



# Journal of Turkish Operations Management

## Rüzgâr enerjisi yatırımlarının karbon fiyatlandırması ve rüzgâr hızı tahmini ile ekonomik analizi

Süleyman Atılğan<sup>1</sup>, Muzaffer Alım<sup>2\*</sup>, Çağrı Koç<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı, Batman Üniversitesi, Batman

e-mail: [suleyman@batman.edu.tr](mailto:suleyman@batman.edu.tr), ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-6943-0055>

<sup>2</sup>Beşiri OSB MYO, Batman Üniversitesi, Batman

e-mail: [muzaffer.alim@batman.edu.tr](mailto:muzaffer.alim@batman.edu.tr), ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-4420-7391>

<sup>3</sup>Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi, Ankara

e-mail: [cagri.koc@asbu.edu.tr](mailto:cagri.koc@asbu.edu.tr), ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-7377-204X>

\*Sorumlu Yazar

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 05.06.2023

Revize: 25.06.2023

Kabul: 14.07.2023

### Anahtar Kelimeler

Rüzgâr enerjisi,  
Rüzgâr hızı tahmini,  
Enerji ekonomisi,  
Karbon emisyon  
fiyatlaması,  
Türbin seçimi

### Özet

Son yıllarda fosil kaynaklardan elde edilen enerji fiyatlarının artması, tedarik problemleri ve çevresel sorunlar gibi faktörler nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları giderek daha büyük bir öneme sahip olmaktadır. Bu enerji kaynaklarına yönelik yapılan yatırımların etkili olması için doğru bir şekilde ekonomik olarak analiz edilmesi gerekmektedir. Son dönemde artan karbon fiyatlandırması uygulamaları da bu analizlerde göz önünde bulundurulması gereken bir faktördür. Özellikle rüzgâr gibi düşük emisyonlu enerji kaynakları için, karbon fiyatlandırması ek bir gelir kaynağı sunmaktadır. Bu çalışmada, belirli bir bölgedeki geçmiş rüzgâr hızı verileri kullanılarak gelecek dönemler için rüzgâr hızı tahminleri yapılmış ve bu tahminlere dayanarak elektrik üretim miktarları hesaplanmıştır. Daha sonra, farklı rüzgâr türbinlerinin ekonomik olarak değerlendirilmesi için birim maliyetler karşılaştırılmıştır. Tahmin yöntemi olarak, mevsimsel ARIMA modeli tercih edilmiştir. Ayrıca, ekonomik analizde Net Bugünkü Değer yaklaşımı kullanılmıştır. Böylelikle, yatırımların maliyetleri, enerji üretimi ve karbon fiyatlaması gibi faktörler dikkate alınarak projenin ekonomik durumu değerlendirilmektedir. Özellikle karbon fiyatlamasının dahil edilmesiyle birlikte, rüzgâr türbinlerinin büyüklüğüne bağlı olarak birim maliyetlerde %9,4 ila %16 arasında azalmalar gözlemlenmiştir. Bu, yatırımcılar ve enerji şirketleri için yenilenebilir enerji projelerinin daha cazip hale gelmesini sağlamaktadır. Ayrıca, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir enerji üretimi hedeflerine ulaşma açısından da önemli bir adımdır.

## Economic analysis of wind energy investments considering carbon pricing and wind speed forecasting

### Article Info

#### Article History:

Received: 05.06.2023

Revised: 25.06.2023

Accepted: 14.07.2023

### Keywords

Wind power,  
Wind speed forecast,  
Energy economics,  
Carbon emission pricing,  
Turbine selection

### Abstract

In recent years, renewable energy sources have gained increasing importance due to the rising prices of fossil fuels, supply problems, and, most importantly, the environmental issues they create. To accurately analyse investments in these sources, all costs and revenues need to be taken into account. The implementation of carbon pricing, which has seen a growing trend in recent years, is also a crucial consideration. It offers an additional revenue opportunity for low-emission energy sources like wind power. This study calculates the electricity generation quantities based on the forecasted wind speeds for the future period by examining historical wind speed data in the selected region. Furthermore, different wind turbines are economically evaluated and compared in terms of unit energy costs. The seasonal ARIMA model is chosen as the prediction method, and the Net Present Value approach is employed for the economic analysis. The inclusion of carbon pricing results in unit cost reductions ranging from 9.4% to 16%, depending on the turbine size. This makes renewable energy projects more attractive to investors and energy companies. It is also an important step in terms of reducing environmental impacts and achieving sustainable energy production targets.

## 1. Giriş

Enerji talebindeki artış, çevresel sorunlar ve kaynakların azalması yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi giderek arttırmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma için enerjide arz-talep dengesinin sağlanması ve enerji üretiminin çevresel açıdan en temiz şekilde yapılması gerekmektedir. Ayrıca, ekonomik olarak herkes tarafından erişilebilir olması için maliyetler de makul bir düzeyde olmalıdır.

Avrupa Birliği (AB), sera gazı emisyonlarını 1990 seviyesine göre %40 düşürmeyi ve 2050 yılına kadar bu oranı %80-95 seviyelerine çıkarmayı hedeflemektedir. Türkiye, sera gazı emisyonlarının düşürülmesi amacıyla 2023 yılı enerji hedefleri doğrultusunda yenilenebilir enerji üretiminin %30'un sağlanmasını hedeflemektedir. (İncekara, 2019). Bu amaçla temiz ve ulaşılabilir enerjiyi teşvik etmek için ülkeler, direkt ve dolaylı olarak çeşitli uygulamalar ortaya koymaktadır. Temiz enerji kaynaklarının kullanımında vergi avantajları sunulduğu gibi ayrıca CO<sub>2</sub> emisyon kotası ve fiyatlandırması uygulanarak dolaylı olarak da firmalar yönlendirilmektedir. Ayrıca, temiz enerji üretimi yapan firmalar, karbon sertifikası alarak üretimlerini daha rahat bir şekilde yapabilmektedir. Gelişmiş ülkelerde emisyonu düşürmenin maliyeti hem daha yüksek hem de enerji verimliliği zaten yüksek olduğu için emisyon azaltma potansiyeli de çok düşüktür. Örneğin, Japonya'da bir ton karbon emisyonu azaltmanın maliyetinin 500 dolar olduğu tespit edilmiştir. Fakat, buna karşın emisyon kredilerinin değeri bunun çok altındadır. Emisyon ile ilgili düzenlemeler dünyanın herhangi bir yerinde yapılan emisyon azaltımını ülke içindeki ile bir tutmaktadır. Bu nedenle gelişmekte olan ülkeler, yenilenebilir enerji yatırımları için firmaları cezbetmektedir. Bu ülkelerden de hem rüzgâr hem de güneş enerjisinde büyük bir potansiyele sahip olan Türkiye, temiz enerji yatırımlarına uyguladığı vergi indirimleri ve elektrik satın alma garantisi ile öne çıkmaktadır.

