

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KISA SÜRELİ RÜZGAR TAHMİNİ İÇİN WRF MODEL PERFORMANSININ
ANALİZİ VE RÜZGAR GÜCÜ UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nilcan AKATAŞ

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KISA SÜRELİ RÜZGAR TAHMİNİ İÇİN WRF MODEL PERFORMANSININ
ANALİZİ VE RÜZGAR GÜCÜ UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Nilcan AKATAŞ
511121008**

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Sevinç ASİLHAN SİRDAŞ

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511121008 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Nilcan AKATAŞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KISA SÜRELİ RÜZGAR TAHMİNİ İÇİN WRF MODEL PERFORMANSININ ANALİZİ VE RÜZGAR GÜCÜ UYGULAMALARI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Sevinç ASİLHAN SİRDAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ercan İZGİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **23 Ocak 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Öncelikle, çalışmam süresince bana yardımcı olan tez danışmanım Doç. Dr. Sevinç Asilhan Sırdaş'a, değerli bilgilerini benimle paylaşan hocalarım Prof. Dr. Ahmet Duran Şahin, Doç. Dr. Ercan İzgi ve Yrd. Doç. Dr. Ahmet Öztopal'a, çalışmam süresince desteklerini benden esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Ayşegül Ceren Moral ve Aslıhan Vuruşkan'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışma ortamımı şenlendiren 307 numaralı odadaki tüm proje çalışanlarına, desteğe ihtiyaç duyduğum her an yanımda olan çok değerli arkadaşlarım ve meslektaşlarım Serhan Yeşilköy, Özgün İnceoğlu ve Özlem Baydaroğlu'na, gerek çalışmamla ilgili gerekse manevi olarak her türlü desteği veren Orçun Altınbaş'a, her zaman arkamda olduklarını bildiğim canım aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu çalışma 110G119 nolu Milli Rüzgar Enerjisi Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi (MİLRES) adlı proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

Aralık 2014

Nilcan Akataş
Meteoroloji Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	4
2. ÇALIŞMA ALANINA AİT GENEL ANALİZLER	9
2.1 Çalışma Alanı ve Kullanılan Veri	9
2.2 Veri Analizi	10
3. RÜZGAR AKIŞ MODELLERİ.....	17
3.1 WAsP	17
3.2 MeteodynWT	17
3.3 Model Uygulamaları	20
3.3.1 WAsP uygulaması.....	20
3.3.2 MeteodynWT uygulaması.....	25
3.3.3 WAsP ve MeteodynWT ile enerji üretim çıktılarının belirlenmesine yönelik rüzgar tarlası tasarımı.....	30
4. KISA SÜRELİ RÜZGAR TAHMİNİ	35
4.1 WRF Modeli.....	35
4.1.1 WRF-ARW başlangıç ve sınır koşulları	35
4.1.2 WRF-ARW sonuçlarının karşılaştırılması	41
4.1.2.1 Dış yuvalamadaki tahminler	41
4.1.2.2 Orta yuvalamadaki tahminler	44
4.1.2.3 İç yuvalamadaki tahminler	47
4.1.3 WRF-ARW tahmin hataları	50
4.1.4 Yapay Sinir Ağları ile WRF-ARW tahminlerin iyileştirilmesi	50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
5.1 Genel Analiz Sonuçları	57
5.2 Rüzgar Akış Modelleri Uygulama Sonuçları	58
5.2.1 WAsP uygulama sonuçları.....	58
5.2.2 MeteodynWT uygulama sonuçları.....	58
5.2.3 WAsP – MeteodynWT karşılaştırma sonuçları	59
5.3 WRF-ARW ile Kısa Süreli Tahmin Sonuçları	60
5.4 Yorum ve Öneriler	61
KAYNAKLAR	63
EKLER.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	71

KISALTMALAR

ACM2	: Asymmetrical Convective Model Version 2 (Asimetrik Konvektif Model, Sürüm 2)
CCS	: Carbon Dioxide Capture and Storage (Karbondioksit Yakalama ve Depolama)
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
MİLRES	: Milli Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi
MRF	: Medium Range Forecast Model (Orta Vadeli Tahmin Modeli)
MYJ	: Mellor – Yamada – Janjic
NCAR	: National Center for Atmospheric Research (Ulusal Atmosferik Araştırma Merkezi)
NCEP	: National Centers for Environmental Prediction (Ulusal Çevresel Tahmin Merkezi)
PBL	: Planetary Boundary Layer (Gezegensel Sınır Tabaka)
PDF	: Probability Distribution Function (Olasılık Dağılım Fonksiyonu)
QC	: Bulut-Su Karışma Oranı
QI	: Bulut-Buz Karışma Oranı
QKE	: Türbülanslı Isı Akısı
RaNS	: Reynolds Averaged Navier Stokes (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes)
RMSE	: Root Mean Square Error (Ortalama Karekök Hata)
TKE	: Türbülans Kinetik Enerjisi
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
WAsP	: Wind Atlas Analysis and Application Program (Rüzgar Atlası Analiz ve Uygulama Programı)
WRF-ARW	: The Weather Research and Forecasting / Advanced Research (Hava Analizi ve Tahmini / Gelişmiş Araştırma)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : MeteodynWT’de tanımlanan kararlılık sınıfları.....	20
Çizelge 3.2 : WAsP’ta belirlenmiş pürüzlülük uzunluğu değerleri	22
Çizelge 3.3 : Rüzgar Türbin Sınıfları için Rüzgar Hızı Parametreleri	31
Çizelge 3.4 : Rüzgar türbini ve tarlası tasarımı için üretim çıktıları	34
Çizelge 4.1 : WRF-ARW mikrofizik seçenekleri.....	37
Çizelge 4.2 : WRF-ARW başlangıç koşulları.....	38
Çizelge 4.3 : Yer yüzeyi fiziki seçenekleri.....	38
Çizelge 4.4 : WRF-ARW PBL şemaları.....	40
Çizelge 4.5 : Şubat ayına ait tahminler için ortalama karekök hatalar	50
Çizelge 4.6 : Mart ayına ait tahminler için ortalama karekök hatalar	51
Çizelge 4.7 : YSA Sonuçları.....	54
Çizelge 4.8 : Tahmin ve gözlem sonuçları arasındaki korelasyonlar	55

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Türkiye rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı	2
Şekil 1.2 : İşletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel dağılımı alışıma alanı	3
Şekil 2.1 : Çalışma alanı	9
Şekil 2.2 : Ölçüm Direği	10
Şekil 2.3 : Sabit ortalama rüzgar hızı için (8 m/s) Weibull dağılımı ve değişen k değerleri.....	11
Şekil 2.4 : Düşey rüzgar kayması profili	12
Şekil 2.5 : Frekans dağılım fonkiyonları: (a) 81 metre (b) 80 metre (c) 65 metre (d) 40 metre (e) 20 metre (f) 10 metre	13
Şekil 2.6 : Günlük ortalama rüzgar şiddetleri	14
Şekil 2.7 : Aylık ortalama rüzgarı şiddetleri.....	14
Şekil 2.8 : Rüzgar şiddetlerinin ortalama günlük profili	15
Şekil 2.9 : Rüzgar gülü: (a) 65 metre (b) 20 metre	15
Şekil 3.1 : Dijital harita WASP görüntüsü	21
Şekil 3.2 : Çözünürlük haritası	21
Şekil 3.3 : Pürüzlülük haritası.....	23
Şekil 3.4 : WASP ortalama rüzgar hızı haritası.....	24
Şekil 3.5 : WASP ortalama enerji yoğunluğu haritası.....	25
Şekil 3.6 : Dijital harita MeteodynWT görüntüsü	26
Şekil 3.7 : Düşey rüzgar kayması grafiği.....	27
Şekil 3.8 : MeteodynWT ortalama rüzgar hızı haritası.....	28
Şekil 3.9 : MeteodynWT türbülans yoğunluğu haritası.....	29
Şekil 3.10 : MeteodynWT enerji yoğunluğu haritası.....	30
Şekil 3.11 : Türbin görüntüsü	32
Şekil 3.12 : Güç eğrisi	33
Şekil 3.13 : Rüzgar tarlası görüntüsü.....	33
Şekil 4.1 : WRF-ARW yuvalama yapılandırması	36
Şekil 4.2 : WRF-ARW yüzey fiziği bileşenleri	40
Şekil 4.3 : Dış yuvalamada WRF-ARW tahmin örneği	42
Şekil 4.4 : Dış yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).....	43
Şekil 4.5 : Dış yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi).	43
Şekil 4.6 : Dış yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).....	44
Şekil 4.7 : Dış yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi).	44
Şekil 4.8 : Orta yuvalamada WRF-ARW tahmin örneği.....	45

Şekil 4.9 : Orta yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).....	45
Şekil 4.10 :Orta yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi)	46
Şekil 4.11 : Orta yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).....	46
Şekil 4.12 : Orta yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi).	47
Şekil 4.13 : İç yuvalamada WRF-ARW tahmin örneği.	47
Şekil 4.14 : İç yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).....	48
Şekil 4.15 : İç yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi).	48
Şekil 4.16 : İç yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).....	49
Şekil 4.17 : İç yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi).	49
Şekil 4.18 : Yapay sinir hücresi	52
Şekil 4.19 : 1 saatlik YSA sonuçları(eğitim)	53
Şekil 4.20 : 1 saatlik YSA sonuçları(test).....	53
Şekil 4.21 : 6 saatlik YSA sonuçları(eğitim)	53
Şekil 4.22 : 6 saatlik YSA sonuçları(test).....	54
Şekil A.1 : Bölgesel haritalar: 65 metredeki yön verilerine göre rüzgar gülleri: (a)Ocak. (b)Şubat. (c)Mart. (d)Nisan. (e)Mayıs. (f)Haziran. (g)Temmuz. (h)Ağustos. (i)Eylül. (j)Ekim. (k) Kasım. (l)Aralık	68
Şekil A.2 : Bölgesel haritalar: 20 metredeki yön verilerine göre rüzgar gülleri: (a)Ocak. (b)Şubat. (c)Mart. (d)Nisan. (e)Mayıs. (f)Haziran. (g)Temmuz. (h)Ağustos. (i)Eylül. (j)Ekim. (k) Kasım. (l)Aralık	69

KISA SÜRELİ RÜZGAR TAHMİNİ İÇİN WRF MODEL PERFORMANSININ ANALİZİ VE RÜZGAR GÜCÜ UYGULAMALARI

ÖZET

Günümüzde küresel iklim değişiminin etkilerinin hissedilebilir hale gelmesi ve bu etkilerin büyük kısmının antropojenik kaynaklı fosil yakıtlardan meydana gelmesi sebebiyle, temiz enerji kaynaklarına olan ilginin artması kaçınılmaz olmuştur. Rüzgar enerjisi de bu kaynaklardan biridir. Bu nedenle özellikle son yıllarda rüzgar türbini ve tarlalarının kurulması için belirlenen bölgelerde yapılan analizler ve sınır tabakadaki rüzgar tahminleri literatürde önemli yer tutmaktadır. Bu analiz ve tahminler, temiz enerji sistemlerinin kurulacağı bölgelerin potansiyellerini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Sistemlerin kurulum maliyetleri yüksek olduğundan, ilerki dönemlerde kayıpların en az olması için yapılan bu ön çalışmalar önem taşımaktadır.

Bu çalışmada TÜBİTAK projeleri arasında yer alan Milli Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi (MİLRES) adlı proje kapsamında Terkos (Durusu) bölgesinde yer alması planlanmış ilk milli türbin olma özelliği taşıyan rüzgar türbini için, aynı bölgede kurulmuş 81 metrelik ölçüm direğinden alınan verilerin analizinin ve sınır tabaka için kısa süreli rüzgar tahminin yapılması amaçlanmıştır.

Çalışmada, İstanbul'un kuzeybatısında $41^{\circ} 18'$ kuzey enlemi ve $28^{\circ} 39'$ doğu boylamlarında, deniz seviyesinden 51 m yükseklikte bulunan Durusu bölgesinde yer alan ölçüm direğinin farklı seviyelerden alınan rüzgar hızı ve yönü verisi ile bölgedeki rüzgarlara ait analizler yapılmıştır. Rüzgar verisi, ölçüm direğinin 20, 40, 65, 80 ve 81 metrelerinden 10'ar dakikalık olarak kayıt edilmiştir ve 1 Ağustos 2012-1 Ağustos 2013 dönemini kapsamaktadır. Ölçüm direğinden alınan farklı seviyelerin rüzgar verisine ait histogramlar çıkarılarak rüzgar hızlarının bağıl frekanslarını bulmada kullanılan Weibull dağılımı ve parametreleri belirlenmiştir.

Yapılan istatistiksel çalışmalarla verinin klimatolojik bilgisi çıkarılmış, hakim rüzgar yönleri ve zaman serileri grafiklere dökülmüştür. Bölge için hakim rüzgar yönleri kuzeydoğu ve güneybatı olarak saptanmıştır. Mevsimsel analizler, kış aylarında rüzgar hızlarının yaz aylarına göre daha yüksek olduğunu ve en yüksek değerlerin Ekim, Kasım ve Şubat aylarında olduğunu göstermiştir. Rüzgarların aylık ortalama değerlerine bakıldığında, rüzgar hızlarının yaz aylarına doğru düştüğü, sonbahar aylarında yeniden yükseldiği görülmüştür. Bunların yanısıra günlük ortalama rüzgarlar 20 m'den 81 m'ye kadar yaklaşık 4 m/s ile 7 m/s arasında değişmektedir.

Analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak, bölgede kurulması planlanan 500 kW'lık rüzgar türbininin konum tespiti için Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP) kullanılmıştır. Bölgenin topografyası ve yüzey şartları göz önünde bulundurularak pürüzlülük haritası çıkartılmış ve programda kullanılmıştır. Bu programla elde edilen rüzgar atlasları daha sonra CFD model olan MetodynWT ile de elde edilerek kıyaslamaları yapılmıştır. Böylece, lineer bir akış modeli olan WASP

ile hesaplamalı akışkanlar dinamiğini içeren MeteodynWT sonuçları arasındaki farklar irdelenmiştir. WAsP'in atmosferi kararlı kabul ettiği varsayımın aksine, MeteodynWT Monin-Obukhov uzunluğuna dayanan farklı kararlılık koşullarına göre çalışabilmektedir. Bu nedenle, MeteodynWT modeli için öncelikle düşey rüzgar kaymasına göre atmosferin kararlılık durumu araştırılmıştır. Atmosferin kararlılık durumu nötre yakın olarak tespit edilmiş, sonuçlar buna göre belirlenmiştir.

WAsP ve MeteodynWT'de kullanılan dijital harita, 63 km²'lik alanı kapsamaktadır. Harita, 50 metre yatay çözünürlüklü gridlerle oluşturulmuştur ve harita üzerinde izohipsler 3'er metre aralıklarla gösterilmiştir.

Her iki model için de sonuçlar, kurulacak türbinin 65 metredeki hub yüksekliği göz önünde bulundurularak elde edilmiştir. WAsP sonuçlarına göre arazi üzerinde ortalama rüzgar hızları 65 metre için 5.13 m/s ile 7.64 m/s arasındadır. MeteodynWT'de 65 m'deki rüzgar hızları WAsP sonuçlarına benzer olarak 5.20 m/s ile 7.60 m/s olarak hesaplanmıştır. Enerji yoğunlukları ise WAsP'ta bölge üzerinde 157 W/m² ile 525 W/m² değerleri arasında değişkenlik gösterirken MeteodynWT'de 189 W/m² ile 476 W/m² arasında değişmiştir. MeteodynWT'de WAsP'a ek olarak bölge genelinde türbülans yoğunluğu haritası elde edilmiştir.

Çalışmada, Terkos bölgesi için yapılan örnek bir uygulama olarak 500 kW gücünde Enercon E40 tipi türbinden faydalanılarak üretim çıktıları WAsP ve MeteodynWT programlarının her ikisinde de hesaplanmıştır. Bir diğer örnek uygulamada 500 kW gücünde 5 türbinle toplamda 2.5 MWh kurulu güce sahip rüzgar tarlası tasarlanarak üretim çıktıları yeniden iki programda da hesaplanmıştır. Kapasite faktörü her iki örnek uygulama için de yaklaşık %25 olarak hesaplanmıştır. 500 kWh'lik kurulu güç için üretim değerleri WAsP'ta yılda 1104 MW, MeteodynWT'de ise yılda 1113 MW olarak hesap edilmiştir. Rüzgar tarlası örneği için bu değerler yılda 5467 MW ve 5510 MW'tır.

Çalışmanın bir diğer bölümünde ise orta vadeli kısa süreli sayısal hava tahmin modeli olan The Weather Research and Forecasting-Advanced Research (WRF-ARW) ile sınır tabakadaki rüzgar tahminleri yapılmıştır. Atmosferin kararlılık durumuna göre çeşitli tarihler belirlenerek, bu tarihlere ait birer saatlik çıktılar halinde üçer günlük ve onar günlük periyodlar için rüzgar tahminleri elde edilmiştir. Model, 6 farklı başlangıç koşuluyla çalıştırılmıştır. Modelin sonuçları gözlem verileriyle karşılaştırılarak hangi başlangıç koşulunun bölge için daha iyi çalıştığına bakılmıştır.

WRF-ARW tahminleri için ilk olarak 1-4 Şubat ve 1-4 Mart günleri için farklı başlangıç koşullarıyla yapılan tahmin sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlar WRF-ARW modelinde seçilen çalışma alanında dış, orta ve içteki yuvalamalar için yapılan tahminleri ayrı ayrı içermektedir. WRF-ARW tahminlerinin gözlem verisiyle karşılaştırılabilmesi için düğüm noktalarındaki tahminler en yakın komşu (nearest neighbour) ve ağırlıklı ortalama (weighted average) yöntemleriyle Terkos'ta ölçüm direğinin olduğu noktaya taşınmıştır. Tahminlerdeki hatalar RMSE ile belirlenmiş, hataların azaltılabilmesi için WRF-ARW tahminlerinin farklı sonuçları için Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi kullanılmıştır. YSA ile hataların düşürülmesi amaçlanmıştır. 1 saatten 6 saate kadar elde edilen YSA sonuçları, başlangıçta model sonuçları ile gözlemler arasındaki düşük korelasyonların yükselmesini, bu yolla hataların azalmasını sağlamıştır. YSA ve benzer yöntemler ham model çıktılarındaki hataların azaltılmasında ve rüzgar enerjisi tahminlerindeki tutarlılığın artırılmasında etkin olarak kullanılabilir.

ANALYSIS OF WRF MODEL PERFORMANCE FOR SHORT-TERM WIND PREDICTION AND WIND POWER APPLICATIONS

SUMMARY

Recently, global climate change effects due to antropogenic pollutants, are much more obvious. This situation has caused increasing interest in clean energy resources like wind, solar, geothermal, tidal etc. Wind energy has become one of the most progressive clean energy around the world. Thus, especially in recent years, wind analyzes in a certain area before wind turbine or wind farm applications, widely take place in the literature. In addition, statistical analyzes and predictions are crucial for wind power studies. All these analyzes form the basis of determination of potential for regions where clean energy systems will be built. Due to high system installation costs, these preliminary studies are important in order to minimize the financial losses.

In this study, data was taken from a measurement mast which was established in the area where the first national turbine will take place within a TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) project called “Development of National Wind Energy Systems and Prototype Turbine Production”. The measurement mast stands in the northwest of İstanbul at 51 meters height from the sea level. Latitude and longitude of the mast is $41^{\circ} 18' N$ and $28^{\circ} 39' E$. Temperature, pressure and wind data are measured at 81 meters, 80 meters, 65 meters, 40 meters and 20 meters on the mast. Measurement devices have been working properly through a solar panel that is mounted at 3 meters. The main purpose of the study is analyzing the wind characteristic of Terkos Region and providing base for the future studies by making short-term prediction about wind energy.

In the first part of the study, exploratory data analysis was performed to summarize and visualize the characteristics of the data set covering the period between August 1, 2012 and August 1, 2013. Data from different levels of the measurement mast was used for obtaining probability distribution function. Then, Weibull distribution and Weibull parameters that are used to find the relative frequencies of wind speeds were determined. Then, prevailing wind direction and time series were plotted on the graphs by using Windographer. The prevailing wind directions of the region were identified as the northeast and southwest. Moreover, seasonal, monthly and daily time series were examined. Seasonal analyzes showed that wind speeds are higher in winter season than summer season. The highest wind speeds are respectively on October, November and February. Monthly analyzes indicated that wind speeds decrease towards the summer, and then rise again in the autumn. Besides, daily mean wind values changes between approximately 4 m/s and 7 m/s.

In the next section, using the results obtained from the analysis, Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP) was performed in order to determine the wind

potential of the region. Roughness map was derived by considering area topography and surface types and then given as a background map for WAsP. Spatial wind speed and wind power distributions were obtained and showed on the maps. These maps were compared with the same distribution maps obtained from a CFD model, MeteodynWT. The differences of the outputs from these two different model were examined. In the computations, WAsP has an assumption that the atmosphere is stable. Contrary to this assumption, MeteodynWT can be operated under different atmospheric stability conditions. MeteodynWT decide the stability condition based on Monin-Obukhov length. Thus, atmospheric stability was investigated primarily before running the model by the vertical wind shear. The stability condition of the atmosphere for study period was determined as close to neutral, and the results were determined accordingly. The results on the maps were obtained for 65 m in both two models considering the turbines which have been planning to establish with 65 m hub height.

Furthermore, because MeteodynWT is a CFD model, small changes can be included to the computations. Micro-scale events like turbulence can also be studied according to turbulent kinetic energy (TKE) budget equation. Hence, turbulence intensity map was also showed across the region. Digital map used in both WAsP and MeteodynWT covers 63 km² area. The map was created by using grids that have 50 meters horizontal resolution. The contour lines on the map was shown with 3 m intervals. These contour lines reveal the topography of the study area.

According to WAsP results, mean wind speeds on the area are between 5.13 m/s and 7.64 m/s on 65 m. On the same level, MeteodynWT results are similar to WAsP results. Mean wind speeds change from 5.20 m/s to 7.60 m/s over the region. Referring to the wind power density, it varies between 157 W/m² and 525 W/m² with reference to WAsP results. However, according to MeteodynWT outputs, wind power density values change between 189 W/m² and 476 W/m² throughout the region.

An example of wind turbine application on the region, a 500 kW Enercon E40 type turbine was placed on the terrain and then wind energy production outputs were derived in both WAsP and MeteodynWT. In second designed, a wind farm that has 2.5 MWh of installed capacity of wind power, was applied on the terrain with five 500 kW Enercon E40 type turbines. Energy production outputs were calculated in two models again. Consequently, capacity factor was calculated as approximately 25% for both examples. Energy production of first application for the installed capacity of 500 kWh was calculated as 1104 MW per year in WAsP. This value was found as 1113 MW per year in MeteodynWT. For second wind farm design, these values are 5467 MW per year in WAsP and 5510 MW per year in MeteodynWT.

The last part of the study consists of the short-term wind prediction by using modern mesoscale numerical prediction model, The Weather Research and Forecasting (WRF). The model has two dynamical core variants named nonhydrostatic mesoscale (NMM) and advance research (ARW). NMM is used for making operational forecasts while ARW is used for both meteorological research and numerical weather prediction. In this study, WRF-ARW version 3.3.1 was used. 3 day periods were chosen in order to obtain wind predictions on February and March. The predictions were achieved in case of one hour outputs. The model was run with 6 different initial conditions including microphysics, cumulus parametrization, planetary boundary layer (PBL) and atmospheric radiation physics schemes. The model results were

downscaled to the latitude and longitude where measurement mast stands in Terkos, and then compared to the observation data.

Firstly, for February 1-4 and March 1-4 results were obtained with 6 different parametrizations of WRF. NCEP Final Operational Model Global Tropospheric Analyses data set with 6-hour interval, was used as initial data. Domain configuration was set up with 3 nested domains with 30 km, 10km and 3 km horizontal resolution, respectively. The model includes 28 vertical levels. Coarser domain covers an area between 33° N and 49° N latitudes and 19° E and 39° E longitudes where contains Turkey and some parts of Eastern Europe. The middle domain involves Marmara region located in the northwest of Turkey. The inner domain has an area including Terkos region. Errors for each parametrizations on each domains were determined by RMSE. On the purpose of reducing the errors, artificial neural network (ANN) was performed by using WRF-ARW results with different initial conditions.

WRF results showed that, focusing on the study area with higher resolution provides that predictions converge to the observations. Another result is that where wind speeds are high, predictions are more consistent with the observations. Given the initial conditions, parametrizations indicated as “WRF-1” in the study, has closer prediction results to observation data. In addition, in the inner domain, RMSE values are less than other domains due to higher spatial resolution. However, predictions have high errors that cannot be underestimated for all situations. Thus, in order to have more consistent results, using micro-scale prediction models may be more applicable especially in wind predictions. Because, wind is quite variable even very short time. This situation makes wind predictions hard when comparing with more stable variables, such as temperature.

ANN results have made the correlation between model results and observations higher, so that reduced the errors of the model results. ANN study has showed that using WRF-ARW model results without post processing may lead to errors or inconsistent results. Thus, evaluating the model results in order to make more correct them in some methods is crucial, especially studies made for economical purposes.

As a result, physical schemes based on different calculations and assumptions cause different model results. On the other hand, combination of consistent aspects of model results obtained from different physical schemes by some methods like ANN, can improve the correlations between forecasts and observations and reduce the errors.

As a summary, in a wind energy or wind analysis study, the general characteristics of local winds and its effects should be examined in detail. For energy production in a selected area, appropriate turbine selection and the deployment of the turbine in the right place are important issues both in terms of using the natural sources efficiently and in terms of provision of financial gains. For the same purposes, short-term wind forecasts are also important. Another and the most important issue is having proper measurement systems both for analyzing the winds locally, and evaluating the success of model results by comparing them with reliable observation data. Thus, in this study, general and detailed information about local winds of Terkos Region were obtained by using measurements on the area, and then forecast performance of WRF model was evaluated with including the correction of different model forecasts by ANN method with a view to shed light on the establishment of wind energy systems which may locate on Terkos Region.

1. GİRİŞ

Günümüzde tüm dünyada sanayileşme ve şehirleşmenin artması, enerji talebinde artışı beraberinde getirmiştir. Enerji üretiminde kullanılan kaynakların tükenebilir olması ve bunun yanında çevreye verdiği zararlardan ötürü temiz enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz olmuştur. Rüzgar da bu kaynaklardan biridir. Rüzgar enerjisinin çevre için en olumlu etkilerinden biri fosil yakıtların yanması sonucu oluşan sera gazları salınımına neden olmamasıdır. Bunun yanı sıra rüzgar enerjisi kullanımının yaygınlaşması fosil yakıt tüketimini azaltacağından, kirlletici madde emisyonlarını da azaltacaktır.

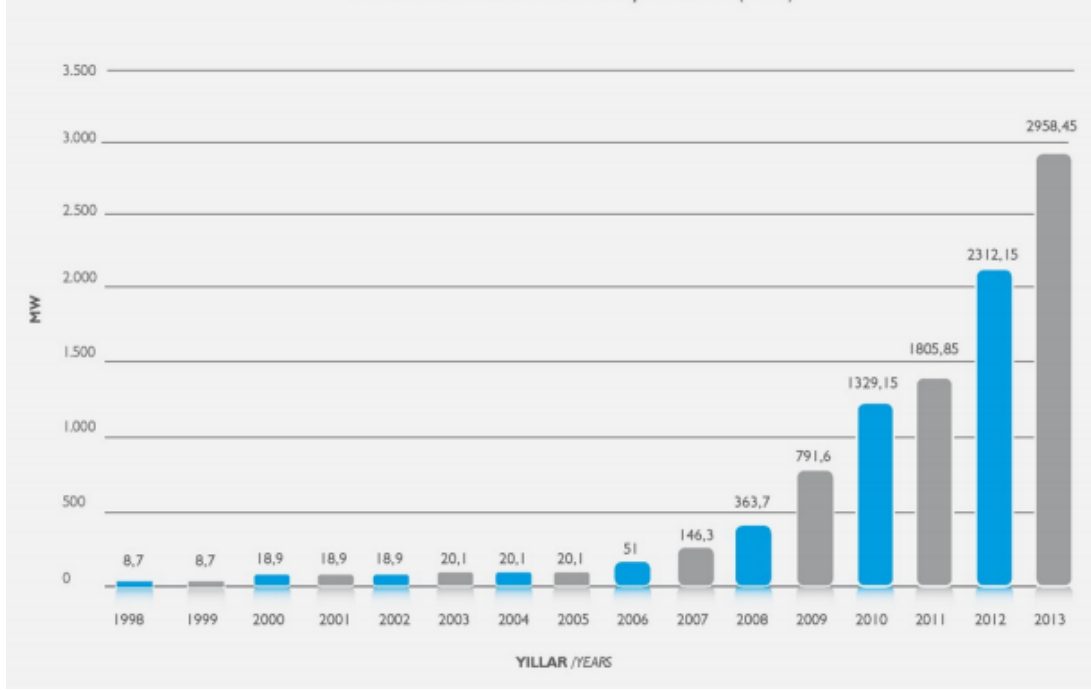
Türkiye bulunduğu enlemden dolayı atmosferin genel sirkülasyonunun meydana getirdiği kuzeyli rüzgarların etkisi altındadır. Bunun yanı sıra üç tarafının denizlerle çevrili olması ve özellikle doğusundaki yüksek bölgeler ve vadiler nedeniyle yüksek rüzgar enerjisi potansiyeline sahip bir bölgedir. Türkiye'nin brüt rüzgar potansiyelinin yılda 400 milyar kWh, teknik potansiyelinin ise 120 milyar kWh olduğu düşünülmektedir [1].

