



Türkiye'nin Rüzgar Enerji Potansiyelinin Sayısal Hava Tahmin Sistemi ile Simülasyonu ve Analizi*

Fahrettin Fırat Özdemir^{1†}, Abdulla Sakallı²

^{1*} İskenderun Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, İskenderun-Hatay, Türkiye, (ORCID: [0000-0002-3060-5014](https://orcid.org/0000-0002-3060-5014)), fozdemir.ee20@iste.edu.tr

² İskenderun Teknik Üniversitesi, Doğa ve Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İskenderun-Hatay, Türkiye, (ORCID: [0000-0002-2488-7318](https://orcid.org/0000-0002-2488-7318)), abdulla.sakalli@iste.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 20 Ekim 2022 ve Kabul Tarihi 11 Ocak 2023)

(DOI: 10.31590/ejosat.1191826)

ATIF/REFERENCE: Özdemir, F.F. & Sakallı, A. (2023). Türkiye'nin Rüzgar Enerji Potansiyelinin Sayısal Hava Tahmin Sistemi ile Simülasyonu ve Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (46), 179-192.

Öz

Dünya genelinde enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Kullanılan fosil temelli yakıtlar, dünya üzerinde yeryüzü sıcaklığındaki yükselmelere, ozon tabakasında oluşan yıkımlara, iklim değişikliklerine sebep olduğu bilinmektedir ve sonucunda geri dönüşmesi zor hasarlar meydana getirmektedir. Rüzgâr enerjisi gibi çevreci ve yenilebilir enerji kaynakları her yıl daha da gelişmekte, kara ve su üzerinde kullanılarak, etkileyici bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte atmosferin stokastik ve tahmin edilmesi zor yapısı, rüzgâr hızında rastgeleliklere ve kesintilere ve sonucunda rüzgâr gücündeki dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu nedenle enerji piyasalarında, rüzgâr gücünün etkili, güvenilir ve kararlı bir yapıda kullanılabilmesi için kısa vadede yapılan tahminler büyük önem arz etmektedir. Atmosferin yapısının sayısal denklemlerle ve WRF-ARW (Weather Research and Forecasting Model) modellemesiyle iyi temsil edilmesi ile bu sorun günümüzde daha kolay bir hale gelmiştir. Yine de model parametreleri, başlangıç koşulları doğru bir şekilde seçilmelidir. Türkiye'de altı farklı bölgede yaptığımız ayrıca tüm Türkiye'yi kapsayan sıcaklık, yağış ve rüzgâr hızı tahminleri ve eğri eşitleme metodu ile Türkiye'nin 2,3 MW (megavat) ve 3 MW'lık rüzgâr gücü üretim potansiyeli tahminlerimiz, orta ve uzun vadede uygulanabilir enerji yatırımları için uygun bir alternatif kaynak sağlayabilir. Bu çalışmada Çanakkale bölgesinde yıllık rüzgâr hızı tahminlerinde sırasıyla 1,35 MAE (Mean Absolute Error) ve d (0,87), IOA (Index of Agreement) değerlerine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr enerjisi, Sistem simülasyonu, WRF, Matematiksel modelleme, Yöneylem araştırması.

Simulation and Analysis of Turkey's Wind Energy Potential with Numerical Weather Forecasting System

Abstract

Energy requirements are increasing all over the world. The fossil-based fuels used are known to cause rises in the earth's temperature, destruction of the ozone layer, and climate changes, and as a result, they cause irreversible damage. Environmental and renewable energy sources such as wind energy are developing more and more each year and have an impressive potential by being used on onshore and offshore. However, the stochastic and difficult-to-predict structure of the atmosphere causes randomness and interruptions in wind speed and consequently fluctuations in wind power. For this reason, short-term forecasts have a great value in order to use wind power in an effective, reliable and stable structure in energy markets. This problem has become easier today, as the structure of the atmosphere is well represented by numerical equations and WRF-ARW (Weather Research and Forecasting Model) modelling. However, the model parameters, initial conditions must be chosen correctly. With the temperature, precipitation and wind speed forecasts we made in six different locations in Turkey, as well as our 2.3 MW (megawatt) and 3 MW wind power generation potential forecasts covering the whole country using the curve equalization method, we can provide a suitable alternative source in medium and long term for feasible energy investments. In this study, the annual wind speed forecasting in Çanakkale was 1.35 MAE (Mean Absolute Error) and d (0.87), IOA (Index of Agreement) values, respectively.

Keywords: Wind energy, System simulation, WRF, Mathematical modeling, Operational research.

* Bu makale Fahrettin Fırat Özdemir 'in yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

^{1†} Sorumlu Yazar: fozdemir.ee20@iste.edu.tr

1. Giriş

Fosil yakıtlar hâlâ günümüzde bir bağımlılık olup, çevre ve doğaya verdiği zararlar bilinmektedir. Küresel ısınma ve karbon emisyonu dünya için ciddi bir tehdittir. Artan enerji talebi ve tükenen kaynaklar göz önüne alındığında yenilenebilir enerji sürdürülebilir bir alternatiftir (Guo ve Xiao, 2014).

Rüzgâr enerjisi tüm dünyada geçerliliği olan bir enerji kaynağıdır ve kullanımı, rüzgâr hızının sahip olduğu kinetik enerjiden mekanik enerjiye, bir türbini döndürme prensibi ile ve jeneratör vasıtasıyla bunu elektrik enerjisine dönüştüren bir yapı ile mümkün olur. Rüzgârın kararsız ve değişken doğası onun güç sistemleri üzerinde kullanılmasında duraksamalar ve zorluklar meydana getirir (Li ve ark., 2019). 2000 yılından hemen önceki yıllarda rüzgâr analizleri çevresel ve kamu politikalarının bir gereği olarak, potansiyel bir enerji kaynağı ve emisyon azaltma stratejileri gibi konularda daha çok ilgi görmeye başlamıştır (Teixeira ve ark., 2020).

2017 yılındaki verilere göre rüzgâr enerjisi ile elektrik üretiminin, yenilenebilir enerji kaynakları içerisindeki oranının %17 civarlarında olduğu tahmin edilmektedir. Fakat toplam kapasitesi %23'tür. Yaklaşık otuz yıl sonunda, kullanım oranının %40'a yaklaşması ve 4 Terawatt üzerinde bir güç sağlaması beklenmektedir, fosil yakıtlar ise %80'in üzerindeki kullanım ile hâlâ birinci kaynak olarak kullanılmaktadır (Salazar ve ark., 2021). Türkiye 2021 yılının ilk iki çeyreğinde toplam rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi oranı %9,22'ye ulaşmış, enerji sektörü içerisindeki büyümesini ve gelişmesini sürdürmüştür. Türkiye'nin batısındaki rüzgârlar ise potansiyelin önemli bir kısmını kapsamaktadır ve 2020 yılında bir önceki yıla göre toplam kapasitesi %15,19 büyüme göstermiştir (TWEA, 2021; GWEC, 2021).

Kara yüzeyindeki kurulumlar haricinde, su üzerinde yüzen ve kule bölümü suyun altında olmak üzere sabit tabanlı rüzgâr türbinleri mevcuttur. Bu kurulumlar daha karmaşık ve daha maliyetli olabilir, üretilen gücün aktarımı ise başka zorluklar doğurur. Yine de açık denizdeki kurulumların, kara kurulumlarına göre birçok avantajı da bulunmaktadır (Akdağ ve Yeroğlu, 2019).

Uygun bir rüzgâr gücü değerlendirmesi yatırımcılara yatırım maliyetleri için uygulanabilirliğin değerlendirilmesi ve risklerin minimuma indirilmesi için uygun analizi sağlar (Erduman ve ark., 2018). Rüzgârın yön, hız ve nihayetinde güç tahminleri için kullanılan istatistiksel, fiziksel, filtreleme, makine öğrenimi ve bunların bir arada kullanıldığı hibrit yöntemler mevcuttur. İstatistiksel yaklaşımlar, genellikle tarihsel verileri kullanır, tahmin eden ve edilen arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ele alır ve veriye çevirir (Groch ve Vermeulen, 2019). Bu konudaki sınırlılıklar dahilinde genellikle tek başına istatistiksel yöntemler kısa vadeli, sayısal yöntemler uzun vadeli tahminlerde daha başarılıdır. İstatistiksel yöntemler atmosfer fiziğini ve topografyadaki değişkenleri iyi temsil edemez fakat maliyet, zaman ve uygulama kolaylığı açısından tercih edilmektedir. Sayısal yöntemler rüzgârın doğasını daha iyi ele alır ve diferansiyel denklemler ile fiziksel özellikleri çözümler ve daha iyi temsil eder fakat başlangıç parametreleri ve sınır koşulları iyi ayarlanmalıdır. Sayısal yöntemler ile birlikte aykırı değerlerin ayıklanması, karar vericilerin belirlenmesi ve çıktıların filtrelenmesi için "Kalman Filtreleme, Analog Şemalar, Topluluk Modeli Çıktı İstatistikleri" vb. yöntemler ile makine öğrenme ve sinir ağları da kullanılmaktadır fakat hesaplama süresi ve maliyetleri kullanılacak yönteme göre dikkat edilmesi gereken önemli bir noktadır. Rüzgârın kaotik doğası, zaman içerisinde doğrusal olmayan yönlerde de sahiptir ve sinir ağları bu konuda yardımcı olabilir fakat aşırı uydurma, düşük yakınsama ve kısmi optimuma olan eğilimi gibi kusurları mevcuttur (Sayeed ve ark., 2020; Jiang ve ark., 2021; Salazar ve ark., 2021; Tan ve ark., 2021). Bunun gibi araştırmalarda son yıllarda kullanılan NWP (Sayısal Hava Tahmini) modelleri, kütle, momentum ve enerji korunumu gibi denklemleri ayırık bir şekilde yaklaşık olarak hesaplamak için kullanılan fizik denklemlerini içerir (Zhao ve ark., 2016). WRF-ARW (Hava Araştırma ve Tahmin Modeli – WRF Gelişmiş Araştırma), ARW çekirdeğini kullanan, ABD'deki Ulusal Atmosfer Araştırmaları Merkezi (NCAR) merkezli, hidrostatik olmayan ve sınırlı bir alanı kapsayan hava araştırma ve tahmin modelidir (Martínez-Arellano ve Nolle, 2013).