Rüzgâr enerjisinin, sürdürülebilir bir dünyada yenilenebilir enerji kaynağı olarak önemli bir yeri olduğu görülmektedir. Rüzgâr enerjisinin diğer yenilenebilir enerji türleri gibi ilk yatırım maliyeti diğer kaynaklar ile karşılaştırıldığında yüksek olmasına karşın kullanım maliyetleri oldukça düşüktür. Ayrıca, çevresel açıdan en temiz enerji üretim teknolojilerinden birisidir. Fakat, rüzgâr hızına bağlı olarak değişen üretim potansiyeli, yatırım açısından bazı riskler doğurmaktadır. Bu da enerji üretim potansiyelinin doğru değerlendirilerek etkili bir performans maliyet analizinin yapılması ile ancak aşılabilir. Bu çalışmada, belirlenen bölgelerdeki rüzgâr hızlarına bağlı olarak rüzgâr üretim potansiyelinin tahminlemesi yapılarak buna göre ekonomik analiz yapılmaktadır. Paranın zaman değerini de içeren Net Bugünkü Değer (NBD) yaklaşımı kullanılarak yapılan ekonomik analiz hem doğru rüzgâr türbinin belirlenmesinde hem de birim elektrik üretim maliyetinin hesaplanmasında analitik bir destek sunmaktadır. Ayrıca, henüz Türkiye'de uygulanmamasına rağmen gelecekte olası karbon fiyatlandırmasının rüzgâr türbininden üretilen elektrik maliyetine etkisinin nasıl olacağı da incelenmektedir.

Bu çalışma dört bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2'de literatür taraması, Bölüm 3'de tahmin yöntemi ve ekonomik modelin matematiksel sunumu, Bölüm 4'de deneysel sonuçlar, son olarak Bölüm 5'de sonuç ve öneriler sunulmuştur.

## 2. Literatür Taraması

Bir bölgedeki rüzgâr enerji üretim potansiyeli o bölgedeki rüzgâr hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle rüzgâr potansiyeli hesaplanırken bölgenin geçmiş dönem rüzgâr hızı verilerine dayanarak tahmin yapılmaktadır. Literatürde rüzgâr hızı ve rüzgâr enerjisinden elektrik üretim tahminleri üzerine çalışmalar bulunmaktadır.

Mabel ve Fernandez, (2008), rüzgâr enerjisinden üretilebilecek elektrik üretiminin analizini ve tahminini yapmışlardır. Çalışmada Hindistan'daki yedi rüzgâr çiftliğinden alınan 2002 ile 2005 yılları arasındaki 3 yıllık veriler kullanılmıştır. Rüzgâr çiftliklerinin aylık güç üretiminin tahmini için yapay sinir ağları kullanılmış ve rüzgâr enerjisi tahmin modelini geliştirmek için MATLAB kullanılarak geri yayılım algoritmaları kullanılmış ve rüzgâr enerjisi tahmin modelini geliştirmek için MATLAB kullanılarak geri yayılım algoritmaları kullanılmıştır. Riahy ve Abedi (2008), yaptıkları çalışmada doğrusal tahmin yöntemini kullanarak rüzgâr türbinleri için kısa vadeli rüzgâr hızı tahmininde bulunmuşlardır. Hong, Chang ve Chiu (2010), çok katmanlı bir ileri beslemeli sinir ağı kullanılan yeni bir rüzgâr enerjisi ve hız tahmin yöntemi önermişlerdir. Çalışmada bir rüzgâr çiftliğinin 2003 ile 2004 yılları arasındaki saatlik ölçülen rüzgâr hızı ve rüzgâr enerjisi üretim verileri kullanılmıştır. Önerilen yöntemle 30 dakikalık ileri rüzgâr gücü ve hızı tahmininde bulunularak yöntem test edilmiş ve çok iyi doğruluk gösterdiği görülmüştür.

Kusiak ve Zhang (2010), yeni bir rüzgâr hızı ve gücü tahmin modeli oluşturmuşlardır. Büyük bir rüzgâr çiftliğinde 10 saniyelik aralıklarla toplanan rüzgâr türbini verilerini kullanarak tahminde bulunulmuştur. Rüzgâr hızı tahmin modellerinden biri gelecek 1 dakika için tahmininin %90 doğrulukta olduğu tespit edilmiştir. Rüzgâr gücü tahmin modeli oluşturulmak için ise beş farklı veri madenciliği algoritması kullanılarak üç model oluşturulmuştur. Bu modellerin kapsamlı performans analizi yapılmış ve üç güç tahmin modelinin de kısa zaman dilimlerinde üretilen gücü doğru bir şekilde tahmin etmiştir.

Liu, Shi ve Erdem (2010), rüzgâr hızı tahmini için yeni bir zaman serisi tahmin yöntemi önermişlerdir. Çalışmada ABD'deki bir gözlem alanından gelen bir yıllık saatlik rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. Önerilen yöntem Taylor Kriging modelinin rüzgâr hızı zaman serilerinin tahmini için uygun şekilde değiştirilmiş halidir. Bu yöntem ARIMA yönteminden %18.60 ve %15.23 daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bouzougou ve Benoudjit (2011), rüzgâr hızı tahmini için farklı tahmin algoritmalarından oluşan çoklu mimari sistemine dayalı yeni bir model önermişlerdir. Önerilen model Cezayir'deki yedi gözlem noktasından alınan 10 yıllık veriler kullanarak test edilmiş ve deneysel sonuçlar geleneksel tahmin yöntemlerine kıyasla rüzgâr hızı tahmininin kesinliğini arttırdığı görülmüştür. Zhang, Wang, Zhao ve Tian (2013), radyal tabanlı fonksiyon sinir ağı, mevsimsel düzeltme yöntemi ve melezleyen hibrit modele dalgacık dönüşümü tekniği uygulanarak rüzgâr hızı tahmin için yeni bir model önermişlerdir. Önerilen model, Çin'de bulunan iki bölgenin bir ay için 24 saatlik ortalama verileri kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar önerilen modelin diğer modellere göre en küçük hataya sahip olduğunu göstermektedir. Li, Guan ve Wu (2015), rüzgâr çiftliklerinde enerji üretimini tahmin etmek için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada geliştirilen yöntem ABD'de bulunan dokuz rüzgâr çiftliğinden alınan 10 dakikalık aralıklarla ölçülen 1 yıllık rüzgâr hızı ve gücü verileri kullanılarak test edilmiştir. Test sonuçlarına göre geliştirilen yöntemle elde edilen tahminlerin güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Dinçer, Rüstemi, Yılmaz ve Çıngı (2017), Kilis ili için 10 metre yükseklikteki rüzgâr hızı verilerini kullanarak farklı yükseklikteki rüzgâr hızlarını tahmin etmişlerdir.

Şenol ve Musayev (2017), rüzgâr enerjisinden elektrik üretimini yapay sinir ağları modeli oluşturarak tahmin etmişlerdir. Tahmin sonuçlarına göre seçilen bölgedeki rüzgâr enerjisi potansiyelinin oldukça iyi olduğunu ve kaliteli rüzgâr türbinleri kullanarak yüksek elektrik üretiminin sağlanabileceği görülmüştür. Dikmen ve Örgen (2018), Burdur Ağlasun bölgesindeki 2 metre yükseklikteki rüzgâr hızı verilerini kullanarak farklı yükseklikteki rüzgâr hızlarını tahmin etmişlerdir. Rüzgâr hızı dikkate alınarak bölge için en uygun türbin tespiti yapılarak bölgeden rüzgâr enerjisi ile elde edilebilecek enerjiyi tespit etmişlerdir. Naik, Satapathy ve Dash (2018), çekirdek sırtı regresyonu ile ampirik mod ayrıştırmasına dayalı kısa vadeli rüzgâr hızı ve gücü tahmini için bir hibrit yöntem önermişlerdir. ABD'de bulunan bir rüzgâr çiftliğinden alınan 10 dakika, 30 dakika ve 1 saatlik rüzgâr hızı ve gücü verileri kullanılarak önerilen yöntem test edilmiştir. Test sonuçlarında önerilen modelin en az hata metrikleri ve en yüksek kolerasyon katsayısı ile üstün tahmin performansı sergilediği görülmüştür.