Türkiye’de rüzgarın enerji için önemli rol oynadığının kanıtları çok eski zamanlara dayanmaktadır. Truva antik kentinde yel değirmenlerinin kullanıldığı bilinmekte fakat Anadolu’da ilk yel değirmenlerinin ne zaman kurulduğu tam olarak bilinmemektedir [2]. Rüzgar enerjisi yoluyla genel kullanım amacıyla elektrik üretimi Türkiye’de ilk kez 55kW’lık enerji kapasitesiyle İzmir’de, Çeşme Altinyunus Resort Hotel’de 1986 yılında gerçekleştirilmiştir [3]. Türkiye’nin ilk rüzgar enerji santrali de aynı şehirde 1998 yılında Demirer Holding tarafından Çeşme-Germiyan bölgesinde kurulan Alize Germiyan santralidir. 3 adet türbinden oluşan tesisin kurulu gücü 1.5 MW’tır [4].

Global Wind Energy Council (Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi) tarafından yayınlanan Küresel Rüzgar Raporu’na göre, 2012’nin sonunda 138 ülke çeşitli yenilenebilir enerji hedeflerini uygulamaya koymuş, 2013’ün sonunda 2012 yılında 1470 GW olan toplam kurulu güce 35.5 GW rüzgar gücü eklenmiştir. Türkiye’de ise

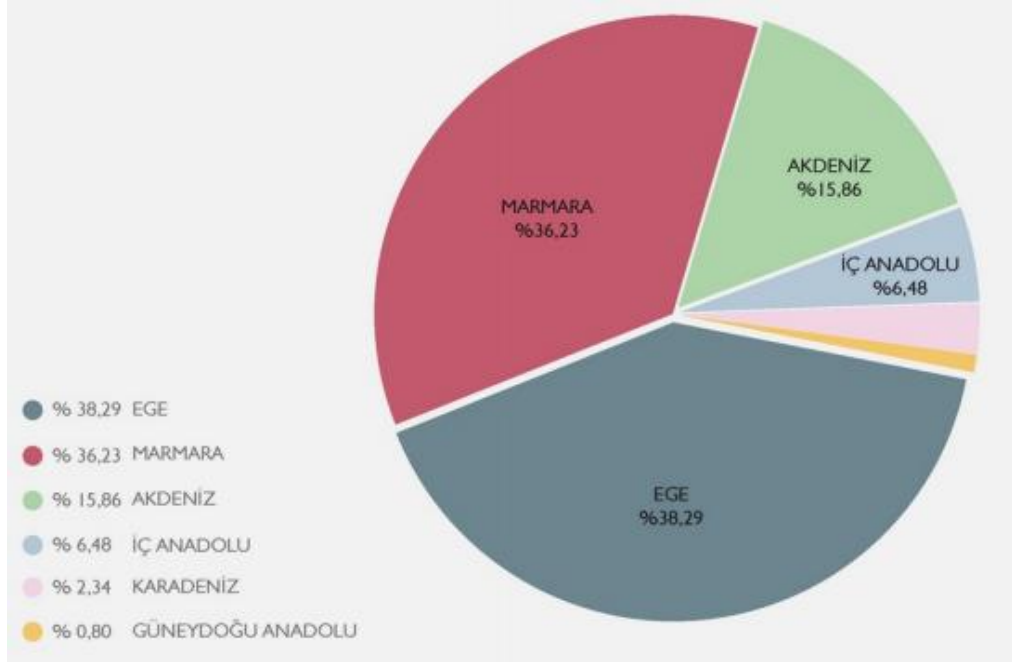
2012 sonunda 2312 MW olan toplam kurulu güce 2013 yılında 646 MW daha eklenmiş ve 2013 yılı sonunda toplam kurulu güç 2959 MW'a yükselmiştir [5].

TÜREB (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği)'nin Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu'nda Türkiye'de yıllara göre kurulu kümülatif güç dağılımları verilmiştir (Şekil 1.1). Buna göre, özellikle 2005 yılından sonra rüzgar enerjisi santrali kurulumunda yüksek bir artış göze çarpmaktadır [6].



Şekil 1.1 : Türkiye rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı [6].

Bölgelere göre işletmede olan enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yüzdesel dağılımına bakılırsa (Şekil 1.2) Ege Bölgesi %38.29 ile ilk sırada, Marmara Bölgesi %36.23 ile ikinci sırada yer almaktadır. En düşük yüzdeye sahip bölge %0.80 ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi'dir.



Şekil 1.2 : İşletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel dağılımı [6].

Enerji kaynaklarını çeşitlendirmek, dışa bağımlılığı azaltarak kendi enerji kaynaklarını en verimli şekilde kullanmak özellikle gelişmekte olan ülkeler için önem taşımaktadır. Ekonomik çıkarların yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklarının diğer enerji kaynaklarına göre çok daha temiz olması çevre için de önemlidir. Küresel iklim değişiminin başlıca sebeplerinden olan fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının birincil enerji kaynakları içinde tüm dünyada baş sıralarda olması, uzun vadede iklim değişimine bağlı çevresel bozulmaların daha da artmamasında veya azalmasında rol oynayacaktır. IPCC'nin 5. Değerlendirme Sentez Raporu'na göre küresel ısınmanın muhtemelen 2°C'nin altında kalacağını öngören senaryolar, enerji verimliliği ile hızlı iyileştirmelerle birlikte enerji temininde sıfır veya düşük karbon salınlı yenilenebilir enerji, nükleer enerji, karbon yakalama ve depolama (CSS) ile fosil enerji ve CSS ile biyoenerji (BECCS)'nin 2050 yılına kadar yaklaşık 4 katına çıkarılmasını içermektedir [7].

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada TÜBİTAK projeleri arasında yer alan Milli Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi MİLRES projesi kapsamında Durusu (Terkos) Bölgesinde yer alması planlanmış ilk milli türbin olma özelliği taşıyan rüzgar türbini için, aynı bölgede kurulmuş 81 metrelik ölçüm direğinden alınan

verilerin ve türbin kurulması planlanan bölgenin analizi ile sınır tabaka için kısa süreli rüzgar tahminin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak Windographer ile bölgenin rüzgar karakteristikleri çıkarılarak ortalama rüzgar hızları, dağılımları, hakim rüzgar yönleri gibi bilgilere ulaşılması amaçlanmıştır. Daha sonra bölgede kurulması planlanan 500 kW'lık rüzgar türbininin konum tespiti için WAsP kullanılarak elde edilen rüzgar atlasları MeteodynWT ile elde edilen sonuçlarla, lineer bir akış modeliyle CFD model arasındaki farkların ve sonuçların bölge içindeki tutarlılıklarının irdelenmesi amacıyla kıyaslanmıştır. Çalışmanın bir diğer bölümünde sayısal hava tahmin modeli WRF-ARW ile 6 farklı başlangıç koşuluyla sınır tabakadaki rüzgar tahminleri yapılarak bölge için en uygun parametризasyonların belirlenmesi amaçlanmıştır. WRF-ARW performansının artırılması amacıyla Yapay Sinir Ağlar (YSA) kullanılarak tahminler geliştirilmeye çalışılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Rüzgar enerjisi uygulamalarında, bir rüzgar türbini veya tarlasının kurulması aşamasında öncelikle bölgedeki rüzgarın genel karakteristiğinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle rüzgar potansiyelini belirlemeye yönelik belirli bölgeler belirlenerek yapılan çalışmalar literatürde önemli yer tutmaktadır.

Sicilya'da 9 farklı noktadan alınan rüzgar verileriyle yapılan çalışmada Weibull dağılımları belirlenerek, kış aylarında elde edilecek enerjinin daha fazla olduğu saptanmıştır [8]. 1990-2001 yıllarına ait veri kullanılarak Ürdün'ün güneyindeki Quera'da rüzgarın yıllık mevsimsel ve günlük salınımları belirlenmiş ve enerji çıktılarına bakılmıştır. En yüksek yıllık enerji çıktısının 100 kW'lık tek bir türbin yerine her biri 4 kW'lık 25 türbinden elde edileceği sonucuna varılmıştır [9]. Sicilya'da enerji kaynakları planlaması için yapılan bir başka çalışmada, bölgedeki rüzgarın istatistiksel analizi ve alansal tahmini yapılmıştır. 29 gözlem istasyonundan alınan 3 yıllık 10 metredeki rüzgar hızlarına ait teorik PDF (probability distribution function-olasılık dağılım fonksiyonu) çıkarılarak her test sahasının rüzgar karakteri belirlenmiş, çıkarılan Weibull dağılımları Kriging yöntemiyle alansal tahminlerde ve rüzgar potansiyellerinin elde edilmesinde kullanılmıştır [10]. Tunus'da rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemeye yönelik çalışmada meteorolojik ve istatistiksel metodlarla yıllık elde edilebilir enerji miktarları elde edilmiştir. Çalışılan bölge yıllık

ortalama rüzgar hızlarına göre iyi, ortalama ve düşük rüzgar potansiyeli olan bölgeler şeklinde 3 gruba ayrılmıştır. İyi rüzgar potansiyelli bölgede 3.6-4.8 m/s arasında değişen ortalama rüzgar hızları ile 537-893 kWh/m² arasında değişen yıllık enerji üretim çıktıları hesaplanmıştır [11]. Cezayir’de Adrar, Timimoun ve Tindouf istasyonlarının 1977-1988 yıllarına ait rüzgar verisi ile uzun dönem ortalama rüzgar hızları 10 metrede 5.9, 5.1 ve 4.3 m/s olarak bulunmuş, ayrıca 30 MW’lık bir türbin için enerji çıktıları ve ekonomik kayıplar hesaplanmıştır [12].

Türkiye’de de belirli bölgeler için rüzgar karakteristiği ve rüzgar potansiyelini belirlemeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin; Türkiye’de Ege Denizi sahil kesimindeki 8 istasyona ait rüzgar verisinin kullanıldığı çalışmada rüzgar enerji potansiyelinin bölgesel dağılımı kümülatif yarı varyogramlar yardımıyla değerlendirilmiştir [13]. Benzer bir çalışmada, 35 farklı meteoroloji istasyonuna ait rüzgar verisi ile noktasal toplam yarı varyogram yöntemiyle Türkiye’deki rüzgar karakteristikleri ile topografya etkileri irdelenmiştir [14]. Kütahya’da yapılan bir çalışmada, Dumlupınar Üniversitesi Ana Kampüs’e kurulan rüzgar gözlem istasyonundan alınan 1 Temmuz 2001-28 Şubat 2003 tarihlerine ait veri seti kullanılarak Weibull ve Rayleigh dağılımları çıkarılmış, bölgedeki rüzgarın örnek olarak seçilmiş 600 kW’lık türbinin elektrik üretim maliyetini karşılamayacağı ve daha uzun süreli bir çalışmanın yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır [15]. Marmara’da 10 meteoroloji istasyonuna ait günlük ortalama rüzgar hızı verisi kullanılan çalışmada 1993-1997 yıllarını kapsayan periyotta harmonik analiz yapılarak, kararsız ve rastgele veriler için periyodikliği gösteren harmonik sayılar elde edilmiştir [16]. Keban-Elazığ meteoroloji istasyonundan alınan 5 yıllık (1998-2002) saatlik rüzgar verisi analiz edilerek PDF çıkarılmış, Haziran ve Temmuz aylarındaki yüksek değerlere karşılık Ekim ve Kasım aylarında düşük rüzgar hızları saptanmıştır. Genel olarak zayıf rüzgar karakteristiği ve yıllık ortalama güç yoğunluğunun düşük olması, bölgenin elektrik ve mekanik bağlantılı bir sisteme uygun olmadığını göstermiştir [17]. Aynı bölgede yapılan bir başka çalışmada, Elazığ çevresindeki Maden, Ağın ve Keban için 1998-2003 yıllarına ait veri kullanılarak mevsimsel rüzgar ve rüzgar enerjisi karakteristikleri incelenmiştir. Rüzgar hızlarındaki mevsimsel salınımın fazla olduğu, en yüksek değerlere yaz aylarında ulaşıldığı saptanmıştır. En yüksek rüzgar gücü yoğunluğuna Maden’de ulaşılması nedeniyle rüzgar enerjisi sistemlerinin bu bölgede kurulmasının diğer

bölgelere göre daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır [18]. Gökçeada’da rüzgar potansiyelini belirlemek için yapılan çalışmada Uğurlu, Çınaraltı ve Aydıncık istasyonlarından alınan verilerle Weibull parametreleri belirlenmiştir. 10 metre ve 30 metreden alınan veriler türbin rotoru (hub yüksekliği) olarak belirlenen 50 metreye taşınmış, yapılan hesaplamalar Gökçeada’nın yüksek rüzgar ve güç değerlerine sahip olduğunu göstermiştir [19]. Erzurum, Elazığ, Bingöl, Kars, Manisa ve Niğde meteoroloji istasyonlarının 2000-2006 yıllarına ait rüzgar verisi kullanılarak yapılan çalışmada, 10 metredeki yıllık ortalama rüzgar hızı değerleri çıkarılarak Weibull parametreleri belirlenmiştir. Erzurum ve Elazığ’ın diğer şehirlere göre en fazla enerji çıktısı değerlerine sahip olduğu bulunmuştur. Ortalama yıllık güç yoğunlukları bu bölgeler için 65 W/m^2 ve 62 W/m^2 olarak hesaplanmıştır [20]. Osmaniye için rüzgar karakteristiği ve potansiyelinin belirlenmesi ile ilgili çalışmada MGM’nin 2008-2011 yıllarına ait 44 aylık rüzgar verisi kullanılarak Weibull parametreleri belirlenmiş, ortalama rüzgar hızı 2.23 m/s , rüzgar potansiyeli ise yaklaşık olarak 24.587 W/m^2 olarak bulunmuştur. Bu değerler rüzgar enerji potansiyelinin bu bölge için düşük olduğunu göstermiştir ve bölgedeki rüzgar enerjisinin elektrik ve mekanik bağlantılı enerji kaynaklarından çok batarya şarjı veya su pompası gibi uygulamalara daha uygun olacağı sonucu ortaya çıkmıştır [21].

Rüzgar enerjisi çalışmalarında rüzgar tahminleri de oldukça önemlidir. Belirli bölgeler için yapılan kısa süreli rüzgar tahminleri literatürde yer almaktadır. Bu çalışmada olduğu gibi birçok çalışmada WRF modeli ile elde edilen tahminler kullanılmıştır. Örneğin; Teksas’ta yapılan bir çalışmada, WRF modelinin farklı fizik seçenekleriyle farklı yatay çözünürlüklerde aşağı seviye rüzgarlarını tahmin etmek için elde edilen 54 saatlik çıktılar değerlendirilmiş, en iyi parametrisasyon kombinasyonunun MYJ PBL, Monin-Obukhov yüzey, RUC yer yüzeyi şemaları olduğu ve vadi rüzgarlarına ait tahminlerde çözünürlüğün arttırılmasıyla hataların azaldığı ortaya çıkmıştır [22]. Japonya’nın Shirahama bölgesinde deniz üzerindeki (offshore) araştırma platformundan elde edilen 2005 yılını kapsayan rüzgar verileri, NCEP FNL verisi kullanılarak elde edilen WRF simülasyonlarıyla karşılaştırılmış, yıllık %15.3 bias, %46 RMSE değerleri elde edilmiş bunun yanısıra PBL’in tepesinde gözlemlerden negatif sapmalar, 1000 m’nin altında pozitif sapmalar ortaya çıkmıştır [23]. Portekiz’de yapılan bir çalışmada farklı sayısal ve fiziksel koşullar altında WRF simülasyonları çalıştırılmış, model sonuçları ve gözlemler arasındaki

farklara bakılmıştır. Tahminler için en uygun tahmin süresinin 2 gün olduğu ve MM5-Yonsei University- Noah parametrizasyonlarıyla elde edilen tahminlerin daha başarılı olduğu görülmüştür [24]. 80 m hub yüksekliğine sahip bir rüzgar türbini için rüzgar hızı tahminlerinin geliştirilmesine yönelik bir diğer çalışmada, farklı PBL şemaları kullanılarak yokuş yukarı ve yokuş aşağı rüzgar hadiseler için rüzgar tahminleri yapılmış, genel olarak gerçek değerlerden daha düşük tahminle elde edilmiştir ve bu tahminlere dayanan topluluklar (ensembles) geliştirilmiştir [25]. İspanya'nın güneyi'nde yapılan bir diğer çalışmada mikrofizik ve sınır tabaka parametrizasyonlarının 32 farklı şekilde değerlendirilmesiyle elde edilen WRF sonuçları 4 ayrı noktadan alınan gözlem verileriyle karşılaştırılmış, sonuçların en fazla sınır tabaka parametrizasyonlarının değişimine bağlı olduğu saptanmıştır [26]. İber Yarımadası'nın sahil ve iç kesimlerinde PBL parametrizasyonlarıyla WRF model simülasyonlarının ve rüzgar enerjisi üretim tahminlerinin yapıldığı çalışmada uygun başlangıç şemalarıyla tahminlerle gözlemler arası farkların önemli ölçüde değiştiği, ACM2-PX PBL şemasıyla en tutarlı tahminlere ulaşıldığı ortaya çıkmıştır [27]. 2014 yılına ait başka bir çalışmada, Türkiye için geliştirilen kısa süreli rüzgar enerjisi tahmini sistemi sonuçlarının 2010 yılına ait saatlik veriler kullanılarak WRF modeliyle karşılaştırıldığı çalışmada, çıktılar daha sonra WindSim modeliyle birleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çanakkale İntepe'deki 38 türbin yer alan rüzgar tarlasında enerji üretimi tahminlerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. [28]. Bir diğer çalışmada WRF model simülasyonlarına göre elde edilen rüzgar gücü değerleri tek seviyeli YSA'ya dayanan güç eğrisi modellerinde kullanılmıştır. Sonuçlar, rastgele seçilen ham verilerle elde edilen güç eğrisinde hata azaltmasından çok WRF'a ait çıktıların başka modeller için başlangıç verisi olarak kullanımında, bu verilere müdahalenin olması gerektiğini ortaya koymuştur [29]. Kuzey ve Baltık denizlerindeki offshore türbinler için elde edilen WRF modeli simülasyonlarını karşılaştırmak için 100 m'deki rüzgar ölçüm direği ve lidar verilerinin kullanıldığı çalışmada, gözlem ve model verileri arasındaki rüzgar hızlarında yıllık ortalama %3.2 'den küçük sapma değerleri bulunmuştur ve sonuçların büyük ölçüde PBL şemalarından etkilendiği ortaya konmuştur [30].

2. ÇALIŞMA ALANINA AİT GENEL ANALİZLER

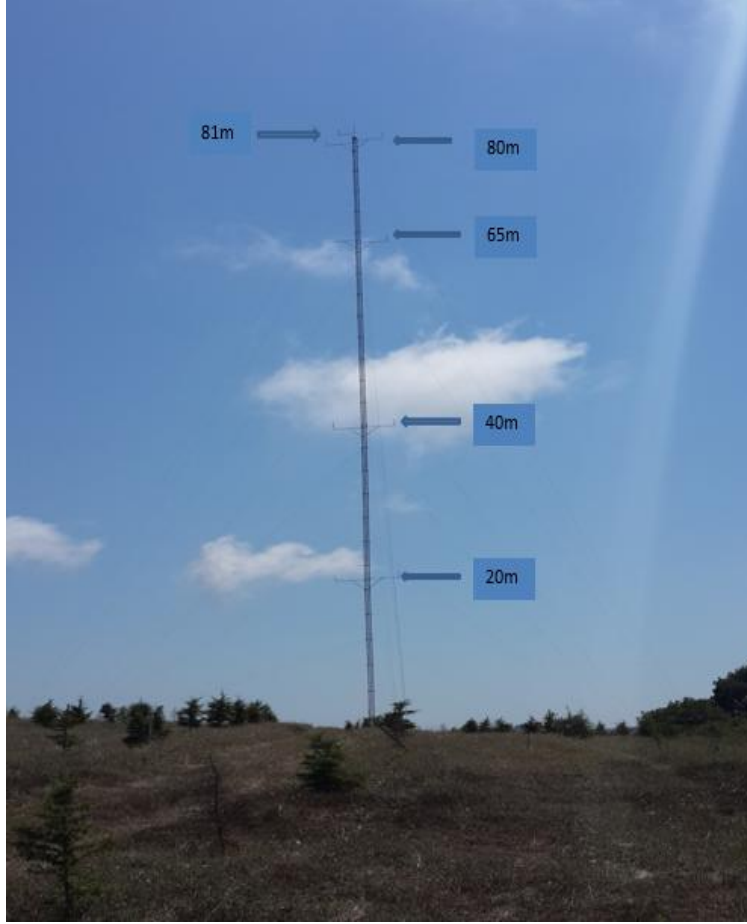
2.1 Çalışma Alanı ve Kullanılan Veri

Çalışma alanı, İstanbul'un kuzeybatısında $41^{\circ} 18'$ kuzey enlemi ve $28^{\circ} 39'$ doğu boylamında bulunan Terkos Bölgesidir (Şekil 2.1). Bu bölgede rüzgar şiddet ve yön verilerinin değerlendirilebilmesi amacıyla 81, 80, 65, 40 ve 20 metrelerde ölçüm alınabilen ve deniz seviyesinden 51 m yükseklikte konumlandırılmış bir ölçüm direği bulunmaktadır (Şekil 2.2). Rüzgar şiddeti ve yönü ile birlikte basınç ve sıcaklık değerleri de aynı seviyelerde ölçülmektedir. Ölçüm aletleri yaklaşık 3 metre yükseklikte konumlandırılmış güneş paneli yoluyla çalışmaktadır.



Şekil 2.1 : Çalışma alanı.

Çalışmada ölçüm direğinin 81, 80, 65, 40 ve 20 metrelerinden alınan 1 Ağustos 2012-1 Ağustos 2013 tarihlerine ait 10 dakikalık ortalama rüzgar şiddeti ile 20 ve 65 metrelerdeki rüzgar yönü verisi kullanılmıştır.



Şekil 2.2 : Ölçüm direği.

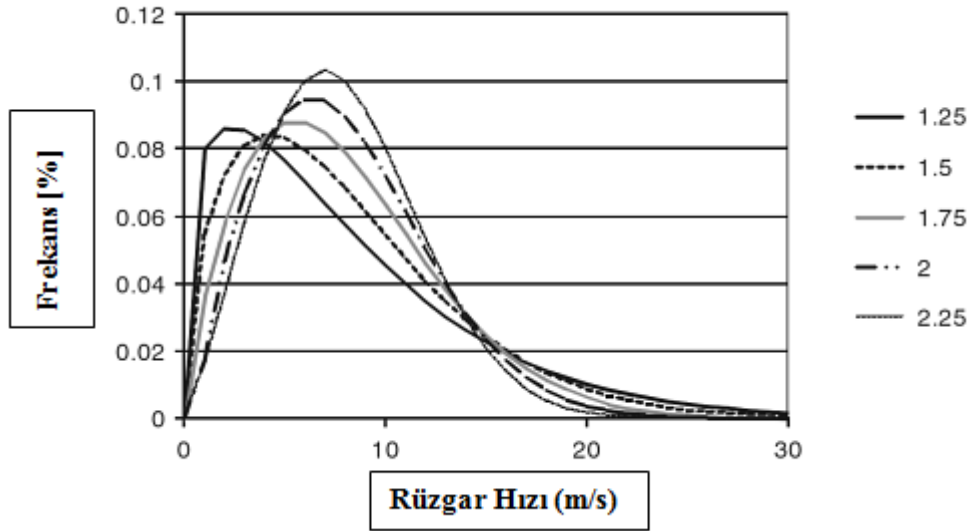
2.2 Veri Analizi

Çalışmada öncelikle ölçüm direğinin farklı seviyelerinden alınan rüzgar verilerinin olasılık dağılım fonksiyonuna ait histogramlar çıkarılarak rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemede en çok kullanılan istatistiksel dağılımlardan biri olan Weibull dağılımı ve Weibull parametreleri belirlenmiştir. Weibull dağılım fonksiyonu rüzgar hızlarının bağıl frekanslarını bulmada kullanılır ve farklı matematiksel yaklaşımlarla elde edilebilen c ve k parametrelerini içerir. Rüzgar hızı için 2-Parametrelili Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun genel formu (2.1)'de verildiği gibidir [31]:

$$f(V) = \frac{k}{c} * \frac{V^{k-1}}{c} \exp -\frac{V^k}{c^k} \quad (2.1)$$

Denklemde $f(V)$ rüzgar hızının olasılık yoğunluğunu, V rüzgar hızını, k ve c ise Weibull parametrelerini temsil etmektedir.

Weibull parametrelerinden c , ölçek parametresidir ve rüzgar hızıyla aynı birimdedir, rüzgarın hızına ait referans bir değerdir. k ise boyutsuz şekil parametresidir. Weibull dağılımının şekil parametresi arttıkça rüzgar verilerin sıklığının 0 dan uzaklaştığı görülmektedir, yani şekil parametresi hızın frekansının dağılımı hakkında önsel bilgi vermektedir [32]. Rüzgar hızı çalışmalarında k şekil parametresi genellikle 1.5 ile 3 değerleri arasında değişir. k parametresi 1'e yaklaştıkça dağılım asimetrik hale gelir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Sabit ortalama rüzgar hızı için (8 m/s) Weibull dağılımı ve değişen k değerleri [33].

Terkos bölgesine ait farklı seviyelerdeki rüzgar verisinin dağılımı Windographer kullanılarak incelenmiştir. Windographer, Mistaya Engineering tarafından, rüzgar ile ilgili çalışmalarda sodar, lidar ve ölçüm direklerinden alınan verinin analizini kolaylaştırmak için geliştirilmiş bir yazılımdır. Windographer veri analizi dışında, başka programlarda kullanmak üzere analizleri içeren kaynak dosyaları oluşturabilir.

Daha sonraki hesaplamalarda ve tahminlerin karşılaştırılmasında kullanılacak 10 metredeki rüzgar verisi Windographer yardımıyla 20, 40, 65, 80 ve 81 metredeki rüzgar hızları kullanılarak, Güç Kanunu (Power Law)'na göre elde edilmiştir. Buna

göre yükseklikle rüzgar hızının değişimi aşağıdaki eşitlikler kullanılarak bulunabilir [34]:

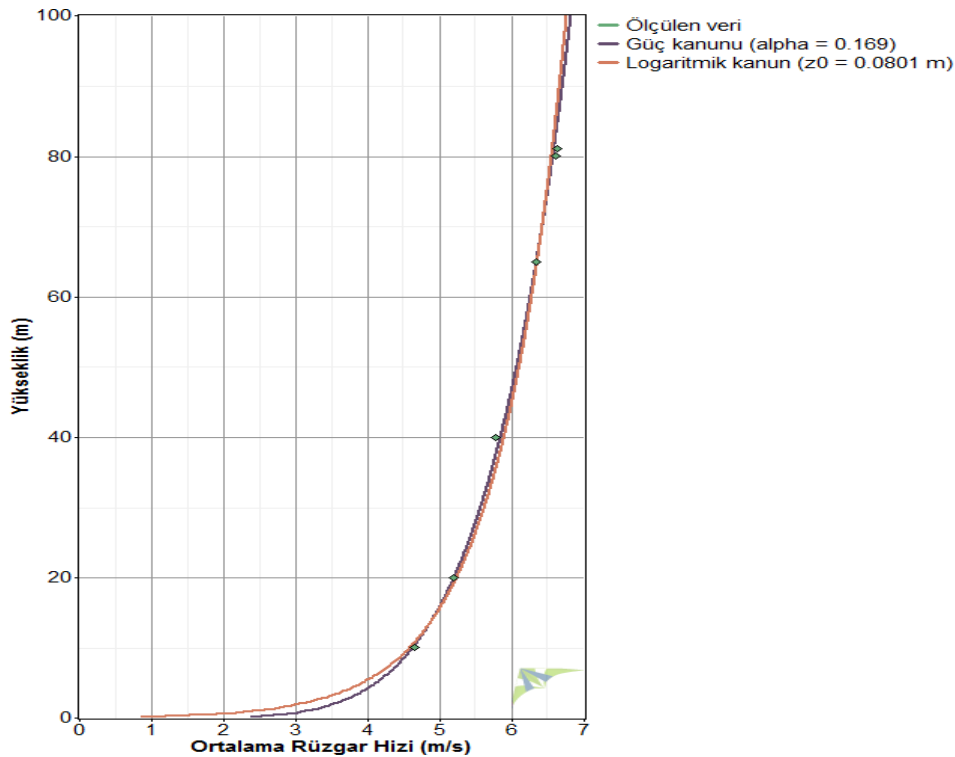
$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

V_2 , z_2 yüksekliği için hesaplanan rüzgar hızı; V_1 , z_1 yüksekliğinde gözlenen rüzgar hızı, α güç kanunu üstel değeridir. Bu formülün hesaplanması için gereken değer, güç kanunu katsayısının sayısal değeridir. α , seçilen konumun pürüzlülüğüne göre değişkenlik göstermektedir (Mikhael ve diğ., 1981) ve aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır:

$$\alpha = \frac{1}{\ln \bar{z} - \ln z_0} - \frac{0.0881}{1 - 0.0881 \ln z_1} * \ln \frac{V_1}{6} \quad (2.3)$$

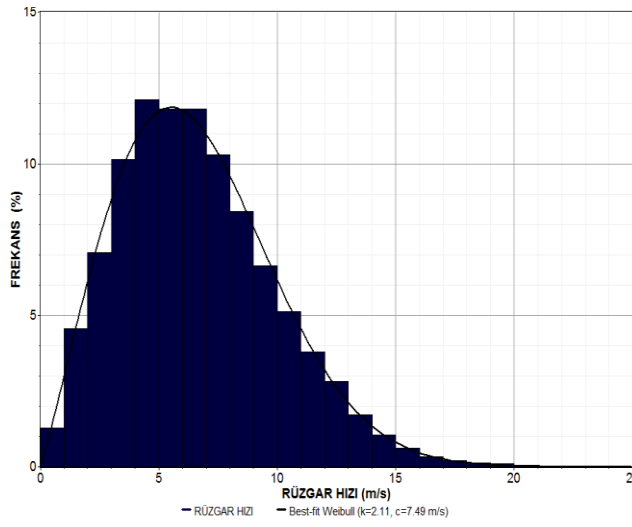
z_0 , bölgenin pürüzlülüğüdür.

$$\bar{z} = \exp \ln z_1 + \ln z_2 / 2 \quad (2.4)$$

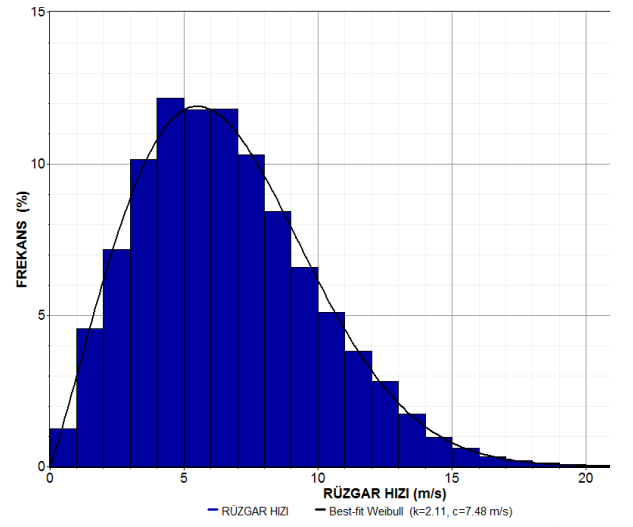


Şekil 2.4 : Düşey rüzgar kayması profili.