WRF modeli Yüzey Tabakası (SL), Gezegensel Sınır Tabakası (PBL), bulut ve radyasyon ışıması vb. gibi özellikleri temsil etmek için sahip olduğu parametreler ve şemaları kullanır. PBL ve SL ise rüzgâr hızının tutarlı tahminleri için en doğru temsile sahip olmalıdır. Arazi özelliklerinin yanlış temsil edilmesi, sinoptik durumlar ve atmosferik kararlılık nedeniyle tahmin sonuçlarını olumsuz etkileyebilir ve bu nedenle çok önemlidir. Bazı durumların model izgarasından küçük bir ölçekte, alt izgara süreçleri ile ele alınması gerekir. Model performansı ayrıca mevsimsel ve zamana bağlı olarak değişim gösterebilir ayrıca model çözünürlüğü arttıkça performans da artar fakat hesaplama süresi ve maliyet için de bu durum paralellik gösterir (Carvalho ve ark., 2014; Sayeed ve ark., 2020; Salfate ve ark., 2020; Dupuy ve ark., 2021).

Doğanşahin ve ark., 2019, bir yıllık bir rüzgâr verisi kullanarak Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının performanslarını incelemiştir. Guo ve Xiao (2014) WRF-SLFN-OD ve WRF-SLFN-WD ile güç eğrisi ile WRF-SLFN modeline göre %40,74 bağlı hatada azalma sağlamıştır. Carvalho ve ark. (2014) WRF modelindeki, PBL ve SL parametrelerinin rüzgâr hızı, yönü ve enerji üretimi için duyarlılık analizini yapmışlar ve genelde ACM2 PBL ve PX SL şemalarını başarılı bulmuşlardır. Men ve ark. (2016) sinir ağı topluluk yöntemini (MDN) kullanmış, bu modeli NARX, ARMA ve GARCH yöntemleri ile karşılaştırmış, (RMSE) ortalama karekök hatası ve (MAE) ortalama mutlak hatada sırasıyla 1,9688 ve 2,0847 ile üstünlüğünü göstermişlerdir. Niu ve ark. (2018) NILA-WRF ve dalgacık ayrıştırma (WD) ile rastgele orman (RF), destek vektör makinesi (SVM) ve bir geri yayılım (BP) yöntemlerini karşılaştırmış ve (MAPE) ortalama mutlak yüzde hatası sırasıyla %5,78 ve %5,45 olmuştur. Li ve ark. (2019) WSTI-RNN modelini geliştirmiş, geleneksel makine öğrenme algoritmalarına karşılaştırmış, üstünlük ve zayıflıklarını göstermiştir. Altan ve Karasu, 2020, ayrıştırma yöntemlerinin LSTM ile yapılan rüzgâr hızı tahminlerine olan etkisini incelemiştir. Emeksiz ve Tan, 2021, benzer bir çalışmayı beş adımlı EEMD-EWT-PACF-BP hibrit bir model ile gerçekleştirmiştir. Wei (2020) çok katmanlı algılayıcı (MLP), derin özyinelemeli sinir ağlarını (DRNN'ler) ile yığılmış (LSTM) uzun-kısa süreli bellek ve sinir ağı modellerini karşılaştırmış ve yığılmış LSTM yönteminin MAE için sırasıyla 0,928 ve 1,528 ile daha üstün olduğunu göstermiştir. Salazar ve ark. (2021) çok değişkenli yöntemle (hız, yön, basınç, sıcaklık), tek değişkenli yöntemi, giriş katmanına kısmi olarak bağlı ve tamamen bağlı ilk gizli katmanlı

sinir ağı ile WRF ham çıktılarını karşılaştırmış ve MAE’de %27,72’ye varan gelişme sağladığını göstermişlerdir. Liu ve ark. (2021) Catboost, LSTM, LightBGM ve XGBoost algoritmalarını karşılaştırmış, Catboost ve LSTM algoritmalarının sırayla 7,504, 7,299 MAE değeri ile sırasıyla 9,2 ve 894 saniyede eğitildiğini göstermişlerdir. Sayeed ve ark. (2020) WRF sapmaları azaltmak için her bir parametre için ayrı bir model çalıştırmış, Weather – AI adında bir model geliştirmiş ve tahmin doğruluğunda IOA (Index of Agreement) %27’lik bir ortalama artış olduğunu göstermişlerdir. Xu ve ark. (2021) çok adımlı WRF-VMD-PCA-LSTM modelini tasarlamışlardır. Bu modeli altı farklı modelle karşılaştırılmış ve WRF-LSTM modeline göre %13,28 daha düşük MAPE oranına sahip olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmamızdaki ana amaç ve hedeflerimiz, yukarıda da belirtilen sınırlılık ve sorunlar dahilinde, WRF ile iyi performans veren bir PBL şemasının seçilmesi ve gün öncesi piyasası için, kısa vadeli rüzgâr hızı ve gücü tahminleri ile nihayetinde rüzgâr enerjisi potansiyelinin en doğru şekilde değerlendirilebilmesidir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada bir WRF-ARW V3.9, sayısal NWP modeli ile rüzgâr hızı, sıcaklık ve yağış verileri tahmin edilerek bunların rüzgâr hızı ölçüm verisiyle olan ilişkileri incelenmiştir.

WRF ile atmosfer simülasyonu için sıcaklık, basınç, rüzgâr hızı vb. atmosferik verileri içeren üç boyutlu noktalar, ızgaralar kullanılmış, başlangıç ve sınır koşulları belirlenmiş ve bir saatlik zaman adımı kadar simülasyon ilerletilerek devam ettirilmiştir.

Bu model kullanılarak belirlenen koordinatlar aralığında, çeşitli parametrelerle ve fizik denklemleriyle ele alınan bölgeyi temsil eden değerler, yaklaşık olarak hesaplanmıştır.

Belirlenen model (Tablo 1), Ulusal Çevresel Tahmin Merkezleri (NCEP) Küresel Tahmin Sistemi (GFS)’ den elde edilen 0,25 x 0,25 ızgara çözünürlüklü başlangıç ve sınır koşulları ve bir saatlik veriler ile başlatılmıştır. Model, 2021-2022 yılları arasında, iki küçük ve bir büyük olmak üzere üç etki alanı üzerinde (Şekil 1), bir saatlik zaman adımlı tahminlerle ve altı farklı noktada, beş farklı şehirde ayrıca tüm Türkiye rüzgâr potansiyelini hesaplamak için çalıştırılmıştır. Kullanılan verilerin hangi firmalardan alındığı yasal nedenlerden dolayı paylaşılmamıştır. Türkiye için 2,3 MW (megavat) ve 3 MW’lık rüzgâr enerjisi güç üretimi potansiyeli haritası oluşturulmuştur. Bunun için model tarafından Türkiye’nin tamamını kapsayan ortalama rüzgâr hızı tahmin verileri ile üç parametrelili bir sigmoid fonksiyonu, gnuplot ile eğri eşitleme metodu ile bilinmeyen değişkenler hesaplanarak elde edilmiştir. Bu denklem ile rüzgâr gradyanının, yüksekliğe göre rüzgâr hızına olan etkisi de göz önünde bulundurulduğunda, model 10 m yükseklikte tahminleri gerçekleştirirken, rüzgâr türbinleri 90 m ve üzerindeki yükseklikleri ile farklı koşullara sahiptir. Thompson (2002)’un, bildirdiğine göre denklem 1 kullanılarak Hellmann üssü, insan yaşam alanlarının üzerindeki nötr ve dengesiz hava değerleri aralığında 0,3 olarak uygun kabul edilmiştir.

Ayrıca bu çalışmamızda geçmiş araştırmalarda ülkelere göre kullanılan PBL parametreleri ve hata değerleri Tablo 2’de verilmiştir, son zamanlarda yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulmuş, model parametreleri seçiminde başvuru bir kaynak olmuştur.

$$v_w(h) = v_{10} * \left(\frac{h}{h_{10}}\right)^a \quad (1)$$

Tablo 1. WRF-ARW V3.9 model konfigürasyonu (Table 1. WRF-ARW V3.9 model configuration)

Başlangıç Tarihi	1 Ocak 2021
WRF Versiyonu	V3.9
Tahmin Süresi	1 yıl
PBL Şeması	YSU
Mikrofizik	Ferrier
Yüzey Tabakası	Monin-Obukhov
Kara Yüzeyi Modeli	Termal Difüzyon
Uzun / Kısa Dalga Radyasyonu	RRTM/Dudhia
Kümüls	Kain-Fritsch
Dikey Seviye	42
Aerosol	Yok

Hata ve performans değerlendirmesi için MAE (Ortalama Mutlak Hata), MSE (Ortalama Kare Hata), RMSE (Kök Ortalama Kare Hata) yöntemleri ile Holley ve Guilford (1964)’in bildirdiği üzere denklem 2 kullanılarak hesaplanan IOA (Uzlaşma İndeksi) yöntemi kullanılmıştır.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}, \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (2)$$



Şekil 1. 25 km, 9 km ve 3 km ile model ızgaraları (Figure 1. Model grids with 25 km, 9 km and 3 km)

Tablo 2. Geçmiş araştırmalarda ülkelere göre kullanılan model parametreleri ve hata değerleri (Table 2. Model parameters and error values used by countries in previous studies)

