

KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ KAYALI KAMPÜSÜNÜN DÖNEMSEL RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN BULUNMASI

Bekir Adem ÇAKMAKÇI*¹, Engin HÜNER²

¹ Kırklareli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kırklareli

² Kırklareli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kırklareli

ÖZET

Bu çalışmada, Kırklareli Üniversitesi Kayalı Kampüsü'nün dönemsel rüzgar enerjisi potansiyeli, 2018 yılı sonbahar dönemi (Eylül, Ekim ve Kasım ayları) için 5 dakika aralıklarla ölçülen rüzgar hızı verilerine dayanarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli tahmininde Weibull, Rayleigh ve Gamma dağılımları kullanılmıştır. Dağılımların parametreleri, Moment ve Maksimum Olabilirlik (MLE) yöntemleri ile hesaplanmıştır. Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE), Ki-Kare Testi (χ^2) ve Korelasyon Katsayısı (R^2) yaklaşım metodları, hangi dağılımın daha iyi modelleme yaptığını ve uygun yaklaşım getirdiğini belirlemek amacıyla uygulanmıştır. Analiz sonucunda dağılımlardan elde edilen en yüksek aylık ortalama güç yoğunluğu değerleri; Eylül ayı için moment metodu ile hesaplanan Weibull dağılımında $176.179 W/m^2$, Ekim ayı için MLE metodu ile hesaplanan Weibull dağılımında $130.969 W/m^2$ ve Kasım ayı için moment metodu ile hesaplanan Weibull dağılımında $322.550 W/m^2$ olarak tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar Enerjisi, Moment, MLE Metodu, Dağılım Fonksiyonları, Hata Analizleri

ABSTRACT

In this study, seasonal wind energy potential in Kayalı Campus of Kırklareli University, based on the wind speed data measured at 5 minute intervals for the 2018 autumn period (September, October and November) was statistically analyzed. Weibull, Rayleigh and Gamma distributions were used estimate the wind energy potential of the region. The parameters of these distributions were calculated with Moment and Maximum Likelihood (MLE) methods. Root Mean Square Error (RMSE), Chi-Square Test (χ^2) and Correlation Coefficient (R^2) approach methods are applied to determine which distribution makes better modeling and proper approach. As a result of the analysis, the highest monthly power density values by estimated; Weibull distribution calculated by the moment method for September month is $176.179 W/m^2$, Weibull distribution calculated by the MLE method for October month is $130.969 W/m^2$ and Weibull distribution calculated by the moment method for November month is $322.550 W/m^2$, as follows.

Keywords: Wind Energy, Moment, MLE Method, Distribution Functions, Error Analysis

* Sorumlu Yazar: bcakmakci@klu.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde her geçen gün gelişmekte olan teknoloji ve insan nüfusundaki sürekli artış ile birlikte insanoğlunun enerjiye olan ihtiyacı katlanarak artmaktadır [1]. Enerji talebinin mevcut kaynaklarla karşılanamamasından dolayı oluşan enerji açığı, ülkelerin mevcut enerji programlarını revize etmesi, alternatif enerji kaynakları üzerinde daha fazla çalışılması ve acilen gerekli önlemlerin alınması zorunluluğunu getirmiştir. Alınacak önlemlerin başında, toplam enerji talebinde petrolün payının giderek düşürülmesi, enerji tasarrufunun sıkı bir şekilde yapılması, enerji kaynaklarının verimli kullanılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarından mümkün olduğu kadar yararlanmaya yönelik stratejilerin hızla geliştirilip uygulamaya konulması gelmektedir [2].

Yeryüzünde karbon bazlı (fosil) yakıtların yakılması sonucunda oluşan sera gazlarının atmosferde birikerek küresel ısınma etkisiyle sert iklim değişikliklerine sebep olması, ekolojik sistemi olumsuz etkileyerek dünya üzerindeki canlı yaşamını tehdit etmesi, tarım alanlarında çöleşmeye sebep olması vb. ciddi sorunlar ülkelerin enerji kaynaklarını daha etkin biçimde kullanmasının önemini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, biyogaz, dalga enerjisi gibi doğal kaynaklar yenilenebilir enerji kaynağı olarak sayılmaktadır. Ancak bu kaynakların tamamı tek bir coğrafi bölgede bulunmamaktadır. Türkiye uygun coğrafi yapısı nedeniyle rüzgâr enerjisinden yararlanabilen şanslı ülkelerden biridir.

