

**Atf İçin:** Erdoğan D, Yiğit K, Acarkan B, 2021. Bir Rüzgâr Enerji Santralının Güç Kapasitesine Bağlı Olarak Üretebileceği Elektrik Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi – Artvin İli Örneği. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(2): 998-1013.

**To Cite:** Erdoğan D, Yiğit K, Acarkan B, 2021. Determination of the Electrical Energy Production Potential of a Wind Power Plant Depending on the Power Capacity: a Case Study for Province of Artvin. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(2): 998-1013.

**Bir Rüzgâr Enerji Santralının Güç Kapasitesine Bağlı Olarak Üretebileceği Elektrik Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi – Artvin İli Örneği**

**Durukan ERDOĞAN<sup>1</sup>, Kenan YİĞİT<sup>2</sup>, Bora ACARKAN<sup>1\*</sup>**

**ÖZET:** Bu çalışmada, Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ve simülasyon yaklaşımı kullanılarak Artvin ili Merkez ilçesinin rüzgâr enerjisi potansiyeli hesaplanmıştır. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonun şekil ve ölçek parametrelerinin hesaplanmasında ortalama ve standart sapma, moment, enerji örneği, grafik, maksimum olabirlik ve modifiye edilmiş maksimum olabirlik yöntemleri kullanılarak 24 metre, 59 metre ve 120 metre kule yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu modellemelerin  $R^2$ , RMSE, MSE ve  $X^2$  yöntemleri ile hata analizleri yapılarak en tutarlı matematiksel yöntemin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca 100 kW, 1 MW ve 5 MW kurulu güce sahip rüzgâr enerji santrali için kapasite faktörleri hesaplanmış ve üretilen elektrik enerjisi potansiyeli analiz edilmiştir. Çalışma neticesinde maksimum olabirlik ve modifiye edilmiş maksimum olabirlik yöntemlerinin hata oranı en az olan yöntemler olduğu saptanmıştır. Daha yüksek rakımlarda daha yüksek enerji üretim potansiyelinin sağlanacağı ve daha yüksek kurulu güce sahip rüzgâr enerji santralının en iyi kapasite faktörünü ihtiva edeceği sonucuna ulaşılmıştır. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ve simülasyon yaklaşımı sonucunda Artvin ilinin yıllık elektrik enerjisi ihtiyacının 100 kW kurulu güce sahip bir sistem ile %0.036 ila %0.075 oranında, 1 MW güce sahip bir sistem ile %0.384 ila %0.773 oranında, 5 MW güce sahip bir sistem ile %1.983 ila %4.051 arasında karşılanabileceği tahmin edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgâr Enerji Santrali, Weibull, Kapasite Faktörü, Elektrik Enerjisi, Enerji Verimliliği

**Determination of the Electrical Energy Production Potential of a Wind Power Plant Depending on the Power Capacity: a Case Study for Province of Artvin**

**ABSTRACT:** In this study, wind energy potential of the central district of Artvin province was calculated by using Weibull probability density function and simulation approaches. In the calculation of the shape and scale parameters of the Weibull probability density function, the modeling of the wind speeds of the central district of Artvin at 24 meters, 59 meters and 120 meters altitudes was performed using the average and standard deviation, moment, energy pattern, graphical, maximum likelihood and modified maximum likelihood methods. It is aimed to calculate the most consistent mathematical method by evaluating these models with  $R^2$ , RMSE, MSE, and  $X^2$  error analysis. Also, the capacity factors were calculated for the 100 kW, 1 MW and 5 MW wind power plants and the potential of electrical energy that can be produced has been analyzed. As a result of the study, it has been determined that the maximum likelihood and modified maximum likelihood methods have the lowest error rate. It has been concluded that higher energy production potential will be achieved at higher altitudes and that the wind power plant with higher installed power will contain the best capacity factor. As a result of the Weibull probability density function and simulation approaches, the annual electrical energy need of Artvin province can be met between at 0.036% and 0.075% with a system of 100 kW, between at 0.384% and 0.773% with a system of 1 MW, and between at 1.983% and 4.051% with a system of 5 MW installed power capacity.

**Keywords:** Wind Power Plant, Weibull, Capacity Factor, Electrical Energy, Energy Efficiency

<sup>1</sup> Durukan ERDOĞAN (Orcid ID: 0000-0003-2395-7668), Bora ACARKAN (Orcid ID: 0000-0002-5697-3157), Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Kenan YİĞİT (Orcid ID: 0000-0002-4165-4081), Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Durukan ERDOĞAN, e-mail:drukanerdogan@gmail.com

Bu çalışma Durukan ERDOĞAN'ın Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

## GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisinin kullanım oranı gün geçtikçe artmakta ve ülkelerin öncelikli yatırım yaptığı alanlar içerisine girmektedir. Konu Türkiye açısından ele alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının her geçen gün ulusal elektrik sistemine dâhil edildiğini ve kurulu güç oranlarının sürekli arttığını söylemek mümkündür. Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü Ekim 2020 sonu itibarı ile yaklaşık 93919 MW olmuştur. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji ve hidrolik enerji gibi yenilenebilir enerji kaynakları toplam kurulu gücün %49’unu oluşturmaktadır. Hidrolik enerji (%31.8) kaynağından sonraki en yüksek kurulu güç oranı ise rüzgâr enerjisine (%8.9) aittir (Anonim, 2020a). 2020 yılı ekim ayı itibarı ile Türkiye’deki Rüzgâr Enerjisi Santrali (RES) kurulu gücü yaklaşık 8330 MW seviyesine çıkmıştır. Türkiye’nin 30 ilinde RES uygulanmakta ve bu illerden İzmir ve Balıkesir RES kapasitesi bakımından ilk iki sırayı almaktadır (Anonim, 2020b).

Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de RES sistemleri farklı açılardan incelemekte ve kullanım potansiyelleri üzerine araştırmalar yapılmaktadır. İlkiliç ve Aydın (2015), Türkiye’nin kıyı bölgelerine ait rüzgâr enerjisi potansiyelini incelemiş ve bu bölgelerde RES sisteminin kullanımına yönelik çalışmalar yapmışlardır. Şenel ve Koç (2015), çalışmalarında Dünya’da ve Türkiye’de rüzgâr enerjisinin kullanım potansiyelini ve kurulu güçlerini inceleyerek karşılaştırma analizleri yapmışlardır. Kaya ve ark. (2016), rüzgâr türbin modelleri kullanarak Kastamonu ili için elektrik enerjisi üretim potansiyelini incelemişlerdir. Aydın ve Çunkaş (2019), Artvin ili Çoruh Üniversitesi Seyitler Yerleşkesine ait bir tesis için 400 kW kurulu güce sahip fotovoltaik güneş paneli ve 100 kW kurulu güce sahip rüzgâr türbini sisteminin fizibilite çalışmasını yapmışlardır.

Rüzgâr türbinlerinin en önemli iki dezavantajı, yüksek kurulum bedelleri ve üretimin belirsiz olmasıdır. Bu açıdan doğru rüzgâr türbin seçimi hayati önem taşımaktadır. En uygun rüzgâr türbinin seçilebilmesi için, rüzgâr potansiyel analizlerinin oldukça hassas yapılması büyük önem taşımaktadır. Rüzgâr potansiyel analizlerinde Weibull olasılık fonksiyonu yöntemi en çok kullanılan istatistiksel dağılımlardan biridir (Kurban ve ark., 2007). Literatürde, Hulio ve Jiang (2020), Weibull olasılık fonksiyonunu kullanarak Karacahi bölgesi için iki farklı yükseklikteki güç yoğunluklarını ve kapasite faktörlerini tespit etmişlerdir. Liu ve ark. (2019), Weibull olasılık fonksiyonunu kullanarak Çin’in rüzgâr enerji haritasını oluşturmayı amaçlamışlardır. Shoaib ve ark. (2019), çalışmalarında Jhampir bölgesinin rüzgâr enerji üretimini hesaplamışlardır. Sedaghat ve ark. (2020), Weibull olasılık fonksiyonunu kullanarak kapasite faktörünün optimizasyonunu yapmışlardır. Türkiye’de de bu konu üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır. Kaplan (2016), Rayleigh ve Weibull yöntemlerini kullanarak Osmaniye bölgesi için rüzgâr enerjisi potansiyelini analiz etmiştir. Dinçer ve ark. (2017), Kilis ili için farklı yüksekliklerdeki rüzgâr hızlarını kullanarak bu yüksekliklere ait rüzgâr potansiyellerini Weibull olasılık fonksiyonunu kullanarak hesaplamışlardır. Arslan ve ark. (2018), Weibull olasılık fonksiyonunu kullanarak Çanakkale ve İstanbul illerinin rüzgâr güç yoğunluklarını hesaplamışlardır. Doğanşahin ve ark. (2019), Weibull olasılık fonksiyonunun parametrelerini moment yöntemi, grafik yöntemi, maksimum olasılık yöntemi ve en küçük kareler yöntemlerini kullanarak hesaplamış ve kapasite faktörlerini belirlemişlerdir. Gungor ve ark. (2020), Weibull olasılık fonksiyonunun parametrelerini en küçük kareler yöntemini, ortalama ve standart sapma yöntemini, maksimum olasılık yöntemi ve enerji örneği yöntemi ile hesaplanmış ve bölgenin ekonomik ve performans analizlerini yapmışlardır. Almalı ve ark. (2013) ortalama rüzgâr hızı ve güç yoğunluğunun tahmin edilmesinde maksimum olasılık, en küçük kareler ve moment yöntemlerini test etmişlerdir.