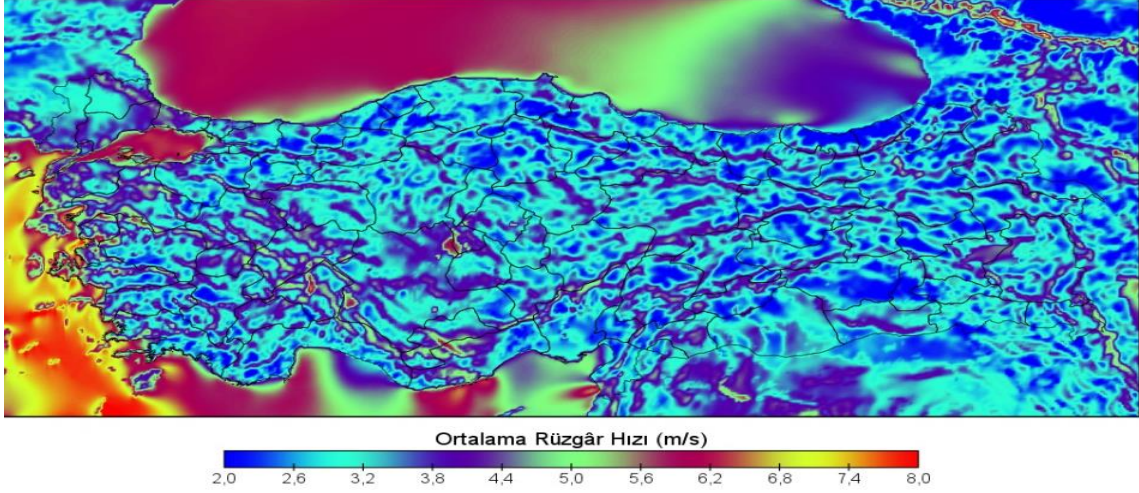
Parametre (boş=verilmemiş)	MAE (boş=verilmemiş)	RMSE (boş=verilmemiş)	Bölge	ATIF
YSU (WSM6)		3,09	Portekiz	(Carvalho ve ark. 2012)
ACM2-APP		1,91	Portekiz	(Carvalho ve ark. 2014)
MYNN2.5 (New Thompson, WSM3)	0,88-1,03	1,56	Kuzey denizi (su üzerinde)	(Giannakopoulou ve Nhili 2014)
MYJ (Eta)	0,86-4,72		Çin	(Zhao ve ark. 2016)
YSU (Monin-Obukhov)	1,92		Çin-Tayvan	(Men ve ark. 2016)
Mellor-Yamada-Janjic		1,76-4,61	Norveç	(Bilal ve ark. 2016)
MYJ (Eta)		3,22-3,37	Çin	(Zhao ve ark. 2017)
BouLac (NoahMP-BEPBEM)	1,8		Amerika	(Salamanca ve ark. 2018)
YSU (Goddard)		3,3	Çin	(Di ve ark. 2019)
MYJ, ACM2	1,68-1,73		Güney Afrika	(Groch ve Vermeulen 2019)
MYJ, ACM2	1,31		Çin	(Li ve ark. 2019)
MYNN2.5 (Eta)			Brezilya	(Teixeira ve ark. 2020)
YSU (WSM5)	1,092-1,362		Tayvan	(Wei 2020)
MYNN 2.5 (WSM6)	6,32-14,21		Türkiye	(Özen ve ark. 2021)
MYNN3 (ice)		2,45-2,68	Şili	(Salfate ve ark. 2020)
YSU(WSM3)	1,65-2,6		Türkiye	(Tan ve ark. 2021)
	0,29-0,48		Çin	(Jiang ve ark. 2021)
YSU (WSM6)	1,51-2,49		Çin	(Xu ve ark. 2021)
MYNN+YSU (Ferrier)		0,5548-0,7261	Amerika (su üzerinde)	(Bodini ve ark. 2021)
MYNN2.5 (WSM5)	1,80-3,21		İspanya	(Prieto-Herráez ve ark. 2021)
YSU (Lin)		2,33-3,0	Avusturya	(Oetl ve Veratti 2021)
ACM2 (WSM6)	1,92-2,40		Japonya	(Salazar ve ark. 2021)
QNSE (WSM6)	1,32		Fransa	(Dupuy ve ark. 2021)
	1,99-2,54		Yunanistan	(Christoforou ve ark. 2021)

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

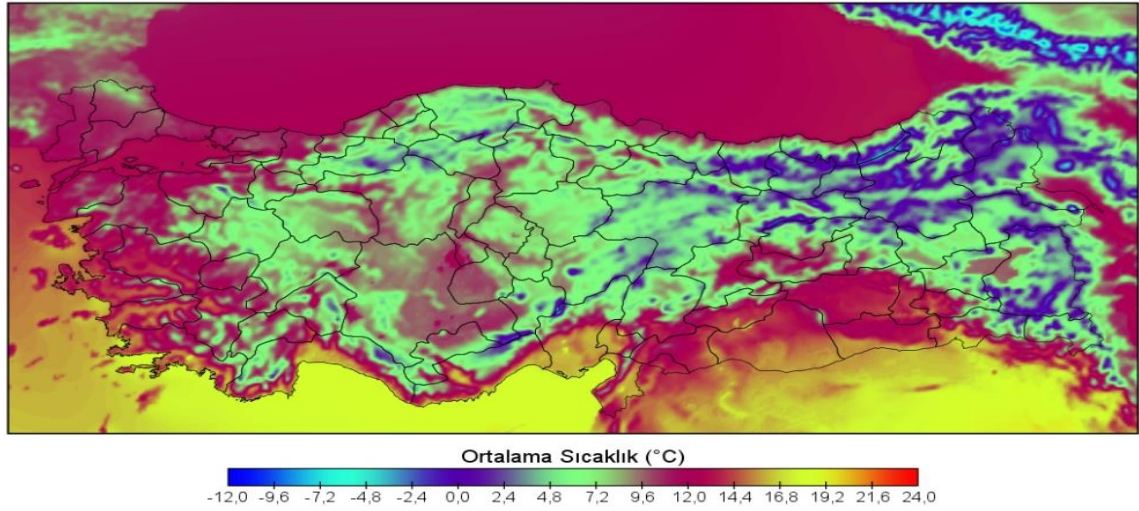
Tüm dünya genelinde hava durumu ve rüzgâr hızı tahminleri, rüzgâr enerjisi santrali kurulumları, bölgenin coğrafi konumu ve topografyası göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Model simülasyonlarının iyi temsil edilebilmesi için seçilen gezegensel

sınır tabakası ve mikro fizik parametreleri (Tablo 2) ile Türkiye'nin rüzgâr hızı potansiyeli haritasında görülen (Şekil 2), Çanakkale, Balıkesir, İzmir ve Manisa bölgelerinin, ortalamada yüksek rüzgâr hızlarına sahip olduğu tespit edilmiş ve bu etkenler göz önünde bulundurulduğunda (Tablo 1) model parametreleri uygun olarak belirlenmiş ve bu durum performans değerlendirmelerine yansımıştır.

Aşağıdaki bölümde sırasıyla Türkiye'nin bir yıllık ortalama rüzgâr, sıcaklık ve toplam yağış model tahmin haritaları Şekil (2-4) incelendiğinde, Türkiye genelinde ağırlıklı olarak 3-5 m/s saniye ortalama rüzgâr hızları tahmin edilmiştir. Yıllık ortalamada, Akdeniz, İç Anadolu ve Ege bölgeleri, 4 m/s ve üzerinde rüzgâr hızlarına sahiptir ve bu durum güç üretimi için elverişlidir. Türkiye'nin güney ve batı bölgelerinin genel ortalama sıcaklıklarının üzerinde olduğu saptanmıştır. Kuzey ve iç bölgeler ağırlıklı olarak ortalamaya daha yakındır bununla birlikte doğu bölgelerinde model genel olarak daha soğuk tahminler üretmiştir.



Şekil 2. Türkiye yıllık ortalama rüzgâr hızı haritası (Figure 2. Turkey annual average wind speed map)

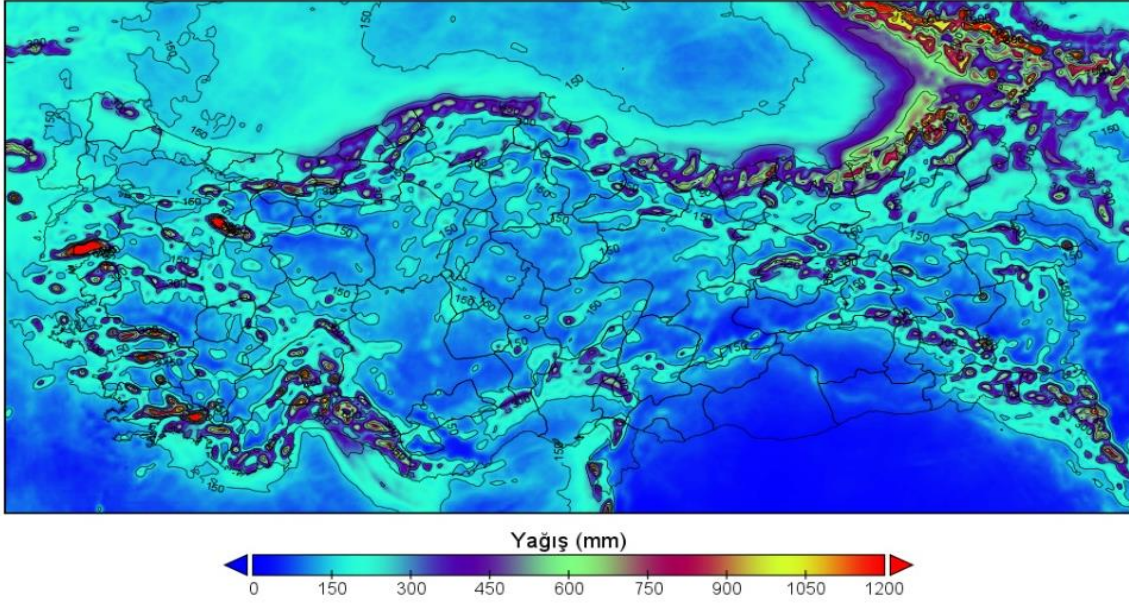


Şekil 3. Türkiye yıllık ortalama sıcaklık haritası (Figure 3. Turkey annual average temperature map)

Sıcaklığın arttığı bölgelerde yağışlar da görülebilmektedir. Türkiye'de yıllık toplam yağışlar (Şekil 4) m² başına en fazla sırasıyla Marmara, Ege ve Akdeniz bölgesinin bir bölümünde görülmekle beraber, ağırlıklı ortalamaya bakıldığında Karadeniz ve Akdeniz'in belirli bölgelerinde yoğunluk tespit edilmiştir. Bununla birlikte tahmin yapılan bölgelerin ortalama sıcaklıkları birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir (Tablo 3).

Bir yıllık süre zarfındaki ve saatlik ölçümlerde, bölgelerin rüzgâr hızı dağılımları (Şekil 5) görüldüğü üzere Manisa bölgesi haricinde tüm bölgeler, ağırlıklı olarak sırasıyla 0-3 m/s ve 3-6 m/s hızlara ev sahipliği yapan bir karakteristiğe sahip olduğu görülmüştür, diğer taraftan tespit edilen maksimum hız aralığı olan 12-21 m/s aralığına ölçümlerde sık rastlanılmamıştır. Şekiller incelendiğinde, Manisa'daki bölge haricindeki bölgelerin enerji üretimi için yeterli rüzgâr hızlarına sahip olduğu belirlenmiştir.