Alternatif enerji kaynaklarından birisi olan rüzgar enerjisi; doğal bir atmosferik dönüşüm sonucunda oluşması, doğada sürekli ve tükenmeyen bir formda olması, asit yağmurlarına ve küresel ısınmaya yol açmaması, atmosfere CO_2 emisyon salınımının olmaması, doğal bitki örtüsü ve insan sağlığına olumsuz etkisinin bulunmaması, fosil yakıt tasarrufu sağlaması, herhangi bir radyoaktif etkisinin bulunmaması gibi özellikleri ile çevre dostu bir enerji kaynağı olarak bilinmektedir. Atmosferde bol ve serbest halde bulunması, teknolojik gelişiminin hızlı olması, enerjinin yönetiminde yüksek bir teknolojiye ihtiyaç duyulmaması, kısa sürede devreye alınabilmesi ve gerekli durumlarda kısa sürede devreden çıkartılabilmesi, düşük maliyetli olması, sık bakım gerektirmemesi, çevre kirliliği yaratmaması gibi özellikleri rüzgar enerjisinin temel avantajları arasındadır [3]. Bu enerji türünün dezavantajları ise; rüzgâr hızının değişken olması, rüzgâr türbini kurulum ve ekipman maliyetinin yüksek olması, gürültü ve ses kirliliği olarak sayılabilir [4]. Yeryüzünün aldığı toplam güneş enerjisinin yaklaşık olarak % 2'sinin rüzgârın kinetik enerjisine dönüştüğü tahmin edilmektedir.

Bu miktarın toplam dünya enerji tüketiminin yüzlerce katı olduğu düşünülürse, rüzgâr enerjisinin

önemi anlaşılmaktadır [5]. Dünya rüzgar enerji potansiyelini belirleyebilmek amacıyla Uluslararası Enerji Ajansı tarafından çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda, dünya teknik rüzgar potansiyeli 53.000.000 GWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü 2017 yılı itibarıyla yaklaşık 539 GW'dır. 2016 yılı verilerine göre (487 GW) rüzgar enerji santrallerinin güç kapasitesinde %10.67'lik bir kapasite artışı tespit edilmiştir [6]. Rüzgar enerjisine yönelik uygulanan teşvikler neticesinde, rüzgar enerjisi kurulu gücünde 2017 yılı sonunda ortalama %10'un üzerinde bir büyüme gerçekleşmiştir. Bu büyüme oranıyla rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en hızlı büyüyen enerji kaynaklarından birisi olmuştur [7].

Rüzgar enerjisi, Türkiye'de 2018 yılı Haziran ayı itibari ile elektrik üretiminin birincil enerji kaynakları arasında yaklaşık %3 oran ile altıncı sırada yer almaktadır [8]. Ülkemizde özellikle Marmara Bölgesi, Ege Bölgesi ile Doğu ve Güneydoğu Anadolu kıyılarında ortalama 4.5-10 m/s rüzgar hızları ile önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir [9]. Rüzgar enerji santrallerinin kurulu gücü ülkemizde her yıl artmakta olup, 2015 yılında toplam kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi 4.71 GW iken, 2016 yılında kurulu gücümüz 6.10 GW, 2017 yılı Temmuz ayı itibarıyla ise toplam kurulu güç 6.87 GW olarak gerçekleşmiştir. 2015-2017 yılları arasında rüzgar enerji santrallerinin kurulu gücündeki artış 2.1 GW'tan fazladır. Ocak 2018 tarihi itibarıyla inşaa halindeki santrallerin toplam gücü 0.552 GW ve lisanslı olan rüzgar enerji santrallerinin toplam gücü ise 2.7 GW'tır [10]. Bu durum, rüzgar enerji santrallerine yönelik yapılan yatırımların yıllar bazında önemli miktarda arttığını göstermektedir.