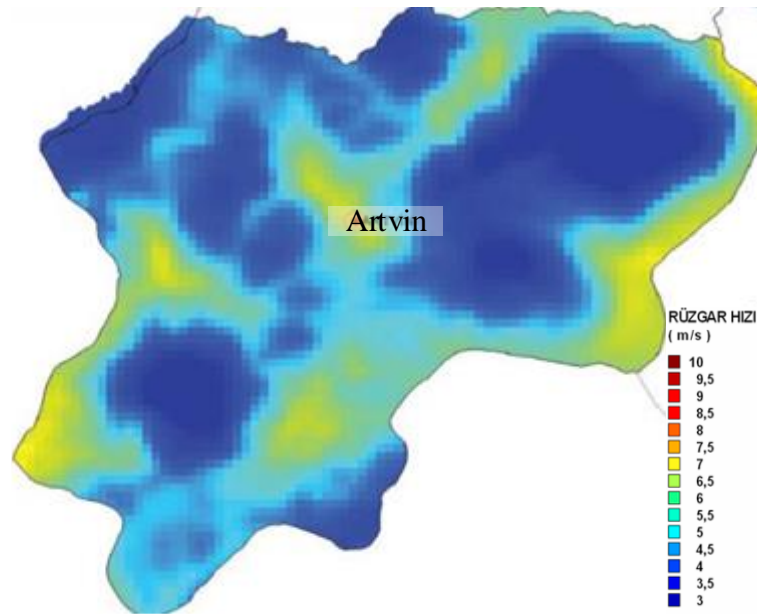
Literatürden görüleceği üzere Artvin İli için rüzgâr enerjisi potansiyelinin tespitine yönelik bazı çalışmaların yapıldığı fakat bu çalışmalarda Weibull olasılık fonksiyonu ve simülasyon yaklaşımı

yönteminin yeterince incelenmediği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ve simülasyon yaklaşımı kullanılarak henüz RES uygulaması bulunmayan Artvin ili Merkez ilçesi şartlarında kurulabilecek 100 kW, 1 MW ve 5 MW kapasiteli RES sistemleri için rüzgâr enerjisi potansiyeli hesaplanmıştır. Weibull olasılık fonksiyonu analizine ait parametrelerin belirlenmesi için standart sapma ve ortalama yöntemi, moment yöntemi, enerji örneği yöntemi, grafik yöntemi, maksimum olabilirlik yöntemi ve modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yöntemi kullanılmıştır. Hesaplamalar sonucunda  $R^2$ , kök ortalama kare hata (RMSE), ortalama kare hata (MSE) ve  $X^2$  hata analiz yöntemleri ile parametre tespitinde kullanılan yöntemlerin analizleri yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında ise Matlab&Simulink programı kullanılarak RES sistemine ait kapasite faktörü ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli analiz edilmiştir.

## MATERYAL VE METOT

### Çalışma Alanı

RES kullanım potansiyelini incelemek amacıyla çalışma alanı olarak Türkiye'nin Artvin ili Merkez ilçesi seçilmiştir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından hazırlanan rüzgâr enerjisi potansiyeli atlasına (Şekil 1) ve kurulabilecek RES kapasitesi verilerine (Çizelge 1) göre Artvin ilinin Merkez ilçesinde ve bazı bölgelerde RES kurulumu için yeterli uygun alan ve rüzgâr hızı potansiyelinin olduğu görülmektedir (Anonim, 2019a).

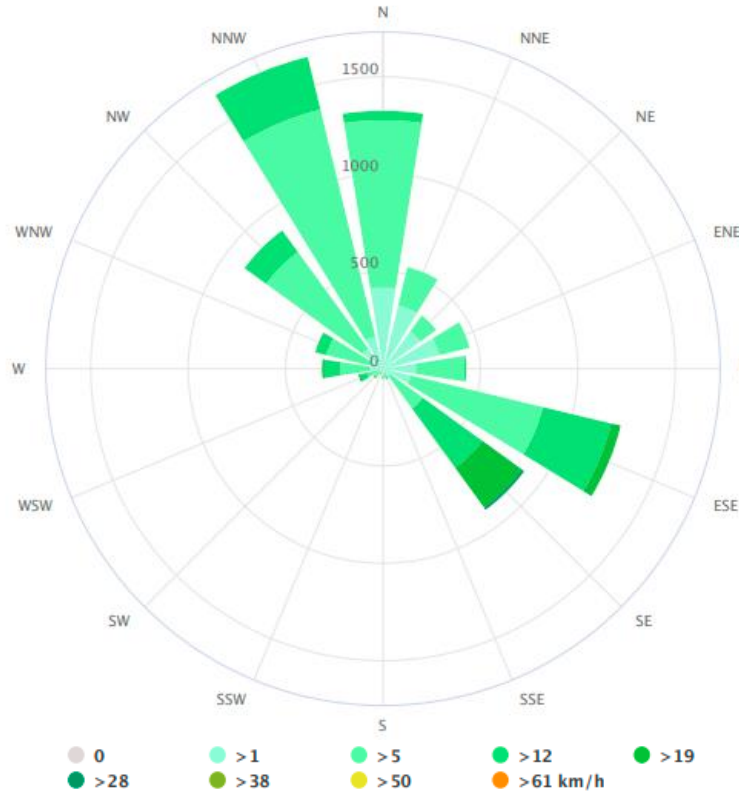


Şekil 1. Artvin ili rüzgâr hızı dağılımı – 50m

Çizelge 1. Artvin iline kurulabilecek RES güç kapasitesi

Yıllık Güç Yoğunluğu - 50 m ( $W m^{-2}$ )	Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı - 50 m ( $m s^{-1}$ )	Toplam Alan ( $km^2$ )	Toplam Kapasite (MW)
300- 400	6.8 - 7.5	1.94	9.68
400- 500	7.5 - 8.1	0.02	0.08
500- 600	8.1 - 8.6	0.00	0.00
600- 800	8.6 - 9.5	0.00	0.00
> 800	> 9.5	0.00	0.00
		1.96	9.76

Ayrıca, Artvin ili rüzgâr hızları ve yönleri rüzgârgülü şeklinde Şekil 2’de verilmiştir (Anonim, 2020c).



Şekil 2. Artvin ili rüzgârgülü haritası

Şekil 1, Artvin iline ait coğrafi alanlara göre rüzgâr hızlarının dağılımını, Şekil 2 ise rüzgâr hızlarının coğrafi yönler göre dağılımını göstermektedir. Rüzgârgülü haritası ile yılda kaç saat, belirtilen yönde rüzgâr estiği gözlemlenebilir. Rüzgârın belirli alanlarda ve yönlerde yoğunlaşmış olması o bölgenin RES kurulumu için daha elverişli olduğu anlamına gelmektedir.

### Weibull Olasılık Fonksiyonu

Rüzgâr enerji potansiyelinin belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden birisi de Weibull olasılık fonksiyonudur (Hulio ve Jiang, 2020). Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile rüzgâr hızları modellenebilir (Akpınar ve Akpınar, 2005). Birçok farklı bölge için uygulanabilir olan esnekliği ve güvenilirliği yüksek bir yöntemdir. İki parametrelili Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V)$  ve kümülatif dağılım fonksiyonu  $F(V)$  sırasıyla Eşitlik 1. ve Eşitlik 2. ile ifade edilebilir.