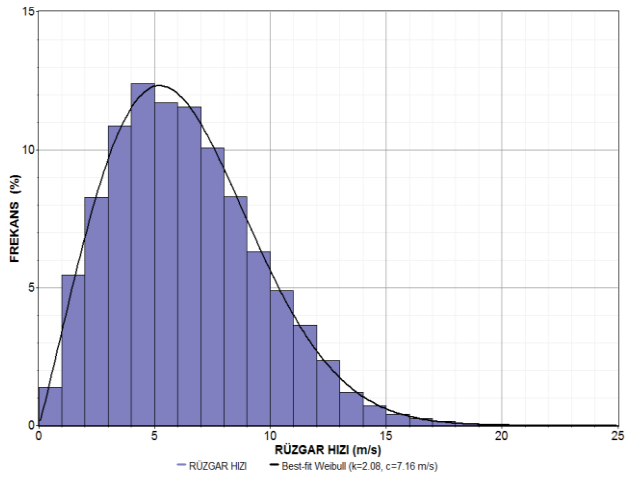
Yukarıda verilen formüller yardımıyla, seviyelere göre ortalama rüzgar hızlarının kullanıldığı düşey rüzgar kayması profiline göre α değeri bu çalışma için 0.169 olarak hesaplanmıştır (Şekil 2.4).



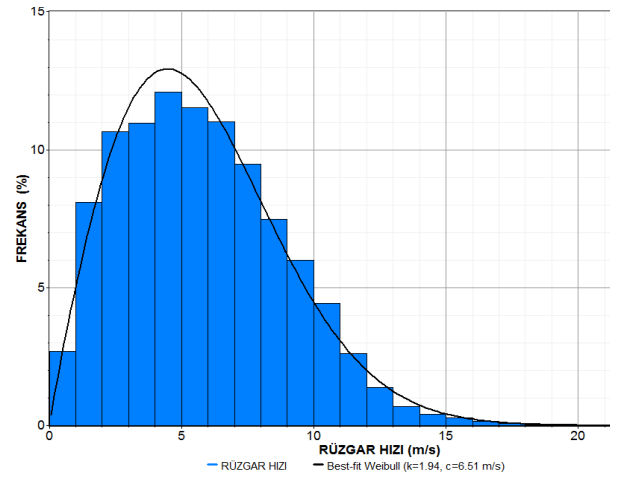
(a)



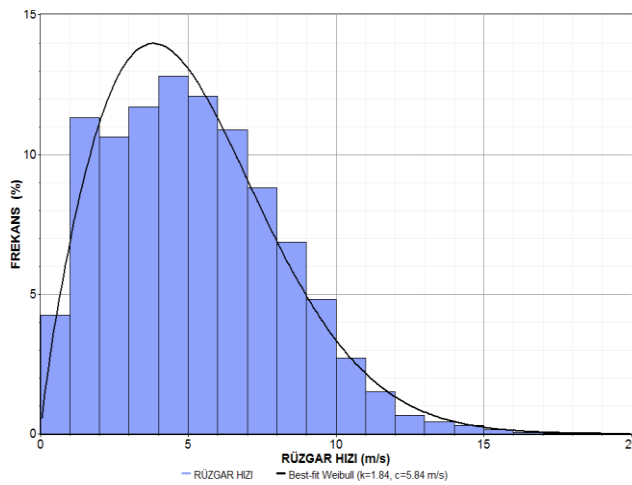
(b)



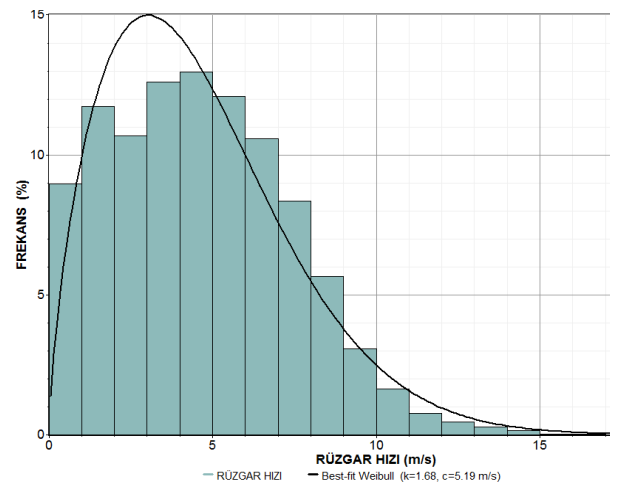
(c)



(d)



(e)

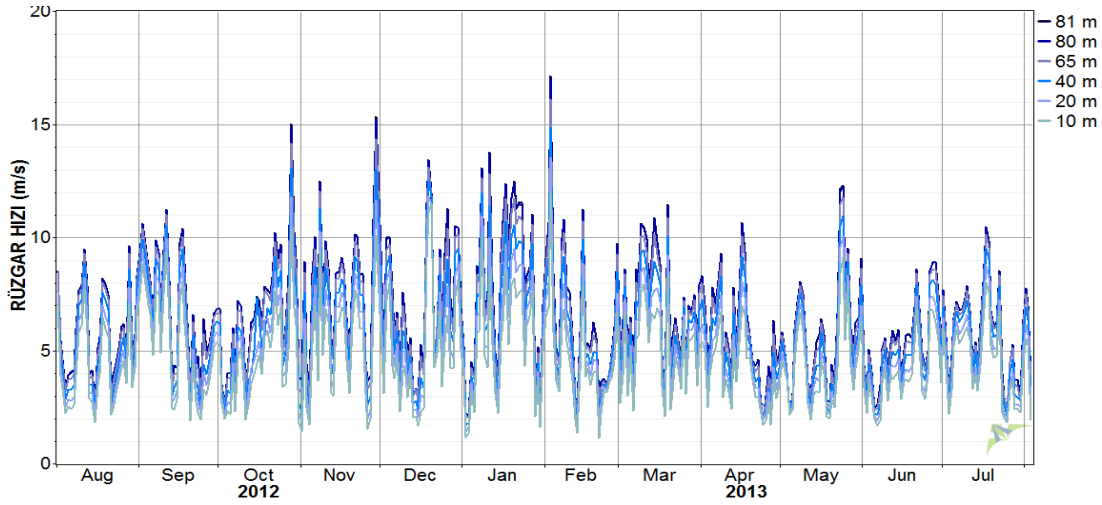


(f)

Şekil 2.5 : Frekans dağılım fonksiyonları: (a) 81 metre (b) 80 metre (c) 65 metre (d) 40 metre (e) 20 metre (f) 10 metre

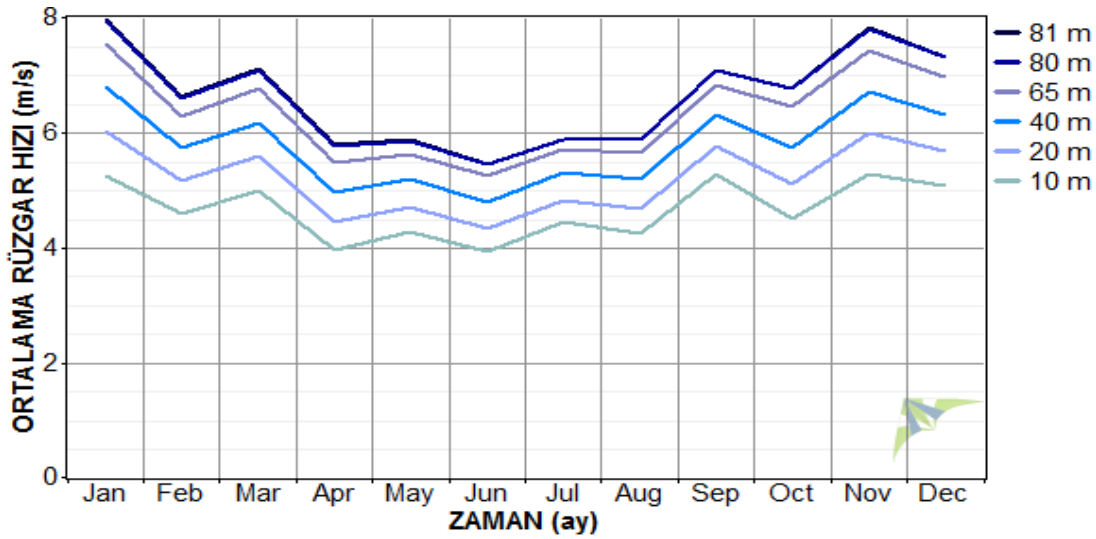
Weibull k, 81 metreden 10 metreye kadar 2.11 ve 1.68 değerleri arasında değişirken c, 7.49 ve 5.19 m/s arasında değişmiştir. Rüzgarların frekans dağılımları, referans rüzgar hızının 5 m/s civarında olduğunu ve tüm periyodun yaklaşık %30'unda bu değerin altında, geri kalan zamanlarda ise üzerinde olduğunu göstermektedir.

Ölçüm direğinden 10 dakikalık olarak alınan verilerin günlük ortalamaları alınarak çizilen zaman serisinde kış aylarında rüzgar şiddetlerinin yaz aylarına göre daha yüksek olduğu, en yüksek değerlerin Ekim, Kasım ve Şubat aylarında, ay içinde salınımların fazla olduğu görülmektedir. (Şekil 2.6)



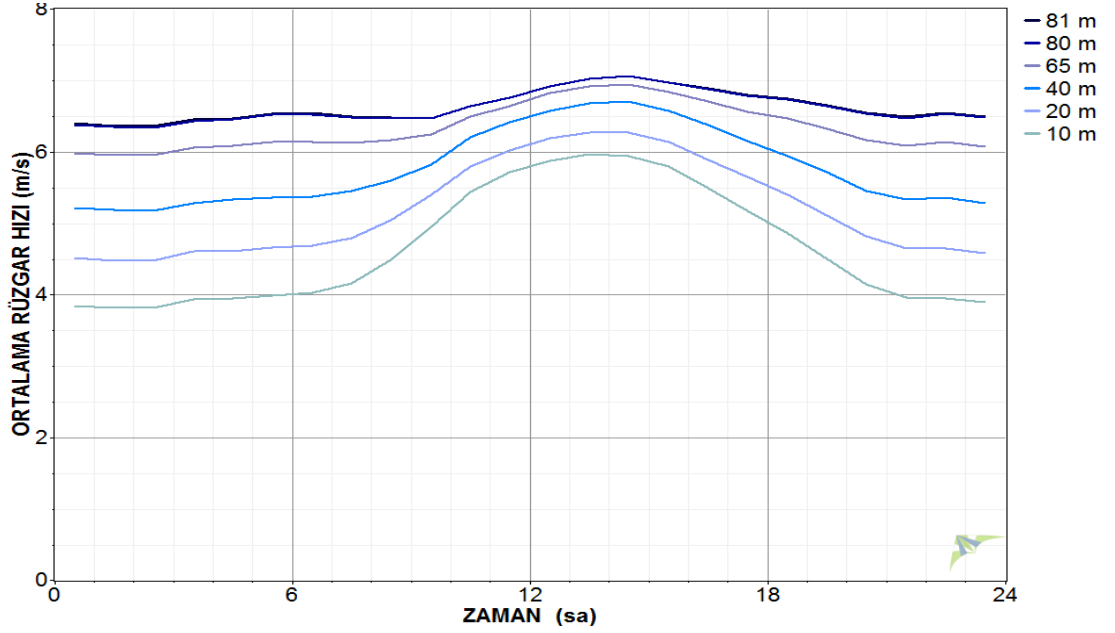
Şekil 2.6 : Günlük ortalama rüzgar şiddetleri.

Rüzgarların aylık ortalama değerlerine bakıldığında, rüzgar şiddetlerinin yaz aylarına doğru düştüğü, sonbahar aylarında yeniden yükseldiği göze çarpmaktadır (Şekil 2.7).

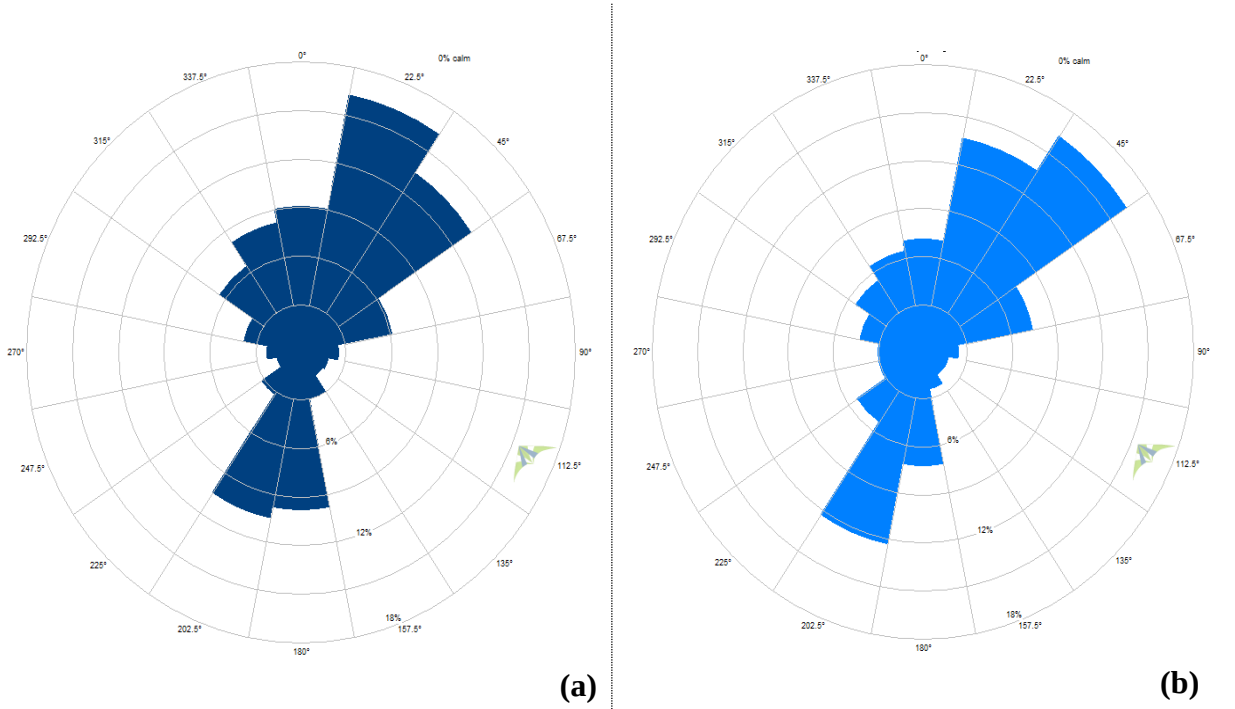


Şekil 2.7 : Aylık ortalama rüzgar şiddetleri.

Rüzgarın günlük salınımı grafiği, rüzgar şiddetinin yukarı seviyelere çıkıldıkça arttığını, gün içinde maksimuma öğleden sonraki saatlerde ulaşıldığını göstermektedir (Şekil 2.8). Bu durum, öğleden sonra artan kararsızlıkla ilişkilendirilebilir. Ortalama rüzgarlar gün içinde yaklaşık en alt seviyeden en üst seviyeye doğru 4 m/s ile 7 m/s arasında değişmektedir.



Şekil 2.8 : Rüzgar şiddetlerinin ortalama günlük profili.



Şekil 2.9 : Rüzgar gülü: (a) 65 metre (b) 20 metre

Rüzgar hızlarıyla birlikte hakim rüzgar yönlerinin bilinmesi, türbinlerin yerleştirilmesi için gerekli olduğundan, rüzgar enerjisi çalışmalarında önemlidir. Şekil 2.9’da ölçüm direğinin 65 metre ve 20 metrelerinden alınan yön verileriyle esme sıklığına göre elde edilen rüzgar gülleri verilmiştir. Buna göre hakim rüzgarlar kuzeydoğulu ve güneybatılıdır. Aylara göre rüzgarların esme sıklıkları yüzde olarak EK-1 ve EK-2’de verilmiştir. Hem 65 metredeki hem de 20 metrede, yaz aylarından kış aylarına doğru rüzgarın hakim rüzgar yönünün güneybatıdan kuzeydoğuya doğru değişiklik gösterdiği görülebilir. Özellikle Haziran ayından Eylül ayına kadar esen rüzgarların yaklaşık % 40’ı kuzeydoğuludur.

3. RÜZGAR AKIŞ MODELLERİ

3.1 WAsP

WAsP, Danimarka Teknik Üniversitesi'nin Risø Ulusal Laboratuvarı'nda, Avrupa için rüzgar atlası hazırlamaya yönelik bir Avrupa Birliği programı kapsamında 1987 yılında hazırlanmış ve geliştirilmiş bir lineer akış modelidir [35]. Model, bir rüzgar tarlasının kurulumunun öncesinde önemli bir araç olarak kullanılabilir.

WAsP veri analizlerini, rüzgar hız verilerinin iki parametrelili Weibull dağılımına uygun bir dağılım gösterdiğini varsayarak yapmaktadır. Modelde rüzgar verisi, bölgenin pürüzlülük bilgileri, bölgedeki engelleyicilerin bilgisi ve topografya bilgisi kullanılarak bölgesel rüzgar atlası hesaplamaları yapılır. Lineer bir akış modeli olduğundan, rüzgar üzerindeki lineer olmayan etkiler hesaba katılmaz. Kullanıcı kılavuzunda belirtildiği üzere model beş temel hesaplama bloğundan oluşmaktadır ve bu hesaplama blokları; sıralı verinin analizi, rüzgar atlas verisinin üretilmesi, rüzgar ikliminin tahmini ve rüzgar gücü potansiyelinin tahmini şeklinde sıralanabilir [36].

WAsP, rüzgar hızının yükseklikle değişimini logaritmik profil kullanarak hesap etmektedir, bu nedenle 3 değişkeni hesaplarda göz önünde bulundurmaktadır: Yer seviyesinden yükseklik, pürüzlülük uzunluğu ve sürtünme hızı [37]. WAsP, atmosferin kararlı olduğunu, akışın basınç kuvveti ve Coriolis kuvvet arasındaki denge ile jeostrofik olduğunu kabul eder [37].

Bu çalışmada WAsP10 sürümü kullanılmıştır.

3.2 MeteodynWT

MeteodynWT, rüzgar ile ilgili çalışmalarda kullanılan bir CFD modeldir. Reynolds averaged Navier Stokes (RaNS) türbülanslı akış metodunu kullanarak üç boyutta momentum ve kütle korunumu denklemlerini kullanarak rüzgar hızı vektörünün u , v

ve w bileşenlerini tahmin eder [38]. Modelde ele alınan akış sürekli ve sıkıştırılmaz iken aşağıdaki RaNS denklemleri kullanılmaktadır [38]:

$$\frac{dU}{dx} + \frac{dV}{dy} + \frac{dW}{dz} = 0 \quad (3.1)$$

$$U \frac{dU}{dx} + V \frac{dU}{dy} + W \frac{dU}{dz} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \quad (3.2)$$

$$U \frac{dV}{dx} + V \frac{dV}{dy} + W \frac{dV}{dz} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \quad (3.3)$$

$$U \frac{dW}{dx} + V \frac{dW}{dy} + W \frac{dW}{dz} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \quad (3.4)$$

U , V ve W kartezyen koordinatlardaki (x,y,z) ortalama rüzgar vektörü bileşenleridir. x ve y yatay, z düşey koordinatı oluşturmaktadır. P , ortalama basınç değeri, ρ hava yoğunluğudur. u , v ve w türbülans dalgalanması bileşenleridir.

MeteodynWT’de türbülans uzunluğu ölçeği hesaplamaları Yamada ve Arritt başlangıç modeline dayanır ve türbülans kinetik enerjisi (k) prognostik denklemi ile difüzyon hesabı için atmosferik koşullara bağlı olarak elde edilen karışma yüksekliği yaklaşımını kullanır [39].

Modelde türbülans kinetik enerjisi (TKE) denklemi aşağıdaki gibidir [39]:

$$U_j \frac{dk}{dx_j} = P_k - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{V_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (3.5)$$

Denklemdaki terimlerin hesaplaması (3.6), (3.7) ve (3.8) eşitliklerine dayanmaktadır.

$$P_k = V_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \quad (3.6)$$

$$V_T = k^{1/2} L_T \quad (3.7)$$

Kayıp terimi , ε , (3.8) denklemiyle verilmiştir:

$$\varepsilon = C_\mu \frac{V_T}{L_T^2} k \quad (3.8)$$

Denklemde türbülans uzunluğu ölçeği L_T , ve C_μ katsayısı R_{if} ile gösterilen “Richardson Akış Sayısı”na göre belirlenen atmosferin kararlılığına dayanmaktadır. R_{if} , türbülansa neden olan kaldırma kuvvetleri ile rüzgar kaymasının oranıyla açıklanabilir; bir diğer değişle termal türbülansın mekanik türbülansa oranıdır [40]. L_T , (3.10) denklemiyle elde edilen l ile, R_{if} ’nin farklı değerlerine göre (3.11) denklemiyle elde edilen S_m ’nin denklem (3.9)’da kullanılmasıyla elde edilir.

$$L_T = \bar{2} S_m^{3/2} l \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_0} + \frac{1}{kz} \quad (3.10)$$

$$S_m = \begin{cases} 1,96 \frac{0.1912 - R_{if}}{1 - R_{if}} \frac{0.2341 - R_{if}}{0.2231 - R_{if}}, R_{if} < 0.16 \\ 0.085, R_{if} \geq 0.16 \end{cases} \quad (3.11)$$

Meteodyn modeli WAsP modelinden farklı olarak farklı atmosfer koşullarındaki sonuçları verebilir. Atmosferin kararlılığına (3.12) eşitliği ile hesaplanan Monin-Obukhov uzunlukları ile karar verilir. Çizelge 3.1’de MeteodynWT’de Monin-Obukhov uzunluklarına göre tanımlanmış kararlılık sınıfları gösterilmektedir.

$$L = - \frac{u_*^3 \theta_v}{kg w' \theta'_v} \quad (3.12)$$

Denklemden u_* sürtünme hızı, θ_v ortalama virtüel potansiyel sıcaklık, $w'\theta'_v$ yüzey virtüel potansiyel sıcaklığı akısı ve k von Kármán sabitidir.

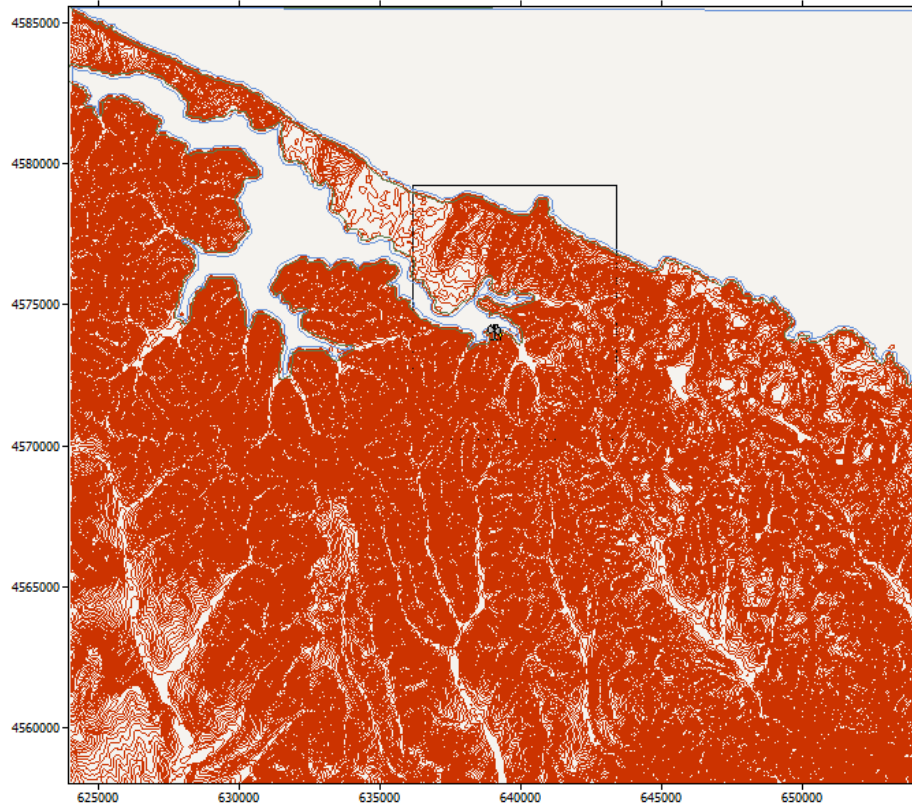
Çizelge 3.1 : MeteodynWT’de tanımlanan kararlılık sınıfları.