Shabbir, AhmadiAhangar, Kütt, Lqbal ve Rosin (2019), rüzgâr enerjisi üretiminin kısa vadeli tahmini için destek vektör makinası tabanlı regresyon algoritması önermişlerdir. Estonya'daki 1 aylık veriler kullanarak rüzgâr enerjisi üretiminin 1 gün öncesinden tahmini yapılmıştır. Çalışmada önerilen algoritma Estonya enerji düzenleme kuruluşu tahmin algoritmasının sonuçlarıyla karşılaştırmış ve önerilen algoritmanın %10 daha az ortalama kare hatası değerine sahip olduğu görülmüştür. Görgel ve Kavlak (2020), İzmir Urla bölgesindeki rüzgâr hızı verilerini kullanarak rüzgâr enerjisinden üretilebilecek elektrik üretim miktarını tahmin etmişlerdir. Lee, Wang, Harrou ve Sun (2020), kısa vadeli rüzgâr enerjisi tahmini için üç topluluk öğrenme dayalı model önermişlerdir. Tahmin doğruluğunun değerlendirilmesi için Türkiye ve Fransa'da bulunan rüzgâr türbinlerinden her 10 dakikada bir alınan ölçümleri kullanılmıştır. Önerilen modellerin iyi bir tahmin sağladığı tespit edilmiştir.

Rüzgâr enerjisinin üretim potansiyeli mevsim şartlarına bağlı olduğu için doğru bir planlama yapılmaksızın kurulan türbinler ekonomik verimliliği sağlamayabilir. Rüzgâr türbinleri kurulmadan önce kurulması planlanan bölgedeki rüzgâr hızı, rüzgâr üretim gücünün doğru şekilde tespit edilmesi ve buna bağlı olarak ekonomik analizinin yapılması gereklidir. Kurulum maliyeti, işletme maliyeti ve bakım maliyeti gibi faktörler kurulması planlanan bölgedeki rüzgâr türbininin amortisman süresini ortaya koymaktadır. Literatürde rüzgâr türbinlerinin ekonomik analizleri üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Blanco (2009), rüzgâr enerjisinin ekonomisini ve Avrupa'daki rüzgâr enerjisi projelerinin mevcut üretim maliyetlerini araştırmıştır. Araştırmada karadaki bir rüzgâr çiftliğinin üretim maliyeti 4,5 ile 8,7 ¢cent/kWh arasında, açık denizlerde bulunan bir rüzgâr çiftliğinin üretim maliyetinin ise 6 ile 11.1 ¢cent/kWh arasında olduğunu tespit etmiştir.

Malik ve Al-Badi (2009), Umman'da bulunan bir rüzgâr türbininin ekonomisini araştırmışlardır. Çalışmada yıllık ortalama rüzgâr hızı 5,7 m/s olan bir bölgede bulunan 50 kW gücündeki bir türbinini ele almışlardır. Araştırma sonucunda rüzgâr türbininin toplam öngül maliyetinin 7,4 ile 8,45 ¢cent/kWh arasında olduğunu ve türbinin basit geri ödeme süresinin 5.1 ile 5.4 yıl arasında indirimli geri ödeme süresinin ise 6.7 ile 8 yıl olduğunu tespit etmişlerdir. Vardar ve Çetin (2009), 22 farklı bölgedeki 1990 ile 2005 yılları arasındaki rüzgâr hızının saatlik ortalama değerlerini kullanarak 2500, 1300 ve 600 kW'lık kapasitede olan üç rüzgâr türbininin ürettiği elektriğin bu bölgeler için kWh başına maliyetini hesaplamışlardır. Araştırmada türbinlerden üretilecek elektriğin minimum maliyeti sırasıyla 0,023, 0,0316 ve 0,0478 ¢cent/kWh olarak Kumköy bölgesinde, maksimum maliyeti ise sırasıyla 0,3929, 0,5184 ve 0,806 ¢cent/kWh olarak Yalova bölgesinde olacağı tespit edilmiştir.

Mohammadi ve Mostafaeipour (2013), İran'ın Aligoodarz şehrinin 2005 ile 2009 yılları arasındaki 10 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızı verilerini kullanarak güçleri 20 kW ve 150 kW arasında değişen altı rüzgâr türbininin ekonomik fizibilitesini değerlendirmişlerdir. Farklı türbinler için enerji maliyetleri 0,0470 ile 0,0720 ¢cent/kWh aralığında olduğu tespit edilmiştir. Geri ödeme süresi ve fayda maliyet oranı analizi yapıldığında bir türbin modeli dışında incelenen tüm rüzgâr türbinlerinin kurulumunun ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu

göstermiştir. Katsigiannis ve Stavrakakis (2014), farklı rüzgâr türbini sınıfları için Avustralya'nın çeşitli bölgelerinde rüzgâr enerjisi üretiminin tahminini yapmışlardır. Çalışmada farklı rüzgâr türbinlerinin ekonomik analizi yapılmıştır. Effiom, Nwankwojike ve Abam (2016), Nijerya'da bulunan 500 MW'lık bir açık deniz rüzgâr türbini çiftliklerinin geliştirilmesinin fizibilitesi üzerine ekonomik maliyet değerlendirmesi yapmışlardır.

Bu çalışma, rüzgâr enerjisi alanında tahminleme ve ekonomik analizin birleştirilmesiyle rüzgâr enerjisi yatırımı değerlendirme konusunda katkı sağlamaktadır. Sonuçlar, seçilen bölge için en uygun türbin modelinin seçilmesi ve karbon fiyatlandırmasının elektrik üretim maliyetine etkisini belirlemek için kullanılabilir. Ekonomik model Vardar ve Çetin (2009)'nin geliştirdiği modele benzemesine karşın bu çalışmada rüzgâr hızının tahmini yapılması ve buna dayanan bir ekonomik analiz yapılması çalışmayı farklı kılmaktadır. Ayrıca ekonomik analizde karbon fiyatlandırmasının dahil edilmesi de daha güncel ve gerçekçi bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmanın sonuçları, sürdürülebilir enerji politikalarının oluşturulmasında ve rüzgâr enerjisi yatırımlarının ekonomik açıdan değerlendirilmesinde karar vericilere rehberlik edebilir.

### 3. Yöntem

Bu çalışmada kullanılan yöntem bu bölümde detaylı anlatılmıştır. Bölüm 3.1'de rüzgâr enerjisi hesaplamaları, Bölüm 3.2'de veri ve matematiksel yaklaşım, Bölüm 3.3'de tahmin yöntemi ve son olarak Bölüm 3.4'de ekonomik model sunulmuştur.