Bir yıllık zaman dilimindeki Türkiye'nin farklı illeri ve bölgelerinin, saatlik rüzgâr hızı ölçüm verileri ile oluşturulmuş olan dağılım grafiğinde Hatay genel olarak diğer bölgelere göre daha homojen bir görüntüye sahiptir (Şekil 6) ve ortalamada daha yüksek hızlarla ilişkilendirilmiştir bununla birlikte model tahminlerinde, Hatay daha farklı bir görüntü sergilemektedir. Ölçümlerde ise Çanakkale Hatay ile benzer bir dağılım göstermektedir. Manisa bölgesindeki ortalama rüzgâr hızları (Tablo 4) yıl boyunca, en düşük hızlara sahipken ve hız yoğunlukları açısından değerlendirildiğinde sıralamanın sırasıyla, Çanakkale, Hatay, Balıkesir, İzmir-Güzelyalı, İzmir-Çeşme ve Manisa şeklinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Türkiye yıllık toplam yağış (Figure 4. Annual total precipitation in Turkey)

Tablo 3. Çalışma bölgelerinde yağış ve sıcaklık istatistik verileri (Table 3. Precipitation and temperature statistics data in the study regions)

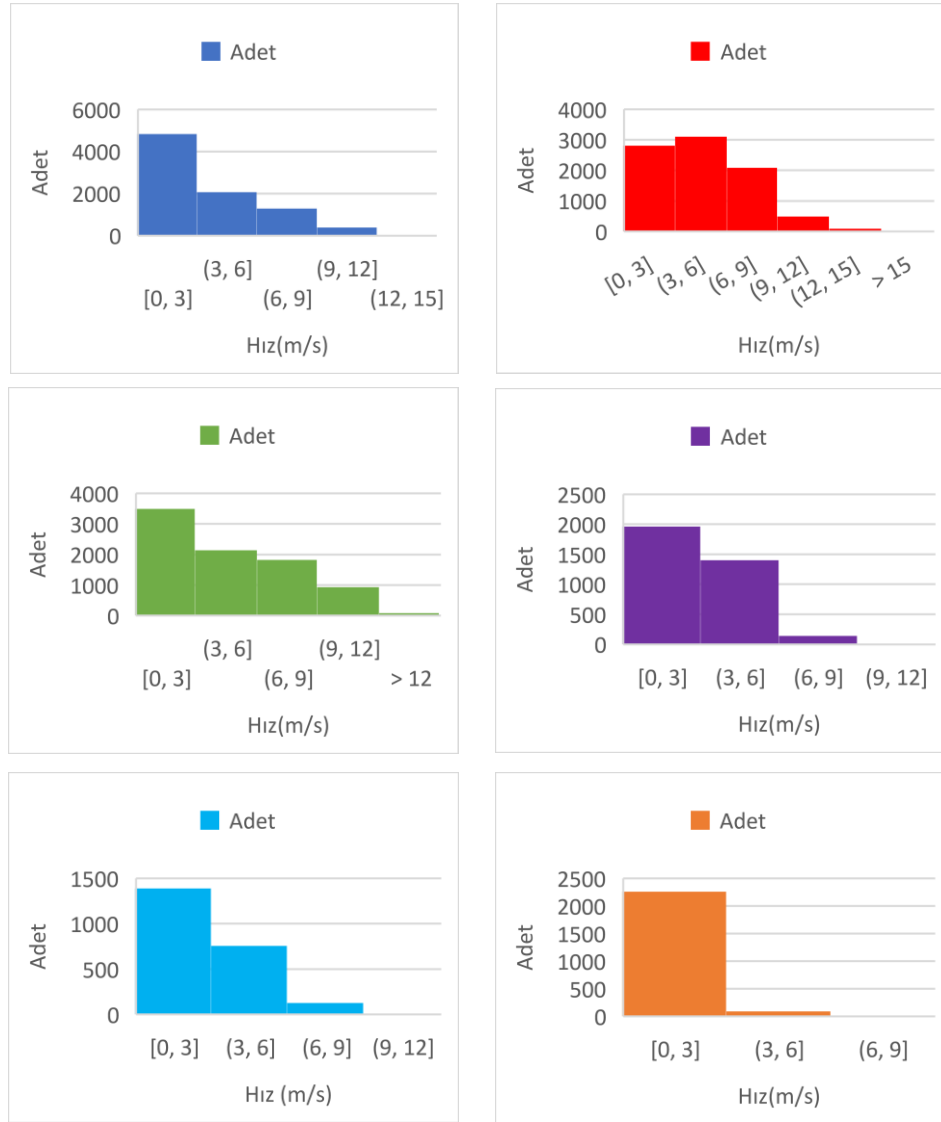
Bölgeler	Yağış Ortalama	Sıcaklık Ortalama	Yağış Varyasyon
Balıkesir	0,294	12,611	288,440
Çanakkale	0,515	13,058	343,432
Hatay	0,227	16,830	519,082
İzmir-Çeşme	0,565	15,090	493,199
İzmir-Güzelyalı	0,359	15,054	299,550
Manisa	0,544	12,522	281,546
Bölgeler	Yağış Standart Sapma	Sıcaklık Standart Sapma	Sıcaklık Varyasyon
Balıkesir	0,850	9,406	74,586
Çanakkale	1,771	8,947	68,521
Hatay	1,180	8,889	52,814
İzmir-Çeşme	2,787	8,145	53,976
İzmir-Güzelyalı	1,076	9,525	63,270
Manisa	1,533	9,109	72,746

Tablo 4. Bölgelerin saatlik rüzgâr hızı ölçüm verisi istatistikleri (Table 4. Hourly wind speed measurement data statistics of the regions)

Bölgeler	Aritmetik Ortalama	Standart Sapma	Varyasyon
Balıkesir	3,110	2,995	96,297
Çanakkale	4,647	2,774	59,694
Hatay	4,523	3,267	72,240
İzmir-Çeşme	2,770	1,661	59,966
İzmir-Güzelyalı	2,772	1,644	59,307
Manisa	0,836	0,948	113,391

2021-2022 yıllık saatlik ortalama rüzgâr hızlarına bakıldığında (Tablo 4) Çanakkale ve Hatay en yüksek değerlere sahiptir. Manisa ve İzmir ise en düşük standart sapma değerlerine sahiptir ve tüm iller aritmetik ortalamaya yakın veya yüksek bir değere sahiptir, bu sebeple rüzgâr hızı ölçüm verileri homojen bir görüntü sergilemektedir. Tablolara göre Manisa ve Balıkesir en yüksek varyasyon değerlerine sahiptir. Tüm veriler, aritmetik ortalama, standart sapma ve varyasyon ile değerlendirildikten sonra en iyi il

Çanakkale olarak gözükmetedir çünkü daha yüksek ortalama hıza, daha düşük standart sapma ve varyasyon değerlerine sahiptir. Tablo 5’de bölgelerin rüzgâr hızı ölçüm verisi ve model çıktısının hata değerlendirmesi ve performans değerleri verilmiştir. Rüzgâr hızı ölçüm verisi ve model tahmin performansları bazı bölgelerde tatmin edicidir bununla birlikte bazı bölgeler ise yüksek hata değerlerine sahiptir.

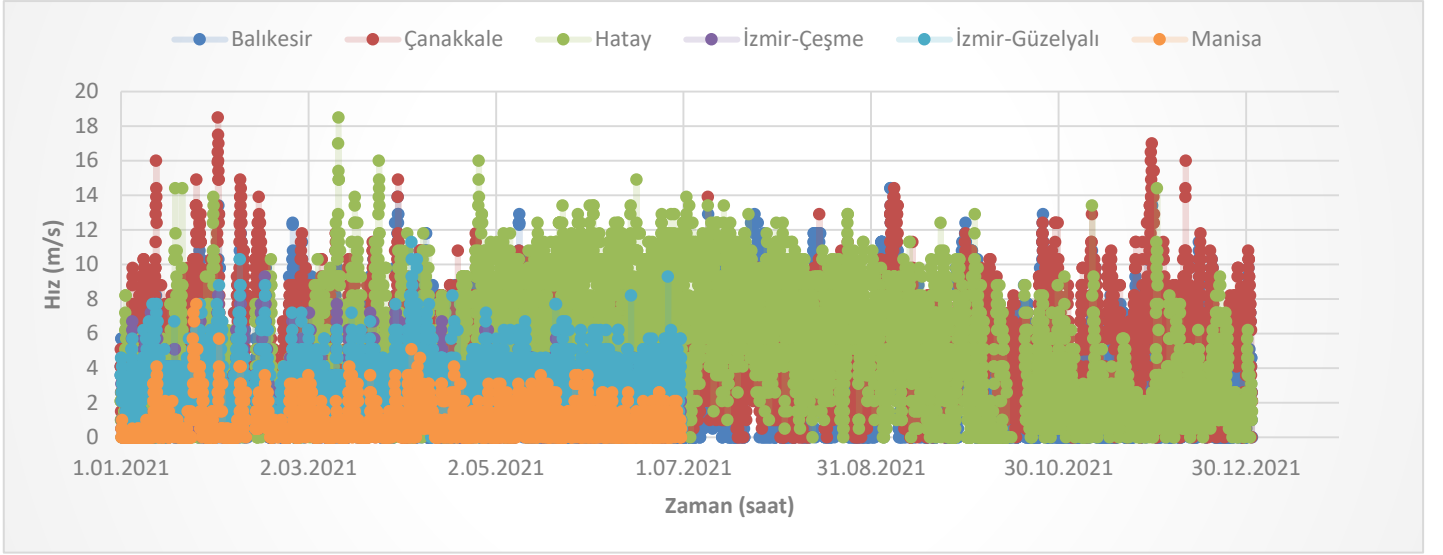


Şekil 5. Bölgelerin rüzgâr hızı ölçümünün dağılım adetleri (Figure 5. Distribution of wind speed measurement of regions)

Balıkesir’deki bölge, en yakın yerleşim yerine 2 km uzaklıkta ve deniz seviyesinden 98 m yüksekliktedir. Bölge açık bir alandadır, bu nedenle doğal veya yapay unsurlar bölgede daha az etkiye sahiptir. Fakat model ızgarasındaki bölgenin koordinatları içerisinde kalan alan, özellikle yakınlardaki insan yaşam alanlarındaki 50 m’ye varan yükseklik farklarına sahiptir ve sonuç olarak bu durumun dikey rüzgâr gradyanına etki etmesi kaçınılmazdır ve tahminleri etkiler (Şekil 7). Yine de WRF 1,46 MAE ile burada başarılı bir tahminde bulunmuştur (Bu bölge çoğunlukla ölçüm yüksekliğine yakın).