Termal Kararlılık Sınıfı	Monin-Obukhov Uzunluğu	Monin-Obukhov Uzunluk Aralığı	Termal Sınıflandırma
0	-80	$L \leq -100$	Çok kararsız
1	-500	-1000 / -100	Kararsız
2	10 000	-1000 / 2000	Nötre yakın
3	1500	1000 / 2000	Az kararlı
4	800	600 / 1000	Kararlı
5	500	400 / 600	Kararlı
6	300	250 / 400	Kararlı
7	200	150 / 250	Kararlı
8	130	100 / 150	Çok kararsız
9	60	$L < 100$	Çok kararsız

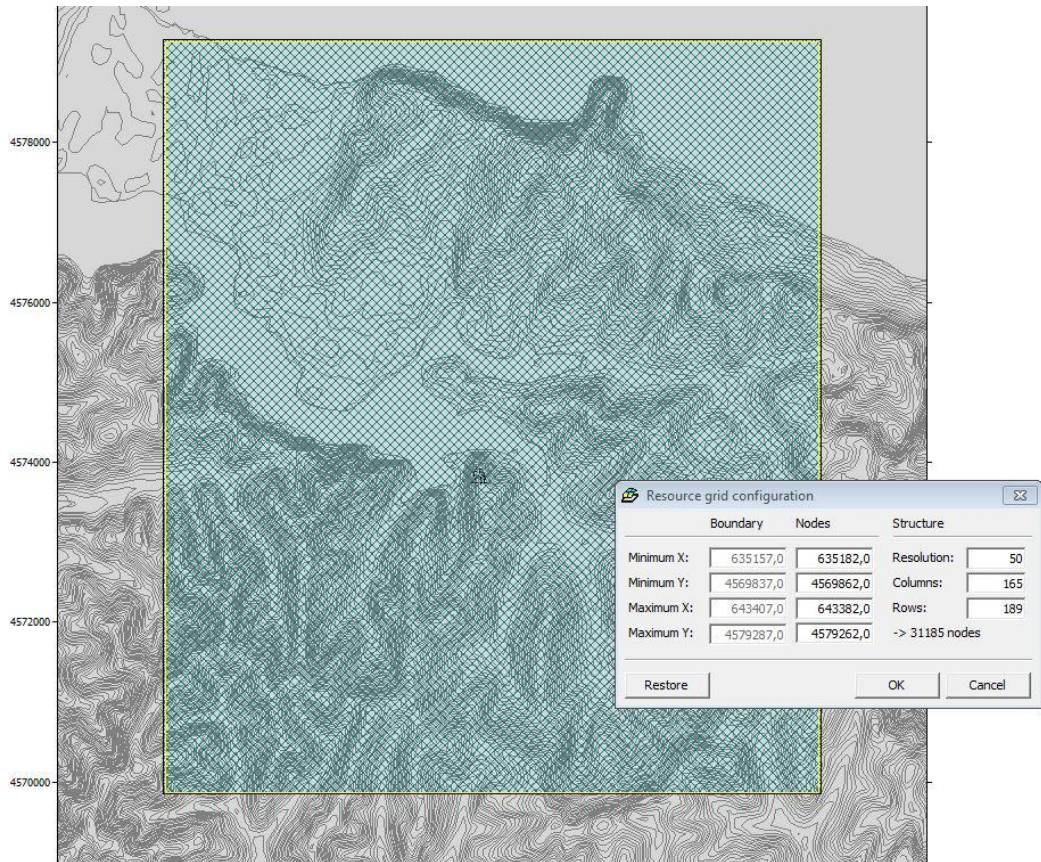
3.3 Model uygulamaları

3.3.1 WAsP uygulaması

İlk olarak çalışılacak alanın WAsP’a altlık olarak kullanılacak dijital haritası oluşturulmuştur (Şekil 3.1). Harita üzerinde koordinatlar UTM (Universal Transver Mercator) projeksiyonuna göre girilmiştir. Çalışma alanı dijital harita üzerindeki 50 metre yatay çözünürlüklü gridlerle oluşturulmuş yaklaşık 63 km² ‘lik alanı kapsamaktadır (Şekil 3.2). İzohipsler 3’er metre aralıklarla oluşturulmuştur. Dijital haritası oluşturulan bölgenin pürüzlülük değerleri Çizelge 3.2’ye göre kullanılarak pürüzlülük haritasına işlenmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.1 : Dijital harita WAsP görüntüsü.

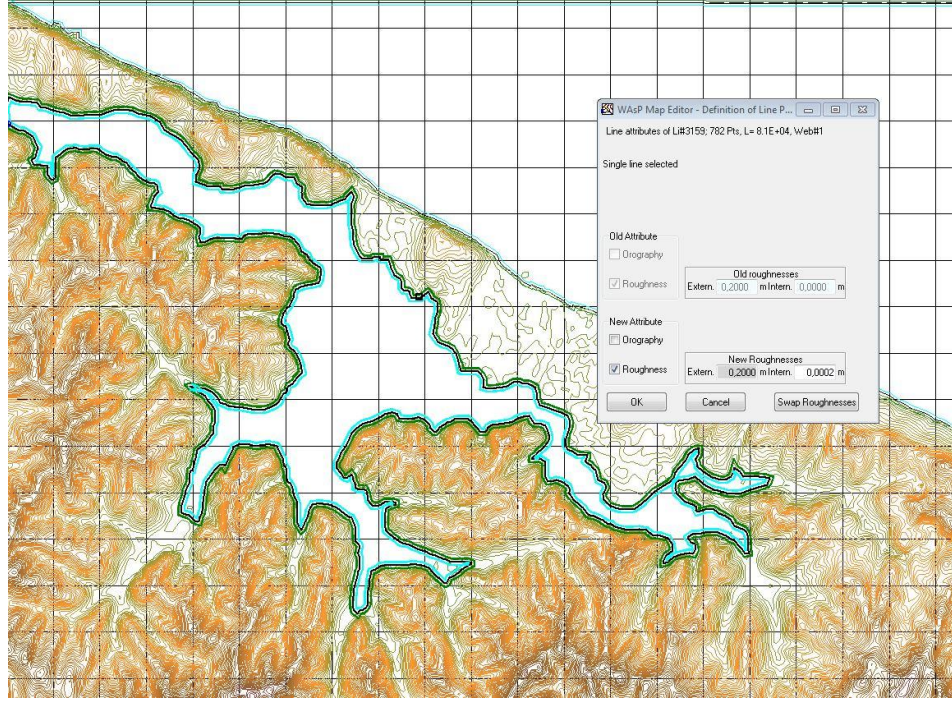


Şekil 3.2 : Çözünürlük haritası.

Çizelge 3.2 : WAsP'ta belirlenmiş pürüzlülük uzunluğu değerleri.

Pürüzlülük uzunluğu z_0 [m]	Arazi yüzeyi özelliği	z_0 pürüzlülük sınıfı	WAsP'ta belirlenen z_0
1.5		4 (1.5 m)	1.5
> 1	Uzun ağaçlı orman		> 1
1.00	Şehir		1.00
0.80	Orman		0.80
0.50	Mahalle		0.50
0.40		3 (0.40 m)	0.40
0.30	Orman koruma şeridi		0.30
0.20	Birçok ağaç ve çalı		0.20
0.10	Kapalı tarım arazisi	2 (0.10 m)	0.10
0.05	Açık tarım arazisi	1 (0.03 m)	0.05
0.03	Birkaç binalı/ağaçlı tarım arazisi		0.03
0.02	Binalı ve ağaçlı havaalanı arazisi		0.02
0.01	Havaalanı pist alanı		0.01
0.008	Biçilmiş çim		0.008
0.005	Düz, çıplak toprak		0.005
0.001	Düz kar yüzeyleri		0.003
0.0003	Kumlu yüzeyler		0.003
0.0002	Su yüzeyleri	0 (0.0002 m)	0.0
0.0001	Su alanları (göller, açık denizler)		0.0

Buna göre Terkos Gölü ve Marmara Denizi üzerinde pürüzlülük uzunluğu 0.0002 alınırken, diğer alanlar için bölgenin yüzey koşulları göz önünde bulundurularak, etrafı kısa ağaç ve çalılarla çevrili olması sebebiyle (Şekil 2.2) 0.20 olarak alınmıştır.



Şekil 3.3 : Pürüzlülük haritası.

Dijital harita ve Windographer yardımı ile elde edilen klimatolojik verinin modele girilip modelin çalıştırılmasıyla arazi üzerinde ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluklarına bakılmıştır. Türbine ait hub yüksekliği 65 m olarak girilmiştir ve tüm hesaplamalar bu yüksekliğe göre yapılmıştır.

Arazi üzerinde ortalama rüzgar hızlarına bakıldığında (Şekil 3.4) rüzgar hızlarının 5.13 m/s ile 7.64 m/s arasında değiştiği görülmektedir. Harita üzerinde yüksek rüzgar hızı değerlerine sahip alanlar kırmızı ile, düşük rüzgar hızı değerlerine sahip alanlar ise mavi ile gösterilmiştir. Yeşil renk ile gösterilen alanlar yaklaşık 6 m/s ortalama rüzgar hızına sahip alanlardır. Kurulması planlanan türbin yeşil renkli alan içerisinde bulunmaktadır.

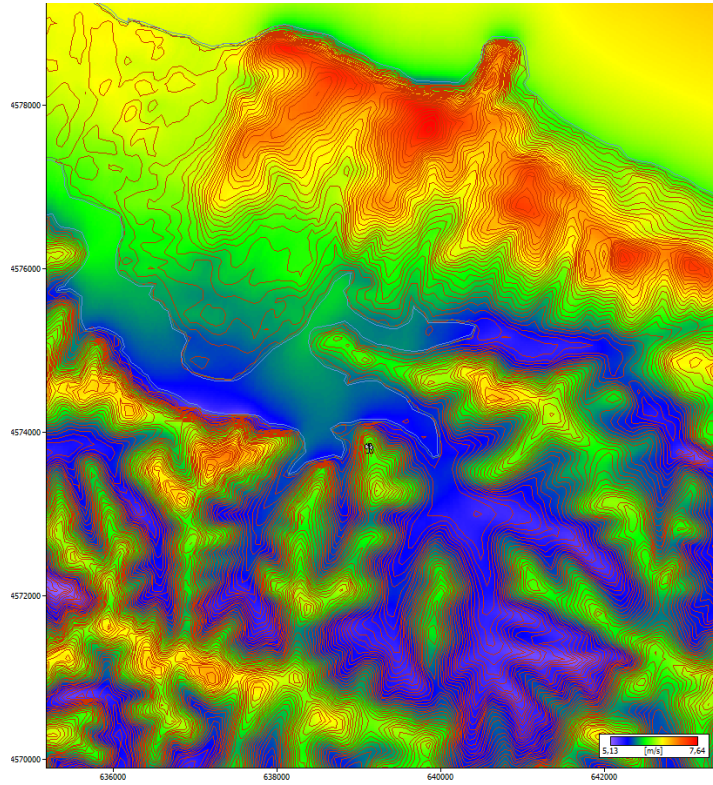
Harita üzerinde bölgenin kuzey kesimlerinde ve iç bölgelerde Terkos Gölü'nün özellikle güneyinde kırmızı bölgeler dikkat çekmektedir. Kuzeyde Karadeniz ve daha güneydeki Terkos Gölü'ne kıyısı olan bölgelerde denizselliğin etkisiyle daha yüksek rüzgar hızları görülmektedir. Özellikle yüksek bölgelerde sarı ve kırmızı renkler göze çarpmaktadır.

Enerji yoğunluğu haritası da rüzgar hızlarına paralel bir görüntü ortaya koymaktadır (Şekil 3.5). Rüzgar hızlarının yüksek olduğu bölgelerde enerji yoğunluğu denklemine

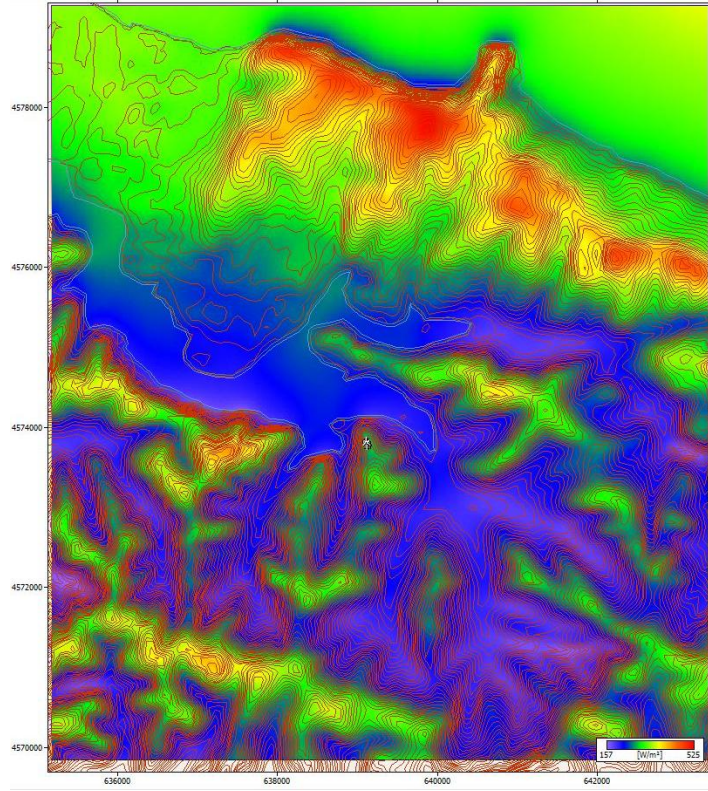
göre (3.13) elde edilen değerler de yüksektir. Denklemden P güç, ρ yoğunluk, V rüzgar hızıdır.

$$P = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (3.13)$$

Enerji yoğunlukları bölge içinde alansal olarak 157 W/m^2 ile 525 W/m^2 değerleri arasında değişkenlik göstermektedir. En yüksek enerji yoğunluğuna sahip bölgeler Karadeniz kıyılarındaki bölgeler ile Terkos Gölü'nün güneybatısı ve yüksek bölgelerin tepeleridir.



Şekil 3.4 : WASP ortalama rüzgar hızı haritası.

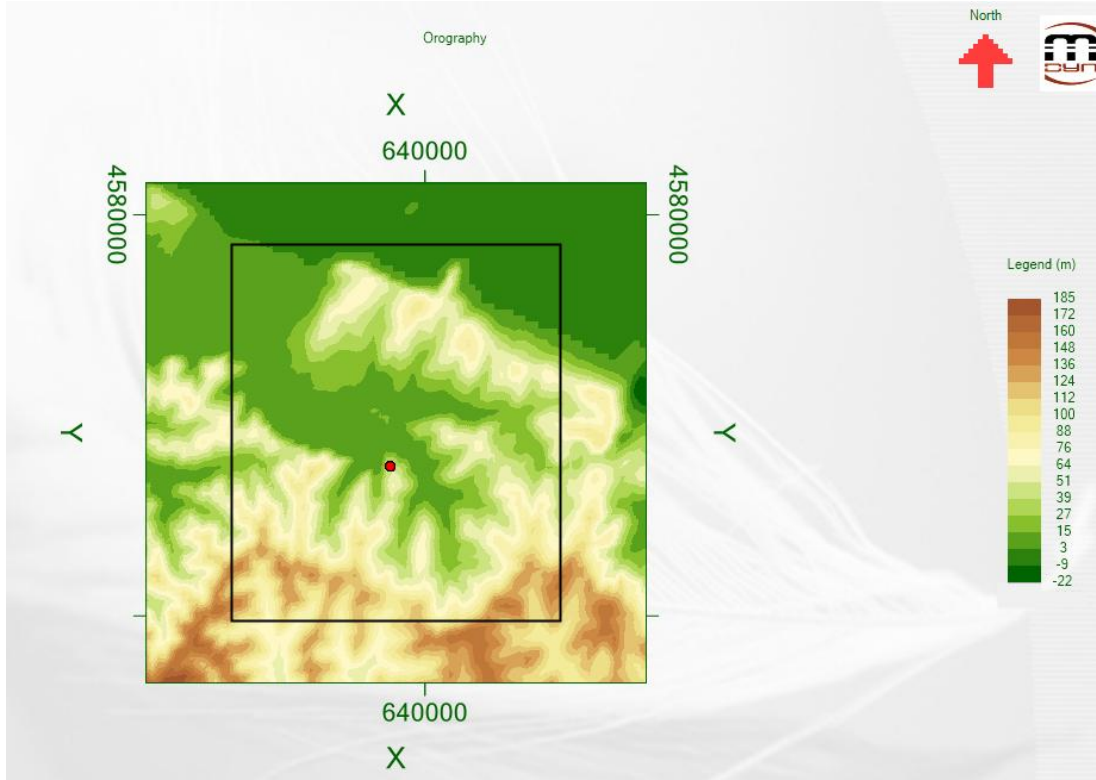


Şekil 3.5 : WAsP ortalama enerji yoğunluğu haritası.

3.3.2 MeteodynWT uygulaması

WAsP bir lineer akış-alan modeli olduğundan karmaşık topografyadaki akış dalgalanmalarına ve sürtünmeye tam anlamıyla açıklık getiremez. Bu değişkenlerin de hesaba katılabilmesi için akışkan dinamiğini de içeren bir model olan MeteodynWT kullanılmıştır.

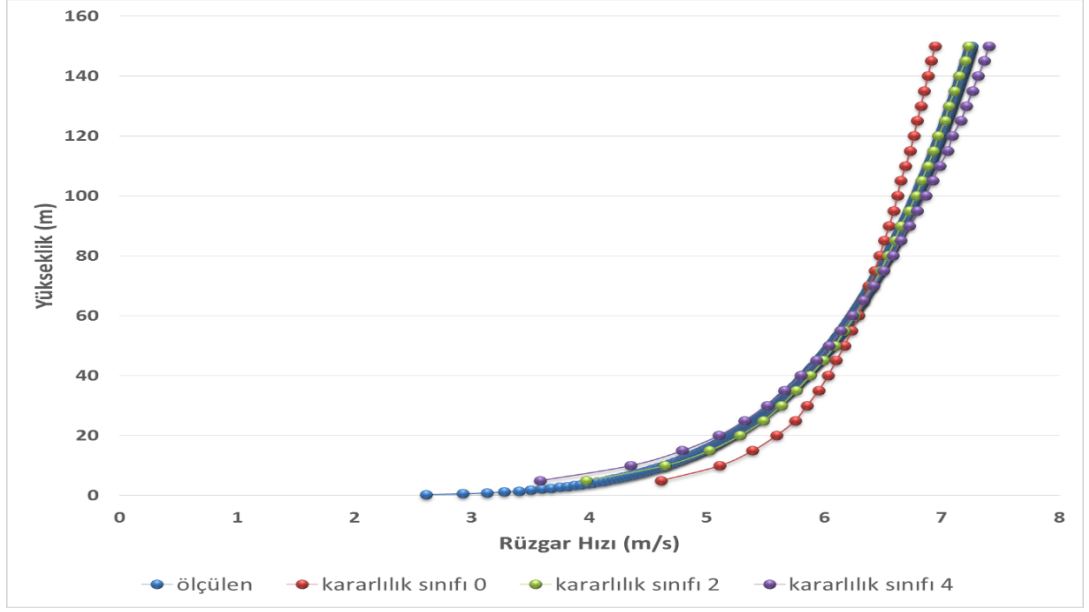
WAsP'ta kullanılan dijital harita ve klimatolojik veri Meteodyn modelinde de girdi olarak kullanılmıştır. Çalışma alanı WAsP'ta olduğu gibi dijital harita üzerindeki 50 metre yatay çözünürlüklü gridlerle oluşturulmuştur. Dijital haritanın Meteodyn modelindeki görüntüsü Şekil 3.6 ile verilmiştir.



Şekil 3.6 : Dijital harita MeteodynWT görüntüsü.

WAsP'ta olduğu gibi MeteodynWT modelinde de ilk olarak ortalama rüzgar hızlarının bölgesel dağılımına bakılmıştır. Türbin hub yüksekliği burada da 65 m olarak belirlenmiştir.

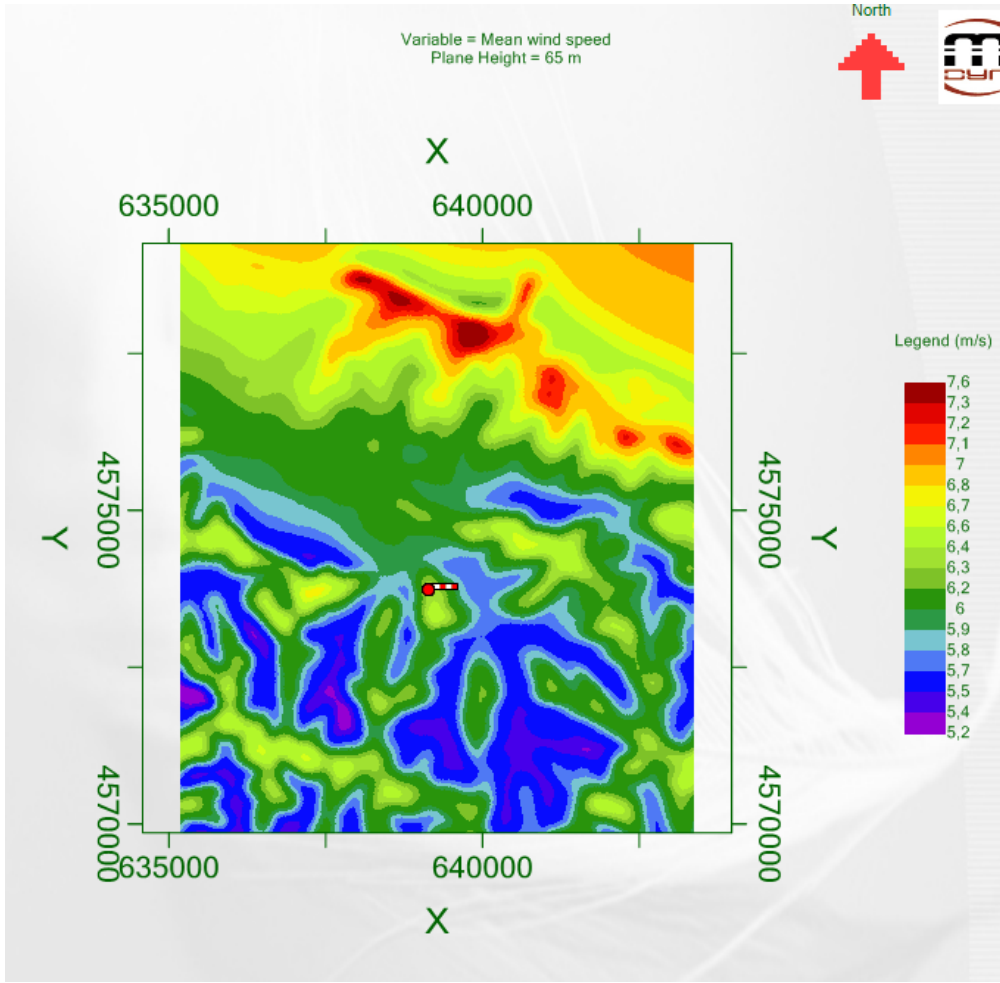
WAsP'ın atmosferi kararlı kabul ettiği varsayımın tersine, MeteodynWT Monin-Obukhov uzunluğuna dayanan farklı kararlılık koşullarına göre (Çizelge 3.1) çalışabilmektedir. Bu nedenle, öncelikle düşey rüzgar kaymasına göre atmosferin kararlılık durumu araştırılmıştır.



Şekil 3.7 : Düşey rüzgar kayması grafiği.

Düşey rüzgar kayması grafiğinde seviyelerine göre ortalama rüzgar hızları grafiğe işlenmiştir. Daha sonra oluşan eğriye en uygun olan kararlılık eğrisi ele alınarak model sonuçları elde edilmiştir. Çizelge 3.1'e göre kararlılık sınıfı 2 ile temsil edilen "nötre yakın" atmosfer koşulu rüzgar gözlem verileriyle uyduğundan (Şekil 3.7), model nötre yakın atmosferik koşullar altında çalıştırılmıştır.

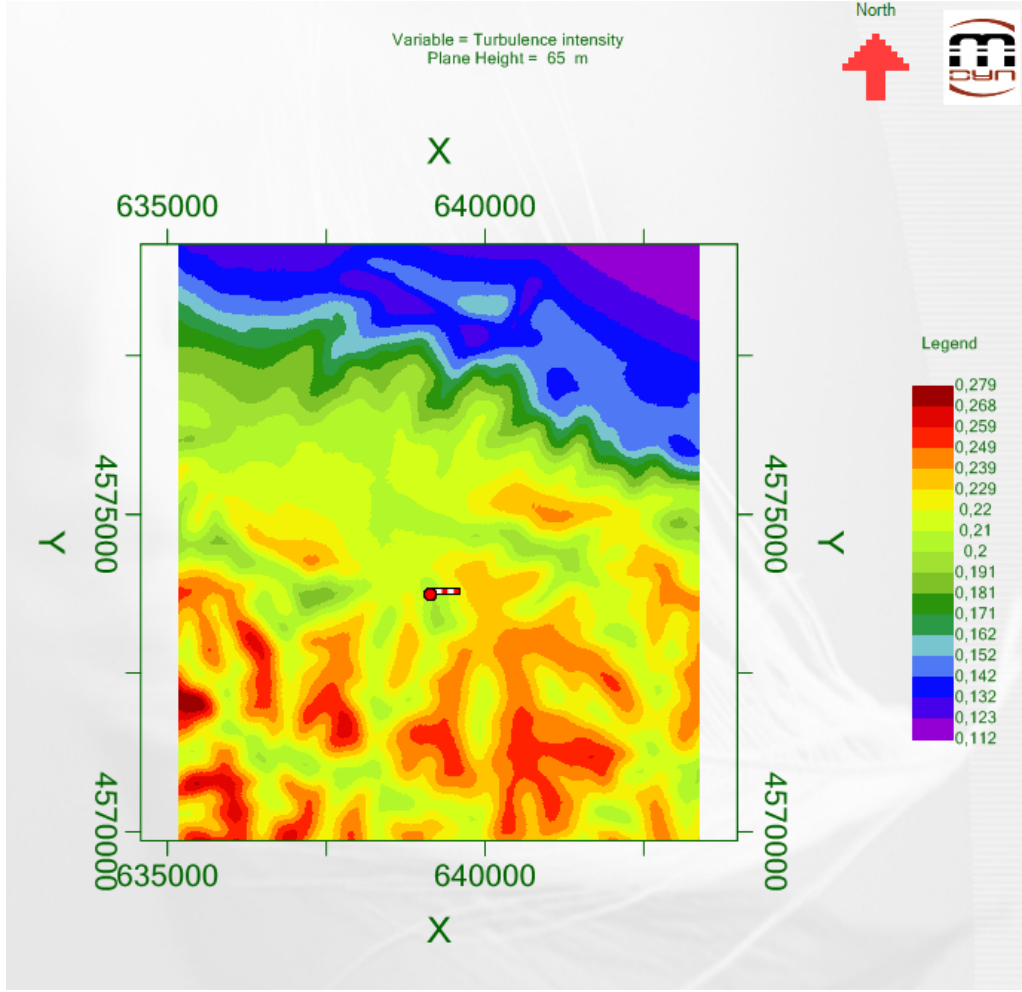
65 m'deki rüzgar hızları WAsP sonuçlarına benzer olarak 5.2 m/s ile 7.6 m/s olarak hesaplanmıştır. Kırmızı renkli alanlar yüksek rüzgar hızlarına ait, mor renkli alanlar ise düşük rüzgar hızlarına sahip alanlardır, mavi ve yeşil renkler sarı ve turuncu renklere göre daha düşük hızları temsil etmektedir. (Şekil 3.8). Ölçüm direğinin bulunduğu bölgede rüzgar hızı ortalaması yaklaşık 6.4 m/s'dir. Kırmızı renkli yüksek hız ortalamasına sahip alanlar, WAsP çıktılarına benzer olarak Karadeniz kıyılarında göze çarpmaktadır. Fakat Terkos Gölü çevresindeki rüzgar hızları WAsP çıktılarına göre daha düşüktür. Model, akışkan dinamiğini içerdiğinden, kara deniz geçiş bölgelerindeki rüzgarları daha iyi temsil edebilmektedir. Sarı renkle temsil edilen ve yaklaşık 6.7 m/s rüzgar hızına sahip bölgeler ise çevrelerine göre daha yüksek bölgelerdir.



Şekil 3.8 : MeteodynWT ortalama rüzgar hızı haritası.

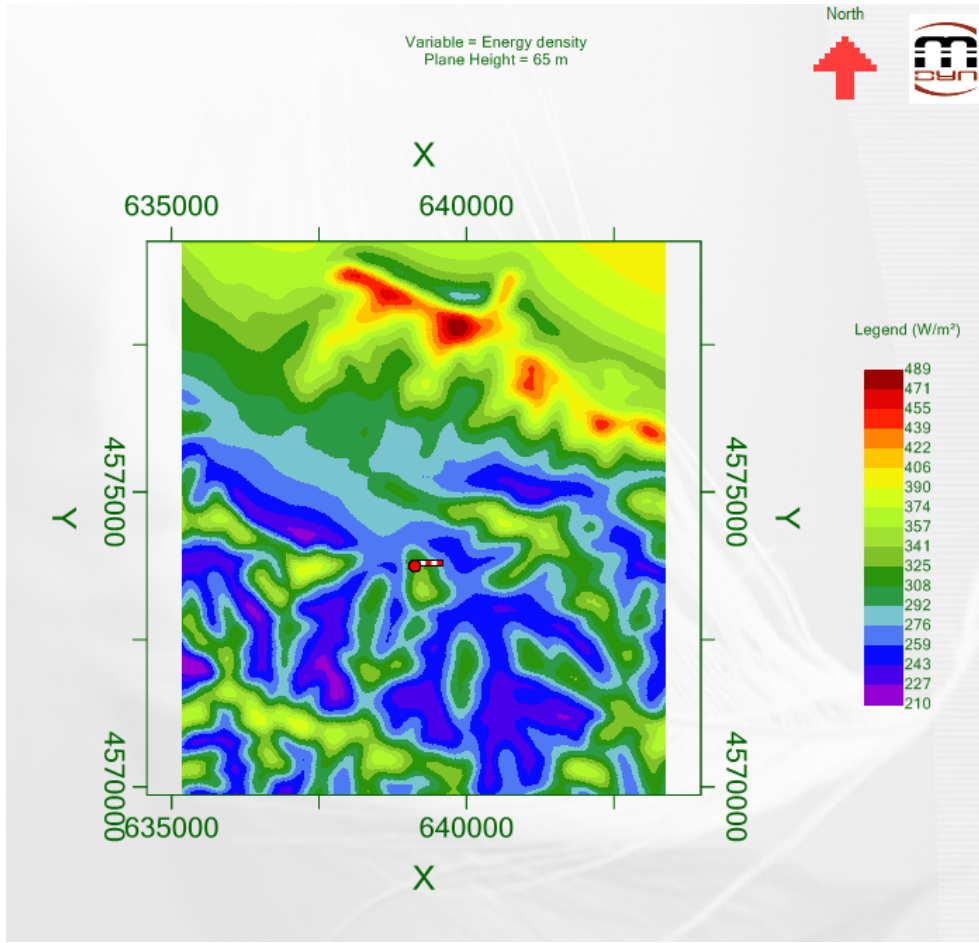
MeteodynWT, içerdiği türbülans kinetik enerjisi denklemine (3.1) dayanarak türbülans yoğunluğu çıktılarını verebilmektedir. Türbülans yoğunluğu, rüzgar hızlarının standart sapmasının ortalama rüzgar hızına oranı olarak tanımlanmaktadır. MeteodynWT’de bu değer türbülans kinetik enerjisinin karekökünün lokal rüzgarın akış hızına oranlanmasıyla bulunur [39].