Ülkemiz, rüzgar enerjisi uygulamaları bakımından son derece uygun yerleşim bölgelerine sahiptir. Ülkemizin bazı üniversitelerinin kampüslerinde ve şehirlerinin yerleşim bölgelerinde rüzgar potansiyeli tahmini ile ilgili literatürde birçok araştırma yapılmıştır. Bunlardan; Anadolu Üniversitesi İki Eylül Kampüsü [11-12], Akhisar, Bababurnu, Belen, Datça, Foça, Gelendost, Gelibolu, Gökçeada ve Söke [13], Denizli ili Tavas ilçesi [14], İzmir ili Menemen ilçesi [15], Gökçeada, Bozcaada, Çanakkale, Edremit, Ayvalık, Dikili, Bornova, Bodrum, Kütahya [16], Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi [17], Niğde [18], Antakya Bölgesi [19], Bodrum, Menteşe, Milas, Yatağan bölgeleri [20], Osmaniye [21], Bandırma [22], Tokat [23], Kumköy, Şile, Akçakoca, Zonguldak, Amasra, Cide, İnebolu [24], Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi [25], Antalya ilinin [26] rüzgâr enerjisi potansiyeli iki parametrelili Weibull, tek parametrelili Rayleigh dağılımları kullanılarak araştırılmış ve istatistiksel analizleri yapılmıştır.

Ülkemizin bazı bölgelerinde [19, 23, 25] rüzgar enerji potansiyelinin tahmininde Gamma

dağılımından da faydalanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı Kırklareli Üniversitesi Kayalı Kampüsünün dönemsel rüzgâr enerji potansiyelinin Weibull, Rayleigh ve Gamma dağılımlarını kullanarak istatistiksel olarak analizini yapmaktır. 2018 yılı sonbahar dönemi rüzgâr hızı verileri; kampüs içerisinde en uygun yer olarak belirlenen 25 metre uzunluğundaki aydınlatma direğine monte edilen rüzgar ölçüm istasyonundan elde edilmiştir. Dağılımların performansını değerlendirmek için, Kök ortalama karesel hata, Ki-Kare ve Korelasyon Katsayısı uyum iyiliği testlerinden faydalanılmıştır.

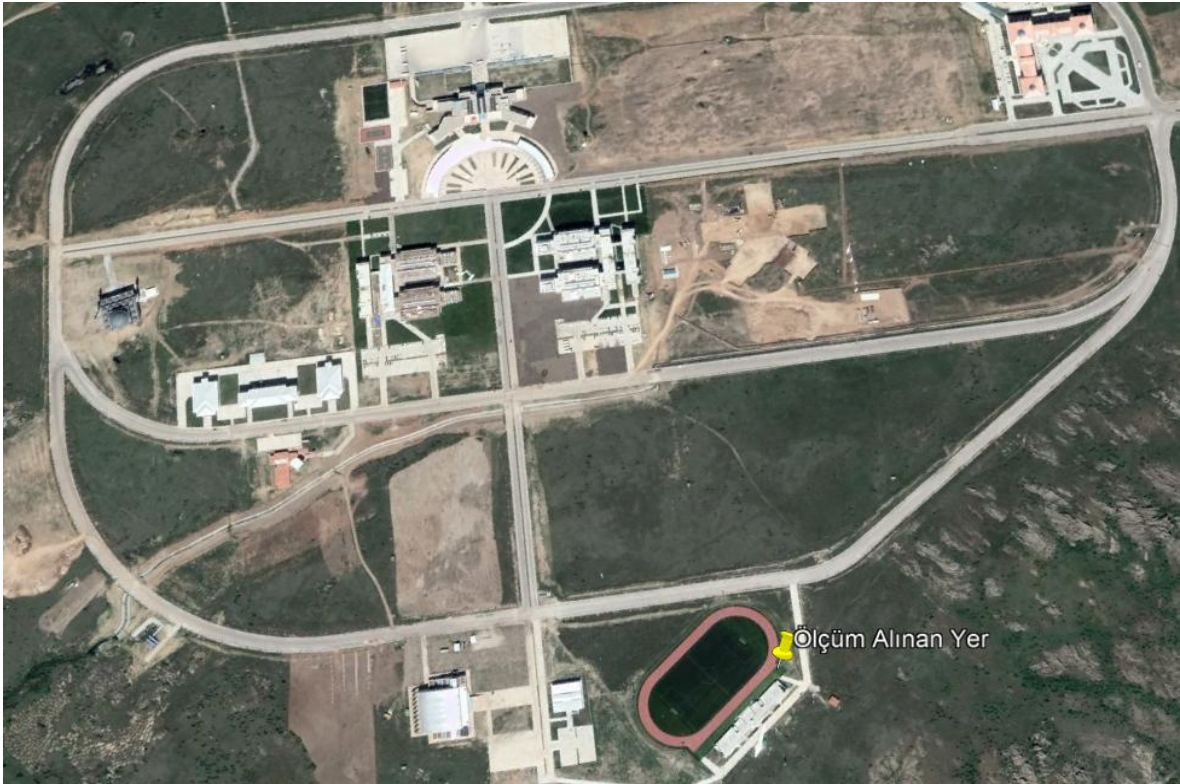
Çalışma içerisinde kullanılan semboller liste halinde Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışma içerisinde kullanılan semboller listesi