Çanakkale’deki bölge ise insan yaşam alanlarına daha yakındır ve deniz seviyesinden 8 m yüksektedir ayrıca ızgara içerisinde sahil, açık su yüzeyleri, dağlar ve ağaçlar bulunmaktadır. Bu durum benzer şekilde ~50 m’ye varan yükseklik farklarına neden olmakla beraber, sıcaklık ve basınç farklarına dolayısı ile rüzgâr hızında değişimlere sebep olmuş olabilir (Şekil 8).

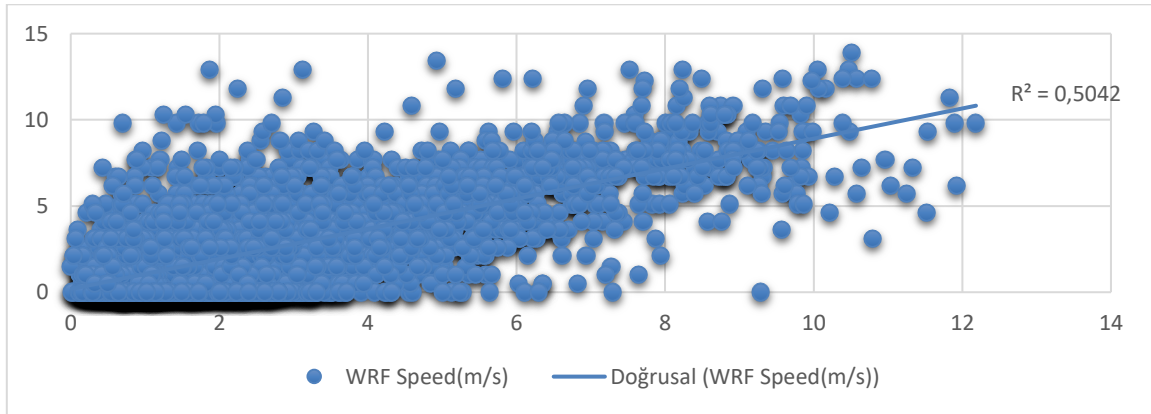
Hatay bölgesindeki konum deniz seviyesinden 8 m yüksekliktedir. Ölçüm noktası açık bir arazidir ve bu tip alanlarda yüzey sürtünmesi daha düşüktür ve bu nedenle daha yüksek rüzgâr hızları görülmesi beklenebilir. Bu bölgedeki nispeten kötü performansın sebebi olarak, ızgara içerisinde bulunan alandaki çokça ve yüksek dağların oluşturduğu yükseklik farkları ve ağaçlık bölgeler tespit edilmiş ve model tahminlerini etkilediği sonucuna varılmıştır. Burada WRF, rüzgâr hızında ölçümlere göre, ağırlıklı olarak daha düşük tahminler üretmiştir (Şekil 9).



Şekil 6. Bir yıllık zaman dilimindeki farklı illerdeki bölgelerin, saatlik rüzgâr hızı ölçüm verileri (Figure 6. Hourly wind speed measurement data of regions in different provinces in a one-year time period)

Tablo 5. Rüzgâr hızı hata ve performans değerlendirmesi (Table 5. Wind speed error and performance evaluation)

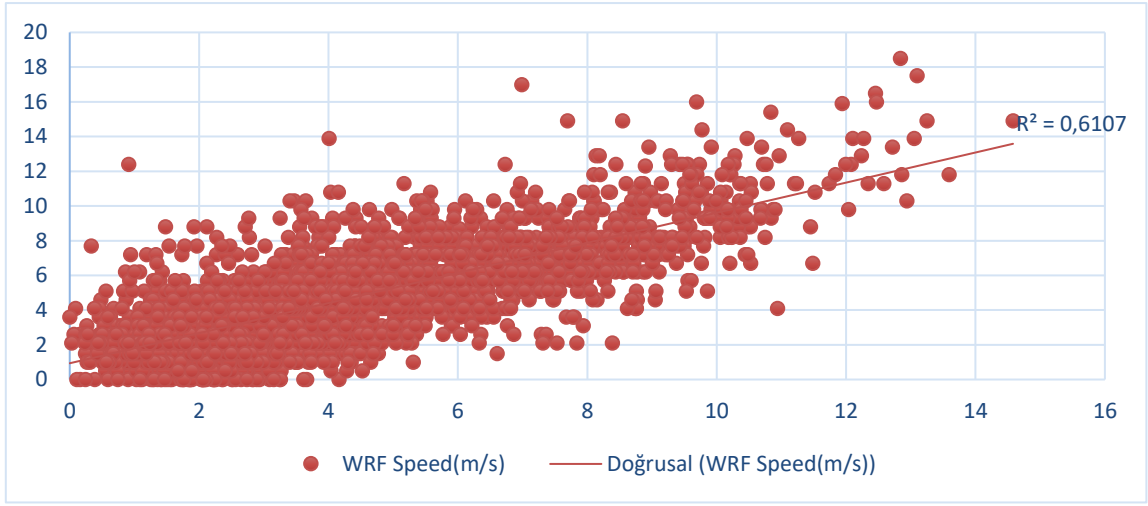
Bölgeler	MAE	MSE	RMSE	(d)
Balıkesir	1,469	3,853	1,963	0,829
Çanakkale	1,354	3,241	1,800	0,873
Hatay	2,284	9,701	3,114	0,637
İzmir-Çeşme	4,056	22,304	4,722	0,519
İzmir-Güzelyalı	1,450	3,751	1,936	0,671
Manisa	3,096	13,139	3,624	0,378



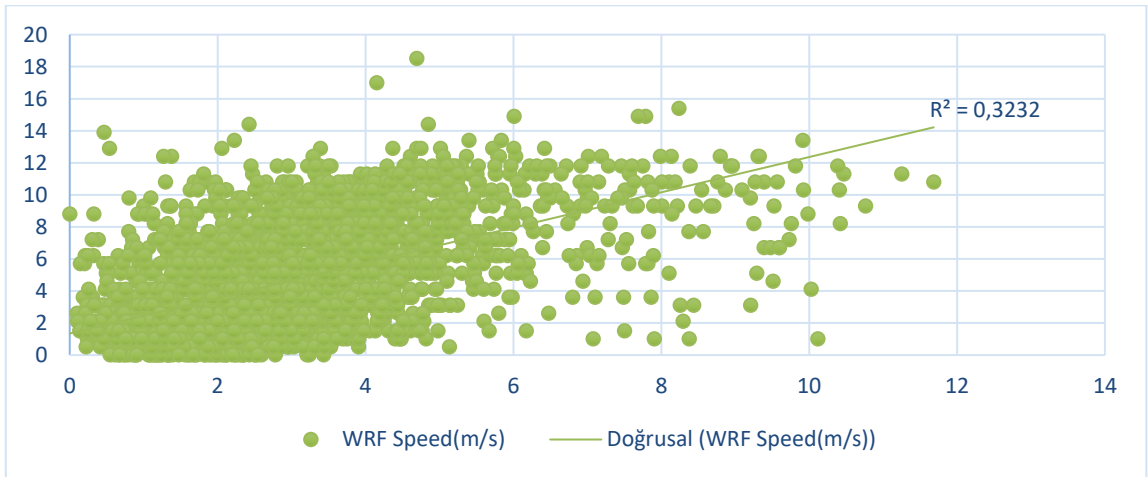
Şekil 7. Balıkesir ilinde WRF model tahmini ve ölçüm ilişkisi (Figure 7. WRF model estimation and measurement relationship in Balıkesir province)

İzmir-Çeşme'deki bölge deniz seviyesinden 52 m yükseklikte ve bölge açık arazidir. Bu bölgede, bölgesel türbülanslar, yüzey sürtünmesi ve konveksiyonların model tarafından iyi temsil edilememiş olduğu belirlenmiştir ayrıca ızgara içerisinde bulunan, sahil, açık su yüzeyi, dağlık ve ağaçlık bölgeler ile 110 m'ye varan yükseklik farkları, model tahminlerini etkiler. WRF bu sebeplerle bölgede genel olarak aşırı tahminler üretmiş olabilir (Şekil 10).

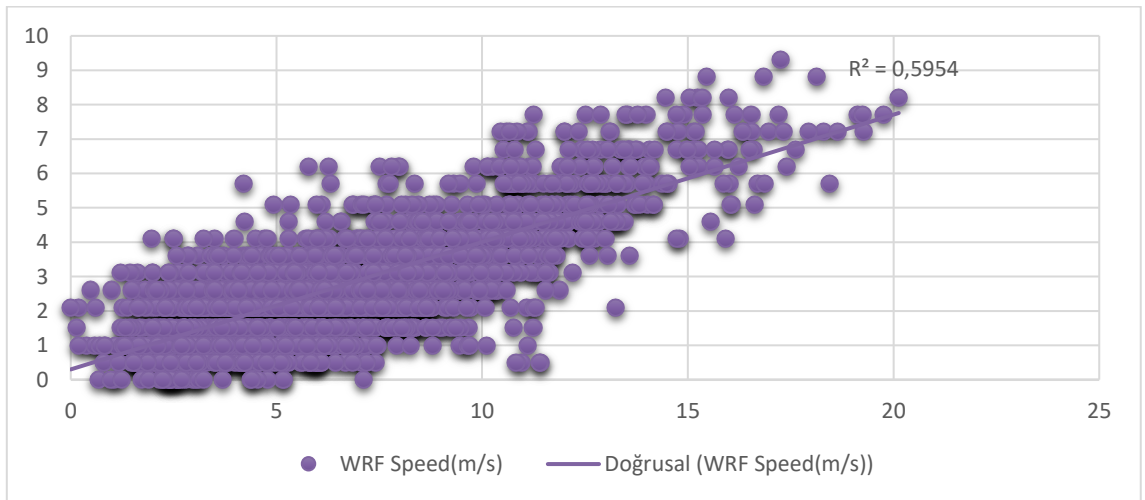
İzmir-Güzelyalı'daki ızgara konumunda, insan yaşam alanları, sahiller ve açık su yüzeyleri bulunmakla beraber, bölge içerisindeki yapılar ve ağaçlık bölgeler sebebiyle 80 m'ye varan yükseklik farklarının, model tahminlerini etkilediği sonucuna varılmıştır. Deniz seviyesine oldukça yakın olan bir bölgede bulunmaktadır. Yükseklik azaldıkça yüzey sürtünmesi ile rüzgâr hızında değişimler ve türbülanslar meydana gelebilir ve bu durum tahminleri genellikle olumsuz etkiler. Model 1,45 MAE ile bu bölgede iyi bir performansı göstermiştir (Şekil 11).