Türbülans yoğunluğu haritasına göre (Şekil 3.9) en yüksek türbülans yoğunluğu değerleri çalışma alanının güneyindeki bölgelerde görülmüştür. Karadeniz ve Terkos Gölü üzerinde türbülans yoğunluğu değerleri karalara göre düşüktür. Karadeniz’den iç kesimlere doğru gidildikçe türbülans yoğunluğu değerleri artmıştır. Türbülans yoğunluklarının alansal dağılımına bakıldığında genel olarak 0.223 ile 0.98 değerleri arasında değişen türbülanslar göze çarpmaktadır. Ölçüm direğinin olduğu yer harita üzerinde 0.19 türbülans yoğunluğu değeriyle gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : MeteodynWT türbülans yoğunluğu haritası.

Enerji yoğunluğu değerleri WAsP ile paralellik gösterse de genel olarak biraz daha düşüktür. Bunun nedeni modelde topografyaya bağlı türbülans etkilerinin de irdelenmesidir. En yüksek enerji yoğunluğu değerleri Karadeniz kıyılarında gözlenirken, yüksekliği daha fazla olan bölgeler yüksek enerji yoğunluklarına sahiptir (Şekil 3.10). Bu bölgede enerji yoğunluğu 489 W/m^2 'ye kadar çıkmaktadır. Çalışılan bölge içinde enerji yoğunlukları deniz seviyesinden olan yüksekliğe bağlı olarak 210 W/m^2 ile 489 W/m^2 arasında değişmektedir. Ölçüm direğinin olduğu bölgede enerji yoğunluğu yaklaşık 350 W/m^2 civarındadır.



Şekil 3.10 : MeteodynWT enerji yoğunluğu haritası.

3.3.2.1 WAsP ve MeteodynWT ile enerji üretimi çıktılarının belirlenmesine yönelik rüzgar tarlası tasarımı

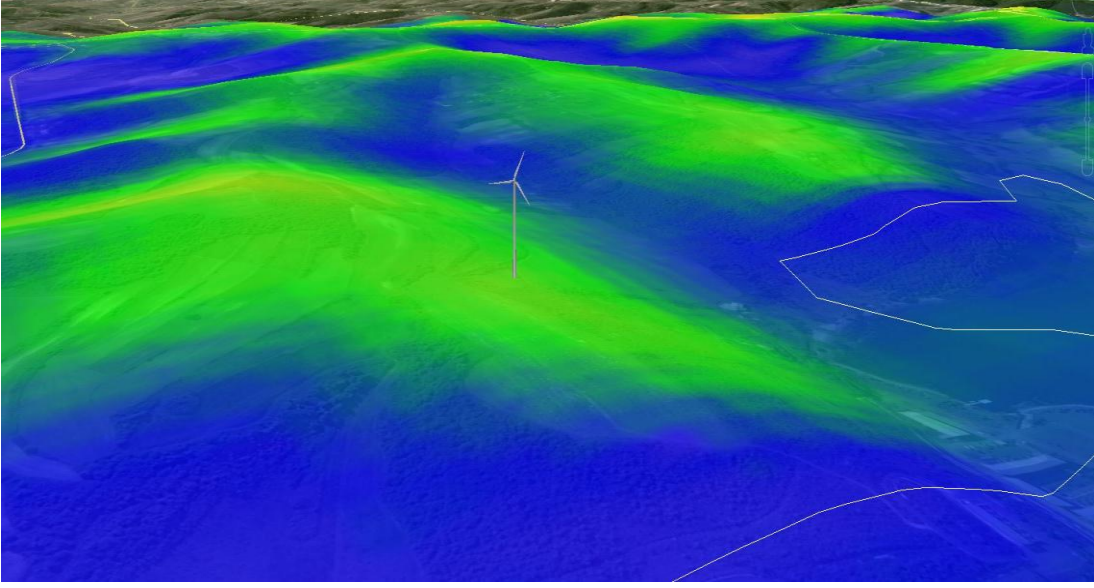
Bir bölgeye uygun türbinin yerleştirilmesi için bilinmesi gereken en önemli değişken rüzgar hızıdır. Türbin seçiminde, rüzgar hızlarına göre sınıflandırmalar yapan IEC (International Electrotechnical Commission - Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) tarafından belirlenmiş standartlar göz önünde bulundurulur. Rüzgar türbin sınıflarının rüzgar hızı parametrelerine göre verildiği IEC 64100-1 standartları Çizelge 3.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 : Rüzgar türbin sınıfları için rüzgar hızı parametreleri [41].

Parametreler	Sınıf I	Sınıf II	Sınıf III	Sınıf IV
Referans rüzgar hızı, u_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	30
Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı, u_{ave} (m/s)	10	8.5	7.5	6
50 yıl içinde görülebilecek en yüksek hız, $1.4u_{ref}$ (m/s)	70	59.5	52.5	42
1 yıl içinde görülebilecek en yüksek hız, $1.05u_{ref}$ (m/s)	52.5	44.6	39.4	31.5
A Türbülans yoğunluğu	0.182	0.182	0.182	0.182
B Türbülans yoğunluğu	0.163	0.163	0.163	0.163

65 m’de ölçülen verilere göre ortalama rüzgar hızı 6.6 m/s’dir. WAsP ve MeteodynWT ile elde edilen ortalama rüzgarların alansal dağılımları da türbin kurulması planlanan bölgede verilerin alındığı periyot içinde ortalama rüzgarın 6 m/s’nin üzerinde olduğunu göstermektedir. Bu durumda ortalama rüzgar hızlarına göre değerlendirme yapıldığında bölge için Sınıf III türbini seçilmelidir. MeteodynWT ile türbin kurulacak bölge için elde edilen türbülans yoğunluğu değeri yaklaşık 0.19 olduğundan (Şekil 3.10), seçilecek türbin IEC 64100-1 standartları’na göre IIIA sınıfına uygun olmalıdır.

Enerji üretimi çıktılarını belirlemek amacıyla iki sayısal uygulama tasarlanmıştır. Birinci uygulamada türbin kurulması planan yere 500 kW’lık Enercon E40 türbini örnek olarak seçilerek yerleştirilmiştir. Rotor yarıçapı 40 metre, hub yüksekliği ise 65 metre olarak girilmiştir. Hava yoğunluğu sabit olarak 1.225 kg/m^3 kabul edilmiştir. Türbinin alana yerleştirilmiş görüntüsü Şekil 3.11’de verilmiştir. Türbin deniz seviyesinden 51 m yükseklikte, ortalama hızı yaklaşık 6 m/s olan bölgede konuşlandırılmıştır.



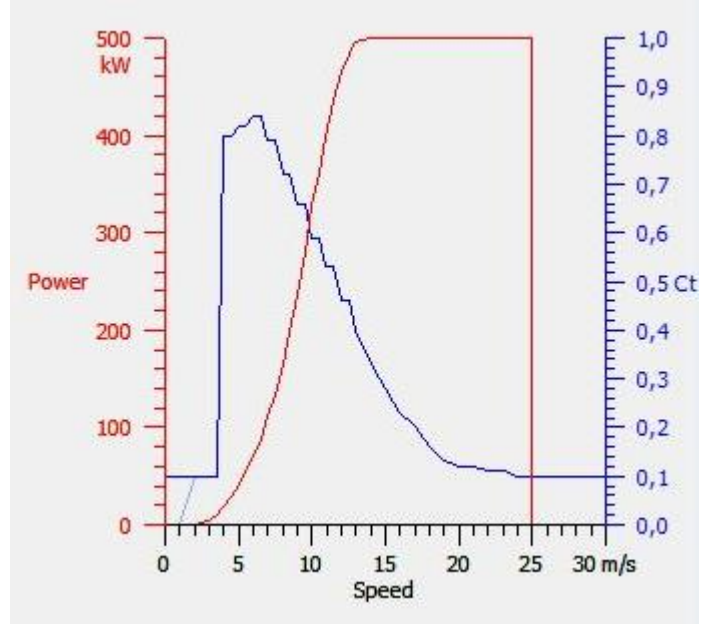
Şekil 3.11 : Türbin görüntüsü.

Türbine ait güç eğrisi grafiğinde (Şekil 3.12) rüzgar hızlarına göre kırmızı renkle gösterilen güç eğrisiyle birlikte mavi renk ile gösterilen itme eğrisi (thrust curve) verilmiştir. Üretim 5 m/s ile 25 m/s arasındaki rüzgar hızlarında yapılabilmektedir. Bu değerler türbinin üretime başladığı cut-in ve üretimi durdurduğu cut-out değerlerini verir. Güç eğrisine ulaşmak için kullanılan güç katsayısı (power coefficient), C_p , (3.14) eşitliği ile hesaplanmaktadır. Eşitlikte P güç, ρ hava yoğunluğu, A rotorun taradığı alan, d rotor yarıçapı, V hub yüksekliğindeki rüzgar şiddetidir [42].

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV^3} = \frac{8P}{\pi\rho d^2 V^3} \quad (3.14)$$

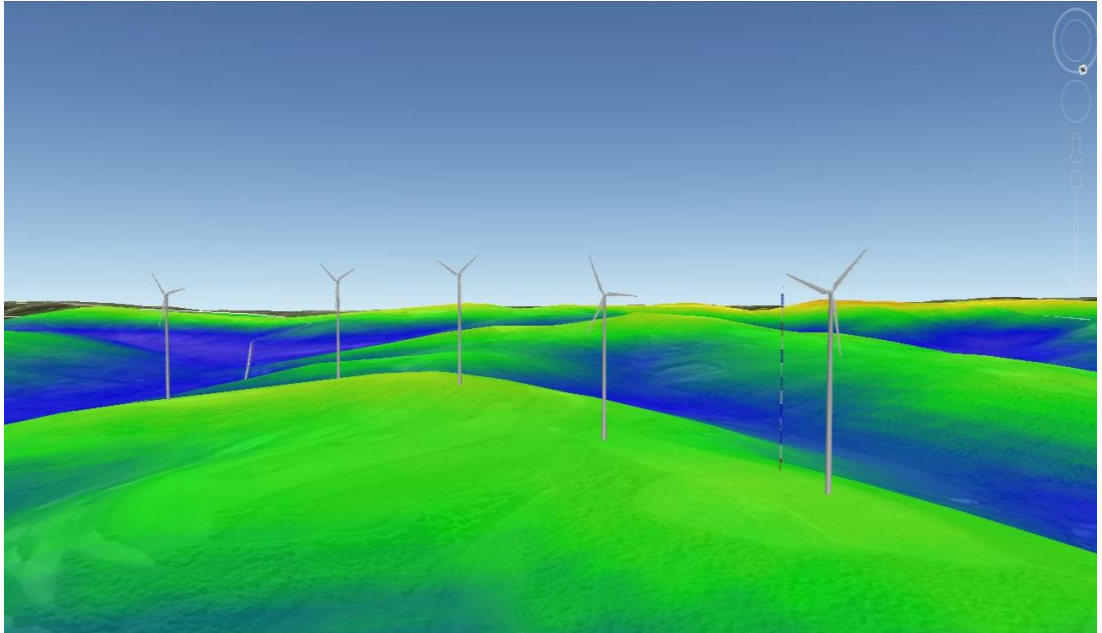
Güç eğrisine göre, türbinin maksimum üretim yaptığı rüzgar hızı 14 m/s ile 25 m/s arasındaki değerlerdir. İtme eğrisinin elde edilmesinde kullanılan itme katsayısı (thrust coefficient) değerleri rüzgar şiddetinin U ile temsil edildiği (3.15) eşitliği ile bulunmuştur [43].

$$C_t = \frac{3.5(2U - 3.5)}{U^2} \quad (3.15)$$



Şekil 3.12 : Güç eğrisi.

Bir diğer çalışmada, tek bir türbin yerine rüzgar tarlası örneği çalışılmıştır. Rüzgar tarlasının görüntüsü Şekil 3.13 ile verilmiştir. Enercon E40 tipi türbinlerden 500kW gücünde 5 türbinle toplamda 2.5 MW kurulu güce sahip rüzgar enerji santrali için üretim çıktıları hesaplanmıştır. Tek türbin için ve rüzgar tarlası için elde edilen üretim değerleri Çizelge 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13 : Rüzgar tarlası görüntüsü.

Çizelge 3.4 : Rüzgar türbini ve tarlası tasarımı için üretim çıktıları.

Model	Türbin Tipi	Türbin Gücü	Kurulu Güç	Üretim	Kapasite Faktörü
WAsP	Enercon E40	500kW	500kWh	1104MW/yıl	%25.2
MeteodynWT	Enercon E40	500kW	500kWh	1113MW/yıl	%25.4
WAsP	Enercon E40	500kW	2500kWh	5467MW/yıl	%25.0
MeteodynWT	Enercon E40	500kW	2500kWh	5510MW/yıl	%25.3

Arazi yapısı çok karmaşık olmadığı için CFD ve lineer modeller arasındaki üretim farkları her iki çalışmada da yüksek olmamıştır. Hem tek türbin için hem de türbin tarlası için kapasite faktörü yaklaşık %25 olarak hesaplanmıştır. Kapasite faktörü, santralin belirli bir periyotta ürettiği enerjinin, tam kapasitede üretebileceği enerjiye oranıdır. Birinci tasarımdaki 500kWh’lık kurulu güç için üretim değerleri WAsP’ta yılda 1104 MW, MeteodynWT’de ise yılda 1113 MW olarak hesap edilmiştir. İkinci tasarım olan rüzgar tarlası için bu değerler yılda 5467 MW ve 5510 MW’tır.

4. KISA SÜRELİ RÜZGAR TAHMİNİ

Günümüzde kısa süreli rüzgar tahmini, rüzgar enerjisi çalışmalarında önemli bir konu haline gelmiştir. Orta ölçekli düğüm noktası (grid point) modelleri meteorolojik değişkenlerin noktasal ve alansal tahminlerinde kullanılabilmektedir. Bu çalışmada modern orta ölçekli bir sayısal tahmin modeli olan WRF-ARW kullanılarak noktasal rüzgar tahmini yapmak hedeflenmiştir.

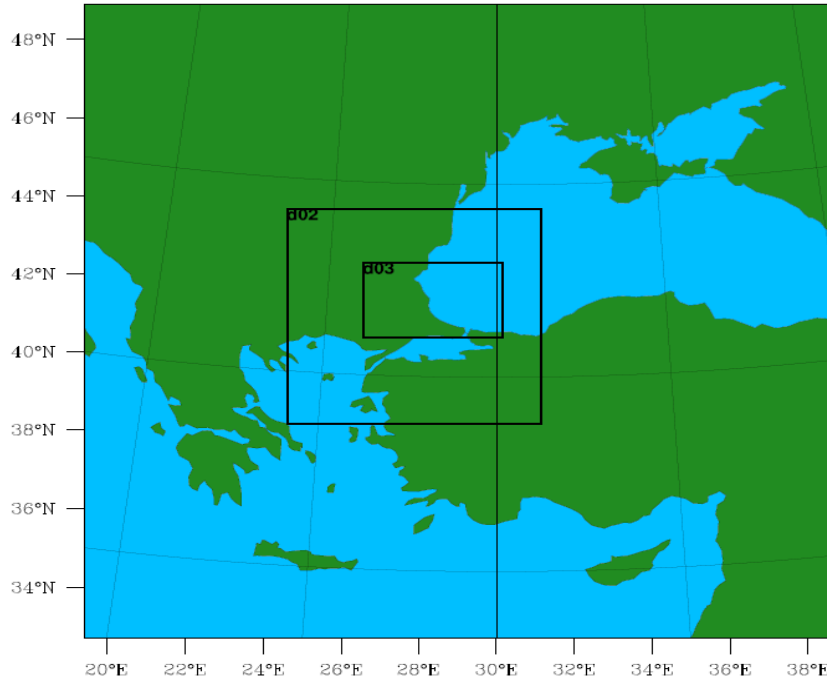
4.1 WRF Modeli

WRF 1990'ların sonlarında, önceleri NCAR (National Center for Atmospheric Research-Ulusal Atmosferik Araştırma Merkezi) ve NCEP (National Centers for Environmental Prediction-Ulusal Çevresel Tahmin Merkezi) tarafından daha sonra FLS (Forecast Systems Laboratory-Tahmin Sistemleri Laboratuvarı), AFWA (the Air Force Weather Agency-Hava Kuvvetleri Hava Kurumu), Naval Araştırma Laboratuvarı, Oklahoma Üniversitesi ve FAA (Federal Aviation Administration-Sivil Havacılık İdaresi)'nin de işbirliğiyle geliştirilmiştir [44]. WRF, araştırmaya yönelik ARW ve operasyonel tahmin yapmaya yönelik NMM (nonhydrostatic mesoscale model-hidrostatik olmayan orta ölçekli model) çeşitlerine sahiptir. WRF, değişik ölçeklerde meteorolojik araştırmaları, gerçek zamanlı sayısal hava tahminini, idealleştirilmiş atmosferik simülasyonlarını, veri asimilasyonu ve geliştirilmesini, diğer yer sistem modelleriyle birleşik olarak çalışmayı, modelleme ve model kullanımı öğretimi ve eğitimini de içeren geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir [45]. Bu çalışmada WRF-ARW 3.3.1 sürümü kullanılmıştır.

4.1.1 WRF-ARW başlangıç ve sınır koşulları

Model, Şubat ve Mart aylarına ait 3 gün için 1'er saatlik tahminler verecek şekilde 6 farklı başlangıç koşuluyla çalıştırılmıştır. Modelde girdi verisi olarak 6 saatlik zamansal çözünürlüklü NCEP'e ait 1° grid çözünürlüğüne sahip Final Operational

Model Global Tropospheric Analyses (Son Operasyonel Model Küresel Troposferik Analizler) veri seti kullanılmıştır.



Şekil 4.1 : WRF-ARW yuvalama yapılandırması.

Modelde dış alan olarak 33-49 ° kuzey enlemlerini ve 19-39 ° doğu boylamlarında Avrupa'nın bir kısmını ve Türkiye'yi içeren bölge seçilmiştir. Orta alan olarak Marmara'yi, en iç alan olarak Terkos'u içine alan bölge seçilmiştir (Şekil 4.1). Yuvalama alanlarının uzaysal çözünürlükleri dıştan içe doğru 30 km, 10 km ve 3 km'dir. Model düzeyde 28 seviye içermektedir.

WRF modeliyle tahminlerin elde edilebilmesi için model içerisinde çeşitli fizik şemaları tanımlanmıştır. Bu fizik şemaları mikrofizik, cumulus parametrisasyonu, yüzey fizikleri, planeter sınır tabaka (PBL - planetary boundary layer) fiziği ve atmosferik radyasyon fiziklerini içermektedir. Bu şemaların farklı kombinasyonları ile farklı tahminler elde etmek mümkündür. Bu çalışmada Çizelge 4.2'de gösterilen 6 farklı başlangıç koşulu kullanılmıştır.

NCAR teknik notlarında yer alan bilgilere göre; WRF modelinde mikrofizik şemaları, idealize edilmiş basit çalışmalardan karmaşık süreçleri içeren çalışmalara ve sayısal hava tahminine kadar uygun fizik seçeneklerine sahiptir. Cumulus parametrisasyonları orta ölçekli modellemeler için düzeltmeleri ve kütle-akı şemalarını içerir. Yüzey fiziği şemaları, basit bir termal modelden kar örtüsü ve

deniz yüzeyindeki buzlanmayı da içeren vejetasyon ve toprak nemi modellerine kadar, çok seviyeli yer yüzeyi modelleri için parametrizasyonları içerir. Planeter sınır tabaka fizikleri kinetik enerjisi tahmini veya lokal olmayan kinetik enerji şemalarını kapsar. Atmosferik radyasyon fizikleri çoklu spektral bantlarla uzun ve kısa dalga şemaları ile iklim ve hava durumu uygulamaları için basit bir kısa dalga şemasını içerir. Bulut etkileri ve yüzey akıları da hesaba katılmaktadır [46].

Çizelge 4.1 : WRF mikrofizik seçenekleri [46].

Şema	Değişken sayısı	Buz fazı süreçleri	Karışım fazı süreçleri
Kessler	3	H	H
Purdue Lin	6	E	E
WSM3	3	E	H
WSM5	5	E	H
WSM6	6	E	E
Eta GCP	2	E	E
Thomson	7	E	E
Goddard	6	E	E
Morrison 2-Moment	10	E	E

Çizelge 4.1’de WRF’da yer alan mikrofizik seçenekleri verilmiştir. Mikrofizik şemaları su buharı, bulut ve yağış süreçlerini çözümlediğinden, buz fazı süreçlerini ve karışım fazı süreçlerini içermesine göre de Evet (E) ve Hayır (H) olarak belirtilmiştir. Çizelgede ayrıca şemaların içerdiği nem değişkenleri sayıları da verilmiştir. Özellikle 10 km’den daha düşük çözünürlüklerde karışım fazını içeren şemaların kullanılması önemlidir [46]. Bu çalışmada WRF’ta başlangıç parametrizasyon şeması olarak Thomson seçilmiştir. Bu şema hem buz fazı süreçlerini hem de karışım fazı süreçlerini içermektedir.

Bir diğer parametrizasyon şeması olan cumulus şeması konvektif veya sığ bulutların etkilerini içerir. Kain-Fritsch, Betts-Miller-Janjic, Grell-Devenyi ve Grell-3 cumulus şemaları WRF’da yer almaktadır. Bu çalışmada, Kain-Fritsch şeması kullanılmıştır. Kain-Fritsch’in WRF’da yer alan güncel versiyonu 1990’da Kain ve Fritsch

tarafından üretilen konvektif parametrizasyona dayanır [47]. 1993 yılında Kain ve Fritsch, orta ölçekli modeller için üretilen parametrizasyonlarına Kain-Fritsch adını vermişlerdir [48]. Daha sonra güncellenen Kain-Fritsch şeması ETA modeli içinde test edilerek güncel halini almıştır [49].

Kain-Fritsch şeması, atmosferde yükseltici ve alçaltıcı kuvvetleri içeren basit bir bulut modeli kullanarak ve sürüklenme etkileriyle birlikte diğer fiziklere göre basit mikrofizikleri de kullanarak hesaplamalar yapmaktadır [46].

Çizelge 4.2 : WRF-ARW başlangıç koşulları.

Başlangıç Koşulu	Gezegensel Sınır Tabaka	Yer Yüzeyi Modeli	Yüzey Tabakası Fiziği
1	ACM2	Pleim-Xiu	Pleim-Xiu
2	MRF	Noah LSM	Monin-Obukhov
3	MYJ	Noah LSM	Eta similarity
4	MYNN2	Noah LSM	MYNN
5	YSU	Noah LSM	Monin-Obukhov
6	QNSE	Noah LSM	QNSE

WRF’da yüzey tabakası şemaları sürtünme hızlarını ve değişim katsayılarını hesaplayarak yer yüzeyi modelleri ve PBL şemalarındaki yüzey gerilimi yardımıyla yüzeydeki ısı ve nem akılarının belirlenmesini sağlamaktadır [46]. Çizelge 4.3’te yüzey tabakası şemaları özetlenmiştir.

Çizelge 4.3 : Yer yüzeyi fiziği seçenekleri [45].

Şema	Vejetasyon süreçleri	Toprak değişkenleri (tabakalar)	Kar şeması
5-Layer	H	Sıcaklık (5)	yok
NOAH LSM	E	Sıcaklık, Su+Buz, Su (4)	Tek seviye, kısmi
RUC	E	Sıcaklık, Buz, Su+Buz (6)	Çok seviye
Pleim-Xiu	E	Sıcaklık, Nem (2)	Yalnızca girdi

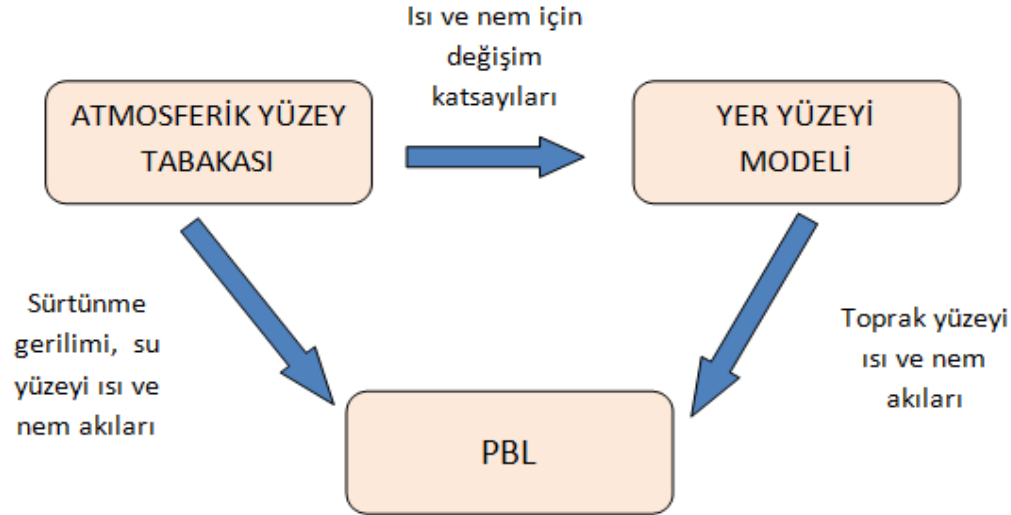
Çalışmada NOAH LSM ve Pleim-Xiu şemaları başlangıç parametrizasyonları olarak seçilmiştir.

NCAR teknik notlarında belirtildiği üzere NOAH YSM, NCAR ve NCEP tarafından geliştirilen, kalınlıkları yukarıdan aşağıya 10 cm, 30 cm, 60 cm, 100 cm olan 4 tabakada toprak sıcaklığı ile kar örtüsü ve bitki örtüsü nemi tahminleriyle birlikte nem modelini içermektedir. Bu şema sınır tabaka şemalarına gizli ısı ve hissedilir ısı akıları bilgilerini vermektedir [46].

Pleim-Xiu, NOAH YSM'den farklı olarak 2 tabaka (1 cm kalınlığında üst tabaka ve 99 cm kalınlığındaki alt tabaka) ile çalışmaktadır ve nem akılarını evapotranspirasyonu, toprak evaporasyonunu ve nemli bitki örtüsünden olan evaporasyonu ele alarak belirlemektedir [46].

Modelde yer yüzeyi şemalarıyla birlikte çalışan yüzey tabakası şemaları da yer almaktadır. Bu nedenle seçilen yer yüzeyi şemalarına uygun yüzey tabakası şemaları seçilmiştir. Çizelge 4.3'de gösterilen yüzey tabakası şemaları modele yüzey tabakası başlangıç parametrizasyonu olarak girilmiştir.

Planeter sınır tabaka şemaları ise modelde atmosferin kararsız koşullarında ısı ve nem akılarında kullanılmaktadır [46]. Bu çalışmada PBL şemalarından ACM2 (Asymmetrical Convective Model version 2 – Asimetrik konvektif model, sürüm 2), MRF (Medium Range Forecast Model – Orta Vadeli Tahmin Modeli), MYJ (Mellor – Yamada – Janjic) , MYNN2, YSU (Yonsei University – Yonsei Üniversitesi) ve QNSE kullanılmıştır (Çizelge 4.2). Modelde kullanılan bu PBL şemalarının özeti Çizelge 4.4 ile verilmektedir. PBL fizikleri girdi olarak yüzey tabakası şemalarından aldığı bilgiler ile birlikte yer yüzeyi modellerinden aldığı bilgileri kullanır. Prognostik değişkenler olarak TKE veya QKE (türbülanslı ısı akısı) kullanılabilir (Çizelge 4.4). Şekil 4.2'de yüzey fiziğini oluşturan bu 3 şemanın işleyişi gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : WRF-ARW yüzey fiziği bileşenleri [48].

Çizelge 4.4 : WRF-ARW PBL şemaları [48].

Şema	WRF Dinamik Çekirdek	Prognostik Değişkenler	Diagnostik Değişkenler	Bulut Karışma Oranı
ACM2	ARW	-	-	QC, QI
MRF	ARW NMM	-	-	QC, QI
MYJ	ARW NMM	TKE_PBL	EL_PBL, exch_h, Tsq, Qsq, Cov, exch_h, exch_m,	QC, QI
MYNN2	ARW	QKE	exch_h, exch_m,	QC
YSU	ARW NMM	-	exch_h, EL_PBL, exch_h,	QC, QI
QNSE	ARW NMM	TKE_PBL	exch_m	QC, QI

Çizelgede prognostik değişkenlerden PBL'deki türbülans kinetik enerjisi TKE_PBL, türbülanslı ısı akıları QKE ile belirtilmiştir. Diagnostik değişkenler; PBL'deki karışma uzunluğu (EL_PBL), skaler değişim katsayıları (exch_h), değişim katsayıları (exch_m), suyun potansiyel sıcaklığının varyansı (Tsq), suyun varyansı (Qsq), su ve suyun potansiyel sıcaklığının kovaryansı (Cov)'u içermektedir [49]. Şemaların kullandığı bulut karışma oranları bulut-su karışma oranı (QC) ve bulut-buz karışma oranı (QI) olarak gösterilmiştir.