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

$$F(V) = 1 - \exp \left[ -\left(\frac{V}{c}\right)^k \right] \quad (2)$$

Burada,  $V$  rüzgâr hızını,  $k$  şekil parametresini,  $c$  ise ölçek parametresini ifade eder.  $k$  parametresinin düşük olması o bölgenin daha fırtınalı olduğuna işaret ederken, yüksek  $k$  parametresi o bölgede daha istikrarlı rüzgârların olduğunu gösterir.  $c$  parametresi ise rüzgâr verisinin yatay olarak dağılımının genişliğini göstermektedir (Anonim, 2020d).

Weibull parametrelerinin hesaplanmasında standart sapma ve ortalama yöntemi, moment yöntemi, enerji örneği yöntemi, grafik yöntemi, maksimum olasılık yöntemi ve modifiye edilmiş maksimum olasılık yöntemi gibi farklı yaklaşımlar uygulanmıştır.

Standart sapma ve ortalama yöntemi kullanılarak rüzgâr hızının ortalamasının ve standart sapmasının, Weibull parametrelerine bağlı olduğu fonksiyonlar ile Eşitlik 3. ve Eşitlik 4 kullanılarak şekil ve ölçek parametreleri bulunabilmektedir (Keyhani ve ark., 2019).

$$k = \left( \frac{\sigma}{V_{ort}} \right)^{-1.086} \quad (3)$$

$$c = \frac{V_{ort}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4)$$

Burada,  $\sigma$  rüzgâr hızının standart sapmasını,  $V_{ort}$  ise rüzgâr hızının ortalamasını,  $\Gamma$  ise gama fonksiyonunu ifade eder. Gama fonksiyonu ve ortalama rüzgâr hızı sırasıyla Eşitlik 5. ve Eşitlik 6. ile gösterilebilir.

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt \quad (5)$$

$$V_{ort} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (6)$$

Burada,  $N$  rüzgâr hızı verisi sayısını,  $V_i$  ise ilgili rüzgâr hızını ifade eder. Rüzgâr hızının standart sapması ise Eşitlik 7. ile hesaplanabilir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - V_{ort})^2} \quad (7)$$

Moment yönteminde Eşitlik 8. ve Eşitlik 9. kullanılarak,  $k$  ve  $c$  parametrelerine ulaşılabilir (Doğanşahin ve ark., 2019).

$$M_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i^r \quad (8)$$

$$M_r = c^r \Gamma\left(1 + \frac{r}{k}\right) \quad (9)$$

Burada,  $x_i$  i numaralı veriyi,  $M_r$  ise rüzgâr hızı verisinin  $r$ . dereceden momentini ifade eder.

Enerji örneği yönteminde  $k$  parametresi Eşitlik 10. ve Eşitlik 11. ile  $c$  parametresi ise Eşitlik 4. ile hesaplanabilir (Akdağ ve Güler, 2015).

$$k = 1 + \frac{3.69}{(E_{pf})^2} \quad (10)$$

$$E_{pf} = \frac{(V^3)_{ort}}{(V_{ort})^3} \quad (11)$$

Burada  $E_{pf}$  enerji örneği katsayısını,  $V$  ise rüzgâr hızını ifade eder.

Eşitlik 12. ile ifade edilen grafik yönteminde Eşitlik 2'ye çift logaritmik dönüşüm uygulanır. Bu işlem sonucunda ulaşılan denklemin sol kısmı denklemin sağ kısmına göre lineer bir değişim gösterecektir (Chang, 2011). Bu doğrunun eğimi  $k$  parametresini vermektedir.  $c$  parametresi ise doğrunun  $y$  eksenini kesişim noktasını ifade etmektedir.

$$\ln[-\ln(1 - F(V))] = k \ln V - k \ln c \quad (12)$$

Maksimum olabilirlik yönteminde  $k$  ve  $c$  ifadeleri Eşitlik 13. ve Eşitlik 14. ile elde edilebilir (Ahmed, 2015).

$$k = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N V_i^k \ln(V_i)}{\sum_{i=1}^N V_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(V_i)}{N} \right]^{-1} \quad (13)$$

$$c = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^k \right]^{1/k} \quad (14)$$

Burada,  $V_i$  ilgili rüzgâr hızını ifade eder.

Modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yönteminde ise  $k$  ve  $c$  ifadeleri Eşitlik 15. ve Eşitlik 16. kullanılarak elde edilebilir (Ahmed, 2015).

$$k = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N V_i^k \ln(V_i) p(V_i)}{\sum_{i=1}^N V_i^k p(V_i)} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(V_i) p(V_i)}{p(V \geq 0)} \right]^{-1} \quad (15)$$

$$c = \left[ \frac{1}{p(V \geq 0)} \sum_{i=1}^N V_i^k p(V_i) \right]^{1/k} \quad (16)$$

Burada,  $V_i$  ilgili rüzgâr hızını ifade eder.  $p(V_i)$  ile ifade edilen parametre ilgili rüzgâr hızının dâhil olduğu grubun frekansını ifade ederken,  $p(V \geq 0)$  ile gösterilen parametre ise rüzgâr hızının 0 veya 0'dan büyük olma olasılığını ifade eder.

### İstatistiksel Hata Analizi

İstatistiksel hata analiz yöntemleri kullanılarak mevcut verilere en tutarlı Weibull olasılık dağılım fonksiyonu tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada, rüzgâr hızı veri analizi için literatürde sıklıkla karşılaşılan hata analiz yöntemleri seçilerek Weibull olasılık dağılım fonksiyonlarının uyumluluğu analiz edilmiştir. Hata analizlerinde, gerçek rüzgâr hızı dağılım frekansları ile Weibull olasılık dağılım fonksiyonlarının frekansları analiz edilmiş ve karşılaştırması yapılmıştır.

Weibull olasılık fonksiyonunun şekil ve ölçek parametrelerinin bulunması için kullanılan standart sapma ve ortalama yöntemi, moment yöntemi, enerji örneği yöntemi, grafik yöntemi, maksimum olabilirlik yöntemi ve modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yöntemleri için hata analizleri yapılmıştır. Hata analizinde  $R^2$ , RMSE, MSE ve  $X^2$  analiz yöntemleri kullanılmıştır.

$R^2$  hata analizi için Eşitlik 17.'den faydalanılmıştır.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2 - \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2} \quad (17)$$

Burada,  $y_i$  ölçülmüş rüzgâr verisini,  $x_i$  tahmin edilen rüzgâr verisini,  $z_i$  ise  $y_i$  parametresinin ortalamasını ifade eder.

RMSE hata analizi için Eşitlik 18. kullanılmıştır.

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

MSE hata analizi için Eşitlik 19. kullanılmıştır.

$$MSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \right] \quad (19)$$



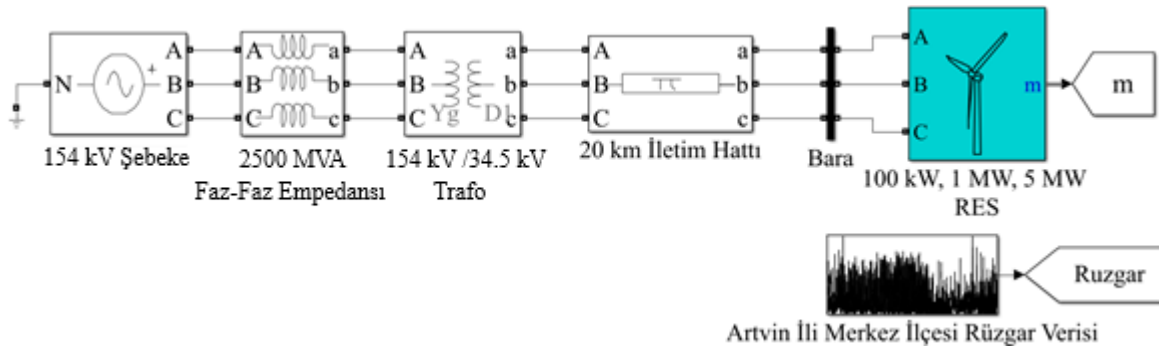
$X^2$  hata analizi için Eşitlik 20. kullanılmıştır.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - x_i)^2}{x_i} \quad (20)$$

Hata analizi yöntemlerinde en iyi sonucu belirlemek için  $R^2$  analizinde en yüksek değere, RMSE, MSE ve  $X^2$  yöntemlerinde ise en düşük değere bakılması gerekmektedir.

### Simülasyon Yöntemi

Simülasyon çalışmasında Matlab&Simulink programı kullanılmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi RES sistemi Türkiye elektrik sistemine entegre edilerek modelleme işlemi yapılmıştır. Modelleme sonrası simülasyon çalışmaları ile RES sistemine ait kapasite faktörü ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli incelenmiştir.