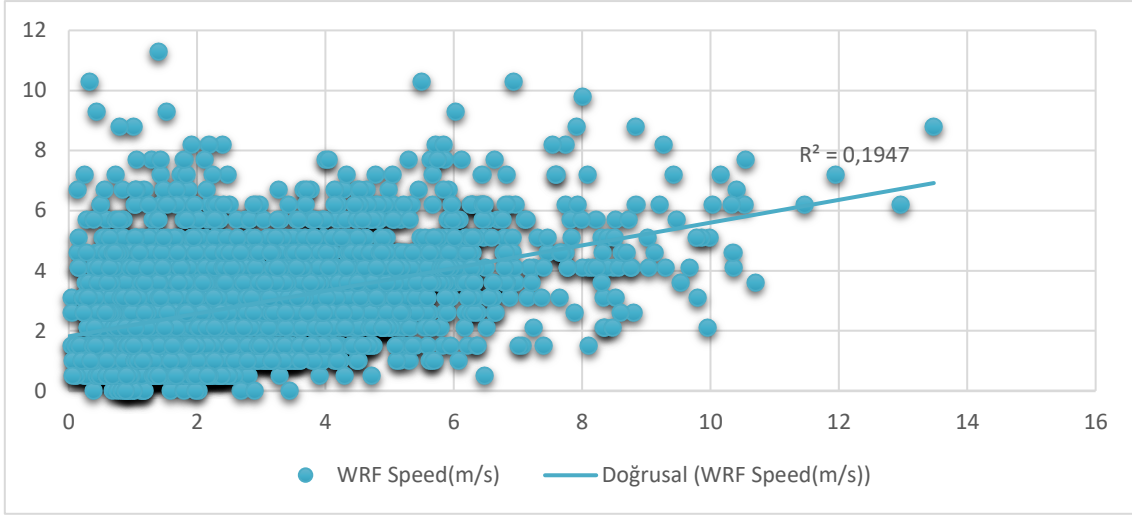
Şekil 8. Çanakkale ilinde WRF model tahmini ve ölçüm ilişkisi (Figure 8. WRF model estimation and measurement relationship in Çanakkale province)



Şekil 9. Hatay ilinde WRF model tahmini ve ölçüm ilişkisi (Figure 9. Relationship between WRF model estimation and measurement in Hatay province)

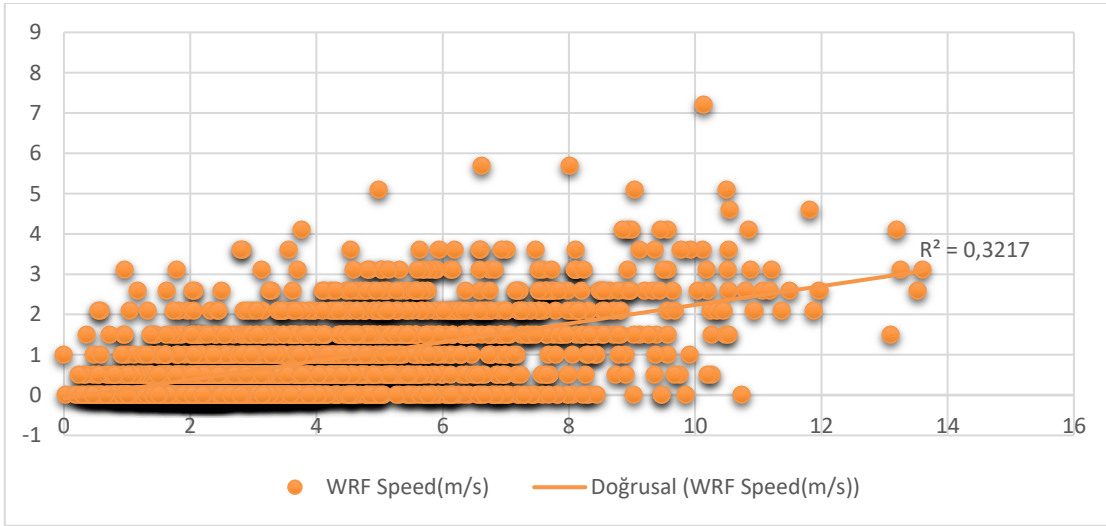


Şekil 10. İzmir-Çeşme'de WRF model tahmini ve ölçüm ilişkisi (Figure 10. Relationship between WRF model estimation and measurement in İzmir-Çeşme)



Şekil 11. İzmir-Güzelyalı’da WRF model tahmini ve ölçüm ilişkisi (Figure 11. Relationship between WRF model estimation and measurement in İzmir-Güzelyalı)

Manisa bölgesi denizden 62 m yüksekliktedir bununla birlikte ızgara içerisinde yer alan dağlık alanlar 390 m’ye varan yükseklik farkları oluşturmaktadır ayrıca insan yaşam alanları ve bölgedeki ağaçların sıklığı rüzgâr hızını önemli ölçüde etkilerken model simülasyonu tarafından coğrafyanın iyi temsil edilememesine ve ölçümlere göre normalden daha yüksek tahminler yapmasına sebep olmuş olabilir. Manisa, Çeşme’den sonra en kötü performansa sahiptir (Şekil 12).

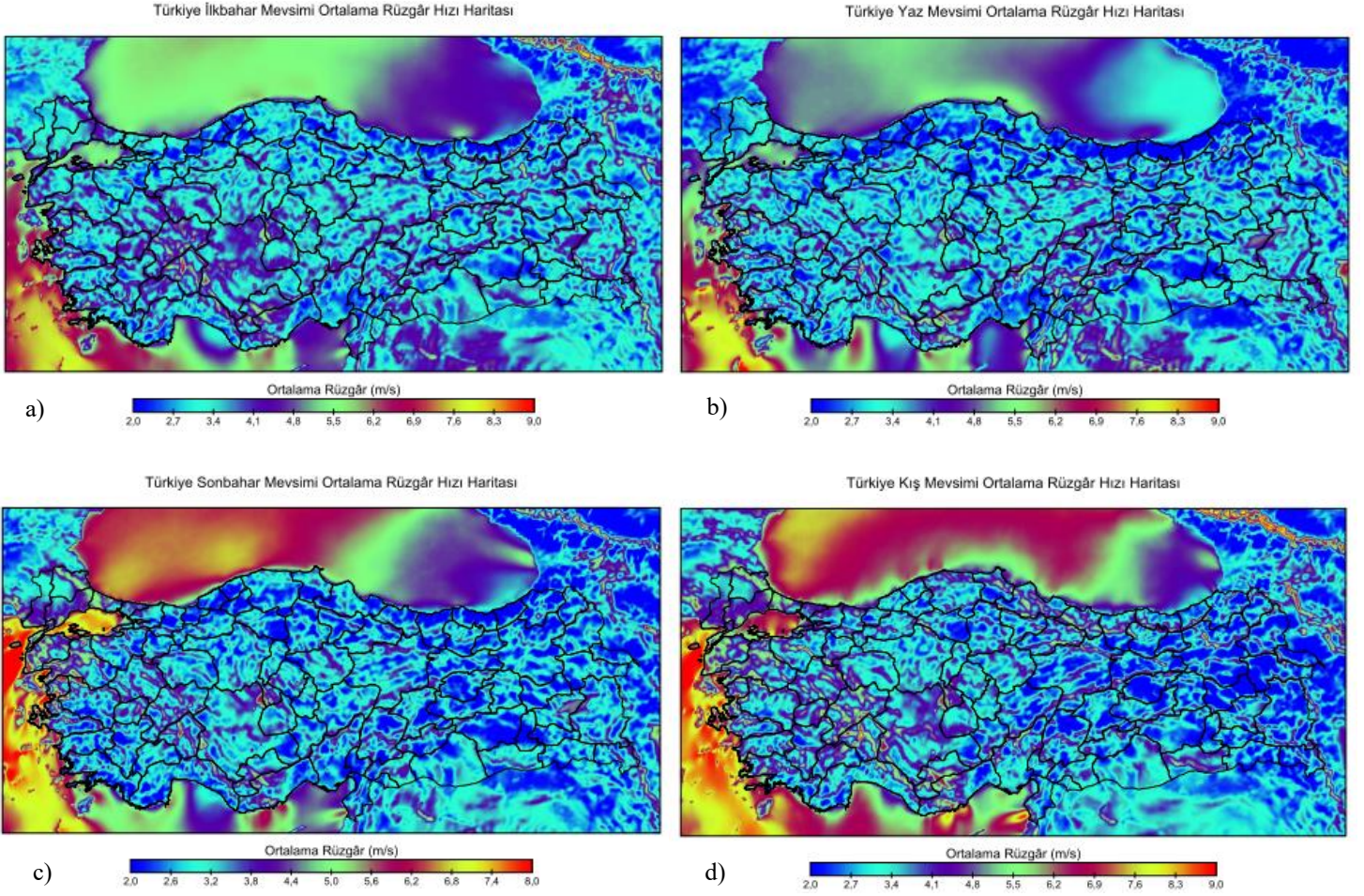


Şekil 12. Manisa ilinde WRF model tahmini ve ölçüm ilişkisi (Figure 12. Relationship between WRF model estimation and measurement in Manisa province)

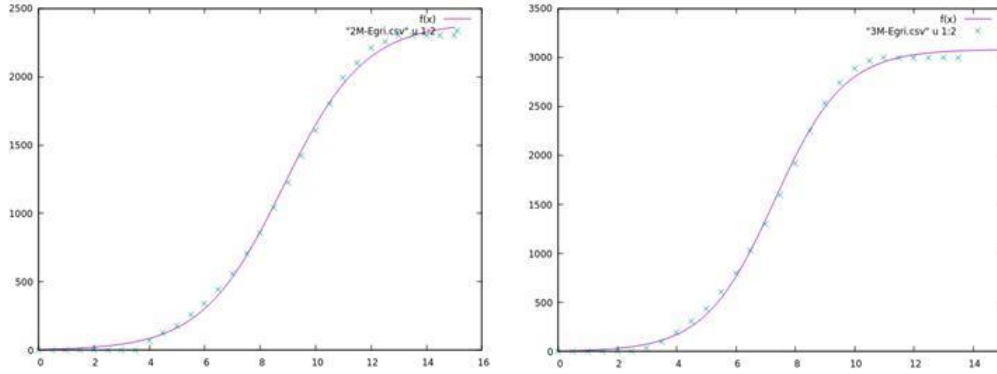
Model tahminleri ve rüzgâr hızları mevsimsel olarak da incelenmiştir. Karada, kış mevsimi, doğu bölgeleri ve Marmara Bölgesi için rüzgâr yoğunluğu daha homojen bir görüntüye sahiptir (Şekil 13). Yaz ve sonbahar mevsimlerinde ise Karadeniz’in uç bölgelerinde ortalama 4 m/s ve üzerinde rüzgâr hızları görülmesi beklenmektedir. İç Anadolu’da İlkbahar mevsimi etkisi ile rüzgârlar daha yoğun seyretmektedir. Açık sularda ise her mevsimde batı denizleri yüksek rüzgâr hızlarına sahiptir bununla birlikte Akdeniz ise en iyi performansı kış ve ilkbahar mevsimlerinde göstermiştir bununla birlikte Karadeniz için en iyi mevsimlerin sonbahar ve kış mevsimi olduğu saptanmıştır.