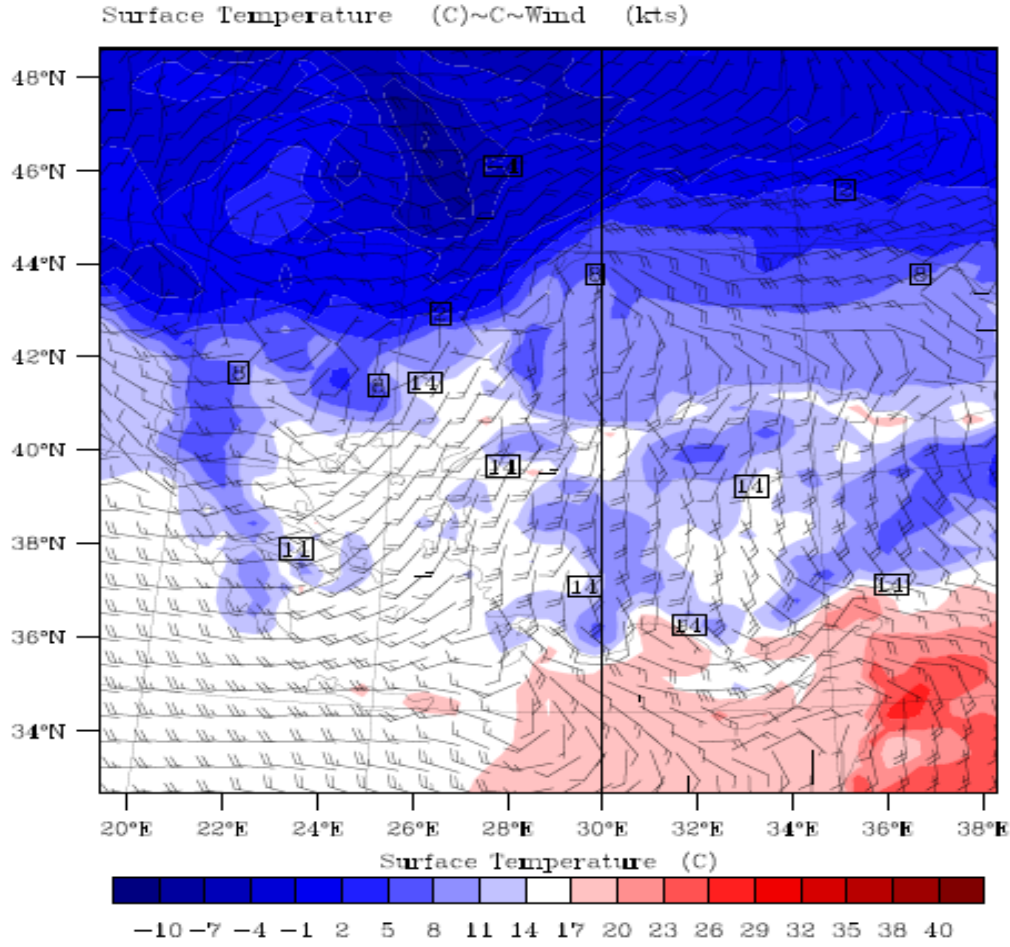
4.1.2 WRF-ARW sonuçların karşılaştırılması

İlk olarak Şubat ve Mart aylarının ilk üç günü için farklı başlangıç koşullarıyla yapılan tahmin sonuçları gözlem verisiyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar WRF-ARW modelinde seçilen yuvalama alanındaki dış, orta ve içteki alan için yapılan tahminleri ayrı ayrı içermektedir. WRF-ARW bir düğüm noktası modeli olduğundan tahminler düğüm noktaları için yapılmaktadır. Tahminlerin gözlem verisiyle karşılaştırılabilmesi için düğüm noktalarındaki tahminler iki farklı alt ölçekleme yöntemiyle Terkos'ta ölçüm direğinin olduğu noktaya taşınmıştır. Yöntemlerden biri en yakın komşu (nearest neighbour), diğeri ağırlıklı ortalama (weighted average) yöntemidir. En yakın komşu yönteminde tahmini yapılan noktaya en yakın düğüm noktasındaki tahminler kullanılmakta, ağırlıklı ortalama ise en yakın düğüm noktalarındaki tahminlerin ortalaması alınmaktadır.

Çalışmada 10 m'deki model verileriyle Terkos'a ait 10 m'deki saatlik ortalama rüzgar hızı verileri karşılaştırılmıştır.

4.1.2.1 Dış yuvalamadaki tahminler

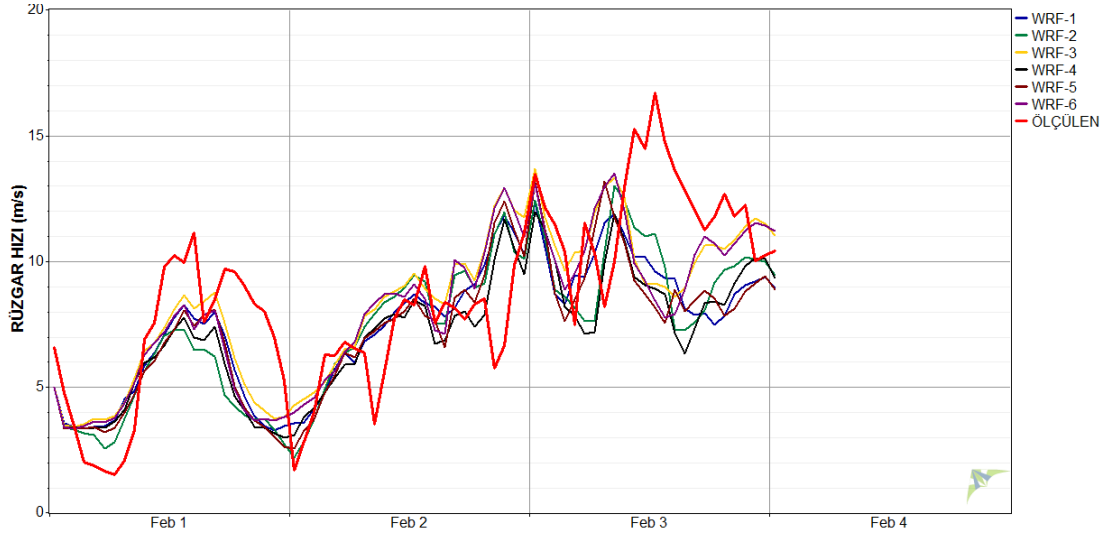
Dış yuvalamaya ait tahminlerin bir örneği yüzey sıcaklığı ve rüzgarların harita üzerine işlendiği Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekilde yüzey sıcaklıkları düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara doğru maviden kırmızıya doğru giden renklerle temsil edilmiştir. Rüzgarlar, yön ve şiddetine göre (knot cinsinden) harita üzerine işlenmiştir.



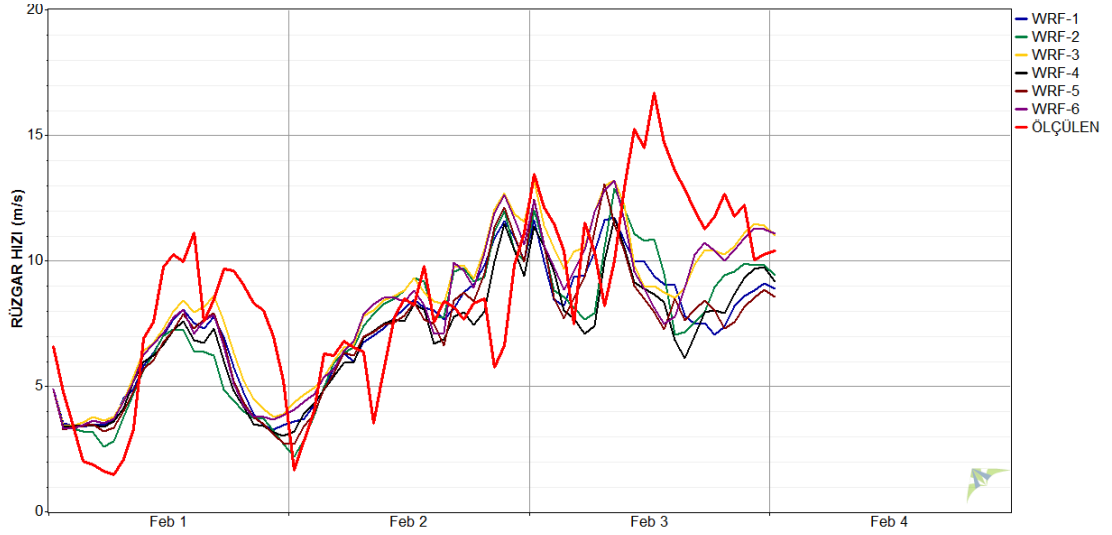
Şekil 4.3 : Dış yuvalamada WRF-ARW tahmin örneği.

6 farklı başlangıç koşuluyla elde edilen tahminler Çizelge 4.1’de verilen sırayla karşılaştırılmıştır. Dış yuvalama için Şubat ayı tahminlerinin Terkos’ta ölçülen verilerle karşılaştırması Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te verilmiştir. Model sonuçlarının birbiriyle yakın olduğu ve WRF-3 parametrisasyonun gözlem verisine en yakın olduğu görülmektedir. Çalışılan alanın büyüklüğü ve iç yuvalamaya oranla daha düşük çözünürlük, tahminlerin gözlemlerden uzaklaşmasına neden olmuştur.

Model sonuçlarının birbiriyle yakın olduğu ve WRF-3 parametrisasyonun gözlem verisine en yakın olduğu görülmektedir. Çalışılan alanın büyüklüğü ve iç yuvalamaya oranla daha düşük çözünürlük, tahminlerin gözlemlerden uzaklaşmasına neden olmuştur.

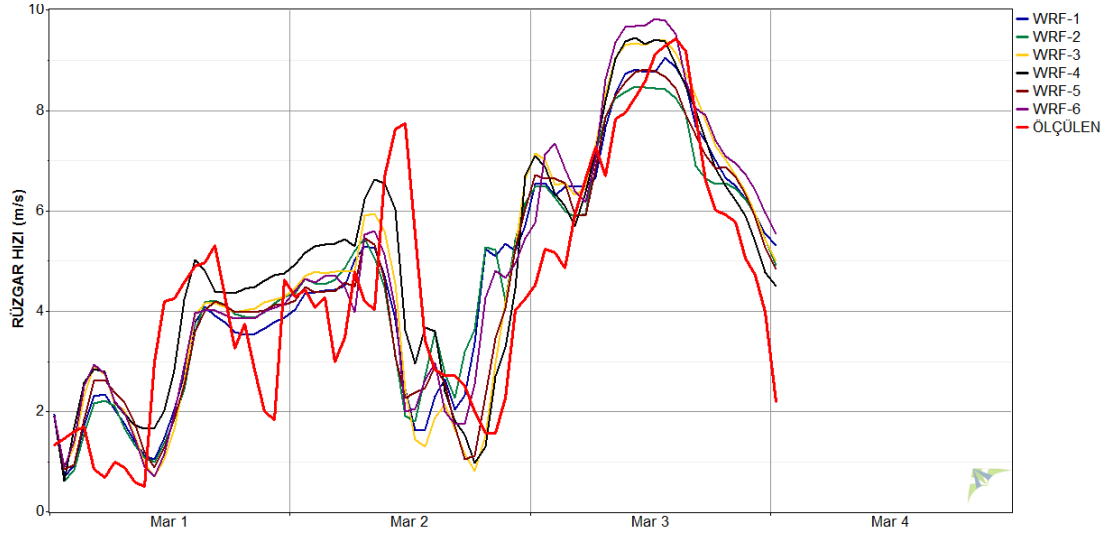


Şekil 4.4 : Dış yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).

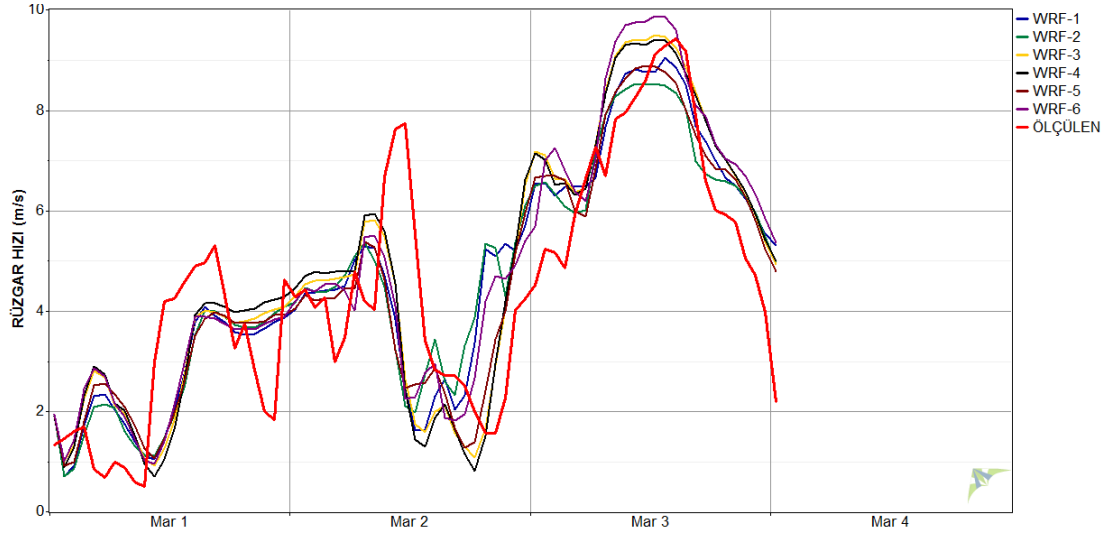


Şekil 4.5 : Dış yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi).

Mart ayına ait dış yuvalama tahminleri Şubat ayına göre gözlemlerle daha çok örtüşmektedir (Şekil 4.6-4.7). Rüzgarların maksimuma ulaştığı yerlerde tahminler gözlemlerle uyduğu görülmektedir. Genel salınımda gözlem verileri daha çok değişime sahip olsa da model sonuçları rüzgar hızındaki artış ve azalışları takip etmektedir.



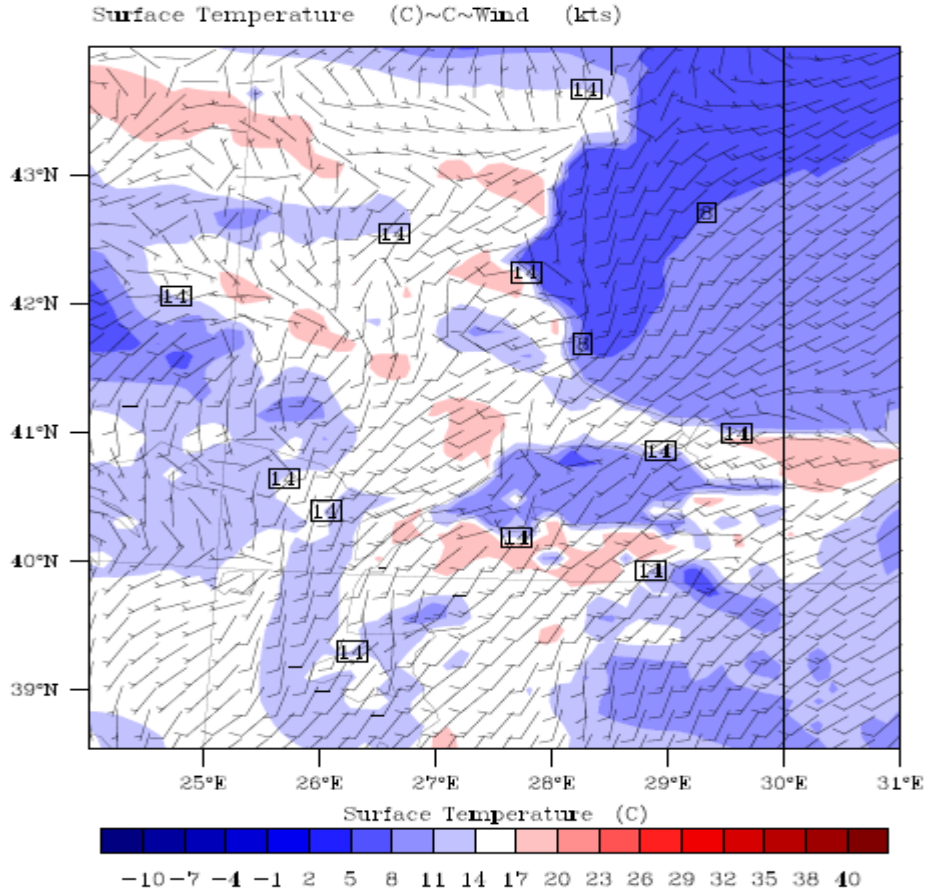
Şekil 4.6 : Dış yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).



Şekil 4.7 : Dış yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi).

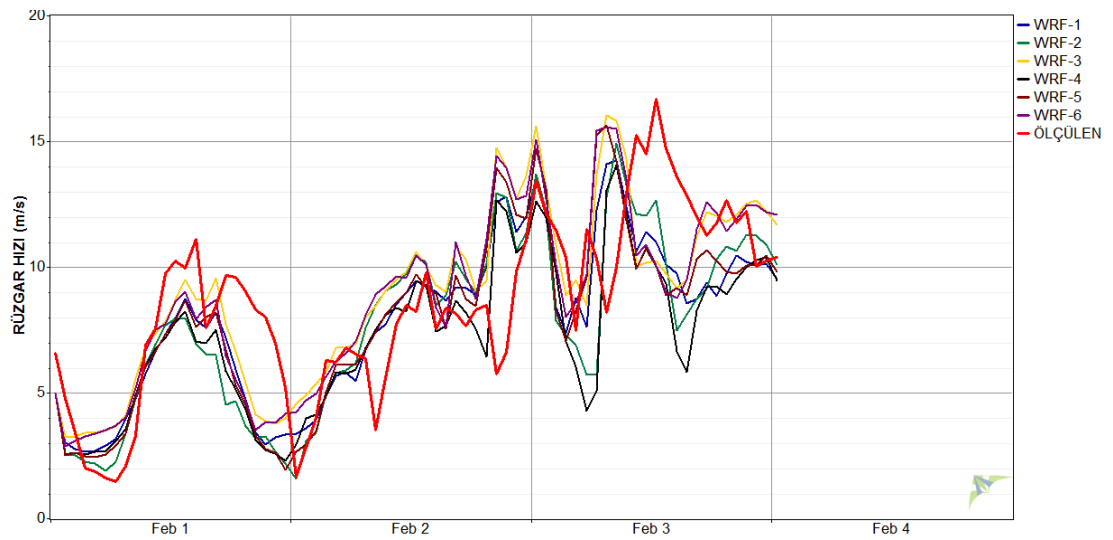
4.1.2.2 Orta yuvalamadaki tahminler

Orta yuvalamaya ait tahminlerin bir örneği yüzey sıcaklığı ve rüzgarların harita üzerine işlendiği Şekil 4.8’de verilmiştir.

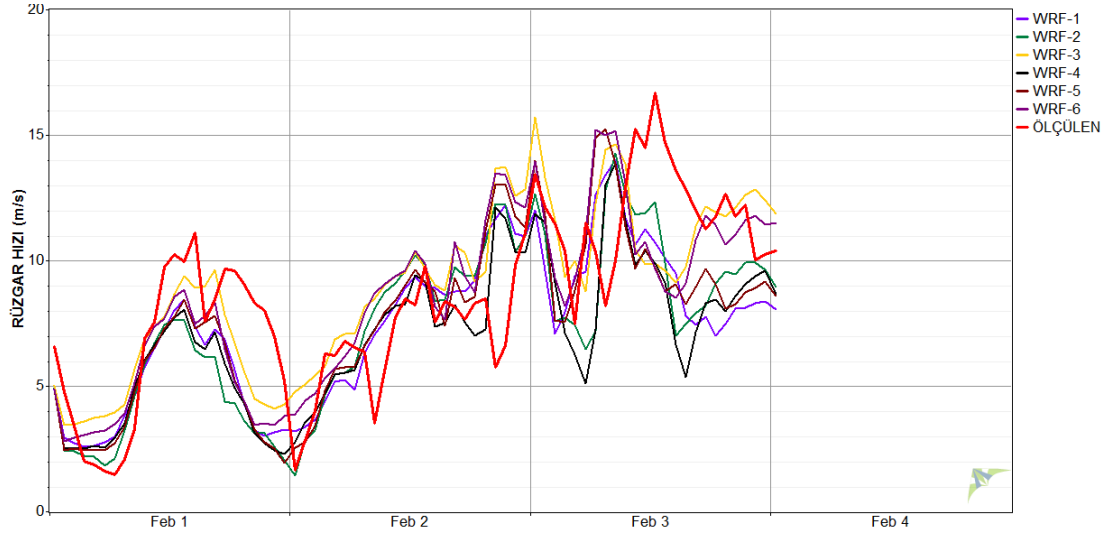


Şekil 4.8 : Orta yuvalamada WRF-ARW tahmin örneği.

Orta yuvalamada Şubat ayı tahminleri ile gözlem verileri arasındaki sapmalar yüksektir (Şekil 4.9-4.10). Rüzgardaki ani çıkış ve yükselişlerin fazla olması modelin gözlemleri yakalamasını zorlaştırmış, sapmaları arttırmıştır.

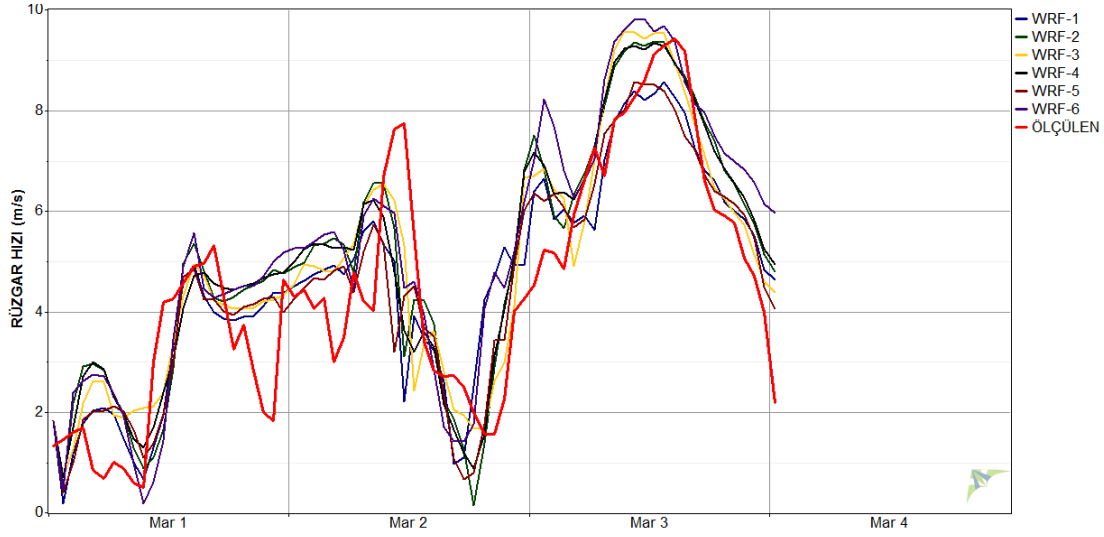


Şekil 4.9 : Orta yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).

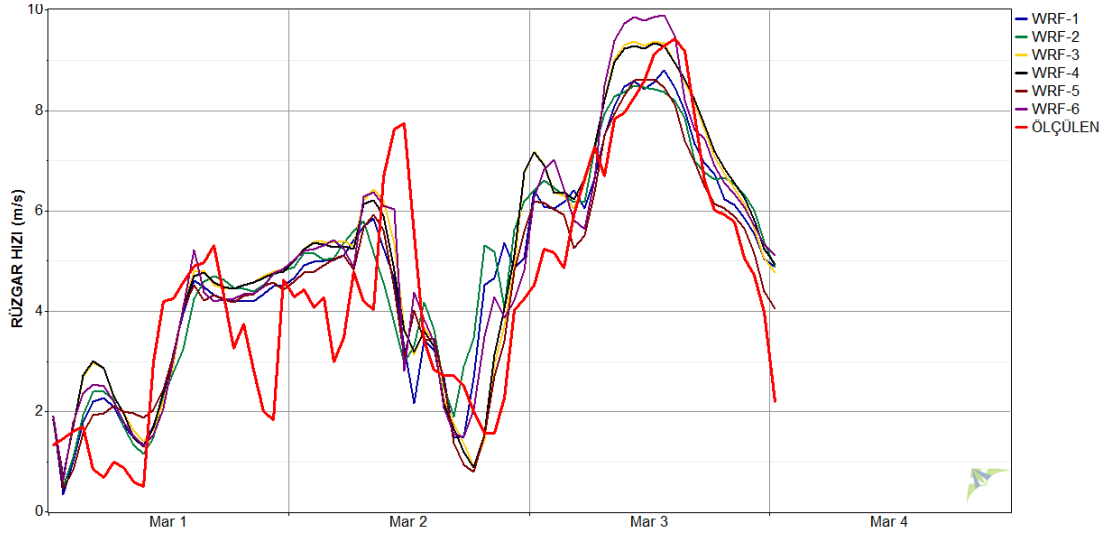


Şekil 4.10 : Orta yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi).

Mart ayına ait gerçek rüzgar hızlarındaki artış ve azalışlardaki ani iniş çıkışların Şubat ayında ele alınan günlerden daha az olması tahminlerle gözlemlerin daha çok yaklaşmasını sağlamıştır. Özellikle 3 Mart gününe ait tahminlerde tahminler ve ölçülen değerler birbirine yakındır. Rüzgarların en yüksek olduğu fakat 12-13 m/s'yi aşmadığı zamanlarda tahminlerin daha tutarlı olduğu görülmektedir.



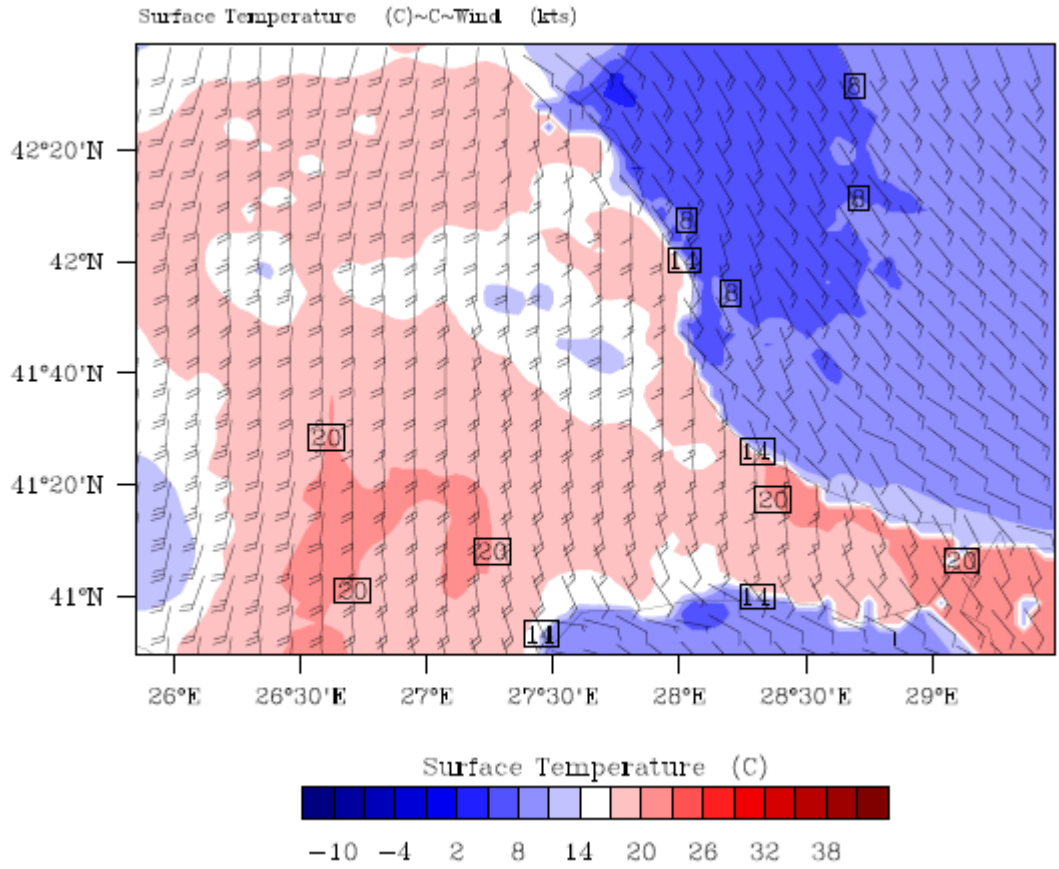
Şekil 4.11 : Orta yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).



Şekil 4.12 : Orta yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi).