Şekil 3. RES sistemi modeli genel görünümü

Şekil 3'teki modelin sol kısmı ulusal elektrik şebeke sistemi için tasarlanmıştır. Sistemin gerilim değeri 154/34.5 kV seviyesine, frekans değeri ise Türkiye güç sisteminin değeri olan 50 Hz seviyesine ayarlanmıştır. Modelin sağ kısmı ise RES sistemi için tasarlanmıştır. Bu kısımda Artvin ili Merkez ilçesine ait bir yıllık saatlik rüzgâr verisi modele tanımlanmıştır.

### Kapasite Faktörü

Bir bölgenin rüzgâr potansiyelinin hesaplanmasında en önemli faktör rüzgâr hızlarıdır. Rüzgâr hızları üzerinden yapılacak hesaplamalarda kapasite faktörü ise çok belirleyici bir özelliktir. Kapasite faktörü Eşitlik 21. ile açıklanabilir.

$$KF = \frac{P_{ort}}{P_n} \quad (21)$$

Burada,  $P_{ort}$  ortalama üretilmiş olan gücü,  $P_n$  ise sistemin nominal gücünü ifade eder.  $P_{ort}$  parametresinin Weibull olasılık fonksiyonları üzerinden hesaplanabilmesi için Eşitlik 22. kullanılabilir.

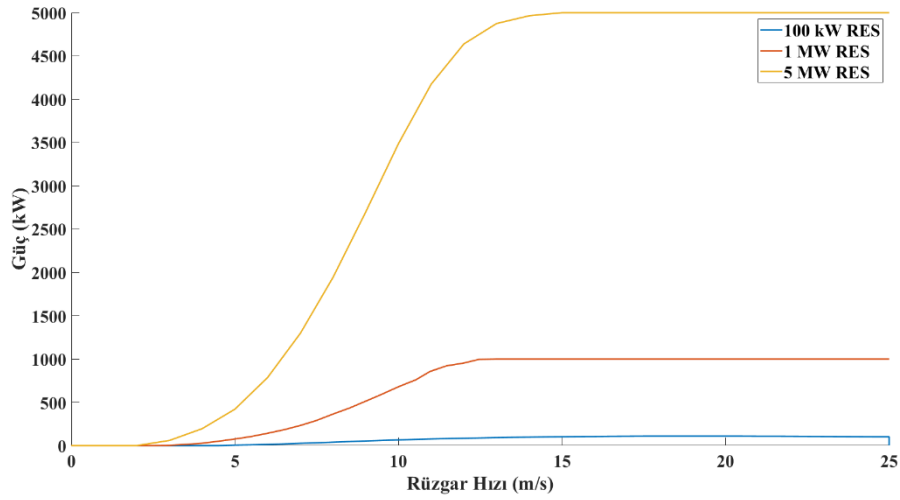
$$KF = \frac{1}{P_n} \int_0^{\infty} P(V) f(V) \cdot dv \quad (22)$$

Burada,  $f(V)$  olasılık yoğunluk fonksiyonunu,  $P(V)$  ise türbinin belli rüzgâr aralıklarındaki güç değerlerini ifade eder. Belli aralıklardaki rüzgâr güç çıkışı değerleri Eşitlik 23. ile ifade edilir.

$$P_{ort} \rightarrow \begin{cases} V < V_{cin} \rightarrow P_{ort} = 0 \\ V_{cin} \leq V < V_n \rightarrow P_{ort} = P(v) \\ V_n \leq V < V_{Cout} \rightarrow P_{ort} = P_n \\ V_{Cout} \leq V \rightarrow P_{av} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

Burada,  $V_{cin}$  parametresi devreye girme rüzgâr hızını,  $V_n$  nominal hızı,  $V_{Cout}$  devreden çıkma rüzgâr hızını,  $P(v)$  ise türbinin devreye girdiği rüzgâr hızı ile nominal güce ulaştığı hız arasında kalan bölgeyi

ifade eder (Shoaib ve ark., 2019). Bu bölgenin fonksiyon çıktısı için türbinlerin güç çıkışı eğrileri Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. RES'e ait güç eğrileri

Yukarıdaki eğrilerin,  $P(V)$  ile ifade edilen bölgeye ait fonksiyonları, fonksiyon yerleştirme ile elde edilmiştir. Elde edilen fonksiyonlar Eşitlik 24., Eşitlik 25. ve Eşitlik 26. ile ifade edilmiştir.

$$P_{100kW}(V) = 0.009592V^4 - 0.463V^3 + 7.422V^2 - 36.16V + 51.08 \quad (24)$$

$$P_{1MW}(V) = -0.2946V^4 + 7.697V^3 - 58.3V^2 + 202.2V - 259.5 \quad (25)$$

$$P_{5MW}(V) = -0.5519V^4 + 9.394V^3 + 21.88V^2 - 329.1V + 665.5 \quad (26)$$

İfade edilen eşitlikler, ilgili fonksiyonda yerine yazılarak kapasite faktörleri hesaplanmıştır.

### RES ve Rüzgâr Hızı Tanımı

Farklı kapasitelere sahip RES sistemlerinin enerji üretim potansiyelini belirlemek için 100 kW, 1 MW ve 5 MW kurulu güce sahip rüzgâr türbini modelleri kullanılmıştır. Literatürden elde edilen 24 m (Anonim, 2020e), 59 m (Anonim, 2020f) ve 120 m (Anonim, 2020g) kule yüksekliğine sahip rüzgâr türbinlerine ait teknik özellikler sırasıyla Çizelge 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Hesaplamalarda kullanılan rüzgâr türbinlerinin teknik özellikleri

Parametre	100 kW RES	1 MW RES	5 MW RES
Nominal güç	100 kW	1 MW	5 MW
Nominal Kule yüksekliği	24 m	59 m	120 m
Rotor çapı	20 m	58.6 m	128 m
Devreye girme rüzgâr hızı	4.5 m s <sup>-1</sup>	3 m s <sup>-1</sup>	2 m s <sup>-1</sup>
Nominal rüzgâr hızı	13 m s <sup>-1</sup>	13 m s <sup>-1</sup>	14 m s <sup>-1</sup>
Devreden çıkma rüzgâr hızı	25 m s <sup>-1</sup>	25 m s <sup>-1</sup>	27 m s <sup>-1</sup>

Rüzgâr hızı, rüzgâr enerji potansiyeli hesaplamalarında en önemli yere sahiptir. Bu çalışmada Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından sağlanan Artvin ili Merkez ilçesine ait saatlik rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. Kullanılan saatlik rüzgâr verileri Mart 2018 ile Mart 2019 tarihleri arasında kapsamaktadır (MGM, 2019). MGM’den temin edilen veriler YEGM Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli

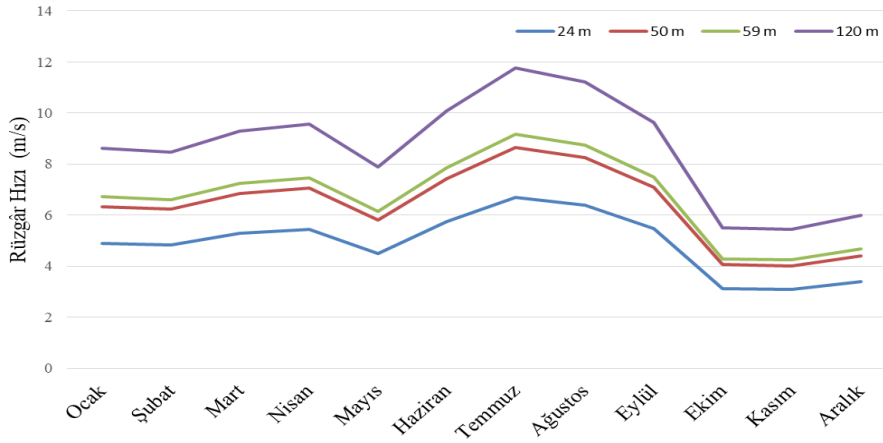


Atlasında Artvin ili için verilen değerler ile harmanlanarak 100 kW, 1 MW ve 5 MW kapasiteli RES için 24 m, 59 m ve 120 m yüksekliğine normalize edilmiştir. İstenilen yüksekliklerdeki rüzgâr hızları Hellman katsayısı ( $\alpha$ ) kullanılarak tahmin edilmiştir. Hellman katsayısı Eşitlik 26. ile hesaplanabilir.

$$\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^\alpha = \left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (26)$$

Burada,  $V_1$   $H_1$  yüksekliğindeki rüzgâr hızını ( $m s^{-1}$ ),  $V_2$  ise  $H_2$  yüksekliğindeki rüzgâr hızını ( $m s^{-1}$ ) ifade eder.