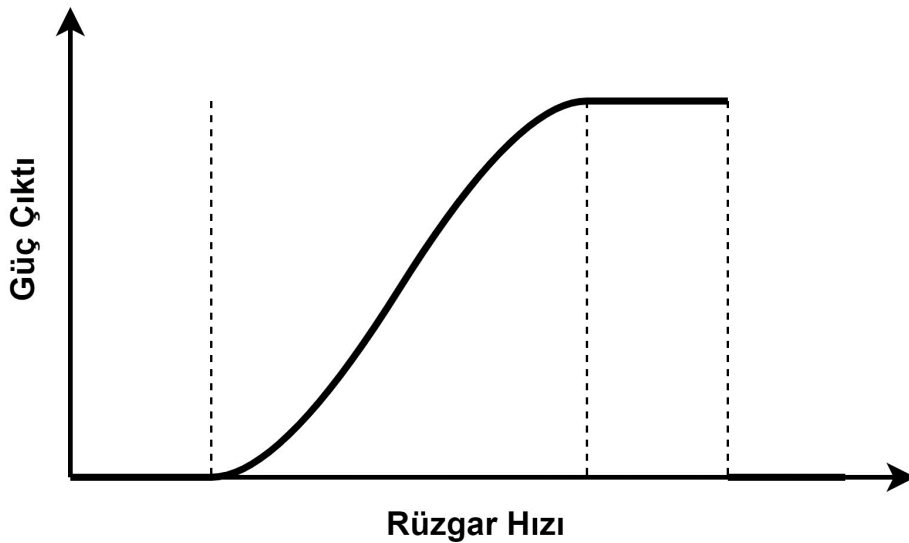
#### 3.1. Rüzgâr Enerjisi Hesaplamaları

Rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisindeki kinetik enerjiyi rotor kanatlarını hareket ettirerek mekanik enerjiye ve ardından elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Rüzgâr gücünden üretilebilecek enerji miktarı Denklem (1)'deki gibidir.

$$P_t = c_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

Denklem (1)'deki  $\rho, A, v, c_p$  sırasıyla hava yoğunluğu, kanatların süpürdüğü alan, rüzgâr hızı ve güç katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Betz Kanunu'na göre hiçbir rüzgâr türbini, rüzgârdaki kinetik enerjinin %59'undan fazlasını elektrik enerjisine dönüştüremez. Bu nedenle  $c_p$  değeri maksimum 0,59 olarak belirlenmiş olmasına karşın gerçekte bu değer 0,30 ile 0,45 arasındadır. Hava yoğunluğu  $1,23 \text{ kg/m}^3$  olarak kabul edilmiştir. Kanatların süpürdüğü alan ise türbinlerin kanat uzunluklarına göre değişkenlik göstermektedir.

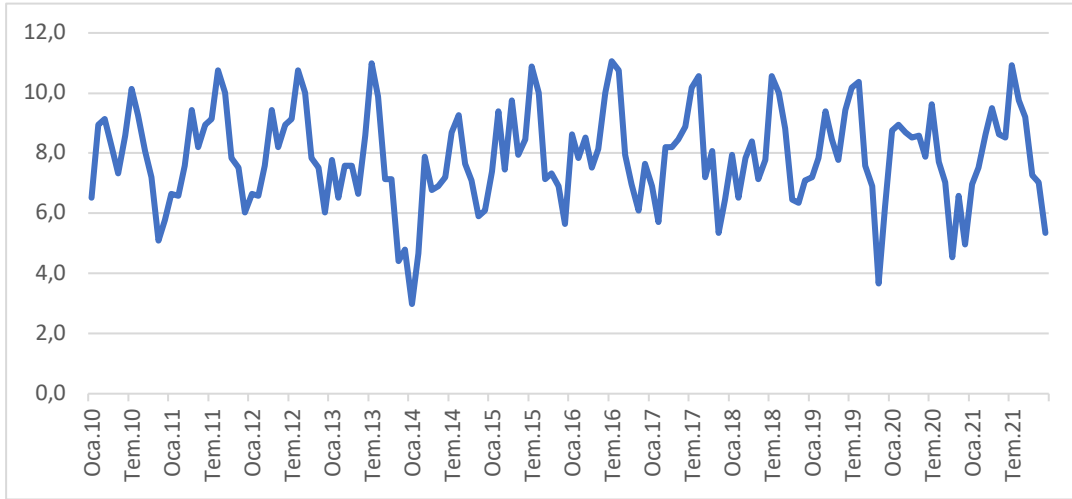
Tipik bir rüzgâr türbinindeki güç eğrisi dört bölümden oluşmaktadır. Türbinin üretime başladığı ilk rüzgâr hızına devreye alınma hızı denir ve rüzgârın bu hızın altında olması durumunda herhangi bir elektrik üretimi gerçekleşmez. Elektrik üretimi belirli bir seviyeye kadar rüzgâr hızıyla birlikte artış gösterir. Anma hızı olarak tanımlanan en yüksek hıza ulaştıktan sonra elektrik üretimi rüzgâr hızındaki artıştan bağımsız olarak sabit kalmaya başlar. Son olarak, rüzgâr hızı devre kesme hızının üzerine çıkarsa türbin üretimi durdurur. Güç eğrisinde bahsedilen bu dört bölüm Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi

### 3.2. Veri ve Matematiksel Yaklaşım

Belirlenen problem doğrultusunda yapılacak olan analiz iki kısımdan oluşmaktadır. Öncelikle elde edilen rüzgâr hızı verilerine bağlı olarak seçili bölgenin rüzgâr hızı ile ilgili gelecek tahmini yapılmaktadır. Türkiye’deki rüzgâr enerjisinden elektrik üretim potansiyeli en yüksek illerden birisi olan Konya bu analiz için seçilmiştir. Hâlihazırda kurulu 263 MW rüzgâr üretim kapasitesine sahip olan Konya bu alanda Türkiye’deki ilk 15 şehir içerisinde yer almaktadır. Ayrıca deniz üstü kurulu rüzgâr türbinlerinde daha yüksek rüzgâr hızlarına erişilebilirken toprak üzerinde kurulu türbinlerde rüzgâr hızları daha düşük olmaktadır. Bu da aslında kara türbinleri için yapılan bir ekonomik analizin deniz üstü türbinleri için çok daha ekonomik olacağı beklentisini doğurmaktadır. Konya ilindeki 2010-2021 yılları arasındaki aylık rüzgâr hızı verileri Şekil 2’de gösterilmektedir (Weather Online, 2022).



Şekil 2. 2010-2021 Konya İli Aylık Ortalama Rüzgâr Hızı Ölçümleri (mil/saat)

Şekil 2’deki grafik incelendiği zaman rüzgâr hızında aylara göre değişen bir mevsimsellik olduğu açıkça görülmektedir. Eldeki rüzgâr hızı verilerin ortalaması alındığında bunun 7,9 mil/s olduğu görülmektedir. Ayrıca 2010-2021 yılları arasında rüzgâr hızı en düşük 2,9 mil/s iken en yüksek 11,1 mil/s olarak gerçekleşmiştir.

### 3.3. Tahmin Yöntemi

Şekil 2’de sunulan geçmiş rüzgâr hızı verilerine bakıldığında farklı yılların aynı aylarında belirgin şekilde bir mevsimsellik gözlemlenmektedir. Beklendiği gibi rüzgâr hızı çeşitli aylarda yüksek iken bazı aylarda daha düşük seyirde ilerlemektedir. Bu nedenle mevsimselliği göz önünde bulunduran zaman serileri ile tahminleme yapılmıştır.