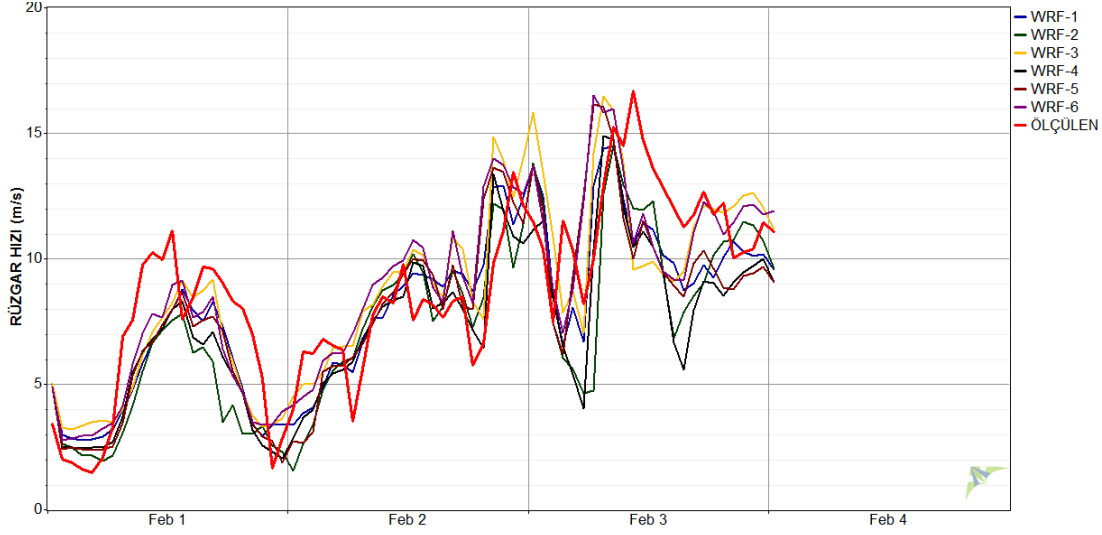
4.1.2.3 İç yuvalamadaki tahminler

İç yuvalamaya ait tahminlerin bir örneği yüzey sıcaklığı ve rüzgarların harita üzerine işlendiği Şekil 4.13’te verilmiştir.

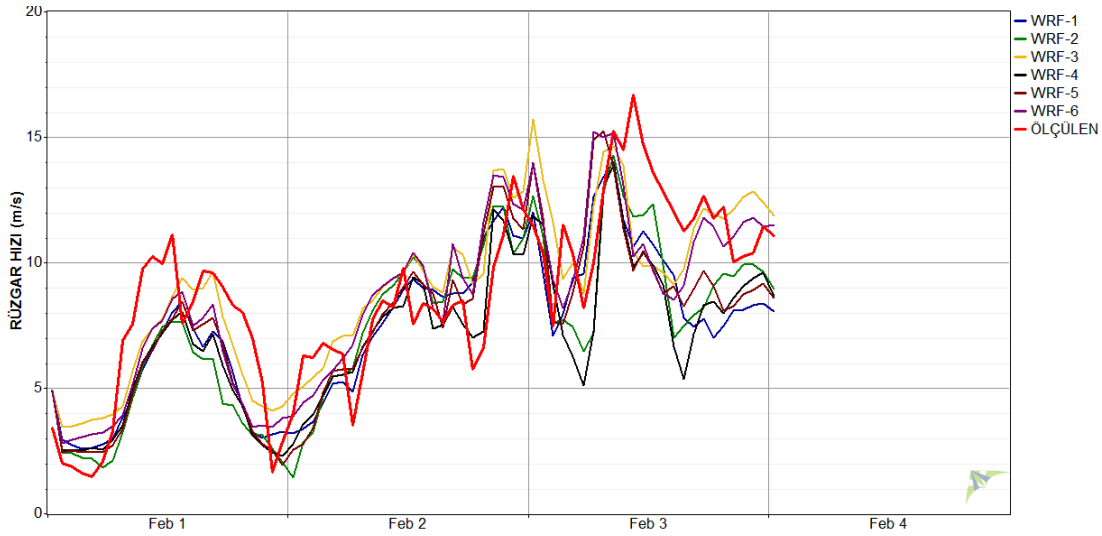


Şekil 4.13 : İç yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW tahmin örneği.

İç yuvalamada model sonuçlarının rüzgar hızındaki çalkantıları daha iyi yakaladığı görülmektedir. Şubat ayına ait karşılaştırmalarda (Şekil 4.14-4.15) artış ve azalışların model tarafından diğer yuvalama sonuçlarına göre çok daha iyi takip edildiği göze çarpmaktadır.

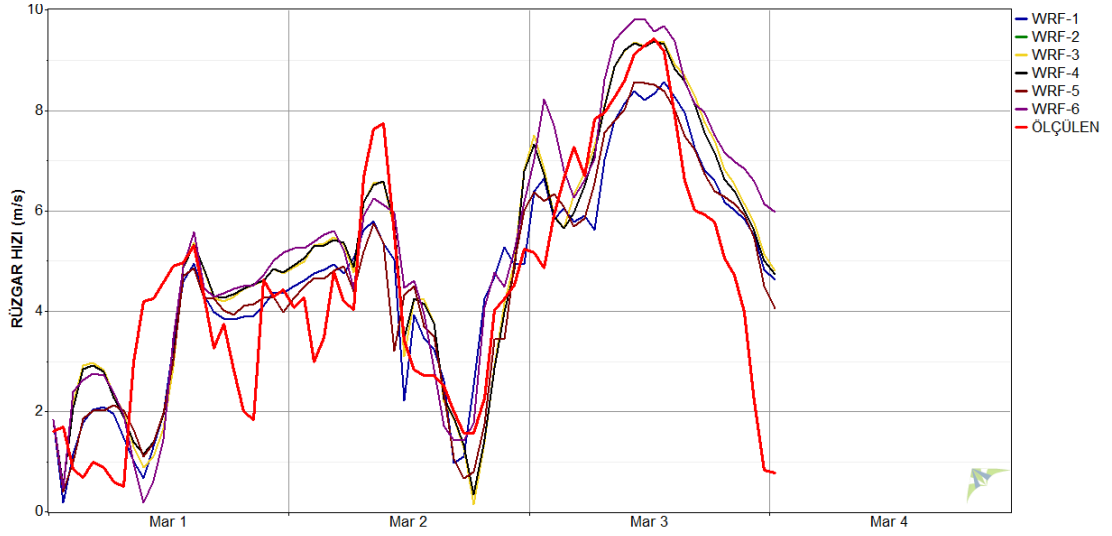


Şekil 4.14 : İç yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).

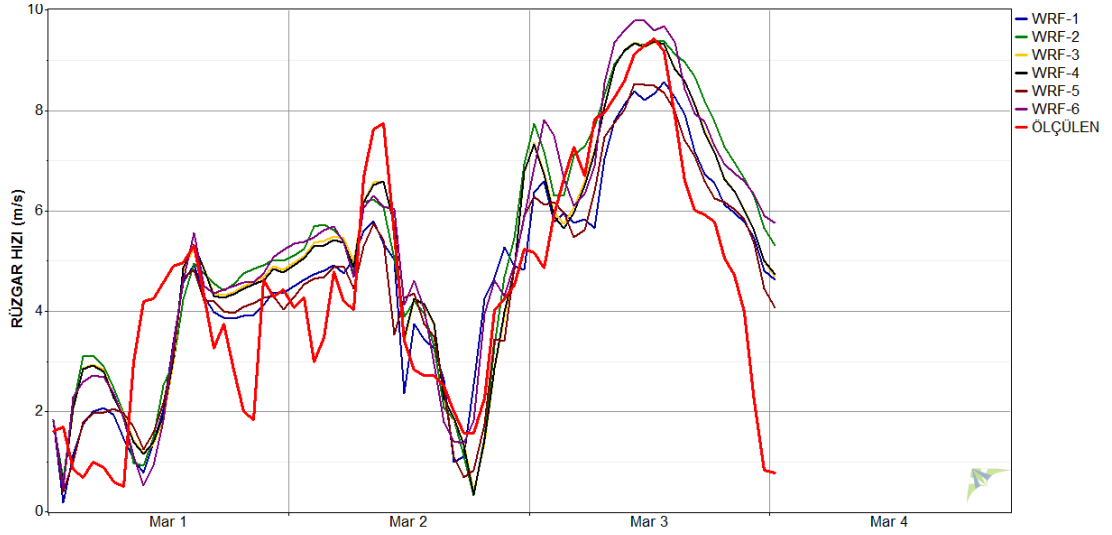


Şekil 4.15 : İç yuvalamada 1-4 Şubat WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi).

Mart ayı tahminlerinde ise tahmin verileri gerçek verideki genel artış ve azalışları, ilk birkaç saat dışında takip etmektedir. Özellikle 2 Mart ve 3 Mart günlerinde, tahmin sonuçlarının genel paterni yakaladığından söz edilebilir.



Şekil 4.16 : İç yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (en yakın komşu yöntemi).



Şekil 4.17 : İç yuvalamada 1-4 Mart WRF-ARW çıktıları karşılaştırması (ağırlıklı ortalama yöntemi).

Tüm tahminler göz önüne alındığında, başlangıç için seçilen parametrizasyonların tahmin sonuçlarında farklılıklara neden olduğu gözlenmiştir. WRF-6 ve WRF-3 başlangıç parametrizasyon şeması genel olarak diğer parametrizasyon şemalarıyla karşılaştırıldığında daha yüksek tahmin değerleri vermiştir. WRF-6 parametrizasyonu çoğunlukla gerçek veriden de daha yüksek tahmin sonuçları vermiştir. Genel gidişatta gerçek değerlere göre daha yüksek tahminler veren bir diğer parametrizasyon şeması da WRF-2'dir. WRF-1 ve WRF-5 başlangıç parametrizasyon şemaları diğerlerine göre genellikle daha düşük tahmin değerleri vermiştir ve bazı zaman adımlarında gerçek verilere en yakın değerleri vermişlerdir.

4.1.3 WRF-ARW tahmin hataları

Tahminlerle Terkos'a ait veriler arasındaki hatalara (4.1) eşitliği ile verilen RMSE ile bakılmıştır. Formülde n veri sayısı, F_i tahmin verisi, O_i gözlem verisidir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2} \quad (4.1)$$

Çizelge 4.5 : Şubat ayına ait tahminler için ortalama karekök hatalar.

1-4 ŞUBAT RMSE (m/s)	WRF-1	WRF-2	WRF-3	WRF-4	WRF-5	WRF-6
Dış yuvalama						
En yakın komşu	1.32	1.36	1.20	1.47	1.44	1.29
Ağırlıklı ortalama	1.38	1.38	1.21	1.51	1.50	1.31
Orta yuvalama						
En yakın komşu	1.16	1.17	1.09	1.20	1.17	1.12
Ağırlıklı ortalama	1.35	1.38	1.20	1.44	1.39	1.27
İç yuvalama						
En yakın komşu	1.19	1.44	1.31	1.38	1.38	1.30
Ağırlıklı ortalama	1.21	1.45	1.29	1.37	1.36	1.30

Tahminlerin geneline bakıldığında en yakın komşu yöntemindeki hataların ağırlıklı ortalamaya göre daha az olduğu görülmüştür. Fakat her iki yöntemde de hatalar fazladır. Başlangıç koşulları göz önüne alınırsa en iç yuvalamadaki tahminlerde WRF-1 tahminleri diğerlerine göre gözlemlere daha yakındır.

Çizelge 4.6 : Mart ayına ait tahminler için ortalama karekök hatalar.

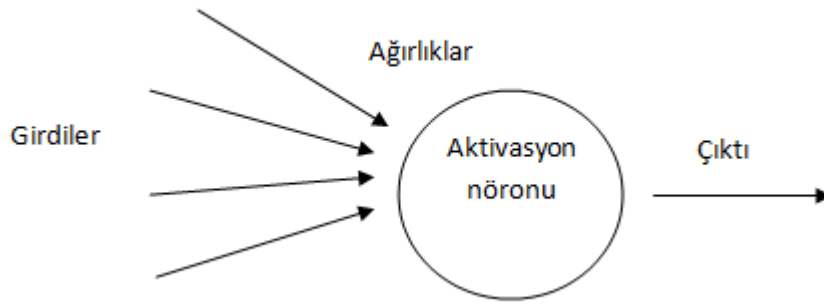
1-4 MART RMSE(m/s)	WRF-1	WRF-2	WRF-3	WRF-4	WRF-5	WRF-6
Dış yuvalama						
En yakın komşu	0.89	0.91	0.91	0.89	0.87	0.95
Ağırlıklı ortalama	0.87	0.90	0.89	0.91	0.85	0.92
Orta yuvalama						
En yakın komşu	0.70	0.71	0.80	0.86	0.70	0.87
Ağırlıklı ortalama	0.78	0.89	0.84	0.86	0.70	0.83
İç yuvalama						
En yakın komşu	0.79	0.88	0.88	0.85	0.76	1.01
Ağırlıklı ortalama	0.78	0.96	0.85	0.85	0.74	0.96

Mart ayına ait tahminlerin gözlemlerle karşılaştırılmasıyla elde edilen RMSE'ler Şubat ayı tahminlerine göre daha düşüktür. Model sonuçları karşılaştırma grafiklerinde görüldüğü gibi, yüksek rüzgar hızlarında gözlemlere yaklaşmaktadır.

4.1.4 Yapay Sinir Ağları ile WRF-ARW tahminlerinin iyileştirilmesi

Çalışmanın son bölümünde, WRF-ARW'nin farklı tahminlerinden çıkan sonuçların kullanıldığı YSA yöntemi ile parametrisasyon şemaları için hatalar hesaplanmıştır.

YSA modeli, deneysel bilgiyi depolama özelliğine sahip olan hücresel ağların çalışmasıdır [50]. Yapay sinir ağlarının geliştirilmesinde beyindeki sinir hücreleri (nöronlar)'dan ilham alındığı bilinmektedir. Gerçek nöronların sinapslar yoluyla uçlarında bulunan dendritlere gelen yeterince güçlü sinyalleri alarak etkin hale gelmesine benzer şekilde, YSA'da girdiler (sinapslara benzer olarak) ağırlıklarla (alınan sinyallerin gücü gibi) çarpılır ve daha sonra nöron aktivasyonunu belirleyen matematiksel fonksiyonlar hesaplanır [51]. Yapay nöronun işleyişi Şekil 4.18 ile verilmiştir.

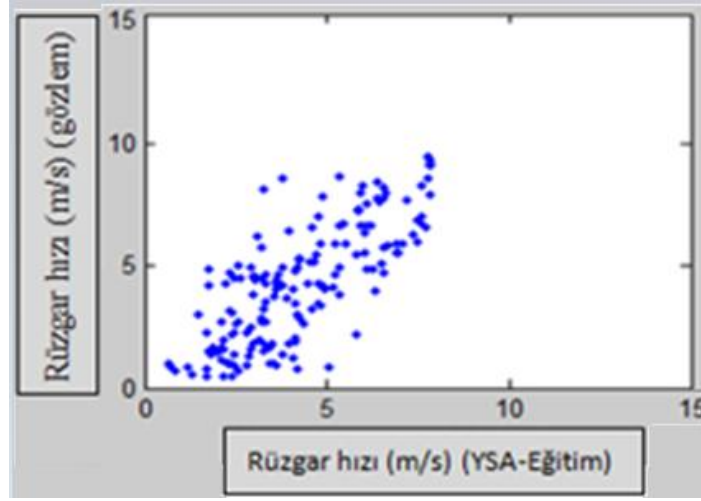


Şekil 4.18 : Yapay sinir hücresi [51].

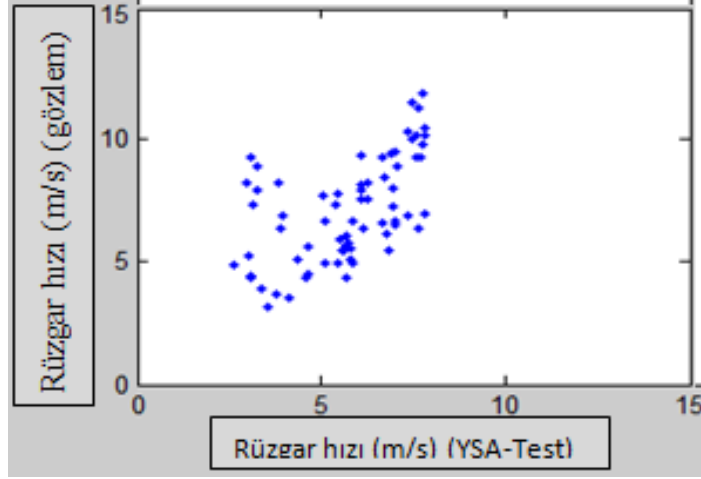
YSA'lar önce, eldeki veriler kullanılarak eğitilmekte ve sonra eğitim sırasında kullanılmayan verilerle test edilmektedir [52]. YSA genellikle giriş çıkış ve gizli katman olmak üzere üç katmandan oluşur. Girişte, YSA'ya girdi olarak verilen veri sayısı kadar hücre sayısı bulunur. Buna karşın, çıkış katmanındaki hücre sayısı YSA'dan alınan bilgilere bağlı olarak değişir. Gizli katmandaki düğüm sayısı YSA'da yapılan tahminlere göre değişkenlik göstermekte ve deneysel olarak bulunmaktadır. Bir hücrenin çok sayıda girişi olmasına rağmen bir adet çıkışı vardır, bu hücreler bu giriş bilgilerini işleyerek bir sonraki katmana bilgiyi aktarırlar [52].

Yapay sinir ağlarında eğitim genellikle bir optimizasyon problemi olarak görülür. Özellikle yapay sinir ağlarında eğitimin amacı, ağıdaki ağırlıkları ayarlayarak hata değerini minimize etmektir [53]. Bu çalışmada, WRF-ARW'ye ait 10 günlük (1-11 Mart 2014 tarihlerine ait) model çıktılarının %70'i eğitim verisi olarak kullanılarak lineer olmayan YSA yöntemiyle iki katmanlı olarak çalışılmıştır. YSA, deneysel bilgiyi depolaması eğitim verisi aracılığıyla olmuştur. Kalan %30'luk veri test verisi olarak kullanılmıştır. Modelde Sönümlü En Küçük Kareler Yöntemi olarak da bilinen Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. LevenbergMarquardt temel olarak maksimum komşuluk üzerine kurulmuş en az kareler hesaplama metodudur, Gauss-Newton ve gradient-descent (eğimli düşüş) algoritmalarının en iyi özelliklerinden oluşur [53]. Algoritmanın hızlı ve kararlı çalışması YSA'da tercih edilmesinin nedenidir.

Şekil 4.19'da eğitim verilerinin gözlemlerle olan ilişkisi, Şekil 4.20'de ise test sonuçlarının gözlemlerle olan ilişkisi saçılma diyagramlarıyla verilmiştir. Sonuçlar 1 saatten 6 saate kadar olan ilişkiler irdelenmiştir.

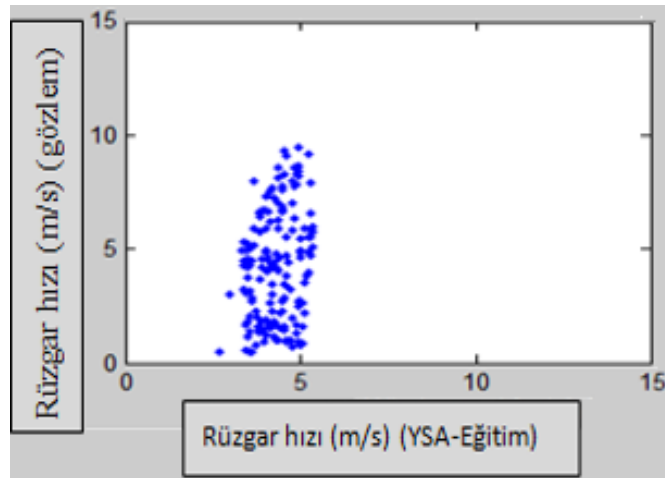


Şekil 4.19 : 1 saatlik YSA sonuçları .

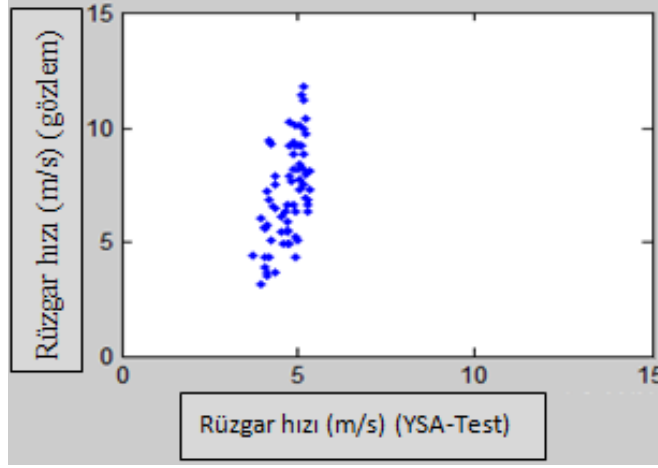


Şekil 4.20 : 1 saatlik YSA sonuçları.

Aynı sonuçlar 6 saate kadar elde edilmiştir. 6 saatlik eğitim verileriyle ve test verileriyle YSA sonuçları Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.21 : 6 saatlik YSA sonuçları.



Şekil 4.22 : 6 saatlik YSA sonuçları.

1 saatten 6 saate kadar olan YSA sonuçlarının gözlemlerle korelasyonu, RMSE ve değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Korelasyon, değişkenler arasındaki ilişkinin gücünü belirlemek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada WRF-ARW çıktıları ve gözlemler arasındaki korelasyonlar ile YSA sonuçları ve gözlemler arasındaki korelasyonlar incelenmiştir. “1” ile temsil edilenler eğitim verilerine, “2” ile temsil edilenler ise test verilerine ait bilgilerdir.

Çizelge 4.7 : YSA sonuçları.

	1SAAT	2SAAT	3SAAT	4SAAT	5SAAT	6SAAT
Korelasyon1	0.77	0.66	0.61	0.50	0.40	0.25
Korelasyon2	0.58	0.61	0.60	0.65	0.57	0.57
RMSE1	1.54	1.80	1.90	2.06	2.18	2.28
RMSE2	2.23	2.17	2.34	2.29	2.46	3.05

10 günlük WRF-ARW çıktılarına ait tahminlerle gözlemler arasındaki 1 saatten 6 saate kadar korelasyonlar ve hatalar Çizelge 4.8’de verilmektedir. Eğitim verisi olarak kullanılan tahminlerle gözlemlerin korelasyonları 4., 5. ve 6. saatlerde düşmüştür. Test verileri olarak üretilen tahminler ile gözlemler arasındaki korelasyonlar daha yüksektir. Buna karşın hatalar daha yüksektir. Buna WRF modeline ait tahminlerin başarısının belirli bir zaman sonra düşmesi neden olmaktadır. WRF-ARW çıktıları ve YSA çıktıları gözlemlerle karşılaştırıldığında korelasyonların zamansal değişimi ortaya çıkmaktadır. Karşılaştırmalar Çizelge 4.8’de verilmiştir. WRF-ARW’nin tüm tahmin sonuçları için ilk 1 saatteki korelasyonlar oldukça düşüktür. Buna karşın YSA ile elde edilen çıktılarda

korelasyonların daha yüksek olduğu görülmektedir. Genel görünümde YSA'nın korelasyonu büyük ölçüde yükselttiği göze çarpmaktadır.

Çizelge 4.8 : Tahmin ve gözlem sonuçları arasındaki korelasyonlar.

	1SAAT	2SAAT	3SAAT	4SAAT	5SAAT	6SAAT
WRF-1						
Korelasyon	0.0001	0.28	0.28	0.31	0.35	0.25
WRF-2						
Korelasyon	0.07	0.03	0.013	0.0008	0.22	0.44
WRF-3						
Korelasyon	0.013	0.17	0.19	0.25	0.21	0.17
WRF-4						
Korelasyon	0.016	0.18	0.24	0.28	0.25	0.23
WRF-5						
Korelasyon	0.046	0.011	0.001	0.034	0.039	0.06
WRF-6						
Korelasyon	0.02	0.27	0.29	0.35	0.34	0.22
YSA(eğitim)						
Korelasyon	0.77	0.66	0.61	0.50	0.40	0.25
YSA(test)						
Korelasyon	0.58	0.61	0.60	0.65	0.57	0.57

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Genel Analiz Sonuçları

İstanbul'un kuzeybatısında 41° 18` kuzey enlemi ve 28° 39` doğu boylamında bulunan Terkos Bölgesi'ne ait rüzgarların karakteristiğini belirlemek deniz seviyesinden 51 m yükseklikte konumlandırılmış ölçüm direğinin 81, 80, 65, 40 ve 20 metrelerinden alınan veriler incelenmiştir. 10 metredeki rüzgar verisi Windographer yardımıyla 20, 40, 65, 80 ve 81 metredeki rüzgar hızları kullanılarak, Güç Kanunu'na göre elde edilmiştir. Verilerin Weibull dağılımları belirlenmiş, Weibull parametrelerinden k'nin, 81 metreden 10 metreye kadar 2.11 ve 1.68 değerleri arasında değişirken, c'nin 7.49 ve 5.19 m/s arasında değiştiği görülmüştür. Rüzgarların frekans dağılımları, referans rüzgar hızının 5 m/s civarında olduğunu ortaya koymuştur.

Verilerin zamansal değişimlerine bakıldığında, kış aylarında rüzgar hızlarının yaz aylarına göre daha yüksek olduğu ve en yüksek rüzgar hızlarına Ekim, Kasım ve Şubat aylarında ulaşıldığı saptanmıştır. Rüzgarların aylık ortalama değerlerine göre çizilen zaman serilerine göre rüzgar şiddetleri yaz aylarına doğru düşüş gösterip, sonbahar aylarında yeniden yükselmektedir. Günlük salınımlar ise rüzgar şiddetlerinin en yüksek değerlere öğleden sonraki saatlerde sahip olduğunu, ortalama rüzgarların gün içinde 10 m'den 81 m'ye kadar yaklaşık 4 m/s ile 7 m/s arasında değiştiğini göstermiştir.

Hakim rüzgar yönlerinin belirlenebilmesi için 65 m ve 20 m'de kaydedilen yön verileriyle esme sıklığına göre elde edilen rüzgar gülleri elde edilmiştir. Çizilen rüzgar gülleri hakim rüzgar yönlerinin birincil olarak kuzeydoğu, ikincil olarak güneybatı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yaz aylarından kış aylarına doğru gidildikçe rüzgarın hakim rüzgar yönü güneybatıdan kuzeydoğuya doğru kaymaktadır.

5.2 Rüzgar Akış Modelleri Uygulama Sonuçları

5.2.1 WAsP uygulama sonuçları

Türbin hub yüksekliği göz önüne alınarak 65 m için çalıştırılan WAsP sonuçları ile ortalama rüzgar hızının ve enerji yoğunluklarının alansal dağılımı elde edilmiştir. Arazi üzerinde ortalama rüzgar hızları 5.13 m/s ile 7.64 m/s arasındadır. Haritalanan bölgenin kuzey ve iç kesimlerinde diğer alanlara göre daha yüksek rüzgar hızları tespit edilmiştir. Karadeniz ve Terkos Gölü'ne kıyısı olan bölgelerde denizselliğin etkisiyle daha yüksek rüzgar hızları görülmüştür. Enerji yoğunluğunun rüzgar hızının üçüncü kuvvetiyle orantılı olması sebebiyle, alansal dağılımı rüzgar hızlarının alansal dağılımına paralel bir görüntü ortaya koymuştur. En yüksek enerji yoğunluğuna sahip bölgeler Karadeniz ve Terkos kıyılarındaki bölgeler ile yüksek bölgelerin tepeleridir. Ortalama enerji yoğunlukları harita üzerinde 157 W/m^2 ile 525 W/m^2 değerleri arasında değişmektedir. Ölçüm direğinin bulunduğu yerde enerji yoğunluğu yaklaşık 300 W/m^2 civarındadır.

WAsP ile rüzgar enerjisi üretim çıktılarını belirlemeye yönelik uygulamada 500 kW'lık Enercon E40 türbini örnek olarak seçilerek bölgeye yerleştirilmiştir. Türbinin cut-in değeri 5 m/s, cut-out değeri 25 m/s'dir. 65 m için yapılan hesaplamalarda kapasite faktörü %25.2 olarak bulunmuştur. Üretim yılda 1104 MW/yıl'dır. Daha sonra aynı uygulama, Enercon E40 tipi türbinlerden 500 kW gücünde 5 türbin kullanılarak yapılmıştır. Toplamda 2.5 MW kurulu güce sahip rüzgar enerji santrali için kapasite faktörü %25 olarak bulunmuştur. Üretim ise yılda 5467 MW/yıl'dır.

5.2.2 MeteodynWT uygulama sonuçları

MeteodynWT WAsP'tan farklı olarak Monin-Obukhov uzunluğuna dayanan farklı kararlılık koşullarına çalışabilmektedir. Bu nedenle öncelikle atmosferin kararlılık durumu araştırılmış, düşey rüzgar kayması grafiğine göre gerçek atmosferik koşulların nötre yakın olduğu saptanarak sonuçlar buna göre elde edilmiştir.