Rüzgâr türbinleri için nominal yüksekliklerde çalışmaları esastır ancak kapasite faktörünün daha net karşılaştırılmasının yapılması için tüm RES'ler farklı yükseklikler için de değerlendirilmiştir. Farklı yüksekliklere normalize edilen rüzgâr hızları Şekil 5'te verilmiştir. Ekonomik bir RES yatırımı için rüzgâr hızı alt sınırı ise  $7 m s^{-1}$  olarak belirlenmiştir (Anonim, 2019a).



Şekil 5. Farklı yüksekliklerde normalize edilmiş rüzgâr hızları

## BULGULAR VE TARTIŞMA

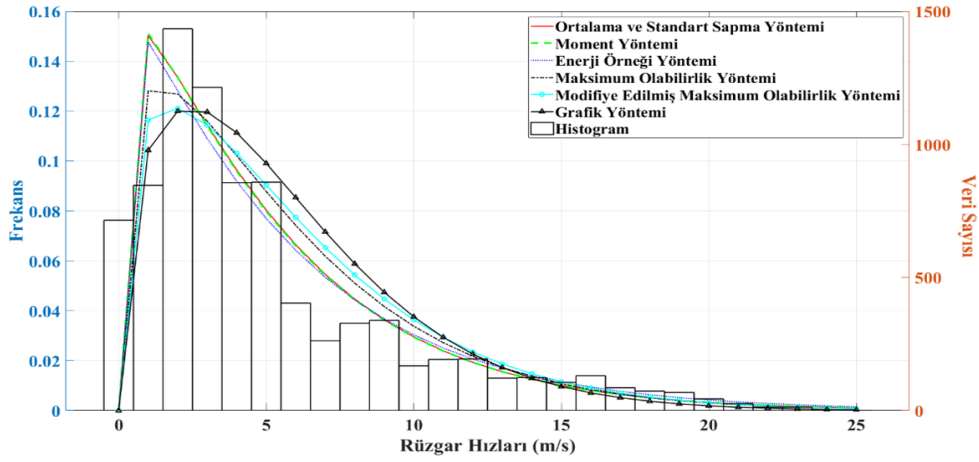
Bu çalışmada farklı kurulu güçlere sahip rüzgâr enerji sistemleri için, farklı kule yüksekliklerindeki kapasite faktörleri ve elektrik enerjisi üretim potansiyelleri hesaplanmıştır. Hesaplama yöntemi olarak Weibull olasılık fonksiyonu ve simülasyon yaklaşımı yöntemleri kullanılmıştır. Weibull olasılık fonksiyonunun şekil ve ölçek parametrelerinin hesaplanmasında standart sapma ve ortalama, moment, enerji, enerji örneği, maksimum olabirlik ve modifiye edilmiş maksimum olabirlik fonksiyonları kullanılmıştır. Her bir yöntem ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve rüzgâr enerji potansiyelinin hesaplanmasında en doğru yöntem belirlenmiştir.

24 m, 59 m ve 120 m kule yüksekliğine sahip RES için Weibull olasılık fonksiyonunun şekil ve ölçek parametrelerinin değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

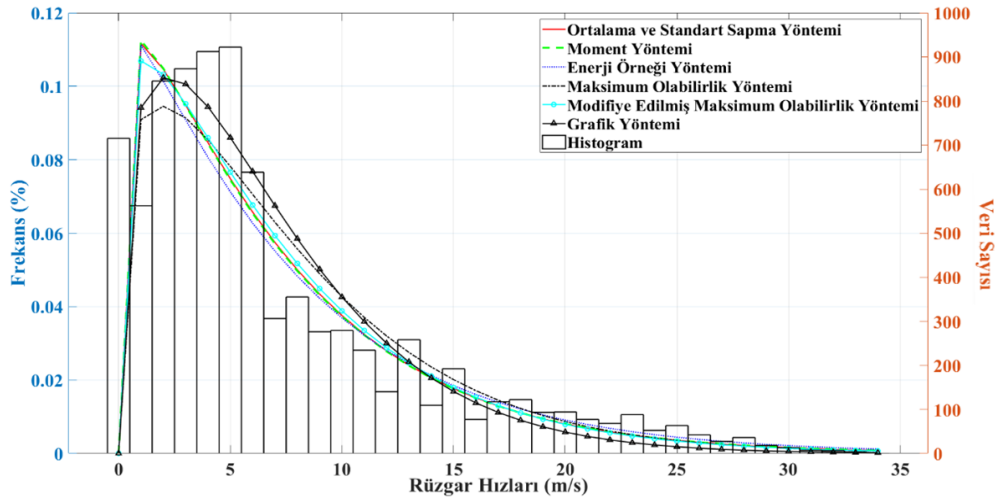
Çizelge 3. Weibull olasılık fonksiyonu için hesaplanan şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri

Yöntem	24 m		59 m		120 m	
	k	c	k	c	k	c
Standart Sapma ve Ortalama Yöntemi	1.094	5.297	1.093	7.257	1.094	9.304
Moment Yöntemi	1.087	5.286	1.087	7.242	1.087	9.285
Enerji Örneği Yöntemi	1.051	5.523	1.051	7.567	1.051	9.701
Grafik Yöntemi	1.392	6.068	1.292	7.885	1.313	8.790
Maksimum Olabirlik Yöntemi	1.211	5.791	1.211	7.933	1.211	10.171
Modifiye Edilmiş Maksimum Olabirlik Yöntemi	1.263	6.090	1.196	8.003	1.302	9.001

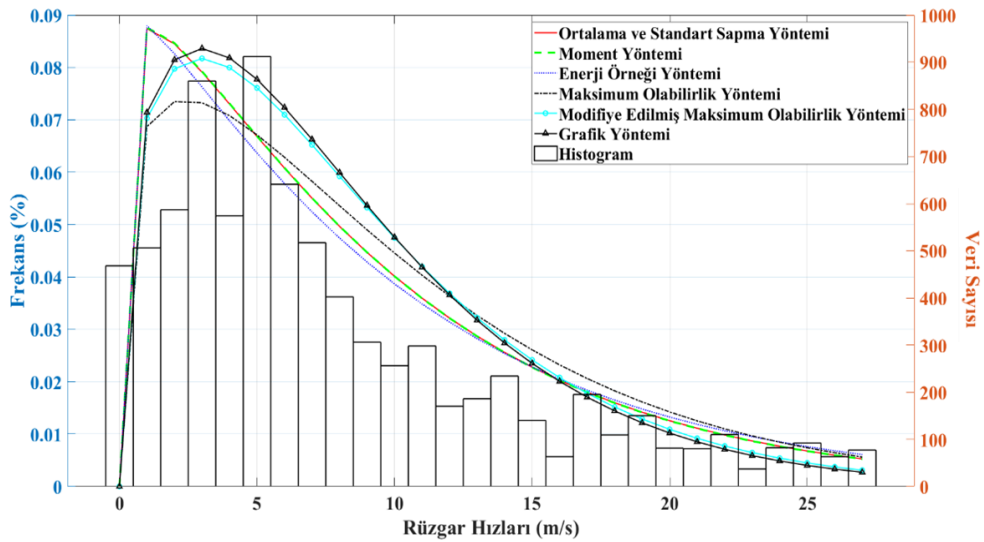
Weibull olasılık fonksiyonları kullanılarak hesaplanan şekil ve ölçek parametreleri ve 24 m, 59 m ve 120 m'deki rüzgâr hızlarına ait histogram gösterimi Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 6. 24 m kule yüksekliği için Weibull olasılık dağılım fonksiyonları



Şekil 7. 59 m kule yüksekliği için Weibull olasılık dağılım fonksiyonları



Şekil 8. 120 m için Weibull olasılık dağılım fonksiyonları

$R^2$ , RMSE, MSE ve  $X^2$  analiz yöntemleri kullanılarak yapılan şekil ve ölçek parametrelerinin hata analizleri Çizelge 4, Çizelge 5 ve Çizelge 6’da verilmiştir.