c	Weibull ve Rayleigh dağılımları için ölçek parametresi	P_w	Weibull dağılımı için ortalama güç yoğunluğu
CO_2	Karbondiyoksit	RMSE	Kök Ortalama Karesel Hata
$f(v)$	Olasılık yoğunluk fonksiyonu	R^2	Korelasyon Katsayısı
$f_w(v)$	Weibull dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu	χ^2	Ki-Kare Katsayısı
$F_w(v)$	Weibull dağılımı için kümülatif dağılım fonksiyonu	V	Herhangi bir andaki hız değeri
$f_r(v)$	Rayleigh dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu	V_D	Çalışılan dağılım için ortalama hız değeri
$F_r(v)$	Rayleigh dağılımı için kümülatif dağılım fonksiyonu	V_g	Gamma dağılımı için ortalama hız değeri
GW	Gigawatt	V_m	Ham rüzgar için ortalama hız değeri
GWh	Gigawatt-saat	W/m^2	Watt/metrekare
k	Weibull ve Rayleigh dağılımları için şekil parametresi	a	Gamma dağılımı için şekil parametresi
MLE	Maksimum Olabilirlik Metodu	b	Gamma dağılımı için ölçek parametresi
m/s	Metre/saniye	Γ	Gamma fonksiyonu
$P(v)$	Birim alandaki rüzgar gücü	ρ	Havanın yoğunluk değeri
P_D	Çalışılan dağılım için ortalama güç yoğunluğu	σ_m	Ham rüzgar için standart sapma değeri
P_g	Gamma dağılımı için ortalama güç yoğunluğu	σ_d	Çalışılan dağılım için standart sapma değeri
P_m	Ham rüzgar hızı için ortalama güç yoğunluğu	o	Derece
P_r	Rayleigh dağılımı için ortalama güç yoğunluğu	,	Dakika

2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, $41^{\circ} 47'$ kuzey enlemi ile $27^{\circ} 10'$ doğu boylamı arasında bulunan, 25 metre uzunluğundaki aydınlatma direğine monte edilen rüzgar ölçüm istasyonundan, 2018 yılı sonbahar dönemi için 5 dakika aralıklarla ölçülen ortalama rüzgar hızı verileri kullanılarak Kırklareli Üniversitesi Kayalı Kampüsü'nün dönemsel rüzgar enerji potansiyeli istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Kampüs alanındaki ölçüm alınan yer Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kampüs alanındaki ölçüm alınan yer