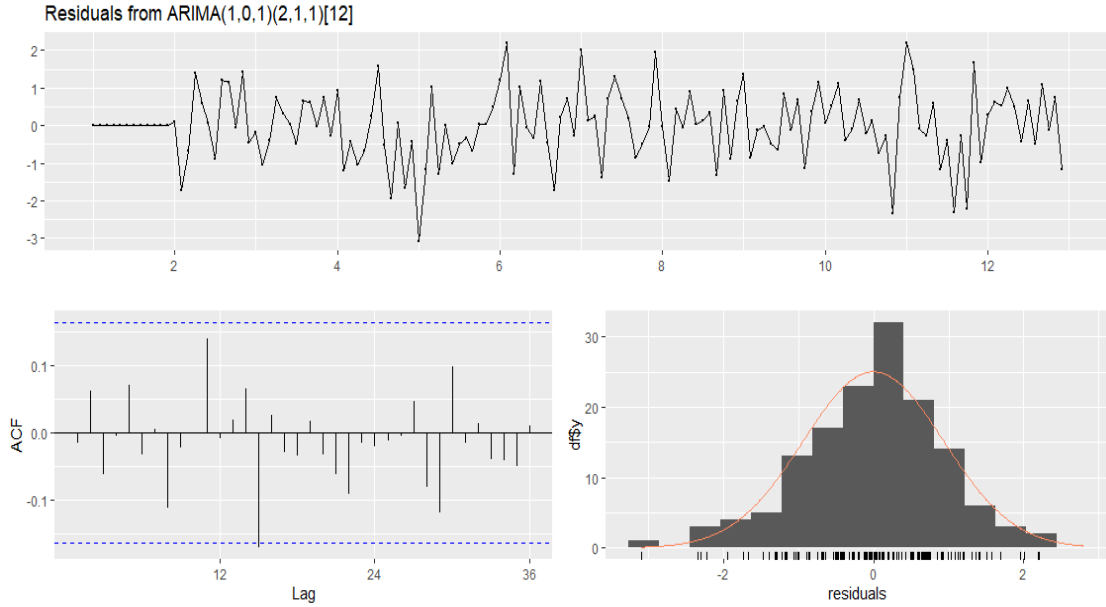
ARIMA (Bütünleşik Otoresif Hareketli Ortalama), belirli bir zaman serisini kendi geçmiş değerlerine, yani kendi gecikmelerine ve gecikmeli tahmin hatalarına dayanarak açıklayan bir modeldir. Bu model, gelecekteki değerleri tahmin etmek için kullanılabilir. Klasik bir ARIMA model  $ARIMA(p,d,q)$  ile gösterilir. ARIMA modelleri tahmin edicilerin korelasyonsuz ve birbirinden bağımsız olduğu durumlar en iyi şekilde çalışmaktadır. Bu nedenle serinin durağan olması için fark alınması yani değerlerin bir önceki değerden çıkarılarak farkların gösterilmesi gerekmektedir.  $d$  değeri ise seriyi durağan hale getirmek için gereken minimum fark alma sayısıdır. Seri eğer durağan ise  $d=0$  olur. Fakat, bazı karmaşık durumlarda bir den fazla kez fark alınması da gerekebilir.  $p$ , “Otomatik Gerileme (AR)” teriminin derecesidir. Tahmin edici olarak kullanılacak  $y$  gecikmelerinin sayısını ifade eder.  $q$  ise “Hareketli Ortalama (MA)” teriminin derecesidir. ARIMA modeline girmesi gereken gecikmeli tahmin hatalarının sayısını ifade etmektedir.

Mevsimselliği göz önünde bulunduran zaman serisi modellerinde ise normal modele ek olarak bir de mevsimsellik kısmı bulunmaktadır. Bu mevsimsel kısımda, tüm ARIMA parametrelerindeki faktörler gecikmenin yani bir sezondaki dönem sayısının katları boyunca çalışır. Mevsimsel bir ARIMA modeli,  $ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s$  olarak gösterilir. Buradaki  $(p,d,q)$  normal ARIMA modeliyle aynı iken  $P$ , mevsimsel otoresif modelinin derecesini,  $D$ , mevsimsel fark alma sayısını,  $Q$ , mevsimsel hareketli ortalama modelinin derecesini ve  $s$  ise bir sezondaki dönem sayısını ifade etmektedir. Tüm bu parametreleri içeren model ise Denklem (2)’de gösterilmektedir.

$$(1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_p B^p)(1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_p B^{ps})(1 - B)^d(1 - B^s)^D y_t = (1 + \theta_1 B + \theta_2 B^2 + \dots + \theta_p B^p)(1 + \Theta_1 B^s + \Theta_2 B^{2s} + \dots + \Theta_p B^{ps}) \varepsilon_t \quad (2)$$

Aylık periyotta mevsimseli hareketlerin yaşandığını gördüğümüz geçmiş dönem rüzgâr hızı verilerine mevsimsel ARIMA modelini R programı üzerinde uygulanmıştır. Eldeki veriye en yakın sonuçlara ulaşan ARIMA(1,0,1)(2,1,1)<sub>12</sub> modeli olduğu görülmüştür. Bu modelin matematiksel gösterimi Denklem (3)'te ve bu modele ait grafik ve sonuçlar Şekil 3'te sunulmuştur.

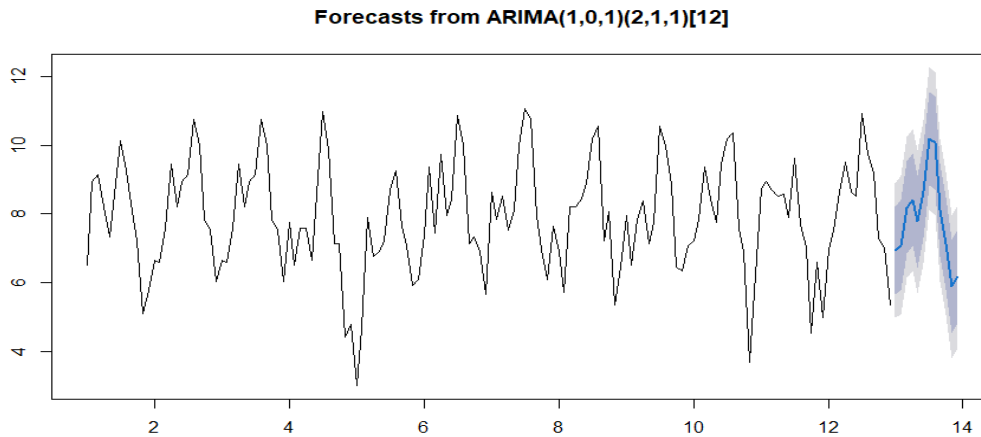
$$(1 - \varphi_1 B)(1 - \Phi_1 B^{12})(1 - \Phi_2 B^2)(1 - B)(1 - B^{12})y_t = (1 + \theta_1 B)(1 + \theta_1 B^{12})\varepsilon_t \quad (3)$$



Şekil 3. ARIMA(1,0,1)(2,1,1)[12] Kalıntı Değerleri

Şekil 3'teki ACF grafiğine baktığımızda neredeyse tüm değerlerin anlamlılık sınırları içerisinde olduğunu ve sadece bir tanesinde küçük bir aşma olduğunu görebiliriz. Bu nedenle elde ettiğimiz kalıntıların beyaz gürültü serisine oldukça yakın olduğu söylenebilir. ARIMA modelleri için kurulan varsayımın böylelikle sağlandığı görülmektedir.

Elde edilen model ile gelecek yıl için rüzgâr hızı verileri tahmini yapıldığında ise sonuç Şekil 4'teki gibi gerçekleşmektedir. Görüldüğü gibi geçmiş dönem hareketlere benzer şekilde bir gelecek tahmini yapılmıştır. Tahmin ortalamasının üzerinde koyu ve daha açık koyu alan ise %80 ve %95 güven aralıklarına göre tahminin değişebileceği seviyeleri göstermektedir.