**Çizelge 4.** 24 m kule yüksekliği için Weibull olasılık dağılım fonksiyonu için hata analizleri

Yöntem	$R^2$	RMSE	MSE	$X^2$
Standart Sapma ve Ortalama Yöntemi	0.98687	0.02235	0.000500	0.0757
Moment Yöntemi	0.98674	0.02243	0.000503	0.0756
Enerji Örneği Yöntemi	0.98580	0.02275	0.000518	0.0739
Grafik Yöntemi	0.98726	0.02312	0.000534	0.1239
Maksimum Olabilirlik Yöntemi	0.98792	0.02180	0.000475	0.0789
Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik	0.98733	0.02231	0.000498	0.0864

**Çizelge 5.** 59 m kule yüksekliği için Weibull olasılık dağılım fonksiyonu için hata analizleri

Yöntem	$R^2$	RMSE	MSE	$X^2$
Standart Sapma ve Ortalama Yöntemi	0.98633	0.01836	0.000337	0.08683
Moment Yöntemi	0.98620	0.01842	0.000339	0.08697
Enerji Örneği Yöntemi	0.98564	0.01859	0.000346	0.08409
Grafik Yöntemi	0.98837	0.01761	0.000310	0.10431
Maksimum Olabilirlik Yöntemi	0.98780	0.01763	0.000311	0.08495
Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik	0.98761	0.01768	0.000313	0.08270

**Çizelge 6.** 120 m kule yüksekliği için Weibull olasılık dağılım fonksiyonu için hata analizleri

Yöntem	$R^2$	RMSE	MSE	$X^2$
Standart Sapma ve Ortalama Yöntemi	0.99038	0.01664	0.000277	0.08362
Moment Yöntemi	0.99039	0.01663	0.000277	0.08424
Enerji Örneği Yöntemi	0.98942	0.01717	0.000295	0.09158
Grafik Yöntemi	0.99288	0.01546	0.000239	0.09319
Maksimum Olabilirlik Yöntemi	0.99061	0.01655	0.000274	0.08824
Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik	0.99262	0.01557	0.000242	0.08753

Hata analizlerinde  $R^2$  analizinin sonucunun yüksek olması istenmektedir. RMSE, MSE ve  $X^2$  analizlerinin sonuçlarının ise düşük olması istenmektedir. Çizelge 4, Çizelge 5 ve Çizelge 6 incelendiğinde üç farklı kule yüksekliğindeki rüzgâr fonksiyonları için hata oranı daha düşük olan yöntemin maksimum olabilirlik ve modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yöntemleri olduğu tespit edilmiştir. Grafik yönteminin  $R^2$  analizinin sonucun diğer yöntemlere göre daha yüksek çıkmış olmasına karşın,  $X^2$  testinin de diğer yöntemlere göre daha yüksek çıktığı görülmüş ve dolayısıyla hata oranı diğer yöntemlere göre yüksek olabileceği belirlenmiştir. Buradan hareketle söz konusu yöntemlerin arasından maksimum olabilirlik ve modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yöntemlerinin en doğru ve tutarlı sonucu vereceği söylenebilir. Rüzgâr enerji santralleri 20 senelik yatırımlar olması nedeniyle en doğru yöntemin belirlenmesi önemlidir. Hata arttıkça üretilecek enerji de yanıltıcı bir biçimde sonuç verebilir.

Bu bilgiler ışığında en tutarlı yöntem olarak belirlenmiş olan maksimum olabilirlik yöntemi ve modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yöntemi ile hesaplanmış aylık kapasite faktörleri Çizelge 7 ve Çizelge 8 ile gösterilmiştir. Bu yöntemler ile hesaplanan kapasite faktörü değişimleri ise Şekil 9 ve Şekil 10’da gösterilmiştir.

Şekil 9 ve Şekil 10 incelendiğinde en yüksek kapasite faktörlerinin genel olarak Temmuz ve Ağustos aylarında yakalandığı görülmüştür. En düşük kapasite faktörleri ise Ekim ve Kasım aylarında görüldüğü belirlenmiştir. Ayrıca, kurulu gücün artışına bağlı olarak kapasite faktörünün arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin kurulu güç arttıkça ilgili türbinin çalışma aralığının artması olduğu

söylenbilir. Ek olarak, kule yüksekliğinin artışı ile kapasite faktörünün de arttığı görülmüştür. Bu artış daha yüksek seviyelere erişildikçe daha hızlı rüzgarla karşılaşılmasından kaynaklıdır.

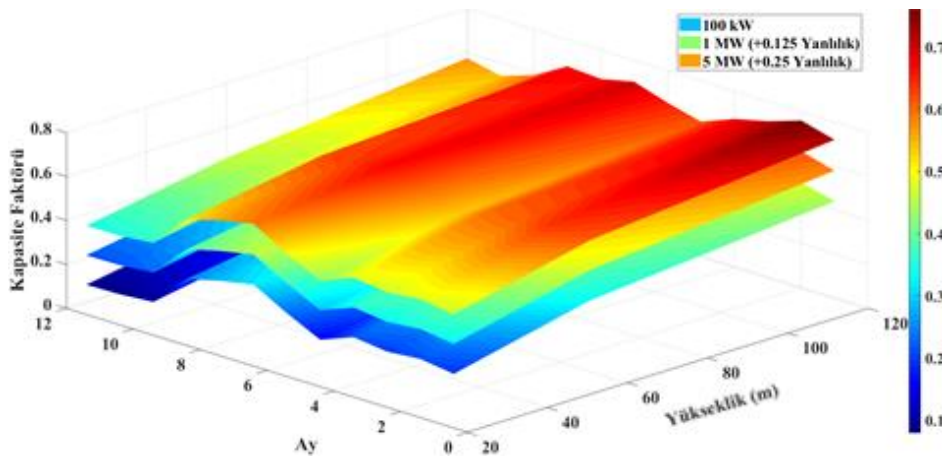
Farklı yöntemler kullanılarak RES'ler için hesaplanan yıllık kapasite faktörü değerleri ise Çizelge 9'da verilmiştir.

Çizelge 7. Maksimum olabilirlik yöntemi kullanılarak elde edilen aylık kapasite faktörleri

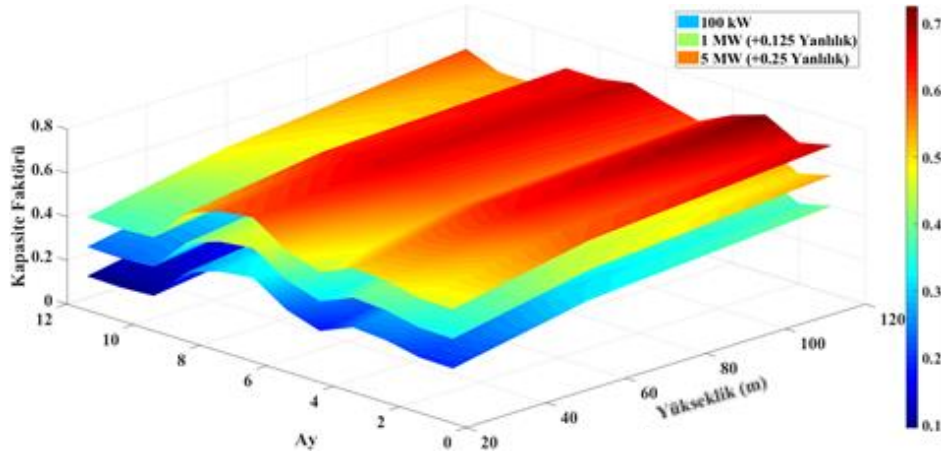
Kule Yüksekliği	100 kW RES			1 MW RES			5 MW RES		
	24 m	59 m	120 m	24 m	59 m	120 m	24 m	59 m	120 m
Ocak	0.19112	0.33335	0.44036	0.2022	0.3472	0.4551	0.21277	0.35809	0.47055
Şubat	0.21179	0.36721	0.47988	0.2234	0.3820	0.4953	0.23437	0.39262	0.51110
Mart	0.19846	0.33297	0.42954	0.2096	0.3465	0.4438	0.21981	0.35801	0.46059
Nisan	0.21701	0.32388	0.39109	0.2278	0.3362	0.4037	0.23799	0.35034	0.42383
Mayıs	0.15839	0.25961	0.33647	0.1679	0.2710	0.3487	0.17707	0.28252	0.36446
Haziran	0.23211	0.31973	0.36962	0.2427	0.3313	0.3812	0.25381	0.34756	0.40312
Temmuz	0.31541	0.38750	0.41215	0.3273	0.3995	0.4234	0.34204	0.42176	0.45192
Ağustos	0.28523	0.35273	0.38052	0.2963	0.3641	0.3914	0.31062	0.38490	0.41759
Eylül	0.24582	0.34064	0.39276	0.2569	0.3528	0.4048	0.26808	0.36929	0.42760
Ekim	0.09495	0.20498	0.31656	0.1038	0.2163	0.3301	0.11393	0.22682	0.34084
Kasım	0.08242	0.17429	0.26817	0.0904	0.1846	0.2804	0.09950	0.19441	0.29111
Aralık	0.07899	0.18461	0.29939	0.0877	0.1956	0.3129	0.09797	0.20648	0.32331

