.

Soma-RES 1. grup türbinler için WindSim model sonuçlarına göre rüzgar gücü için hesaplanan hata frekans histogramı Şekil 6.44’de gösterilmektedir.



Şekil 6.44 : Soma-RES için WindSim modeli ile 1. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı.

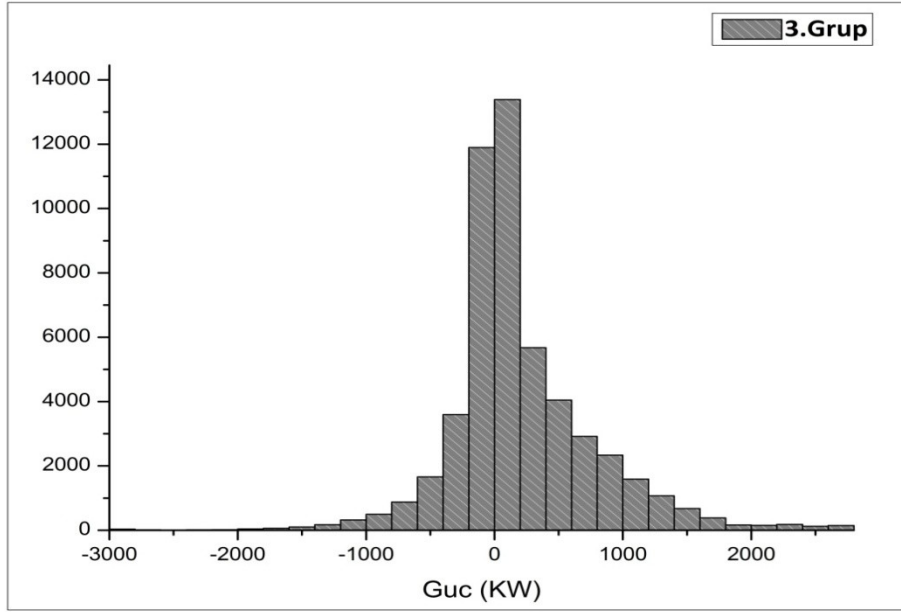
1. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı incelendiğinde yığılmanın +400/-200 kW aralığında olduğu görülmektedir. Genel olarak modelde pozitif bir yanlılık bulunmaktadır. Soma-RES 2. grup türbinler için WindSim model sonuçlarına göre rüzgar gücü için hesaplanan hata frekans histogramı Şekil 6.45’de gösterilmektedir.



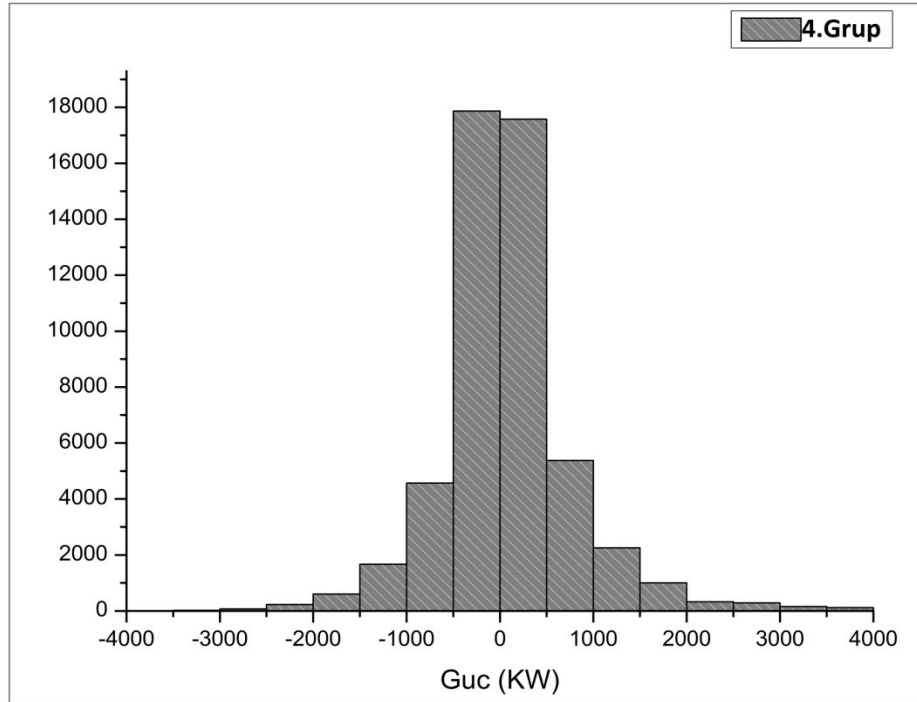
Şekil 6.45 : Soma-RES için WindSim modeli ile 2. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı.

2. Grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı incelendiğinde hatanın en fazla görüldüğü aralık +500/-500 kW dır. Hataların büyük çoğunluğu pozitif hatalardır. Yani model hep fazla tahminde bulunmuştur. Soma-RES 3. grup türbinler için WindSim model sonuçlarına göre rüzgar gücü için hesaplanan hata frekans histogramı Şekil 6.46’da gösterilmektedir.

3. Grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı incelendiğinde hatanın en fazla görüldüğü aralık +1000/-1000 kW’dir. Modelde büyük ve pozitif değerlere doğru bir yönelim görülmektedir. Soma-RES 4. grup türbinler için WindSim model sonuçlarına göre rüzgar gücü için hesaplanan hata frekans histogramı Şekil 6.47’de gösterilmektedir.

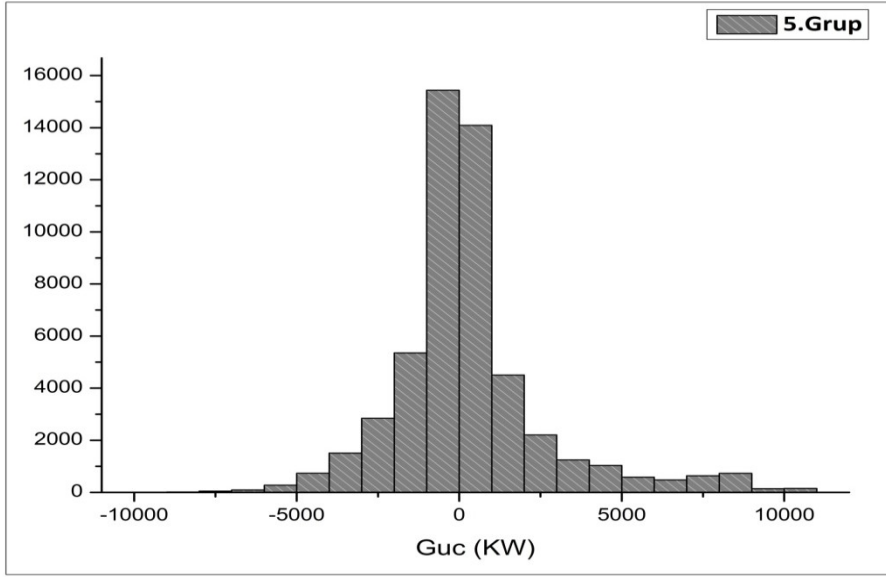


Şekil 6.46 : Soma-RES için WindSim modeli ile 3. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı.



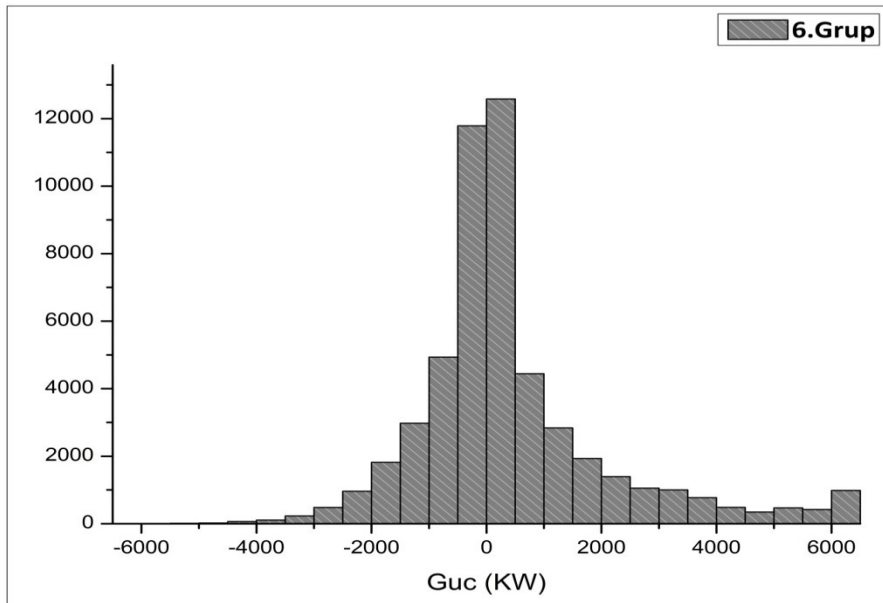
Şekil 6.47 : Soma-RES için WindSim modeli ile 4. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı

4. Grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı incelendiğinde hatanın en fazla görüldüğü aralık +500/-500 kW'dır. Soma-RES 5. grup türbinler için WindSim model sonuçlarına göre rüzgar gücü için hesaplanan hata frekans histogramı Şekil 6.49'da gösterilmektedir.



Şekil 6.48 : Soma-RES için WindSim modeli ile 5.grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı

5. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı incelendiğinde hatanın en fazla görüldüğü aralık +1000/-1000 kW'dır. Soma-RES 6. grup türbinler için WindSim model sonuçlarına göre rüzgar gücü için hesaplanan hata frekans histogramı Şekil 6.50'de gösterilmektedir.