Bölgedeki ortalama rüzgar şiddetleri 5.2 m/s ile 7.6 m/s arasındadır. Rüzgar şiddetleri topografyaya göre dağılmış, yüksek bölgelerde yüksek değerler almıştır. Karadeniz kıyılarında tüm alana göre daha yüksek rüzgar şiddetleri göze çarpmaktadır. Ortalama enerji yoğunluklarının alansal dağılımda 210 W/m^2 ile 489

W/m^2 arasındaki değerler harita üzerinde görülmektedir. Ölüm direğinin olduğu yerde ortalama enerji yoğunluğu yaklaşık $350 W/m^2$ civarındadır.

WAsP ile rüzgar enerjisi üretim çıktılarını belirlemeye yönelik rüzgar türbini rüzgar tarlası  alışması MeteodynWT’de de uygulanmıştır. Enercon E40 tipi t rbınlerden 500 kW gücünde 5 t rbın kullanarak tasarlanan rüzgar tarlası  rneği için üretim yılda 5510 MW/yıl olarak hesaplanmıştır, t rbının kapasite faktörü %25.2’dir.

WAsP ile elde edilen alansal dağılımlara MeteodynWT kullanılarak da ulaşılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.  rnek olarak seçilen 500 kW’lık Enercon E40 türbini ile elde edilen üretim  ıktısı 1113 MW/yıl, kapasite faktörü ise %25.4 olarak hesaplanmıştır.

65 m’de ölçülen verilere ve MeteodynWT ile elde edilen ortalama rüzgarların alansal dağılımına ait rüzgar atlasına göre t rbın kurulması planlanan bölgede ortalama rüzgarlar 6 m/s’nin üzerindedir. MeteodynWT ile elde edilen türbülans yoğunluğu değeri de göz önünde bulundurulduğunda, bölgedeki rüzgar enerjisi üretim çalışmalarında, IEC 64100-1 standartlarına göre Sınıf IIIA türbini seçilmesinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

5.2.3 WAsP – MeteodynWT karşılaştırma sonuçları

WAsP lineer akış metodlarını, MeteodynWT ile RaNS türbülanslı akış modelini kullandığından ve bunun yanısıra modeller içerisindeki kabuller farklı olduğundan hesaplamalarda bazı farklılıklar gözlenmiştir. WAsP kararlı atmosfer koşullarına göre sonuçlar üretirken, MeteodynWT çalışılan bölgenin atmosferik koşullarına göre nötre yakın atmosfer için çıktılar vermiştir.

Rüzgar hızlarının alansal dağılımı elde edilirken, bölge genelindeki ortalama rüzgar hız değerleri iki model karşılaştırıldığında oldukça yakındır. Ortalama rüzgar hızlarının alansal dağılımı göz önünde bulundurulduğunda, her iki model çıktısında Karadeniz kıyılarında yüksek rüzgar hızları göze çarpmaktadır. Fakat Terkos Gölü çevresindeki rüzgar hızları MeteodynWT’de WAsP’a göre daha düşüktür. MeteodynWT kara deniz geçiş bölgesindeki farklılıkları daha iyi ortaya koymuştur.

Enerji yoğunluklarının alansal dağılımlarının her iki model  ıktıları karşılaştırıldığında, en düşük enerji yoğunluğuna sahip bölgelere ait değerler

MeteodynWT'de WASP'a göre daha yüksektir. WASP sonuçlarına göre arazi üzerinde en düşük enerji yoğunluğu 157 W/m^2 iken, MeteodynWT sonuçlarına göre 210 W/m^2 'dir. Buna karşın, arazi üzerinde en yüksek enerji yoğunluğu WASP sonuçlarına göre 525 W/m^2 'ye ulaşırken, MeteodynWT'de 489 W/m^2 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, WASP sonuçlarının sınır değerlerde daha uç değerlere ulaştığı söylenebilir.

Arazi üzerinde rüzgar enerjisi üretim çıktıları belirlemeye yönelik çalışmada, rüzgar türbini örneğinde WASP'taki üretim çıktıları ve kapasite faktörü MeteodynWT'ye göre daha düşüktür. WASP'a göre üretim 1104 MW/yıl iken, MeteodynWT'de bu değer 1113 MW/yıl olarak hesaplanmıştır. Rüzgar tarlası örneğinde de benzer olarak WASP'ta hesaplanan değer 5467 MW/yıl iken, MeteodynWT'de 5510 MW/yıl 'dır.

5.3 WRF-ARW ile Kısa Süreli Tahmin ve YSA ile Tahmin İyileştirme Sonuçları

WRF-ARW modelinin, Şubat ve Mart aylarına ait 3 gün için 1'er saatlik tahminler verecek şekilde 6 farklı başlangıç koşuluyla çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar iki farklı alt ölçekleme yöntemiyle (en yakın komşu ve ağırlıklı ortalama) Terkos'ta ölçüm direğinin olduğu noktaya taşınmıştır. 3 yuvalama için elde edilen tahminler karşılaştırıldığında, en içteki yuvalama daha yüksek uzaysal çözünürlüğe sahip olduğundan gözlemlere daha yakın değerler vermiştir. En yakın komşu yöntemi genel olarak ağırlıklı ortalama yöntemine göre daha az hatalı sonuçlar vermiştir. Rüzgar hızlarının yükseldiği noktalarda model sonuçları gözlemlere yaklaşmıştır, fakat rüzgar hızlarının $12\text{-}13 \text{ m/s}$ 'yi aştığı durumlarda model sonuçları gözlemlere göre düşük tahminlerde bulunmuştur. WRF-ARW orta ölçekli bir tahmin modeli olduğundan çok kısa zaman içinde değişkenlik gösteren rüzgarın salınımlarını çok iyi takip edememiştir ve genellikle rüzgarın salınımlarını yakalamada gecikmiştir.

Şubat ayına ve Mart ayına ait tahminler karşılaştırıldığında, Şubat ayındaki değerlerin daha yüksek olması tahmin başarısını azaltmıştır. Model sonuçları, Mart ayında 10 m/s altındaki rüzgarları daha iyi tahmin ederken, Şubat ayındaki maksimumlarda düşük tahminlerde bulunmuştur. Şubat ayında rüzgar hızındaki dalgalanmaların fazla olması ve WRF-ARW'nin bu dalgalanmaları yakalayamaması model sonuçlarının başarısını düşürmüştür.

Parametrizasyonlar değerlendirilecek olursa, dış yuvalama için Mart ayı tahminlerine ait hatalar tüm şemalar için oldukça yakındır. şubat ayı tahminlerinde ise sırasıyla WRF-3 ve WRF-6 parametrizasyonları en az hataya sahiptir. Orta yuvalama için Mart ayı tahminleri yine benzer sonuçlar göstermiştir. şubat ayı için ise dış yuvalama sonuçlarına benzer olarak WRF-3 ve WRF-6 parametrizasyonları en az hataya sahiptir. İ yuvalama sonuçları ise Mart ayı için en az hataya sahip parametrizasyon şemalarının WRF-5 ve WRF-1 olduğunu göstermiştir. şubat ayına ait i yuvalama sonuçları da WRF-1'e parametrizasyon şemalarının en iyi sonucu verdiğini ve bunu WRF-5'in takip ettiğini göstermiştir.

Sonuç olarak, farklı denklem ve kabllere dayanan fiziksel şemaların farklı çözünürlüklerde farklı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bunun yanısıra her bir farklı fizik şemasının iyi çalıştığı yönler YSA yöntemiyle birleştirilerek elde edilen sonuçlar, YSA'nın tahmin ve gözlemler arasındaki ilişkiyi arttırılabileceğini göstermiştir. Bu yolla, model sonuçlarına ait hatalar azaltılabilmektedir.

5.4 Yorum ve neriler

Rüzgar enerjisine yönelik çalışmalarda rüzgar hızları ölçümlerinin uzun süreli olması bölgedeki rüzgarın karakteristiğini belirlemek için önemlidir. Bu nedenle verinin uzun süreli olması çalışmalarda önem taşımaktadır. Buna benzer çalışmalarda birkaç yıllık verinin olması çalışma sonuçlarının daha güvenilir olmasını sağlayabilir. Verilerin farklı seviyelere ait olması rüzgar kaymalarının tespiti için önemlidir. Bu nedenle rüzgar ile ilgili çalışmalarda değişik seviyelere ait verilerin kullanılması önemlidir.

Türbin konuşlandırması için lineer modeller yerine CFD modellerin kullanılması arazi üzerindeki türbülansların daha iyi tahmin edilmesini ve bölge için uygun türbinin tespitini sağlayabilir. CFD modellerin mikro ölçekteki değişimleri de ele alıyor olması çalışmalarda önemlidir.

Bir bölge üzerinde meteorolojik tahminler yapılırken öncelikle modelin başlangıç koşullarını belirlemeye yönelik çalışmaların yapılması, tahminlerin tutarlılığını arttırabilir. Bunun yanısıra mekansal ve zamansal çözünürlükler tahminlerde büyük önem taşımaktadır. Rüzgar gibi durağan olmayan, çalkantılara sahip değişkenlerin tahmin edilmesine yönelik çalışmalarda mikro ölçekli modellerin kullanılması rüzgar

hamlelerinin veya rüzgardaki ani artış ve düşüşlerin daha iyi tahmin edilmesini sağlayabilir. Bu çalışmadaki gibi orta ölçekli modellerle tahminlerde ise zaman adımları kısaltılarak ve çözünürlükler arttırılarak çok sayıda simülasyon test edilmelidir.

YSA ile hata düzeltmelerinde modellerin en iyi çalıştığı zaman aralıkları iyi iredelendiğinde daha başarılı sonuçlar ortaya çıkabilir. Bu çalışmada, YSA'da eğitim verisi olarak kullanılan tahmin verileri ile gözlemler arasındaki korelasyonların, test verilerine oranla daha yüksek olması, WRF modelinin ilk %70'lik verileri kapsayan zaman dilimdeki tahminlerde daha başarılı olması ile ilişkilendirilebilir. Bir diğer deyişle, WRF modeline ait tahminlerin başarısının belirli bir zaman sonra düştüğü göz önünde bulundurularak, YSA'da eğitim verisi ve test verisi olarak kullanılması gereken veri uzunluğu buna bağlı olarak seçilebilir. YSA'nın korelasyonları büyük ölçüde arttırıyor olması, çalışmalarda ham model çıktılarını kullanmak yerine, çeşitli yöntemlerle iyileştirerek kullanmanın daha faydalı olacağını göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Gençoğlu, M. T.** (2002). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Açısından Önemi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 14(2), 57-64.
- [2] **Hepbasli, A. ve Ozgener, O.** (2003). A review on the development of wind energy in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Review* 8 (2004) 257–276.
- [3] **Hepbasli, A. ve Ozgener, O.** (2010). Present status and potential of renewable energy sources in Turkey. *Energy Sources* 23:33–50.
- [4] **Url-1** <<http://www.demirer.com.tr/santral/alize/cesme/index.html>>, alındığı tarih: 20.10. 2014.
- [5] **Url-2** <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/GWEC-Global-Wind-Report_9-April-2014.pdf>, alındığı tarih: 01.10.2014.
- [6] **Url-3** < http://www.tureb.com.tr/attachments/article/169/Turkiye_Ruzgar_Enerji_si_istatistikk_Raporu_Ocak_2014.pdf>, alındığı tarih: 10.12.2014.
- [7] **Url-4** <http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/syr/SYR_AR5_LONGER_REPORT.pdf>, alındığı tarih: 26.10.2014.
- [8] **Bivona, S., Burlon R. ve Leone, C.** (2003). Hourly wind speed analysis in Sicily. *Renewable Energy* 28, Pages1371–1385.
- [9] **Hrayshat, E. S.** (2007). Wind resource assessment of the Jordanian southern region. *Renewable Energy* 32, 1948–1960
- [10] **Cellura, M., Cirrincione, G., Marvuglia, A. ve Miraoui, A.** (2008). Wind speed spatial estimation for energy planning in Sicily: Introduction and statistical analysis. *Renewable Energy* 33, 1237-1250.
- [11] **Elamouria, B. ve Amar, F. B.** (2008). Wind energy potential in Tunisia. *Renewable Energy* 33 (2008) 758–768.
- [12] **Himri, Y., Rehman, S., Draoui, B. ve Himri, S.** (2008). Wind power potential assessment for three locations in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 12, Issue 9, Pages 2495–2504. [12] **Köse, R.** (2004). An evaluation of wind energy potential as a power generation source in Kütahya, Turkey. *Energy Conversion and Management*. Volume 45, Issues 11–12, Pages 1631–1641.
- [13] **Şen, Z. ve Şahin, A. D.** (1997). Regional assessment of wind power in western Turkey by the cumulative semivariogram method. *Renewable energy*, 12(2), 169-177.

- [14] **Şen, Z.** (2001). Areal assessment of wind speed and topography with applications in Turkey. *Renewable Energy* 24, 113–129.
- [15] **Kose, R., Ozgur, M. A., Erbas, O. ve Tugcu, A.** (2004). The analysis of wind data and wind energy potential in Kutahya, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 8, Issue 3, Pages 277–288.
- [16] **Sirdas, S.** (2005). Daily wind speed harmonic analysis for Marmara region in Turkey. *Energy conversion and management*, 46(7), 1267-1277.
- [17] **Akpınar, E. K. ve Akpınar, S.** (2005). A statistical analysis of wind speed data used in installation of wind energy conversion systems. *Energy Conversion and Management* 46, 515–532.
- [18] **Akpınar, E. K. ve Akpınar, S.** (2005). An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics. *Energy Conversion and Management* 46, 1848–1867.
- [19] **Eskin, N., Artar, H. ve Tolun, S.** (2008). Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 12, Issue 3, Pages 839–851.
- [20] **Ucar, A. ve Balo, F.** (2009). Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey. *Applied Energy* 86, 1864–1872.
- [21] **Yaniktepe, B., Koroglu, T. ve Savrun, M. M.** (2013). Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Osmaniye, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 21, Pages 703–711.
- [22] **Chin, H. S., Glascoe, L., Lundquist, J. ve Wharton, S.** (2010). Impact of WRF Physics and Grid Resolution on Low-level Wind Prediction: Towards the Assessment of Climate Change Impact on Future Wind Power. *Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering*, Chapel Hill, NC, United States.
- [23] **Shimada, S. ve Ohsawa, T.** (2011). Accuracy and Characteristics of Offshore Wind Speeds Simulated by WRF. *SOLA*, Vol. 7, 021–024.
- [24] **David Carvalho, D., Rocha, A., Gesteira, M. G. ve Santos, C.** (2012). A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. *Environmental Modelling & Software* 33, 23-34.
- [25] **Deppe, A. J., Gallus Jr, W. A. ve Takle, E. S.** (2013). A WRF ensemble for improved wind speed forecasts at turbine height. *Weather and Forecasting*, 28(1), 212-228.
- [26] **Santos-Alamillos, F. J., Pozo-Vázquez, D., Ruiz-Arias, J. A., Lara-Fanego, V. ve Tovar-Pescador, J.** (2013). Analysis of WRF model wind estimate sensitivity to physics parameterization choice and terrain representation in Andalusia (Southern Spain). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(7), 1592-1609.
- [27] **Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. ve Silva Santos, C.** (2014). Sensitivity of the WRF model wind simulation and wind energy production estimates to planetary boundary layer parameterizations for onshore and offshore areas in the Iberian Peninsula. *Applied Energy*. Volume 135, Pages 234–246.

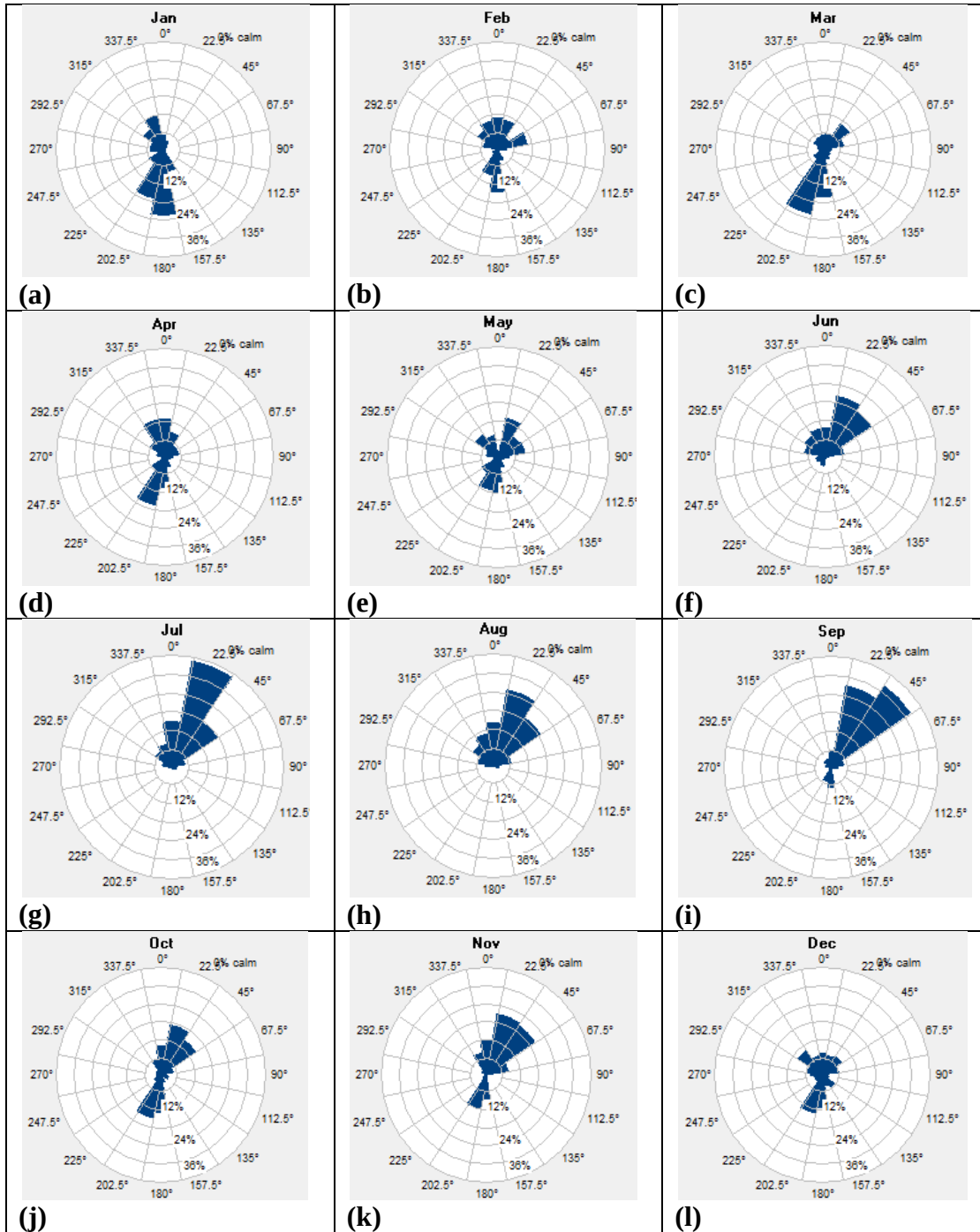
- [28] **Yılmaz, E., Goktepe, N., Sayinta, F. M., Unal, E., Tan, E., Unal, Y. S., Montes, S. S. ve Incecik, S.** (2014). Resolution Evaluation of the WRF Model with WindSim comparisons for the Short Term Wind Energy Prediction System of Turkey. *EMS Annual Meeting*. Vol. 11, EMS2014-538.
- [29] **Guo, Z. ve Xia, X.** (2014). Wind Power Assessment Based on a WRF Wind Simulation with Developed Power Curve Modeling Methods. *Hindawi Publishing Corporation Abstract and Applied Analysis*.
- [30] **Hahhmann, A. N., Vincent, C. L., Peña, Lange, J. ve Hasager, C. B.** (2014). Wind climate estimation using WRF model output: method and model sensitivities over the sea. *International Journal of Climatology*.
- [31] **Vogiatzis, N., Kotti, K., Spanomitsios, S. ve Stoukides, M.** (2004). Analysis of wind potential and characteristics in NorthAegean, Greece. *Renewable Energy* 29, 1193–1208.
- [32] **Kurban, M., Kantar, Y. M. ve Hocaoglu, F. O.** (2009). Weibull dağılımı kullanılarak rüzgar hız ve güç yoğunluklarının istatistiksel analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 7(2).
- [33] **Tong, W.** (2010). *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. USA:Witpress.
- [34] **Aksas, M.** (2010). Wind energy potential in the site of Batna in Algeria. *Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza*, 11 – 19.
- [35] **Mortensen, N. G.** (1993). *Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP): Getting Started*. Denmark: Riso National Laboratory.
- [36] **Mortensen, N. G., Heathfield, D. N., Myllerup, L., Landberg, L. ve Rathmann, O.** (2007). *Getting Started with WASP 9*. Risø National Laboratory Technical University of Denmark Roskilde, Denmark.
- [37] **Petersen, E., Mortensen, N. G., Landberg, L., Højstrup, J., ve Frank, H.** (1997). *Wind Power Meteorology*. Risø-I-1206(EN). Roskilde: Risø National Laboratory.
- [38] **Pereira, R., Guedes, R. ve Santos, C.S.** (2010). Comparing WASP and CFD wind resource estimates for the “Regular” User. *European Wind Energy Conference: Warsaw, Poland*.
- [39] **Url-5** < http://meteodyn.com/wpcontent/uploads/2012/06/Technical_note_WT2.2.pdf>, alındığı tarih: 09.10.2014.
- [40] **Texier, O., Clarenc, T., Bezault, C., Girard, N. ve Degelder, J.** (2010). Integration of atmospheric stability in wind power assessment through CFD modeling. *European Wind Energy Conference & Exhibition, Warsaw, Poland*.
- [41] **Çetin, N.S., Çelik, H. ve Başaran, K.** (2011). Rüzgar Türbinlerinde Kapasite Faktörü ve Türbin Sınıfı İlişkisi. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey.

- [42] **Mortensen, N. G., Landberg, Troen, I., Petersen, E., Rathmann, O. ve Nielsen, M.** (2004). *WAsP Utility Programs*. Risø National Laboratory Technical University of Denmark Roskilde, Denmark.
- [43] **Barthelmie, R., Pryor, S., Frandsen, S. ve Larsen, S.** (2014). *Analytic Modelling of Large Wind Farm Clusters*. Risø National Laboratory, Denmark.
- [44] **Url-6** < <http://www.wrf-model.org/index.php>>, alındığı tarih: 09.11.2014.
- [45] **Url-7** < <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>>, alındığı tarih: 22.09.2014.
- [46] **Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, M., Duda, K. G., Huang, X. Y., Wang, W. ve Powers, J. G.** (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR/TN-475+STR*. National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.
- [47] **Kain, J. S. ve Fritsch, J. M.** (1990). A one-dimensional entraining/ detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2784–2802.
- [48] **Kain, J. S. ve Fritsch, J. M.** (1993) Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The representation of cumulus convection in numerical models*, K. A. Emanuel and D.J. Raymond, Eds., Amer. Meteor. Soc., 246 pp.
- [49] **Url-9** <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.3/users_guide_chap5.htm>, alındığı tarih: 22.12.2013.
- [50] **Aleksander, I.** (1989). *Neural computing architectures: the design of brain-like machines*. North Oxford Academic Publ., London.
- [51] **Gershenson, C.**, (2001). Artificial Neural Networks for Beginners. Cognitive and computing sciences. University of Sussex. 9 pages.
- [52] **Atik, K., Deniz, E. ve Yıldız, E.** (2007). Meteorolojik Verilerin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi* 10(1).
- [53] **Aşkın, D., İskender, İ. ve Mamızadeh, A.** (2011). Farklı Yapay Sinir Ağları Yöntemlerini Kullanarak Kuru Tip Transformatör Sargısının Termal Analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* Cilt 26. No 4, 9005-913.

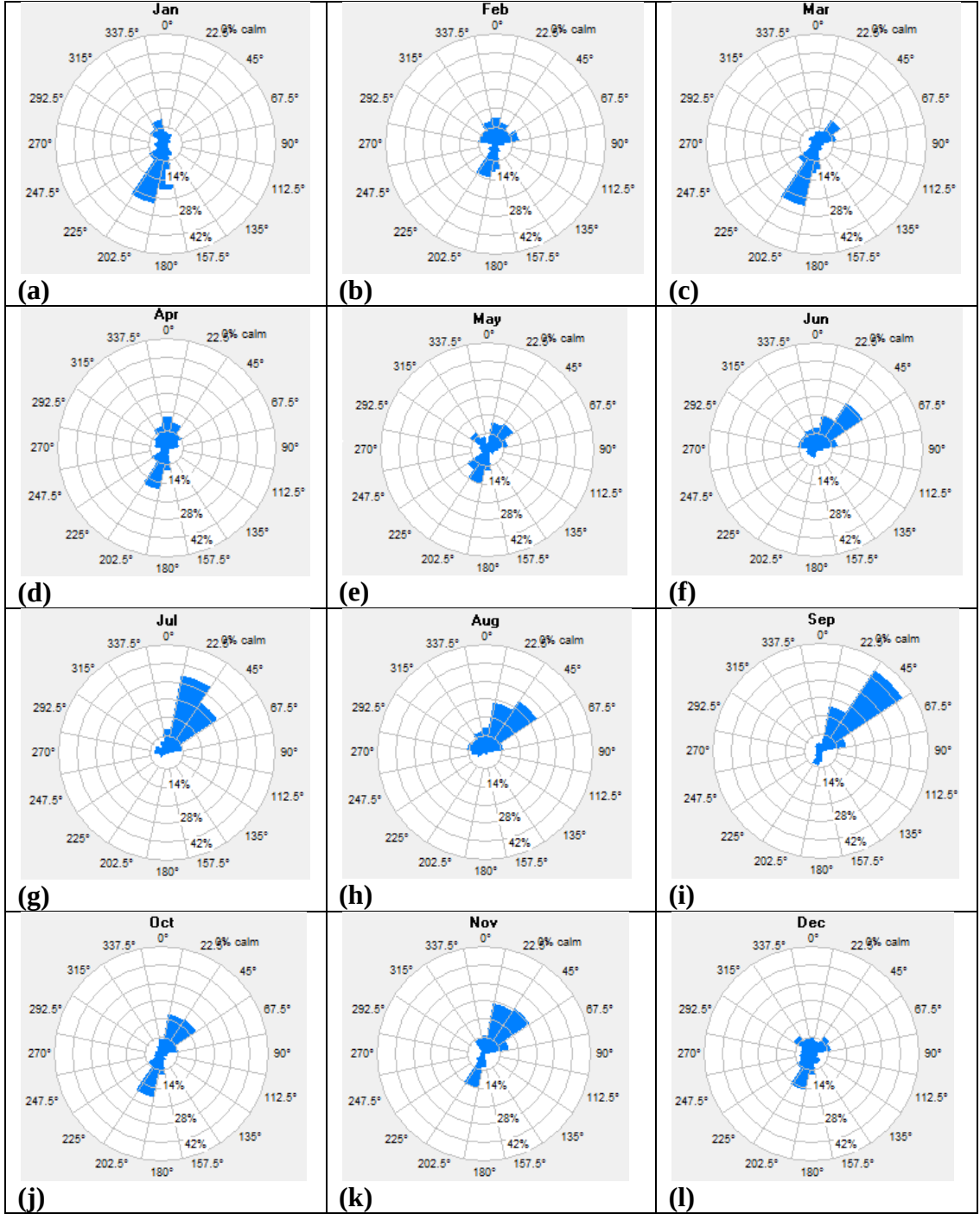
EKLER

EK A: Aylara göre rüzgar gülleri

EK A



Şekil A.1 : 65 metredeki yön verilerine göre rüzgar gülleri: (a)Ocak. (b)Şubat. (c)Mart. (d)Nisan. (e)Mayıs. (f)Haziran. (g)Temmuz. (h)Ağustos. (i)Eylül. (j)Ekim. (k) Kasım. (l)Aralık.



Şekil A.2 : 20 metredeki yön verilerine göre rüzgar gülleri: (a)Ocak. (b)Şubat. (c)Mart. (d)Nisan. (e)Mayıs. (f)Haziran. (g)Temmuz. (h)Ağustos. (i)Eylül. (j)Ekim. (k) Kasım. (l)Aralık.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Nilcan Akataş
Doğum Yeri ve Tarihi : Malatya, 31.10.1989
E-Posta : akatas@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Akataş, N.**, Sirdas, S. 2014. Evaluation of Boundary Layer Short Time Wind Prediction with WRF Mesoscale Modeling, *AOGS 11th Annual Meeting* 28 Jul-01 Aug, Sapporo, Japan.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Sirdas, S., **Akataş, N.** 2013. Evaluating Global Precipitation Data Sets linked with Global Warming over Turkey, *3. Uluslararası Su Kongresi ve Sergisi*, 22-24 Mart, Bursa, Türkiye.
- Sirdas, S., Aksoy, M., İlter, M. **Akataş, N.** WRF/ARW Different Physics Scheme Coupled HEC-Hydrological Modeling System for Kurbagalidere Flood Forecasts, *3. Uluslararası Su Kongresi ve Sergisi*, 22-24 Mart, Bursa, Türkiye.
- Yeşilköy, S., **Akataş N.**, Şahin A. D. 2014. Assessment of Global Radiation Map for the Eastern Part of Turkey, *AOGS 11th Annual Meeting* 28 Jul-01 Aug, Sapporo, Japan.