Çizelge 8. Modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yöntemi kullanılarak elde edilen aylık kapasite faktörleri

Kule Yüksekliği	100 kW RES			1 MW RES			5 MW RES		
	24 m	59 m	120 m	24 m	59 m	120 m	24 m	59 m	120 m
Ocak	0.19462	0.31460	0.40152	0.2058	0.3279	0.4161	0.21648	0.33898	0.42929
Şubat	0.19798	0.30054	0.36612	0.2089	0.3128	0.3788	0.21896	0.32521	0.39577
Mart	0.22944	0.36480	0.44668	0.2414	0.3791	0.4621	0.25201	0.39065	0.47545
Nisan	0.24172	0.34729	0.39753	0.2535	0.3602	0.4114	0.26379	0.37453	0.42676
Mayıs	0.17841	0.28017	0.32701	0.1887	0.2921	0.3401	0.19833	0.30394	0.35241
Haziran	0.22750	0.33543	0.35950	0.2395	0.3474	0.3723	0.25081	0.36406	0.38817
Temmuz	0.32609	0.38057	0.39706	0.3383	0.3924	0.4093	0.35309	0.41464	0.43176
Ağustos	0.30862	0.36319	0.37306	0.3204	0.3748	0.3854	0.33482	0.39602	0.40462
Eylül	0.25770	0.33877	0.37519	0.2692	0.3508	0.3879	0.28042	0.36758	0.40583
Ekim	0.10340	0.19076	0.26767	0.1122	0.2013	0.2797	0.12204	0.21115	0.29062
Kasım	0.09513	0.18971	0.27016	0.1037	0.2004	0.2826	0.11347	0.21028	0.29315
Aralık	0.09921	0.21644	0.32818	0.1085	0.2282	0.3426	0.11992	0.23939	0.35287



Şekil 9. Maksimum olabilirlik yöntemi ile hesaplanan kapasite faktörü değişimi



Şekil 10. Modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yöntemi ile hesaplanan kapasite faktörü değişimi

Çizelge 9. Farklı güçteki RES'ler için hesaplanan yıllık kapasite faktörleri

Yöntem/Kule Yüksekliği	100 kW RES			1 MW RES			5 MW RES		
	24 m	59 m	120 m	24 m	59 m	120 m	24 m	59 m	120 m
Standart Sapma ve Ortalama Yöntemi	0.189	0.282	0.345	0.198	0.294	0.345	0.208	0.307	0.376
Moment Yöntemi	0.189	0.281	0.344	0.198	0.293	0.344	0.208	0.306	0.374
Enerji Örneği Yöntemi	0.204	0.291	0.345	0.214	0.302	0.345	0.224	0.317	0.377
Grafik Yöntemi	0.210	0.317	0.358	0.222	0.330	0.358	0.231	0.343	0.385
Maksimum Olabilirlik Yöntemi	0.207	0.316	0.387	0.218	0.328	0.387	0.228	0.342	0.419
Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik Yöntemi	0.221	0.282	0.345	0.232	0.333	0.365	0.242	0.344	0.393
Simülasyon Yöntemi	0.196	0.270	0.290	0.205	0.270	0.310	0.205	0.289	0.338

Daha yüksek seviyelere erişildikçe daha hızlı rüzgârlar yakalanacaktır. Kurulu gücün artması ile türbinin çalışma aralığı da artacaktır. Çizelge 9'dan görüleceği üzere kule yüksekliği ve kurulu gücün artması kapasite faktörünün de artması anlamına gelmektedir. Yıllık kapasite faktörü hesabında kullanılan yöntemlerden maksimum olabilirlik ve modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yöntemlerinin en uygun yöntem olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca farklı güçteki RES'ler için ifade edilen yöntemler kullanılarak hesaplanan yıllık elektrik enerjisi üretim potansiyelleri Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. RES'ler için hesaplanan yıllık elektrik enerjisi üretim potansiyeli (MWh yıl<sup>-1</sup>)

Yöntem/ Kule Yüksekliği	100 kW RES			1 MW RES			5 MW RES		
	24 m	59 m	120 m	24 m	59 m	120 m	24 m	59 m	120 m
Standart Sapma ve Ortalama Yöntemi	165.2	247.3	302.6	1 737.6	2 571.7	3 129.0	9 114.4	13 445.9	16 451.9
Moment Yöntemi	165.1	246.5	301.2	1 737.3	2 563.6	3 114.4	9 113.2	13 407.4	16 379.7
Enerji Örneği Yöntemi	178.7	254.7	302.6	1 873.6	2 644.8	3 125.8	9 819.8	13 866.5	16 494.9
Grafik Yöntemi	181.4	276.6	338.9	1 907.6	2 874.3	3 500.1	9 974.1	14 961.7	18 345.7
Maksimum Olabilirlik Yöntemi	193.7	278.3	320.0	2 034.2	2 890.5	3 315.6	10 614.2	15 058.6	17 226.9
Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik Yöntemi	184.3	278.0	313.7	1 942.0	2 892.3	3 252.9	10 154.7	15 004.7	16 883.3
Simülasyon Yöntemi	171.7	236.5	254.0	1 795.8	2 365.2	2 715.6	8 979.0	12 658.2	14 804.4

Kule yüksekliği arttıkça, rüzgâr hızı artacaktır. Buna bağlı olarak rüzgâr hızının küpü ile orantılı olan enerji üretimi de önemli ölçüde artış gösterecektir. Çizelge 10, daha yüksekler erişildikçe enerji



üretiminin de önemli ölçüde artacağını göstermektedir. Enerji Piyasası Denetleme Kurulu'nun raporuna göre Artvin ilinin elektrik enerji tüketim miktarı 452 895.3 MWh yıl<sup>-1</sup> olarak belirlenmiştir (Anonim, 2019b). Çalışmada incelenen 7 farklı yöntem neticesinde Artvin ilinin enerji talebinin yüzde olarak karşılanabileceği miktarlar Çizelge 11'de gösterilmiştir.

**Çizelge 11.** Artvin ilinin yıllık elektrik enerjisi talebinin karşılanma oranı yüzdesi (%)

Yöntem/Kule Yüksekliği	100 kW RES			1 MW RES			5 MW RES		
	24 m	59 m	120 m	24 m	59 m	120 m	24 m	59 m	120 m
Standart Sapma ve Ortalama Yöntemi	0.036	0.055	0.067	0.384	0.568	0.691	2.012	2.969	3.633
Moment Yöntemi	0.036	0.054	0.067	0.384	0.566	0.688	2.012	2.960	3.617
Enerji Örneği Yöntemi	0.039	0.056	0.067	0.414	0.584	0.690	2.168	3.062	3.642
Grafik Yöntemi	0.040	0.061	0.075	0.421	0.635	0.773	2.202	3.304	4.051
Maksimum Olabilirlik Yöntemi	0.043	0.061	0.071	0.449	0.638	0.732	2.344	3.325	3.804
Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik Yöntemi	0.041	0.061	0.069	0.429	0.639	0.718	2.242	3.313	3.728
Simülasyon Yöntemi	0.038	0.052	0.056	0.397	0.522	0.600	1.983	2.795	3.269

Çizelge 11, 24 m kule yüksekliğinde 100 kW RES'in Artvin ilinin elektrik enerjisi talebinin %0.036 ile %0.043'lük kısmını karşılayabileceğini, 1 MW RES'in enerji talebinin %0.384 ile %0.449'lük kısmını karşılayabileceğini, 5 MW RES'in ise enerji talebinin %1.983 ile %2.344'lük kısmını karşılayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, 59 m kule yüksekliğinde 100 kW RES'in Artvin ilinin elektrik enerjisi talebinin %0.052 ile %0.061'lik kısmını karşılayabileceği, 1 MW RES'in enerji talebinin %0.522 ile %0.639'lük kısmını karşılayabileceği, 5 MW RES'in ise enerji talebinin %2.795 ile %3.325'lik kısmını karşılayabileceği görülmektedir. Bununla birlikte, 120 m kule yüksekliğinde 100 kW RES'in Artvin ilinin elektrik enerjisi talebinin %0.056 ile %0.075'lik kısmını karşılayabileceği, 1 MW RES'in enerji talebinin %0.600 ile %0.773'lük kısmını karşılayabileceği, 5 MW RES'in ise enerji talebinin %3.269 ile %4.051'lik kısmını karşılayabileceği anlaşılmaktadır.