Üç parametrelili bir sigmoid fonksiyonu ile oluşturduğumuz 2,3 MW ve 3 MW’lık güç eğrileri (Şekil 14) verilen fonksiyonla doğru bir şekilde eşlendiği görülmüştür (Tablo 6 ve 7) ve bu eğriler ile Türkiye’nin rüzgâr gücü üretim potansiyeli haritası (Şekil 15 ve 16)’da oluşturularak sırasıyla 2,3 MW ve 3 MW ortalama güç üretim potansiyeli haritaları oluşturulmuştur, batı ve güney bölgeleri ve kıyı kesimlerinin ortalama rüzgâr gücü ile enerji üretimi için uygun olduğu saptanmıştır.

Güç eğrisi parametreleri incelendiğinde asimptotik standart hata (Tablo 6 ve 7) %1’in altında değerler almıştır. En yüksek korelasyon matris ilişkileri sırasıyla a, b ve a, c arasında olduğu saptanmıştır. En düşük ilişkinin ise b ile c parametreleri arasında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 13. Türkiye mevsimsel ortalama rüzgâr hızı haritası (Figure 13. Turkey seasonal average wind speed map)



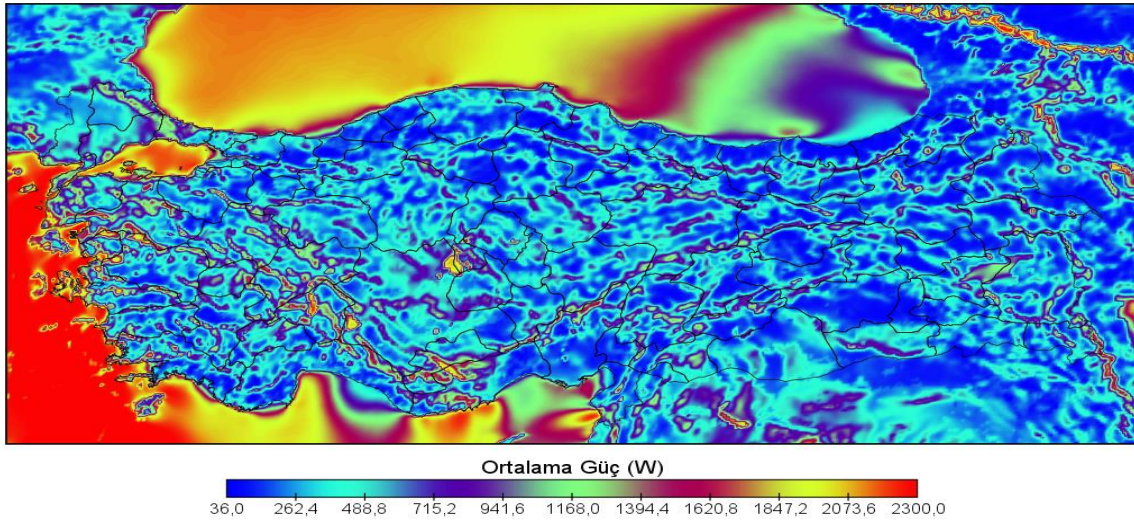
Şekil 14. Eşitlenmiş güç eğrileri (Figure 14. Fitted power curves)

Tablo 6. 2,3 MW güç eğrisi parametreleri ve hata değerleri (Table 6. 2.3 MW power curve parameters and error values)

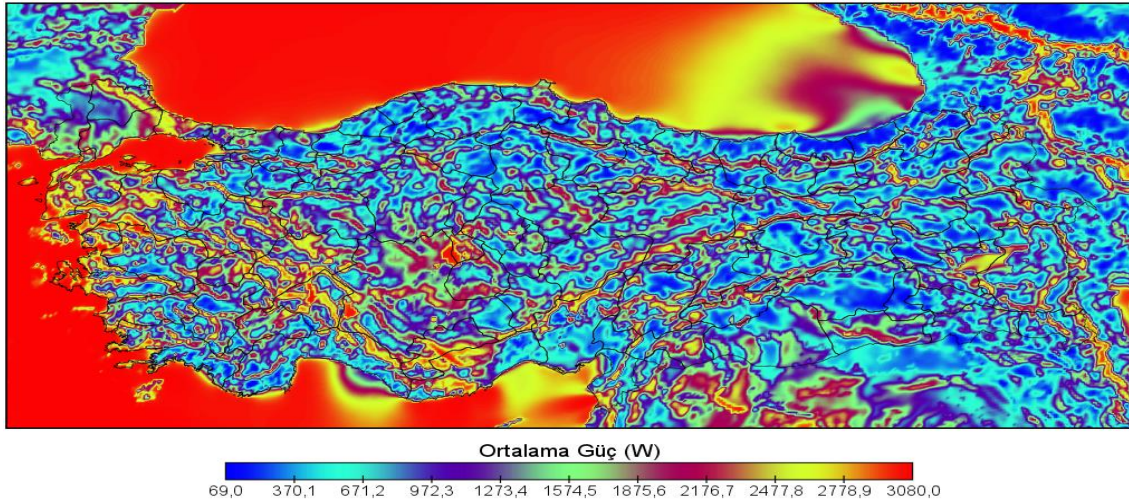
2,3 MW Güç Eğrisi	a	b	c
Ayarlanmış Parametre Değeri	2395,7	8,83299	1,47246
Asimptotik Standart Hata	+/- 20,37 (%0,8503)	+/- 0,04854 (0,5495%)	+/- 0,03793 (%2,576)
Korelasyon Matrisi a	1,000		
Korelasyon Matrisi b	0,756	1,000	
Korelasyon Matrisi c	0,672	0,508	1,000

Tablo 7. 3 MW güç eğrisi parametreleri ve hata değerleri (Table 7. 3 MW power curve parameters and error values)

3 MW	a		b		c	
Ayarlanmış Parametre Değeri	3080,29		7,30116		1,17229	
Asimptotik Standart Hata	+/- 22,96	(%0,7454)	+/- 0,03983	(%0,5455)	+/- 0,03284	(%2,801)
Korelasyon Matrisi a	1,000					
Korelasyon Matrisi b	0,653		1,000			
Korelasyon Matrisi c	0,587		0,382		1,000	



Şekil 15. Türkiye 2,3 MW rüzgâr gücü üretim potansiyeli haritası (Figure 15. Türkiye 2.3 MW wind power generation potential map)



Şekil 16. Türkiye 3 MW rüzgâr gücü üretim potansiyeli haritası (Figure 16. Türkiye 3 MW wind power generation potential map)

Mentes ve ark. (2012) Manisa bölgesinde WRF ve WindSim modellerini üç günlük bir zaman diliminde çalıştırmış 1,28–2,46 aralığına mutlak hataya sahip olduğunu göstermiştir. MISO yapay nöral ağ 0,92–0,98 korelasyon katsayısına sahiptir ve iki günlük bir eğitim süresine sahiptir. Kullanılan farklı veri setleri, model parametreleri, konum ve çalışma süresi, sonuçların farklı olmasına sebep olabilir. Tan ve ark. (2021) Manisa bölgesi için ECMWF datası kullanarak benzer bir çalışma ile üç güne kadar rüzgâr hızı ve gücü tahminleri gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma rüzgâr hızında 0,89 ve 0,92 aralığında bir Index of Agreement performansına sahiptir. Ölçüm verilerindeki ve modeldeki farklılıklar sonuçları etkileyebilir. Devrim ve Sakallı (2021) Hatay bölgesinde WRF modeli ile bir aylık bir çalışma gerçekleştirmiş ve değerlendirmede 0,92 korelasyon katsayısına sahiptir. Zamansal çözünürlük, çalışma aralığı ve model parametresindeki farklılıkların sonuçlardaki farklılıklara sebep olduğu düşünülmektedir. Şahin ve ark. (2005) Doğu Akdeniz'deki rüzgâr verilerini WASP modeli ile incelemiştir. Hatay'ın bölgelerinde rüzgâr hızı ve güç üretim potansiyelini değerlendirmiştir. Samandağ bölgesinde rüzgâr hızının günün %72 'sinde 3 m/s ve üzerinde seyrettiğini tespit etmiştir.

Jacodino ve ark. (2021) Brezilya'da rüzgâr hızı için yaptıkları saatlik ölçümler ve aylık değerlendirmeler sonucunda 1,1 MAE değerine ulaşmıştır. Bu değer bizim yıllık 1,35 MAE değerimize yakındır. Coğrafi farklılıklar, model şemaları ve parametrelerdeki

farklılıklar her bölge için farklı tahminler üretebilir. Bu durum sonuçları etkilemektedir. Feroz ve ark. (2020) Pakistan’da yaptığı bir çalışmada 0,5 derecelik GFS başlangıç çözünürlüğüyle yaz ve kış aylarının ilk ayının, bir hafta süre aralığındaki iz etkilerini incelemiş, 1,20 ve 1,87 aralığında MAE değerlerine ulaşmıştır. Başlangıç koşulları, model parametreleri ve topoğrafyadaki farklılıklar sonuçları etkilemektedir.