Şekil 6.49 : Soma-RES için WindSim modeli ile 6. grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı.

6. Grup türbinler için toplam güce ait hata histogramı incelendiğinde hatanın en fazla görüldüğü aralık +500/-500 kW dır. Modelde bir pozitif yanlılık mevcuttur.

6.9 Gözlem Değerleri ile WindSim Sonuçları Arasında İlişki Kurulması

WRF modelinden alınan tahmin değerleri WindSim modeli ile tek tek türbinlerin bulunduğu koordinatlara taşınmıştır. Daha sonra her bir türbin için bu tahmin değerleri ile gözlem değerleri arasında basit regresyon analizi yapılmıştır. Ve tahmin değerleri ile gözlem değerleri arasında lineer bir ilişki kurulmuştur. Kurulan bu doğrusal ilişkinin denklemi (6.1)

$$y = a + bx \quad (6.1)$$

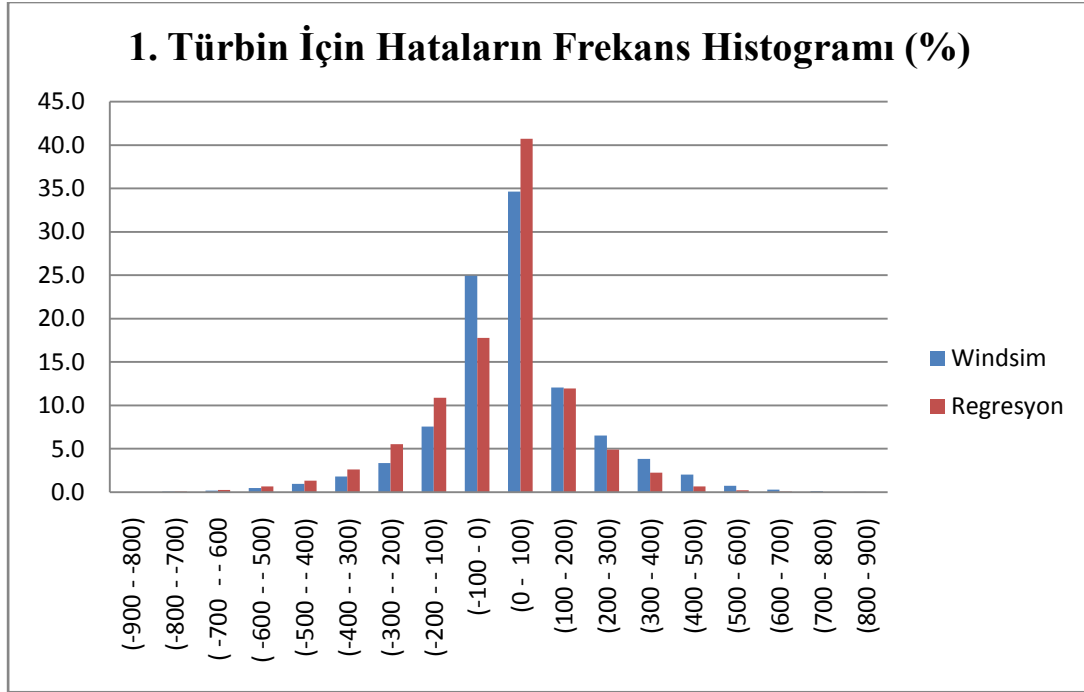
şeklinde. Burada y, gözlem değerleri x tahmin değerleri, a kesişim, b ise doğrunun eğimidir. Bu doğrusal ilişkinin verilerin ne kadarını temsil ettiğini görmek için belirlilik katsayıları hesaplanmıştır (R^2). Korelasyon katsayısının karesine belirlilik katsayısı denir. Belirlilik katsayısı, bir değişkenin diğer değişkene hangi oranda bağlı olduğunu gösteren, (Öztürkcan, 2009) Belirlilik katsayısı 0 ile 1 arasında değerler alır ve bu değer negatif olamaz. Kabul edilen bu çözümün herbir türbin için hesaplanan a ve b katsayıları ile tahmin ve gözlemler arasındaki ilişkiyi ifade eden denklemin determinasyon katsayısı Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.7 : Türbinlere taşınan verilerin a, b ve R^2 değerleri