Şekil 4. ARIMA(1,0,1)(2,1,1)[12] Gelecek Tahmini

Tahminin performans değerleri ortalama mutlak hata ve yüzdesel ortalama mutlak hata değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Buna göre ortalama mutlak hata değeri 0,695 iken yüzdesel değer 9,9 olarak ölçülmüştür. Bu da tahminin başarılı bir yöntem olduğunu göstermektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi rüzgâr hızı ortalamaları aynı yılın aynı dönemlerinde belirli bir artış ve azalış trendinde görülmektedir. Bu analiz, hangi aylarda rüzgâr hızında artış hangi aylarda düşüş olduğunu göstermektedir. Fakat rüzgâr türbinin için yapılacak analizde sadece ortalama rüzgâr hızı verilerini kullanmak yanı sıra neden olabilmektedir. Çünkü rüzgâr hızı ortalaması, türbinin devreye alma hızından düşük olsa bile bu hiçbir enerji üretimi olmayacak anlamına gelmemektedir. Bu nedenle ekonomik modelde aylık rüzgâr hızı güçleri ve bunların sıklıkları kullanılmıştır.

### 3.4. Ekonomik Model

Rüzgâr türbini yatırımının ekonomik analizinin yapılabilmesi için paranın zaman değerini de göz önünde bulunduran bir yöntem tercih edilmelidir. Çünkü bu tür yatırımlar on yıllar sürecektir ve kapasitede olduğu için zaman içinde paranın azalan değerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Rüzgâr türbini yatırımı için ekonomik maliyetler temel olarak ilk yatırım maliyetleri, dönemlik sabit maliyetler ve değişken maliyetleri olarak sınıflandırılabilir. İlk yatırım maliyetleri genel olarak, türbinin ve gerekli tesislerin kurulumu için gereken tek seferlik teçhizat, işçilik ve diğer maliyetlerdir. Toplam içerisindeki en büyük pay genellikle bu maliyete aittir. Dönemlik sabit maliyetler ise bakım-onarım maliyetleridir. Bunlar, düzenli olarak belirli periyotlarda yapılan bakım çalışmaları için ödenmektedir. Bunun üretilen elektrik ile herhangi bir ilişkisi yoktur ve sabit şekilde gerçekleşir. Değişken giderler ise türbinin çalışmasına bağlı olarak değişen maliyetlerdir. Üretilen enerji miktarı ile doğru orantılı olarak bu maliyetler artış göstermektedir. Yenilenebilir enerji türlerinin bir avantajı da herhangi bir yakıt tüketimi olmadığı için bu değişken maliyetlerin, diğer enerji türlerindeki göre daha düşük olmasıdır (Kumar ve Madlener, 2016). Ayrıca yenilenebilir enerjilerin karbon emisyonu daha düşük olduğu için elektrik üretiminden kaynaklanan ortalama emisyonu düşürmekte ve karbon fiyatlanması uygulanması halinde ekonomik bir katkı sağlamaktadır.

Ekonomik modelde, maliyetler kesikli olarak ödenirken, üretilen elektrikten elde edilen karbon geliri sürekli olarak elde edilmektedir. Bu nedenle toplam maliyetin Net Bugünkü Değeri, Denklem (4)'deki gibi hesaplanmaktadır. Ayrıca son olarak

$$NBD_{\text{rüzgâr}} = C_0 + C_{\text{sabit}} \left( \frac{1+i}{r-i} \right) \left[ 1 - \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^N \right] + C_s \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^N - C_{\text{carbon}} (E_{\text{avg}} - E_{\text{wind}}) \sum_{t=1}^N P_t(v_t) \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^t \quad (4)$$

Denklem (4)'de  $C_0$  rüzgâr türbinin kurulması için bugün harcanan maliyetleri kapsamaktadır. Bu maliyet kurulacak rüzgâr türbinin çeşidine göre değişmektedir.  $C_{\text{sabit}}$  ise yıllık düzenli olarak gerçekleşen bakım onarım maliyetleridir ve bunların bugünkü değeri için Denklem (4)'deki şekilde faiz formülüyle çarpılmıştır. Kullanım ömrü sonunda eldeki türbinin  $C_s$  fiyatına satılabileceği öngörülmektedir. Bu miktar genellikle kurulum maliyetindeki malzeme maliyetinin %10'u olarak kabul edilmektedir (Vardar ve Çetin, 2009). Ortalama karbon emisyonunda sağlanan düşüş kadar karbon, birim fiyatı  $C_{\text{carbon}}$  olacak şekilde satılabilmektedir.  $E_{\text{avg}}$  ve  $E_{\text{wind}}$  sırasıyla Türkiye'deki birim elektrikten kaynaklanan emisyon miktarını ve rüzgâr türbinindeki emisyon miktarını göstermektedir. Karbon fiyatlaması üretim miktarına bağlı olduğu için türbinin kullanım ömrü süresince ( $N$ ),  $t$  anında  $v$  rüzgâr hızına bağlı olarak üretilen enerji miktarı ( $P_t(v)$ ) üzerinden hesaplanmaktadır. Denklemdeki son kısım bu hesaplamayı göstermektedir.  $i$  enflasyon oranı (%10) ve  $r$  faiz oranı (%12) olarak seçilmiştir.  $NPV_{\text{rüzgâr}}$  değeri toplam maliyetin bugünkü değerini vermektedir. Bunu toplam üretim miktarına böldüğümüzde ise kurulan rüzgâr türbini için birim elektrik üretim maliyeti hesaplanmış olur.

### 4. Deneysel Sonuçlar

Seçilen bölgenin rüzgâr hızı verileri ve bunun gelecek tahminine bağlı olarak ekonomik analiz yapılmaktadır. Şekil 4'te sunulan gelecek tahmini ekonomik model için kullanılacaktır. Rüzgâr hızı verilerinin aylık olarak değişmesi nedeniyle satılan karbon ve satış gelirlerinde aylık faiz oranı kullanılırken diğerleri yıllık bazda ödendiği için yıllık faiz oranı kullanılacaktır. Türbine dair teknik bilgiler Tablo 1'de ve bu türbinlerin ekonomik maliyetleri Tablo 2'de sunulmuştur.

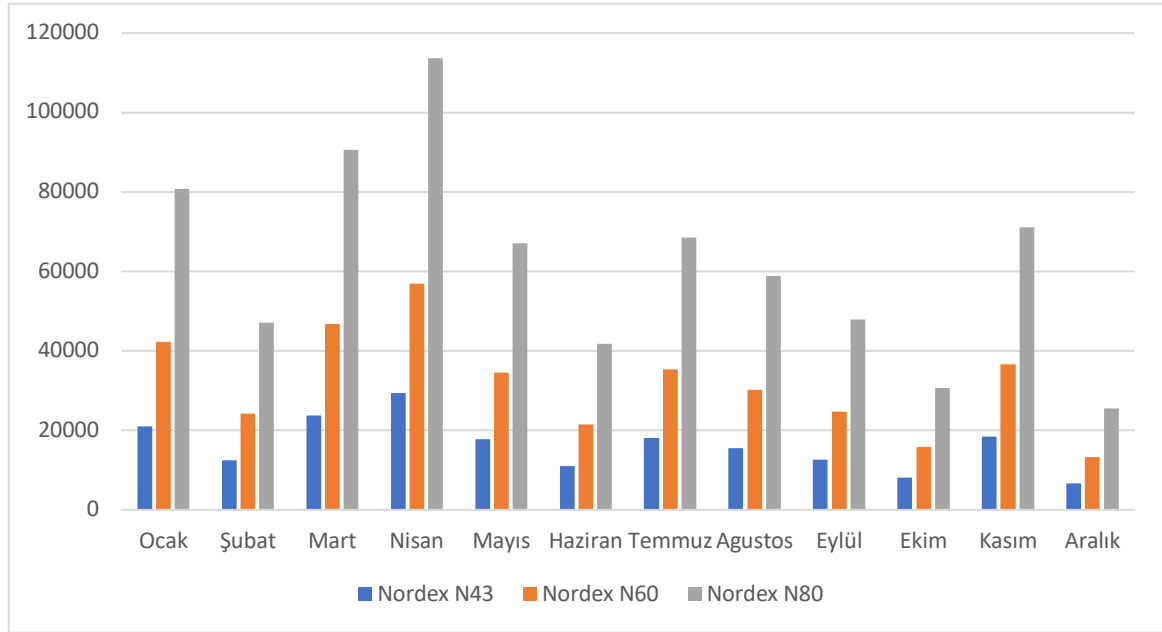
**Tablo 1.** Rüzgâr Türbinlerinin Teknik Özellikleri (Vardar ve Çetin, 2009)