2.1. İstatiksel Analizler

Bölgesel rüzgâr rejimlerinin önceden tahmin edilebilmesi için çeşitli istatistiksel dağılımlar kullanılmaktadır. Son yıllarda iki parametrelili Weibull dağılımı, bir parametrelili Rayleigh dağılımı ve iki parametrelili Gamma dağılımı dünyanın farklı bölgelerinin rüzgâr dağılımlarını temsil etmek için sıklıkla tercih edilmektedir. Weibull ve Rayleigh yöntemlerinin kullanılma nedeni, rüzgâr dağılımına çok iyi uymaları, dağılımlarının esnek bir yapıya sahip olmaları, parametrelerinin belirlenmesindeki kolaylık, parametre sayısının az olması, parametrelerin bir yükseklik için

belirlenmesinin ardından farklı yükseklikler için tahmin edilebilmesi gibi faktörlerdir [27]. Gamma dağılımının tercih edilmesinin sebebi ise düşük rüzgar hızı profillerinde diğer dağılımlara göre modellemede daha başarılı olmasıdır [28-30].

2.1.1. Weibull ve Rayleigh Dağılımları

Weibull dağılımı, temelde şekil (k) ve ölçek (c) olmak üzere iki parametreden oluşan bir dağılımdır. İki parametrelili Weibull dağılımının şekil parametresinin 2 olduğu durum olan Rayleigh dağılımları yüksek rüzgar profiline sahip bölgelerde literatürde en yaygın kullanılan dağılımlardır [11-15, 20-22]. Rayleigh dağılımı tek parametrelili olduğu için Weibull' a göre daha az esnek; ancak parametrelerinin hesaplanması daha kolaydır. Yıllık ortalama rüzgâr hızının 4.5 m/s değerinden büyük olduğu durumlarda, rüzgâr hızı dağılımının Rayleigh dağılımına yaklaştığı bilinmektedir [31]. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ($f_w(v)$) Denklem 1'de verilmiştir.

$$f_w(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (1)$$

Denklem 1'de; v sembolü, herhangi bir andaki hız değerini temsil etmektedir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu, herhangi bir andaki hızın gözlenme olasılığını vermektedir.

Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu ($F_w(v)$) Denklem 2'de verilmiştir.

$$F_w(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (2)$$

Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu, rüzgar hızının belli bir hız değerinden küçük ya da eşit gerçekleşme olasılığını vermektedir.

Rayleigh dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu ($f_r(v)$) Denklem 3'te verilmiştir.

$$f_r(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right) \quad (3)$$

Rayleigh kümülatif dağılım fonksiyonu ($F_r(v)$) Denklem 4'te verilmiştir.

$$F_r(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right) \quad (4)$$

Rayleigh dağılımının en büyük avantajı sadece ortalama rüzgâr hızı ile dağılımın belirlenmesidir. Bu çalışmada, Weibull ve Rayleigh dağılımların parametrelerinin bulunmasında moment ve MLE metodları kullanılmıştır [32-33].

Dağılımların ortalama rüzgâr hızları (v_d) Denklem 5'te verilmiştir.

$$v_d = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (5)$$

Denklem 5'te; Γ sembolü, gamma fonksiyonunu temsil etmektedir.

Dağılımların rüzgâr hızının standart sapmaları (σ_d) Denklem 6'da verilmiştir.

$$\sigma_d = \sqrt{c^2\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]} \quad (6)$$

Yukarda ifade edilen formüllerde $k=2$ alındığında Rayleigh dağılımı için istenilen hesaplamalar gerçekleştirilmektedir.

Ortalama rüzgâr gücü yoğunluğu (P_m) Denklem 7'de verilmiştir.

$$P_m = \int_0^{\infty} P(v)f(v)dv \quad (7)$$

Denklem 7'de; $P(v)$ sembolü, birim alandaki rüzgar güç değerini temsil etmektedir. $f(v)$ sembolü ise olasılık yoğunluk fonksiyonunu temsil etmektedir.

Weibull dağılımı için ortalama güç yoğunluğu (P_w) Denklem 8'de verilmiştir [34].

$$P_w = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (8)$$

Denklem 8'de; ρ sembolü, ölçüm yapılan havanın yoğunluk değerini temsil etmektedir.