4. Sonuç

Rüzgâr enerjisi yatırımları yüksek maliyetlere ulaşmaktadır. Bu konudaki en büyük zorluklardan biri de doğru ve kesintisiz rüzgâr hızı ölçüm verilerine erişmek ve bu verileri analiz etmektir. Ölçümler maliyet ve zaman yönüyle rüzgâr enerjisi yatırımlarını zorlaştırmaktadır ayrıca her bölgede ölçüm yapmak mümkün olamamaktadır. Bu nedenle ki rüzgâr bileşenlerinin doğru ve kısa sürede tahmin edilmesi, santral yatırımları ve enerji piyasaları için, rüzgâr hızına olan artarak ilerleyen rağbet ile daha da önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada seçtiğimiz başlangıç koşulları ve uygun parametreler ile yapılan WRF model tahminleri ile ölçüm verilerinin analizi sonucunda, Türkiye’de 2,3 MW ve 3 MW rüzgâr güç üretim potansiyeli mevcut olduğu tahmin edilmektedir. 2,3 MW’lık üretim alanları mevcut olmakla birlikte güç üretim haritaları incelendiğinde 3 MW’lık yatırımların uzun vadede çok daha iyi bir sonuç verebileceği saptanmıştır bununla birlikte kara üzerindeki kurulumlar haricinde su üzerindeki hibrit kurulumlar için de Türkiye’nin iyi bir potansiyele sahip olduğu söylenebilir. Sonraki araştırmalarda bu potansiyel daha detaylı olarak incelenerek dalga ve akıntı, rüzâr ve güneş enerjileri için hibrit kurulumlara uygun konumlar tespit edilebilir.

Kaynakça

- Akdağ, O., & Yeroğlu, C. (2019). Offshore/Onshore Rüzgâr Santralinin Modellenmesi ve Şebekeye Bağlantısı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (16), 505-520.
- Altan, A., & Karasu, S. (2020). Ayırıştırma yöntemlerinin derin öğrenme algoritması ile tanımlanan rüzgâr hızı tahmin modeli başarımına etkisinin incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (20), 844-853.
- Bilal, M., Solbakken, K., & Birkelund, Y. (2016). Wind speed and direction predictions by WRF and WindSim coupling over Nygårdsfjell. *Journal of Physics: Conference Series* 753 (8): 082018.
- Bodini, N., Hu, W., Optis, M., Cervone, G., & Alessandrini, S. (2021). Assessing boundary condition and parametric uncertainty in numerical-weather-prediction-modeled, long-term offshore wind speed through machine learning and analog ensemble. *Wind Energy Science*, 6(6): 1363-1377.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., & 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.
- Carvalho, D., Rocha, A.M.A. C., Gómez-Gesteira, M., & Santos, C.S. (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*, 135: 234-246.
- Christoforou, E., Emiris, I.Z., Florakis, A., Rizou, D., & Zaharia, S. (2021). Spatio-temporal deep learning for day-ahead wind speed forecasting relying on WRF predictions. *Energy Systems*, 1-21.
- Devrim, M.A., & Sakalli, A. (2021). Estimation of wind speed and energy potential by atmospheric model for day-ahead market and wind power plants in Turkey. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1032 (1) 012042.
- Di, Z., Ao, J., Duan, Q., Wang, J., Gong, W., Shen, & C., Liu, Z. (2019). Improving WRF model turbine-height wind-speed forecasting using a surrogate-based automatic optimization method. *Atmospheric Research*, 226: 1-16.
- Doğanşahin, K., Uslu, A.F., & Kekezoğlu, B. (2019). İki Bileşenli Weibull Dağılımı ile Rüzgâr Hızı Olasılık Dağılımlarının Modellenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 315-326.
- Dupuy, F., Duine, G.J., Durand, P., Hedde, T., Pardyjak, E., & Roubin, P. (2021). Valley winds at the local scale: Correcting routine weather forecast using artificial neural networks. *Atmosphere*, 12(2): 128.
- Emeksiz, C., & Tan, M., (2021). Geliştirilmiş EEMD-EWT Tabanlı Yapay Sinir Ağı Modeli Kullanarak Çok Adımlı Rüzgâr Hızı Tahmini. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (26), 165-173.
- Erduman, A., Kekezoğlu, B., & Durusu, A. (2018). Küçük Güçlü Rüzgâr Santrallerinin Kurulumu ve Şebekeye Etkilerinin Teknik ve Ekonomik Açından Değerlendirilmesi: Uygulama Çalışması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (13), 112-117.
- Feroz, R.M.A., Javed, A., Syed, A.H., Kazmi, S.A.A., & Uddin, E. (2020). Wind speed and power forecasting of a utility-scale wind farm with inter-farm wake interference and seasonal variation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42: 100882.
- Giannakopoulou, E.M., & Nhili, R. (2014). WRF model methodology for offshore wind energy applications. *Advances in Meteorology*.
- Global Wind Energy Council, G.W.E.C. (2021). Global wind report 2021.
- Groch, M., & Vermeulen, H.J. (2019). Wind speed event forecasting using a Hybrid WRF and ANN model. In *2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)* 1-6.
- Groch, M., & Vermeulen, J. (2019). Short-term ensemble nwp wind speed forecasts using mean-variance portfolio optimization and neural networks. In *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)* 1-6.

- Guo, Z., & Xiao, X. (2014). Wind power assessment based on a WRF wind simulation with developed power curve modeling methods. *Hindawi Publishing Corporation Abstract and Applied Analysis*, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/941648>.
- Holley, J.W., & Guilford, J.P. (1964). A note on the G index of agreement. *Educational and psychological measurement*, 24(4): 749-753.
- Jacodino, W.D., da Silva Nascimento, A.L., Calvetti, L., Fisch, G., Beneti, C.A.A., & da Paz, S.R. (2021). Hourly day-ahead wind power forecasting at two wind farms in northeast Brazil using WRF model. *Energy*, 230: 120841.
- Jiang, P., Liu, Z., Niu, X., & Zhang, L. (2021). A combined forecasting system based on statistical method, artificial neural networks, and deep learning methods for short-term wind speed forecasting. *Energy*, 217: 119361.
- Li, F., Ren, G., & Lee, J. (2019). Multi-step wind speed prediction based on turbulence intensity and hybrid deep neural networks. *Energy conversion and management*, 186: 306-322.
- Liu, X., Zhang, L., Zhang, Z., Zhao, T., & Zou, L. (2021). Ultra Short Term Wind Power Prediction Model Based on WRF Wind Speed Prediction and CatBoost. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 838 (1): 012001.
- Martínez-Arellano, G., & Nolle, L. (2013). Genetic programming for wind power forecasting and ramp detection. In *International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence* 403-417.
- Men, Z., Yee, E., Lien, F. S., Wen, D., & Chen, Y. (2016). Short-term wind speed and power forecasting using an ensemble of mixture density neural networks. *Renewable Energy*, 87: 203-211.
- Mentes, S., Tan, E., Ozdemir, T., Unal, E., Unal, Y., Efe, B., & Borhan, Y. (2021.) Short term wind power forecast in Manisa, Turkey by using the wrf model coupled to a cfd model.
- Niu, D., Pu, D., & Dai, S. (2018). Ultra-short-term wind-power forecasting based on the weighted random forest optimized by the niche immune lion algorithm. *Energies*, 11(5): 1098.
- Oettl, D., & Veratti, G. (2021). A comparative study of mesoscale flow-field modelling in an Eastern Alpine region using WRF and GRAMM-SCI. *Atmospheric Research*, 249: 105288.
- Özen, C., Dinç, U., Deniz, A., & Karan, H. (2021). Wind power generation forecast by coupling numerical weather prediction model and gradient boosting machines in Yahyalı wind power plant. *Wind Engineering*, 45(5): 1256-1272.
- Prieto-Herráez, D., Frías-Paredes, L., Cascón, J.M., Lagüela-López, S., Gastón-Romeo, M., Asensio-Sevilla, M.I., & González-Aguilera, D. (2021). Local wind speed forecasting based on WRF-HDWind coupling. *Atmospheric Research*, 248: 105219.
- Salamanca, F., Zhang, Y., Barlage, M., Chen, F., Mahalov, A., & Miao, S. (2018). Evaluation of the WRF-urban modeling system coupled to Noah and Noah-MP land surface models over a semiarid urban environment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(5): 2387-2408.
- Salazar, A.A., Che, Y., Zheng, J., & Xiao, F. (2021). Multivariable neural network to postprocess short-term, hub-height wind forecasts. *Energy Science & Engineering*, 1–15. doi:[10.1002/ese3.928](https://doi.org/10.1002/ese3.928).
- Salfate, I., Marin, J.C., Cuevas, O., & Montecinos, S. (2020). Improving wind speed forecasts from the Weather Research and Forecasting model at a wind farm in the semiarid Coquimbo region in central Chile. *Wind Energy*, 23(10): 1939-1954.
- Sayed, A., Choi, Y., Jung, J., Lops, Y., Eslami, E., & Salman, A.K. (2020). A deep convolutional neural network model for improving WRF forecasts. *arXiv preprint arXiv: 2008.06489*.
- Şahin, B., Bilgili, M., & Akilli, H. (2005). The wind power potential of the eastern Mediterranean region of Turkey. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(2): 171-183.
- Tan, E., Mentes, S.S., Unal, E., Unal, Y., Efe, B., Barutcu, B., & Incecik, S. (2021). Short term wind energy resource prediction using WRF model for a location in western part of Turkey. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13 (1): <https://doi.org/10.1063/5.0026391>.
- Teixeira, R.S., Santos Conterato, F., Maria, P., Dias, A., Kaore, Y., & Kitagawa, L. (2020). Hybrid model of wind speed prediction in short time range using wrf and artificial neural networks. *VI International Symposium on Innovation and Technology (SIINTEC)*.
- Thompson, R.D. (2002). *Atmospheric processes and systems*. Routledge.
- Turkish Wind Energy Association. (2021). *Turkish Wind Energy Statistics Report*.
- Wei, C.C. (2020). Development of stacked long short-term memory neural networks with numerical solutions for wind velocity predictions. *Advances in Meteorology*, 2020.
- Xu, W., Liu, P., Cheng, L., Zhou, Y., Xia, Q., Gong, Y., & Liu, Y. (2021). Multi-step wind speed prediction by combining a WRF simulation and an error correction strategy. *Renewable Energy*, 163: 772-782.
- Zhao, J., Guo, Z. H., Su, Z. Y., Zhao, Z. Y., Xiao, X., & Liu, F. (2016). An improved multi-step forecasting model based on WRF ensembles and creative fuzzy systems for wind speed. *Applied Energy*, 162: 808-826.
- Zhao, J., Guo, Y., Xiao, X., Wang, J., Chi, D., & Guo, Z. (2017). Multi-step wind speed and power forecasts based on a WRF simulation and an optimized association method. *Applied Energy*, 197: 183-202.