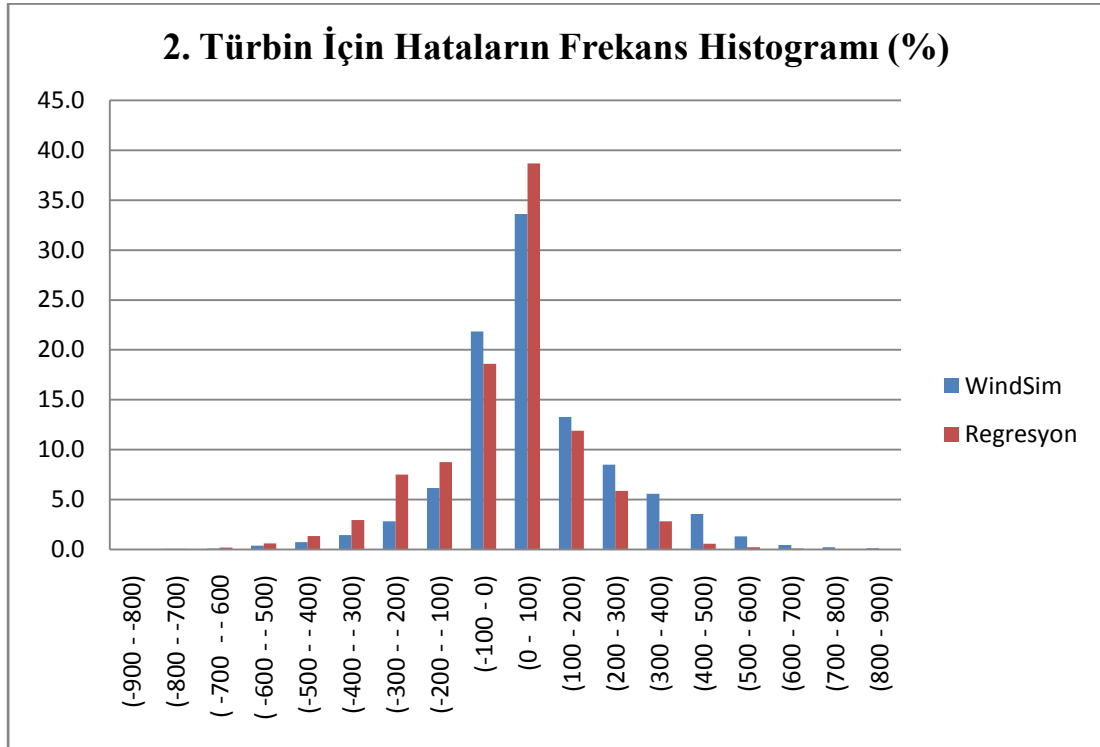
Türbin No	a	b	R^2	Türbin No	a	b	R^2
1	30,2	0,774	0,62	19	33,4	0,807	0,65
2	20,3	0,711	0,58	20	21,9	0,797	0,65
3	7,1	0,659	0,56	21	24,4	0,797	0,62
4	2,5	0,62	0,56	22	28,	0,814	0,63
5	2,2	0,611	0,57	23	34,4	0,845	0,60
6	5,8	0,639	0,58	24	21,1	0,824	0,64
7	1,2	0,592	0,56	25	48,4	0,895	0,61
8	1,1	0,582	0,56	26	48,2	0,905	0,62
9	17,0	0,634	0,58	27	53,3	0,92	0,62
10	47,8	0,794	0,66	28	66,9	0,895	0,61
11	21,3	0,734	0,63	29	76,8	0,92	0,59
12	25,8	0,767	0,65	30	37,9	0,828	0,64
13	19,7	0,732	0,64	31	29,2	0,788	0,64
14	27,5	0,787	0,65	32	47,7	0,817	0,62
15	25,8	0,774	0,64	33	52,3	0,784	0,53
16	59,6	0,867	0,66	34	33,4	0,798	0,58
17	55,0	0,877	0,67	35	27,9	0,8	0,61
18	43,4	0,834	0,67	36	42,82	0,854	0,59

Çizelge 6.7'ye göre R^2 değerleri 0,53 ile 0,68 değerler arasında değişmektedir.

Linear regresyon doğrusu Windsim sonuçlarına uygulanarak elde edilen değerler ile Windsim tahminlerinin hatalarının frekans dağılımı 1. Ve 2. Türbin için yapılmıştır (Şekil. 6.50 ve Şekil 6.51)



Şekil 6.50 : 1.Türbin İçin Hataların Frekans Histogramı



Şekil 6.51 : 2.Türbin İçin Hataların Frekans Histogramı

1. Türbin ve 2. Türbin için WindSim tahmin sonuçları ile, lineer regresyon doğrusunun veriye uygulanması ile elde edilen sonuçların gözlemlere göre bağlı hataları kıyaslanacak olursa; lineer regresyon dönüşümü ile pozitif yönelimli ekstrem hataların yüzdesi minimize edilmiş ve sıfır civarındaki hata yüzdesi ise %5 oranında artmıştır. Negatif yönelimli ekstrem hata oranlarında belirgin bir değişim gözlenmezken daha düşük aralıktaki hata yüzdelerinde ise artma vardır. Ancak 0 – (-100) aralığındaki hata yüzdesi ise model tahminlerine göre daha düşüktür.