Rayleigh dağılımı için ortalama güç yoğunluğu (P_r) Denklem 9'da verilmiştir.

$$P_r = \frac{3}{k} \rho v_d^3 \quad (9)$$

2.1.2. Gamma Dağılımı

Gamma dağılımı, farklı bilim dallarına uygulanabilmesinin önünü açan esnek yapısı sayesinde rastgele olarak değişen rüzgar hızı verilerine de uygulanabilmektedir [19]. Bu durum coğrafi konum ve iklim rejimine bağlı olarak değişkenlik gösteren rüzgar hızı verileri için de geçerlidir. Gamma dağılımına ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonu ($f(x)$) Denklem 10'da verilmiştir.

$$f(x) = \frac{(x^{a-1})\left(\frac{-x}{b}\right)}{b^a \Gamma(a)} \quad (10)$$

Denklem 10'da; x herhangi bir andaki hız değerini, b ölçek parametresini, a şekil parametresini ve $\Gamma(a)$ ise gamma dağılımındaki şekil parametresi fonksiyonunu temsil etmektedir.

Gamma dağılım parametrelerinin bulunmasında moment ve MLE metodları kullanılmıştır [35]. Gamma dağılımının ortalama rüzgar hızı (V_g) Denklem 11'de verilmiştir.

$$V_g = ab \quad (11)$$

Gamma dağılımının ortalama güç yoğunluğu (P_g) Denklem 12'de verilmiştir.

$$P_g = \frac{1}{2} \rho(ab)^3 \quad (12)$$

2.2. Hata Analizleri

Hata analizleri dağılımlarının rüzgâr hızı sıklık değerlerini ne kadar iyi tahmin edebildiğini belirlemek için yapılan bir işlemdir. Hangi dağılımın daha başarılı modelleme yaptığı ve uygun yaklaşım getirdiği çeşitli kriterlere bakarak belirlenebilir. Değerlendirme parametreleri ile ilgili detaylı bilgi literatürde bulunmaktadır [36-38]. Kök ortalama karesel hata (RMSE) kriterinin bulunması Denklem 13'te verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2\right]} \quad (13)$$

Ki-Kare (χ^2) kriterinin bulunması Denklem 14'te verilmiştir.

$$\chi^2 = \left[\frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2\right] \quad (14)$$

Denklem 14'te; n sembolü dağılımlardaki parametre sayısını ifade etmektedir.

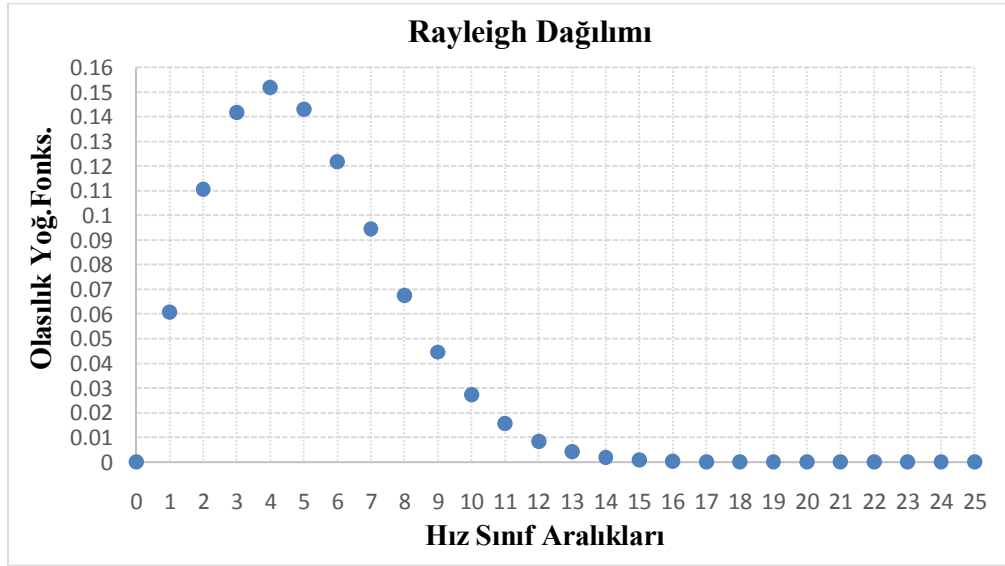
Korelasyon katsayısı (R^2) kriterinin bulunması Denklem 15'te verilmiştir.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2} \quad (15)$$

Yukarıdaki denklemlerde; y_i değeri i . gerçek veriyi, x_i değeri i . dağılımlardan tahmin edilen veriyi, z_i değeri y_i değerlerinin ortalamasını, n değeri gerçek veri adedini, N değeri ise gözlem sayısını vermektedir.