Rüzgâr Türbini	Başlama ve Bitirme Hızı (m/s)	Anma Hızı (m/s)	Üretim Gücü (kW)	Rotor Çapı (m)	Yaşam Ömrü (yıl)
Nordex N43/600	3-25	13,5	600	43	20
Nordex N60/1300	3-25	15	1300	60	20
Nordex N80/2500	3-25	14	2500	80	20

**Tablo 2.** Rüzgâr Türbinlerinin Ekonomik Verileri (Vardar ve Çetin, 2009)

Rüzgâr Türbini	Yatırım Maliyeti (Euro)	Kule Maliyeti (Euro)	Kontrol Ünite Maliyeti (Euro)	Toplam İnşaat Maliyeti (Euro)	Yıllık Bakım ve Onarım Maliyeti (Euro)
Nordex N43/600	308.600	7.800	5.400	14.000	23.400
Nordex N60/1300	603.000	10.940	5.400	18.400	23.400
Nordex N80/2500	1,137,000	15.600	5.400	25.000	23.400

2021 yılı verileri baz alındığında ele alınan iki farklı türbinin seçilen bölge için elektrik üretim potansiyeli Şekil 5'teki gibi gerçekleşmektedir.

**Şekil 5.** Türbinlerin Aylara Göre Elektrik Üretim Potansiyeli (kWh)

Rüzgâr hızı verileri genelde düşük aralıkta olduğu için üretim potansiyeli de biraz düşük kalmaktadır. Ekonomik olarak analiz edildiğinde ise 20 yıllık toplam maliyet ve üretim miktarları bugünkü değeri göz önüne alındığında ekonomik sonuçlar Tablo 3'teki gibi elde edilmiştir.

**Tablo 3.** Ekonomik Analiz Sonuçları

Rüzgâr Türbini	Toplam Üretim (kWh)	Karbondan Elde edilen Gelir (Euro)	Maliyet (Euro)	Birim Maliyet (Euro/kWh)	Karbonsuz Birim Maliyet (Euro/kWh)
Nordex N43/600	3,90 milyon	64.923	701.803	0,163	0.180
Nordex N60/1300	7,65 milyon	127.387	982.685	0,112	0.129
Nordex N80/2500	14,88 milyon	247.855	1.489.918	0,084	0.100

Türkiye'de enerji bakanlığının verilerine göre 1 MWh elektrik üretimine karşın ortalama 0,440 ton CO<sub>2</sub> ortaya çıkmaktadır. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde ise 0,011 ton CO<sub>2</sub> meydana gelmektedir. Bu nedenle rüzgârdan üretilen her bir MWh için 0,429 ton CO<sub>2</sub> kazanım sağlanmaktadır. Karbon satış fiyatının 20 yıl boyunca sadece enflasyon kadar artacağı ve bugün 100 Euro/ton olarak belirlendiği bir ortamda elde edilen rüzgâr hızı verilerine dayalı ekonomik analiz her üç türbin için de yapılmıştır. Büyük ekonomilerde karbon fiyatı 40-80 dolar arasında değişmesine karşın bu rakam Avrupa'da 100 euro'ya ulaşmıştır. Türkiye'de yenilenebilir enerji yatırımı yapacak



firmaların da büyük oranda Avrupa firmaları olacağı düşünülebileceğinden karbon fiyatı bu şekilde seçilmiştir. Buna göre 20 yılda Nordex N43 türbini 3,9 milyon kWh elektrik üretimi yaparken Nordex N60 7,65 milyon kWh ve Nordex N80 ise 14,88 milyon kWh üretim gerçekleştirmektedir. Birim başına maliyetlere bakıldığında ise 20 yıllık süreç için seçilen rüzgâr türbinlerinin birim maliyetleri sırasıyla 0,180, 0,129 ve 0,010 olarak hesaplanmıştır. Karbon satışından kaynaklanan gelirler buna eklendiğinde ise birim başına maliyetler 0,163, 0,112 ve 0,084'e düşmektedir. Bu da N43 türbini için maliyetlerde %9,4, N60 için %13 ve N80 için %16'lık bir düşüş meydana geldiğini göstermektedir. Karbon fiyatının 50 euro olarak alındığı durumda ise birim maliyetler 0,172, 0,12 ve 0,092 olarak ölçülmektedir. Yani karbon fiyatının yarıya inmesi durumunda N30 türbini için birim maliyet %5, N60 için %6,7 ve N80 için %8,7 oranında artış göstermektedir. Karbon fiyatındaki değişiklikten beklendiği gibi en çok üretim yapan türbin daha çok etkilenmektedir. Bu nedenle karbon fiyatlarındaki değişimin türbin seçimini doğrudan etkileyebileceği öngörülebilir.

## 5. Sonuç ve Öneriler

Artan teknolojik gelişmeler ve enerjide dışa bağımlılık ve bunun neden olduğu enerji krizleri enerjinin önemini giderek arttırmaktadır. Rusya-Ukrayna krizi Avrupa'nın enerjide bağımlılığının ne denli önemli siyasi sonuçları olabileceğini göstermektedir. Bu siyasi etkilerin yanında fosil kaynaklı enerji yakıtlarının neden olduğu çevresel problemler de küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi büyük sorunlara neden olmaktadır. Bu da yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır. Türkiye'de elektrik üretiminde doğalgaz kullanımının yenilenebilir enerji yatırımları ile düşürülebileceği öngörülmektedir. Sürdürülebilirlik açısından da hem ekonomik hem çevresel faktörlerin birlikte değerlendirilmesi ve ayrıca enerjide dışa bağımlılığın etkileri düşünüldüğünde yenilenebilir enerji kaynaklarına büyük önem verilmesi gerektiği görülmektedir. Son yıllardaki yenilenebilir kurulu güçteki büyük artış da bu önemi göstermektedir. Bu tür kaynaklar mevsimsel şartlara bağlı olduğu için çeşitli kısıtlara sahiptir. Eldeki kısıtlı imkânlarla, bu alana yapılan yatırımlardan maksimum verimin elde edilebilmesi için doğru bir planlama ve analiz yapılması gerekmektedir. Bu durum da mevcut çalışmaların daha detaylı bir şekilde enerjinin tüm boyutlarını ele alacak şekilde geliştirilmesini mecburi hale getirmektedir.