SONUÇLAR

Ülkelerin kalkınmışlık derecesi arttıkça tükettikleri enerji miktarı da artmaktadır. Fosil kaynak rezervlerinin sonunun öngörülüyor olması, devletleri YEKlere yönlendirmiştir. YEKler içinde de rüzgar enerjisi önemli bir yer tutmaktadır. Üretilen elektriğin depolanamaması ve ulusal enerji dağıtım ağına olan katılımının sürekli ve sabit değerde olmaması nedeniyle, rüzgar enerjisi santralinin çok iyi bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bu amaçla rüzgar enerjisi santralinin bulunduğu bölgede rüzgar enerjisi tahmini yapılması çok önemli bir konuma yükselmektedir.

Bu çalışmada seçilen Soma-RES için 2010 yılını kapsayan bir yıllık periyotta onar dakikalık kısa süreli (24-48-72 saat) rüzgar enerjisi tahmini yapılmıştır. Bunun için mezo-ölçek SHT modeline bir mikro ölçek akış alan modeli adapte edilerek tahmin sistemi oluşturulmuştur. Daha sonra model çıktıları ile gözlemler arasında basit lineer regresyon analizi yapılmıştır.

Hazırlanan rüzgar enerjisi tahmin sisteminde kullanılan SHT modeli WRF, atmosferik araştırmalar ve operasyonel tahminler için hazırlanmış yeni nesil SHT'dir. Seçilen bölge için WRF modelinde girdi verisi olarak 0.25 derece çözünürlüklü ECMWF-IFS tahmin verileri kullanılmıştır. Model ile 1 km. çözünürlükte 1 yıl süreli 10 dakika aralıklı olmak üzere 72 saate kadar tahmin değerleri elde edilmiştir. Ancak bir rüzgar santralindeki türbinlerin birkaç yüz metre aralıklarla konumlandırılmış olması daha yüksek çözünürlüklü bir akış alan modelinin bu modelin çıktılarına uygulanmasını gerekli kılmaktadır. Bu amaçla kullanılan WindSim modeli, HAD tabanlı bir mikro-ölçek modeldir. Literatüre göre non-linear modeller engebeli arazilerde lineer modellere göre daha iyi sonuç vermektedir. Bu amaçla non-linear bir yöntem olan HAD'i kullanan WindSim, mikro ölçek model olarak uygulanmıştır. Elde edilen tahmin değerlerinin başarımını test etmek üzere mutlak ortalama hata değerleri hesaplanmıştır. Son olarak da Windsim sonuçlarına basit lineer regresyon uygulanarak sonuçlar iyileştirilmeye çalışılmıştır. Uygulanan yöntem sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir :

- Manisa Meteoroloji İstasyonu'nun uzun dönem aylık rüzgar şiddeti dağılımı 1.4 m/sn ile 2.3 m/sn değerleri arasındadır. Rüzgar şiddeti değerlerinin bu kadar düşük olmasının sebebi şehirleşme etkisidir.
- Bölgenin hakim rüzgar yönü, kuzey yönlerdir (345^0 ile 15^0 arasını kapsayan sektör). İkinci hakim rüzgar yönü ise güneydir (165^0 ile 225^0 arasını kapsayan sektör).
- Ortalama rüzgar şiddetinin ve ölçek parametresinin en yüksek olduğu yön, güneydir (165^0 ile 225^0 arası). Şekil parametresinin en yüksek olduğu yön ise kuzey kuzeydoğudur (15^0 ile 45^0 arası)
- Şiddeti 6 m/sn'den fazla olan rüzgarlar bölgenin geniş bir alanında etkili olmaktadır.
- Ekstrem rüzgar şiddeti değerlerine sahip günler için model sonuçları rüzgar şiddeti açısından incelendiğinde; modellerle gözlemlerin aynı salınımı gösterdiği, ilk 48 saati tahmin ederken model performansının daha iyi iken son 24 saatlik periyotta modelle gözlemler arasındaki farkın arttığı, model çıktılarının genelde gözlemlerden daha yüksek olduğu, gözlem değerlerinin yüksek değerlerden düşük değerlere doğru değiştiği saatlerde model sonuçlarının aynı değişimi göstermediği görülmektedir.
- Ekstrem rüzgar şiddeti değerlerine sahip günler için model sonuçları rüzgar yönü açısından incelendiğinde, genel olarak model çıktıları ile gözlem değerleri arasında uyumlu bir gidiş olmasına rağmen, ani yön değişiminde modelin bu değişimi yakalama süresinde bir gecikme olmaktadır.
- Bir yıllık simülasyon boyunca günlük ortalama rüzgar şiddetlerinin mutlak hatalarının bir yıllık ortalaması ilk 24 saatte 0,97 m/sn, ikinci 24 saatte 1,05 m/sn ve üçüncü 24 saatte 1,19 m/sn'dir. Mutlak hataların standart sapmaları her üç gün içinde 1 civarındadır. Eğer onar dakikalık aralıklar ile yapılan mutlak hataların günlük ortalamaları alınırsa bu değerlerin yıllık ortalamaları sırasıyla 1,68, 1,78 ve 1,90 olmaktadır. Genel olarak simülasyonlarda pozitif yanlılık mevcuttur ve tahmin edilen rüzgar şiddetleri gözlemlerden fazladır. İlk 24 saat içerisinde 52.489 tahminin %58'i, ikinci 24 saatin %59'u ve 3. 24 saatin %58'si rüzgar şiddetini daha fazla tahmin etmiştir. Rüzgar şiddetinde yapılan hatalar Mayıs-Ekim ayları arasında daha az iken kış mevsiminde bazı özel günlerde 8-9 m/sn seviyelerine ulaşmaktadır.