## SONUÇ

Bu çalışmada Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ve simülasyon yaklaşımı kullanılarak Artvin ili Merkez ilçesi şartlarında kurulabilecek 100 kW, 1 MW ve 5 MW rüzgâr enerjisi santralleri için rüzgâr hızı potansiyeli, kapasite faktörü ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli incelenmiştir. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu parametrelerini belirlemek için standart sapma ve ortalama yöntemi, moment yöntemi, enerji örnekleme yöntemi, grafik yöntemi, maksimum olabilirlik yöntemi ve modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yöntemi kullanılmıştır. Parametre belirlemede kullanılan yöntemler R<sup>2</sup>, Ortalama Karekök Hata (RMSE), Ortalama Hata (MSE) ve X<sup>2</sup> hata analizi teknikleri ile değerlendirilmiştir. Simülasyon çalışmasında ise Matlab&Simulink programı kullanılarak rüzgâr enerjisi santraline ait kapasite faktörü ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli analiz edilmiştir.

Sonuç olarak, hata analizlerinde maksimum olabilirlik yöntemi ve modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yönteminin en tutarlı ve doğru sonucu verdiği görülmektedir. Ayrıca, en yüksek rüzgâr hızlarının, daha yüksek rakımlarda ve yaz aylarında elde edileceği elde edilmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek rakımlarda ve daha yüksek kurulu güce sahip rüzgâr türbinleri ile daha yüksek kapasite faktörünün elde edilebileceği analiz edilmiştir. Artvin İli Merkez İlçesi için düşünülen farklı kapasitelere sahip rüzgâr enerji santralleri için kapasite faktörünün en yüksek olacağı aylar genel olarak temmuz ve ağustos ayları olarak tespit edilmiştir. Bu aylarda 1 MW ve 5 MW kapasiteli rüzgâr enerji santralleri için kapasite faktörlerinin birbirlerinin çok yakın olduğu iki türbinle de uygun üretim yapılabileceği söylenebilir. Buna karşılık 100 kW kapasiteli rüzgâr enerji santrali için kapasite faktörünün sene boyunca çok düşük kalacağı ve bu kurulu güce sahip bir sistemin kurulmasının yetersiz olacağı tespit



edilmiştir. Çalışma neticesinde, Artvin ilinin 100 kW kapasiteli bir rüzgâr enerjisi santrali kurulması durumunda %0.036 ila %0.075 arasında, 1 MW kapasiteli bir sistemin kurulması durumunda %0.384 ila %0.773 arasında, 5 MW kapasiteli bir sistemin kurulması durumunda ise %1.983 ila %4.051 arasında yıllık elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanabileceği öngörülmektedir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, Artvin ili Merkez ilçesine ait rüzgâr verilerini sağlayan T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Meteorolojik Veri İşlem Dairesi Başkanlığı'na teşekkür ederler.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Anonim, 2019a. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. Rüzgâr enerjisi potansiyeli atlası. <http://www.yegm.gov.tr/YEKrepa/ARTVIN-REPA.pdf> (Erişim Tarihi: 03.10.2019).
- Anonim, 2019b. Enerji Piyasası Denetleme Kurulu. 2019 yılı elektrik piyasası gelişim raporu. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-24/elektrikyillik-sektor-raporu> (Erişim Tarihi: 04.12.2020).
- Anonim, 2020a. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Türkiye elektrik sistemi kuruluş ve kaynaklara göre kurulu güç raporu. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari> (Erişim Tarihi: 02.12.2020).
- Anonim, 2020b. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği. Türkiye rüzgâr enerjisi istatistik raporu. <https://www.tureb.com.tr/bilgi-bankasi/turkiye-res-durumu> (Erişim Tarihi: 04.12.2019).
- Anonim, 2020c. Meteoblue. Artvin ili iklim verileri. [https://www.meteoblue.com/tr/hava/historyclimate/climate-modelled/artvin\\_t%C3%BCrkiye\\_751817](https://www.meteoblue.com/tr/hava/historyclimate/climate-modelled/artvin_t%C3%BCrkiye_751817) (Erişim Tarihi: 20.12.2020).
- Anonim, 2020d. Weibull k value. [https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/weibull\\_k\\_value.html](https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/weibull_k_value.html) (Erişim Tarihi: 01.12.2020).
- Anonim, 2020e. Vestas V20 wind turbine datasheet. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/618-vestas-v20> (Erişim Tarihi: 12.02.2020).
- Anonim, 2020f. Enercon E-58/10.58 wind turbine datasheet. [https://www.thewindpower.net/turbine\\_en\\_218\\_enercon\\_e58-1000.php](https://www.thewindpower.net/turbine_en_218_enercon_e58-1000.php) (Erişim Tarihi: 04.12.2020).
- Anonim, 2020g. Gamesa G128-5.0MW wind turbine datasheet. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/767-gamesa-g128-5.0mw> (Erişim Tarihi: 04.12.2020).
- Ahmed S, 2015. Wind energy: theory and practice. PHI Learning Pvt. Ltd.
- Akdağ SA, Güler Ö, 2015. A novel energy pattern factor method for wind speed distribution parameter estimation. *Energy Conversion and Management*, 106, 1124-1133.
- Akpınar EK, Akpınar S, 2005. An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics. *Energy conversion and management*, 46(11-12), 1848-1867.
- Almalı MN, Rüstemli S, Gürçam K, 2013. Ortalama Rüzgâr hızı ve güç yoğunluğunun tahmin edilmesinde kullanılan farklı yöntemler. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 73-78.
- Arslan H, Baltacı H, Akkoyunlu OB, Karanfil S, Tayanc M, 2020. Wind speed variability and wind power potential over Turkey: Case studies for Çanakkale and İstanbul. *Renewable Energy*, 145, 1020-1032.
- Aydın, EH, Çunkaş M, 2019. Artvin Çoruh Üniversitesi Seyitler Yerleşkesi enerji talebinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanması. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 241-252.
- Chang TP, 2011. Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. *Applied Energy*, 88(1), 272-282.
- Diñer F, Rüstemli S, Yılmaz Ş, Çingı A, 2017. Kilis ili için farklı yüksekliklerdeki rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 12-20.

- Doğuşahin K, Uslu AF, Kekezoğlu B, 2019. İki Bileşenli Weibull Dağılımı ile Rüzgâr Hızı Olasılık Dağılımlarının Modellenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 315-326.
- Gungor A, Gokcek M, Uçar H, Arabacı E, Akyüz A, 2020. Analysis of wind energy potential and Weibull parameter estimation methods: a case study from Turkey. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(2), 1011-1020.
- Hulio ZH, Jiang W, 2020. Wind energy potential assessment for KPT with a comparison of different methods of determining Weibull parameters. *International Journal of Energy Sector Management*.
- İlkiliç C, Aydın H, 2015. Wind power potential and usage in the coastal regions of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 78-86.
- Kaplan YA, 2016. Rayleigh ve Weibull dağılımları kullanılarak osmaniye bölgesinde rüzgâr enerjisinin değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(1).
- Kaya Ü, Caner M, Oğuz Y, 2016. Rüzgâr türbin modelleri kullanarak Kastamonu ili rüzgâr ile elektrik üretim potansiyeli tahmini. *Technological Applied Sciences*, 11(3), 65-74.
- Keyhani A, Ghasemi-Varnamkhasti M, Khanali M, and Abbaszadeh R, 2010. An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran. *Energy*, 35(1), 188-201.
- Kurban M, Kantar MY, Hoccoğlu FO, 2007. Weibull dağılımı kullanılarak rüzgâr hız ve güç yoğunluklarının istatistiksel analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 205-218.
- Liu F, Sun F, Liu W, Wang T, Wang H, Wang X, Lim W H, 2019. On wind speed pattern and energy potential in China. *Applied Energy*, 236, 867-876.
- MGM, 2019. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Mart 2018 – Mart 2019 tarihleri arası Artvin ili saatlik rüzgâr verileri.
- Sedaghat A, Alkhatip F, Eilaghi A, Mehdizadeh A, Borvayeh L, Mostyafaepour A, Hassanzadeh A, Jahangiri M, 2020. Optimization of capacity factors based on rated wind speeds of wind turbines. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-22.
- Shoab M, Siddiqui I, Rehman S, Khan S, 2019. Assessment of wind energy potential using wind energy conversion system. *Journal of Cleaner Production*, 216, 346-360.
- Şenel MC, Koç E, 2015. Dünyada ve Türkiye’de rüzgâr enerjisi durumu-Genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 56(663), 46-56.