Rüzgâr hızı tahminleri, türbin performansının doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Rüzgâr hızı, enerji üretimi ve dolayısıyla finansal getiriler üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Doğru tahminler, enerji üretimi potansiyelinin en iyi şekilde değerlendirilmesine yardımcı olurken, yanlış tahminler tesisin etkinliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, rüzgâr hızı tahminlerinin doğruluğu, türbin seçimi sürecinde kritik bir faktördür. Bu çalışmada ele alınan mevsimsel ARIMA modeli bu konuda oldukça başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır. Ayrıca, karbon fiyatlarının sisteme dahil edilmesi, türbin seçiminde sürdürülebilirlik ve çevresel etkilerin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Karbon fiyatları, enerji üretimi maliyetlerini etkilemektedir ve düşük karbon emisyonuna sahip enerji üretim teknolojileri, uzun vadede daha ekonomik ve sürdürülebilir bir seçenek olacaktır.

Sonuç olarak, rüzgâr hızı tahminlerinin doğruluğu ve karbon fiyatlarının sisteme dahil edilmesi, türbin seçimi sürecinde ekonomik analizde dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Bu faktörlerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, rüzgâr enerjisi projelerinin finansal getirilerini artırabilir, sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunabilir ve çevresel etkilerini azaltabilir. Ayrıca ilave devlet destekleri, teşvikler ve yeşil finansman sayesinde rüzgâr başta olmak üzere yenilenebilir enerji yatırımları daha cazip hale getirilebilir. Bu makalede sadece kara üzerindeki türbinler ele alınmış olup aynı yükseklikteki rüzgâr hızı değerleri üzerinden hesaplama yapılmıştır. Farklı yükseklikteki rüzgâr hızı ölçümleri ve deniz üstü rüzgâr türbinleri için de bu analizler yapılabilir. Gelecekteki araştırmalar, rüzgâr enerjisi sektöründe bu faktörlerin daha etkin bir şekilde kullanılmasını ve karar verme süreçlerini iyileştirmeyi hedefleyebilirler. Daha geniş bir çerçeveden bakıldığında kullanılan türbinlerin maliyetlerinin azalması bu kaynaklardan üretilen enerji maliyetini azaltacaktır.

## Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Süleyman ATILGAN, literatürün taranması, verilerin toplanması, makale yazımında, Muzaffer ALIM, problem tanımlanması, araştırma sürecinin planlanması ve matematiksel analizlerin yapılmasında, Çağrı KOÇ, analizlerin kontrolü, sonuçların yorumlanması ve metnin revizyonu konularında katkı sağlamıştır.

## Çıkar Çatışması

Bu çalışmada yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## Kaynaklar

- Blanco, M. I. (2009). The Economics of Wind Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1372-1382. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.004>
- Bouzgou, H. & Benoudjit, N. (2011). Multiple Architecture System for Wind Speed Prediction. *Applied Energy*, 88(7), 2463-2471. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.037>
- Dikmen, E. & Örgen, F. K. (2018). Ağlasun Bölgesi için Rüzgâr Hızı Tahmini ve En Uygun Türbin Tespiti. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 871-879. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh/issue/38579/445314>
- Diñçer, F., Rüstemli, S., Yılmaz, Ş. & Çıngı, A. (2017). Kilis için Farklı Yüksekliklerdeki Rüzgâr Potansiyelinin Belirlenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 12-20. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/bitlisfen/issue/30042/298458>
- Effiom, S. O., Nwankwojike, B. N. & Abam, F. I. (2016). Economic Cost Evaluation on the Viability of Offshore Wind Turbine Farms in Nigeria. *Energy Reports*, 2, 48-53. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2016.03.001>
- Görgel, P. & Kavlak, E. (2020). Uzun Kısa Süreli Hafıza ve Evrişimsel Sinir Ağları ile Rüzgâr Enerjisi Üretim Tahmini. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 69-80. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/dumf/issue/53363/596533>
- Hong, Y. Y., Chang, H. L. & Chiu, C. S. (2010). Hour-Ahead Wind Power and Speed Forecasting Using Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA) Algorithm and Neural Network with Fuzzy Inputs. *Energy*, 35(9), 3870-3876. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.041>
- İncekara, Ç. Ö. (2019). Türkiye ve AB'nin Enerji Hedefleri. *Journal of Turkish Operations Management*, 3(2), 298-313. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jtom/issue/51652/583491>
- İncekara, Ç. Ö. (2020). Türkiye'nin Elektrik Üretiminde Doğalgaz Talep Tahminleri. *Journal of Turkish Operations Management*, 4(2), 494-508. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jtom/issue/59336/851882>
- Katsigiannis, Y. A. & Stavrakakis, G. S. (2014). Estimation of Wind Energy Production in Various Sites in Australia for Different Wind Turbine Classes: A Comparative Technical and Economic Assessment. *Renewable Energy*, 67, 230-236. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.051>
- Kusiak, A. & Zhang, Z. (2010). Short-Horizon Prediction of Wind Power: A Data-Driven Approach. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(4), 1112-1122. Doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2043436>
- Lee, J., Wang, W., Harrou, F. & Sun, Y. (2020). Wind Power Prediction Using Ensemble Learning-Based Models. *IEEE Access*, 8, 61517-61527. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983234>
- Li, P., Guan, X. & Wu, J. (2015). Aggregated Wind Power Generation Probabilistic Forecasting Based on Particle Filter. *Energy Conversion and Management*, 96, 579-587. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.021>
- Liu, H., Shi, J. & Erdem, E. (2010). Prediction of Wind Speed Time Series Using Modified Taylor Kriging Method. *Energy*, 35(12), 4870-4879. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.001>
- Mabel, M. C. & Fernandez, E. (2008). Analysis of Wind Power Generation and Prediction Using ANN: A Case Study. *Renewable Energy*, 33(5), 986-992. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.06.013>
- Malik, A. & Al-Badi, A. H. (2009). Economics of Wind Turbine as an Energy Fuel Saver—A Case Study for Remote Application in Oman. *Energy*, 34(10), 1573-1578. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.002>
- Mohammadi, K. & Mostafaepour, A. (2013). Economic Feasibility of Developing Wind Turbines in Aligoodarz, Iran. *Energy Conversion and Management*, 76, 645-c. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.053>
- Naik, J., Satapathy, P. & Dash, P. K. (2018). Short-Term Wind Speed and Wind Power Prediction Using Hybrid Empirical Mode Decomposition and Kernel Ridge Regression. *Applied Soft Computing*, 70, 1167-1188. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.12.010>
- Riahy, G. H. & Abedi, M. (2008). Short Term Wind Speed Forecasting for Wind Turbine Applications Using Linear Prediction Method. *Renewable Energy*, 33(1), 35-41. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.01.014>
- Shabbir, N., AhmadiAhangar, R., Kütt, L., Iqbal, M. N. & Rosin, A. (2019). Forecasting Short Term Wind Energy Generation Using Machine Learning. In *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)* (pp. 1-4). IEEE. Doi: <https://doi.org/10.1109/RTUCON48111.2019.8982365>

Şenol, Ü. & Musayev, Z. (2017). Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretiminin Yapay Sinir Ağları ile Tahmini. *Bilge Uluslararası Fen ve Teknoloji Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 23-31. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/324901>

Vardar, A. & Çetin, B. (2009). Economic Assessment Of The Possibility Of Using Different Types Of Wind Turbine İn Turkey. *Energy Sources, Part B*, 4(2), 190-198. Doi: <https://doi.org/10.1080/15567240701620465>

Weather Online, (2022). Web: <https://www.weatheronline.co.uk> , (Erişim tarihi: 10 Nisan 2022).

Zhang, W., Wang, J., Wang, J., Zhao, Z. & Tian, M. (2013). Short-Term Wind Speed Forecasting Based on a Hybrid Model. *Applied Soft Computing*, 13(7), 3225-3233. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2013.02.016>