- WindSim model sonuçları incelendiğinde ise, türbin başına hesaplanan mutlak hata değerlerinin ilk 24 saatlik tahminler kullanıldığında daha az son 24 saatlik tahminler kullanıldığında ise daha fazla olduğu, türbin başına hesaplanan mutlak hata değerlerinin en az yaz aylarında olduğu en çok ise kış aylarında olduğu görülmüştür.
- Uygulanan basit lineer regresyon analizi ile pozitif yönelimli hatalar azalırken, negatif yönelimli hatalarda aynı başarı görülmemiştir.

Özellikle Manisa bölgesi kış aylarında Akdeniz orjinli sinoptik sistemlerin etkisinde olan bir bölgedir. Yapılan tahmin değerlerindeki hatanın kış mevsiminde daha fazla olduğu görülmektedir. Özellikle güneyli yönlerde yapılan hatalar kış aylarında artmaktadır. Kışın akdeniz orjinli sinoptik sistemler bölge üzerinde güneyli akışlarla etkili olmaktadır. Sistemlerin ardışık geçişleri esnasında rüzgar şiddetindeki periyodik değişim, bu mevsimdeki tahmin tutarlılığını etkilemektedir.

Yaz aylarında daha düşük yüzdeli tahmin hatası görülmekle birlikte, bölgenin karmaşık topoğrafik yapısı göz önüne alındığında, bölgede etkili olan anabatik ve katabatik akımların etkisiyle rüzgar şiddetinin en kuvvetli olduğu saatlerde, model alanının çözünürlüğü 1 km. olmasına rağmen, hata oranı artmaktadır. Model sonuçlarının doğruluğunu artırmak için her iki modelde de daha hassas orografî ve pürüzlülük bilgilerini içeren dijital haritaların kullanılması gerekmektedir. WindSim modeli ya da diğer HAD modellerinin daha küçük alanlarda, daha yüksek çözünürlükte ve doğru seçilmiş bir model alanı için çalıştırılması yapılan hataları en aza indirecektir. Ekstrem rüzgar durumlarında tahmin hatalarını azaltmak için model çıktı istatistik yöntemlerinin uygulanması gerkebilir. Bunun için yapay sinir ağları gibi daha gelişmiş istatistik modellerin kullanılması uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ahmet, G., Kumru, S., Kaya, M. Tuncer, İ. H.** (2010). Meteorolojik Hava Tahminleri İçin Uyumlu Dik Ayırışım (POD) Yöntemiyle Veri Asimilasyonu. *III. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı*, Eskişehir, Türkiye
- Akdağ, S.A., Dinler, A., Menteş, S.** (2007). Rüzgar Karakteristiğinin Analizi, *YEKSEM '07*, Gaziantep, Türkiye
- Arya, S.P.S.** (1988). *Introduction to Micrometeorology, Dept. Of Marine, Earth and Atmospheric Sciences*. North Carolina University, Academic Press. Inc., San Diego, California, 307 p
- Bayrakçı, C. H., Delikanlı, K.** (2007). Türkiye'de Rüzgar Enerjisi ve Potansiyel Belirleme Çalışmaları, *Mühendis ve Makina*, cilt 48, sayı 569, pp 78-80.
- Dektmk (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi)** (2010). *Enerji Raporu*.
- Doğanay, H.** (1991). *Enerji Kaynakları*, Atatürk Üniversitesi Yayınları, Sf. 189.
- Dudhia, J.** (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, 46, Sf. 3077–3107.
- EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu)** (2010). Faaliyet Raporu.
- Erec (European Renewable Energy Council)** (2010). *RE-thinking 2050*. A 100 % Renewable Energy Vision For The Eupean Union.
- ETKB (Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı)** (2010). 2010-2014 Stratejik Planı.
- Focken U., Lange, M., Waldl, H.** (2001). Previento - A Wind Power Prediction System with an Innovative Upscaling Algorithm, *European Wind Energy Conference & Exhibition (EWEC)*, Kopenhag, Danimarka
- Giebel, G., Landberg, L., Kariniotakis, G., Brownsword, R.** (2003). State-of-the-Art on Methods and Software Tools for Short-Term Prediction of Wind Energy Production, *European Wind Energy Conference & Exhibition (EWEC)*, Madrid, İspanya.
- Giebel, G.** (2010). Validation of Boundary-Layer Winds from WRF Mesoscale Forecasts with Applications to Wind Energy Forecasting, *9th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants*, Quebec.
- Gravdahl, A. R.** (1998). *Meso Scale Modeling with a Reynolds Averaged Navier-Stokes Solver*. Documentation for WindSim users.

- Hayli, S.** (2001). Rüzgar Enerjisinin Önemi, Dünya’da ve Türkiye’deki Durumu, *F.Ü. Sosyal Bilimler Dergisi*, C.11, S.1, sf. 1-26, Elazığ, Türkiye.
- Hodge, B., Zeiler, A., Brooks, D., Blau, G. Pekny, J., Reklatis, G.** (2011) Improved Wind Power Forecasting with ARIMA Models. *21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 21*, Halkidiki, Yunanistan
- Holton, J. R.** (2004). An Introduction to Dynamic Meteorology, Fourth Edition. *Elsevier Academic Press*, Kaliforniya, Amerika Birleşik Devletleri
- Hong, S.Y., Lim, J.O.J.** (2006). The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, p 129–151.
- Janjic, Z. I.** (1996). The surface layer in the NCEP Eta Model, Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19–23 August; *Amer. Meteor. Soc.*, Boston, MA, 354–355.
- Janjic, Z. I.** (2002). Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, *NCEP Office Note*, No. 437, p. 61.
- Jursa R., Rohrig R.** (2008) Short-term wind power forecasting using evolutionary algorithms for the automated specification of artificial intelligence models, *International Journal of Forecasting* 24, Sf. 694–709
- Justus, J. C., Hargraves, W. R., Mikhail, A., Graber, D.** (1978). Methods For Estimating Wind Speed Frequency Distributions, *J. Appl. Meteorology* c.17, Sf. 350–353
- Kain, J. S.** (2004). The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, Sf. 170–181.
- Karabulut, Y.** (1999). Enerji Kaynakları. Ankara Üniversitesi Basımevi, Ankara, Türkiye
- Koçak, K.** (2009), Atmosfer Bilimlerine Giriş Ders Notları. İTÜ, İstanbul, Türkiye
- Koçak, K., Aslan, A.** (2003). Süreklilik Eğrileri ile Rüzgar Hızı Persistansının Hesaplanması. *III. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu*, İstanbul, Sf. 226-234.
- Landberg, L.** (1994). *Short-term Prediction of Local Wind Conditions*. (doktora tezi), Risø-R-702(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark 1994, ISBN 87-550-1916-1.
- Linacre E.** (1992). Climate Data and Resources, *A Reference and Guide*.
- Liu, H., Shi, J., Erdem, E.** (2010). Prediction of wind speed time series using modified Taylor Kriging method. *Energy* 35 Sf. 4870-4879
- Louka, P., Galanis, G., Siebert, N., Kariniotakis, G., Katsafados, P., Pytharoulis, I., Kallos, G.** (2008) Improvements in wind speed forecasts for wind power prediction purposes using Kalman filtering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96 Sf. 2348-2362
- Malkoç, Y.** (2008). Rüzgar Enerjisi Kaynaklarımız,
- Menteş S. Ş.** (2009). Ders Notları, İTÜ, İstanbul, Türkiye

- Menteş S. Ş.** (1996). *Atmosferik Sınır Tabakanın Yüksek Mertebe Kapam Yöntemi ile Bir Boyutlu Modellenmesi* (doktora tezi), İTÜ, İstanbul, Türkiye
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J. , Brown, P. D., Iacono, M. J., Clough, S. A.** (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16663–16682.
- Sánchez,I., Usaola, J., González, G., Soto, F.** (2002). Sipreólico - a Wind power prediction system based on flexible combination of dynamic models. Application to the Spanish power system. Berlin, Almanya
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker,D. M., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W. Powers,J. G.** (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3.
- Stage, S.A. and Weller, R.A.** (1976), The frontal air-sea interaction experiment (FASINEX), *Bull. Amer. Meteor. Soc.* Vol. 67 pp. 16-20
- Stull, R.B.** (1988), An Introduction to Boundary Layer Meteorology, *Kluwer Academic Publishing*, The Netherlands, Sf. 666
- Stull, R.B.** (1994), Meteorology Today for Scientists and Engineers, *West Educational Publ.*, Minneapolis, Sf. 350.
- Taşcıkaraoğlu, A., Uzunoğlu M.** (2011). Dalgacık Dönüşümü Ve Yapay Sınır Ağları İle Rüzgar Hızı Tahmini. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu (FEEB)*, Elazığ, Türkiye.
- Tok, G.** (1999). Elektrik Üreten Değirmenler, Rüzgar Santralleri. *Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi*, sayı:381, pp. 74-77.
- Tolun, S., Menteş, S., Aslan, Z., Yükselen M.A.** (1995) The Wind Energy Potential of Gökçeada in the Northern Aegean Sea, *Renewable Energy*, cilt 6, sayı 8, pp. 679-685
- Torres J.L., Garcı, A., Blas M., Francisco, A.** (2004). Forecast of hourly average wind speed with ARMA models in Navarre (Spain). *Solar Energy* 79 Sf. 65–77,
- Uzol, S. N.** (2009). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Üç-Boyutlu Karmaşık Akış Problemlerinin Yüksek Başarımli Hesaplamaları. 1. Ulusal Yüksek Başarım ve Grid Konferansı, ODTÜ, Ankara, Türkiye
- Wallbank, T., (2008).** Windsim validation study: CFD validation in complex terrain. Documentation for WindSim users.
- Zack, J. W.** (2006), An Analysis of the Errors and Uncertaintyin Wind Power Production Forecasts, *AWEA WINDPOWER*, Pittsburg, PA, Amerika Birleşik Devletleri
- Zhu, B., Chen, M., Wade, N., Ran, L.**(2011). A prediction model for wind farm power generation based on fuzzy modeling. *International Conference on Environmental Science and Engineering (ICESE2011)*, Bali adaları, Endonezya.
- Url-1**<<http://www.belgeler.com/blg/29iv/ruzgar-enerjisi-ile-elektrik-uretimi>>, alındığı tarih: 10.02.2012.

- Url-2**<http://www.prediktor.dk/Zephyr_Prediktor_FactSheet.pdf>, alındığı tarih: 10.02.2012.
- Url-3**<http://wind.nrel.gov/public/SeaCon/Proceedings/Copenhagen.Offshore.Wind.2005/documents/papers/Wind_power_plant_control/H.Madsen_Atoolforpredictingt_hewindpowerproduction.pdf>, alındığı tarih: 10.02.2012.
- Url-4**<http://www.ressiad.org.tr/doc/EIE_Numerical Weather_Prediction_for_TSO.pdf>, alındığı tarih: 10.02.2012.
- Url-5**<http://tr.wikipedia.org/wiki/Rüzgar_Gücü>, alındığı tarih: 10.02.2012
- Url-6**<<http://www.eie.gov.tr/duyurular/YEK/YEKrepa/MANISA-REPA.pdf>>, alındığı tarih: 16.02.2012.
- Url-7**<<http://www.ewea.org/fileadmin/ewea/documents/documents/publications/statistics/Stats2011.pdf>>, alındığı tarih: 15.02.2012
- Url-8**<<http://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/sss/sayisalnedir.pdf>>, alındığı tarih: 10.02.2012.
- Url-9**<http://144.122.146.46/index.php?option=com_content&view=article&id=6&Itemid=43>, alındığı tarih: 10.02.2012.
- Url-10**<http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics>, alındığı tarih: 10.02.2012.
- Url-11**<http://tr.wikipedia.org/wiki/Navier-Stokes_denklemleri>, alındığı tarih: 10.02.2012.
- Url-12**<http://www.polatenerji.com/f_soma.php>, alındığı tarih: 10.02.2012.
- Url-13**<http://www.enercon.de/p/downloads/EN_Productoverview_0710.pdf>, alındığı tarih: 18.02.2012.
- Url-14**<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source2.html>, alındığı tarih: 22.02.2012.
- Url-15**<<http://www.soma.bel.tr/V2/soma/hakkinda.aspx>>, alındığı tarih: 22.02.2012.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Bahtiyar EFE
Doğum Yeri ve Tarihi: 03.01.1984
Adres: İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi
E-Posta: efeba@itu.edu.tr
Lisans: Meteoroloji Mühendisliği

Yayın ve Patent Listesi:

Deniz A., Toros H., Efe B., 2009, Investigation of tourism climate Index (TCI) in Turkey, International conference on Tourism Development and Management, Kos Island, Greece, 2009

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Efe, B., Menteş, S. S., Akçan, D., Tan, E., Unal, Y. S., Onol, B., Tanrıover, S., Anbarcı, K., Oner, E., Inceçik, S. (2011). Preliminary Results Of Short Term Wind Energy Prediction System (SWEPS) For The Northwestern Region Of Turkey., European Meteorological Society European Conference on Applications of Meteorology EMS&ECAM Berlin, Almanya

Akçan, D., Efe, B., Menteş, S. S., Unal, Y., Tan, E., Onol, B., Inceçik, S., Tanrıover, S., Barutcu, B., Anbarcı, K., Oner, E. (2011). Preliminary Results Of Short Term Wind Energy Prediction System (SWEPS) For Soma, Manisa In Turkey., European Geosciences Union General Assembly, Viyana, Avusturya