3. BULGULAR

Çalışmada ilk olarak, rüzgâr hızı değerleri sınıflara bölünmüş ve her sınıf aralığındaki rüzgâr frekansları belirlenmiştir. Rüzgar frekansları belirlendikten sonra, frekans değerleri toplam veri sayısına bölünerek, her sınıf aralığındaki yüzdesel sıklık miktarları bulunmuştur. Dağılımların parametreleri moment ve MLE metodu ile bulunmuştur. Parametrelerin bulunmasıyla, dağılımların her bir sınıf aralığındaki olasılık yoğunluk fonksiyonları bulunmuş ve örnek bir dağılım Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Örnek bir ay: Eylül Ayı Rayleigh Dağılımı

Sınıf aralık değerleri ile olasılık yoğunluk fonksiyon değerleri çarpılarak, dağılımların her hız sınıf aralığı için ortalama anlık güç yoğunlukları hesaplanmıştır. Son olarak her sınıf aralığındaki ortalama güç yoğunluk değerleri toplanarak dağılımların aylara göre ortalama güç yoğunlukları hesaplanmıştır. Moment yöntemi ile parametreleri belirlenen dağılımlara ait şekil parametresi “k”, ölçek parametresi “c (m/s)”, ortalama güç yoğunluğu “ $P_m (W/m^2)$ ” ve dağılımlardan elde edilen ortalama güç yoğunluğu “ $P_d (W/m^2)$ ” değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Moment yöntemi ile parametreleri belirlenen dağılımlara ait değerler

Aylar	Eylül			Ekim			Kasım		
	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma
k	1.6715	2	2.6454	1.9570	2	3.5198	1.5256	2	2.2381
c	5.6036	5.6485	1.8922	5.4272	5.4297	1.3671	6.5500	6.6588	2.6366
P_m	75.263	75.263	75.263	66.853	66.853	66.853	123.307	123.307	123.307
P_d	176.179	143.738	75.069	130.528	127.681	66.885	322.55	235.496	122.529

Tablo 2’de elde edilen verilere göre; ölçüm yapılan bölgenin Eylül, Ekim, Kasım ayları için ham rüzgar verilerinin ortalama güç yoğunluğu değerleri sırasıyla $75.263 W/m^2$, $66.853 W/m^2$ ve $123.307 W/m^2$ iken, bölgede Eylül, Ekim, Kasım ayları için Weibull dağılımı verilere uygulandığında en yüksek ortalama güç yoğunluğu değerlerinin sırasıyla $176.179 W/m^2$, $130.528 W/m^2$ ve $322.55 W/m^2$ olacağı tahmin edilmiştir. MLE yöntemi ile parametreleri belirlenen dağılımlara ait şekil parametresi “k”, ölçek parametresi “c (m/s)”, ortalama güç yoğunluğu “ $P_m (W/m^2)$ ” ve dağılımlardan elde edilen ortalama güç yoğunluğu “ $P_d (W/m^2)$ ” değerleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. MLE yöntemi ile parametreleri belirlenen dağılımlara ait değerler

Aylar	Eylül			Ekim			Kasım		
	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma
k	1.7143	2	2.6043	1.9442	2	2.8666	1.5453	2	2.0770
c	5.6339	5.8762	1.9220	5.4202	5.4528	1.6786	6.5711	7.098	2.8412
P_m	75.263	75.263	75.263	66.853	66.853	66.853	123.307	123.307	123.307
P_d	172.547	161.844	75.043	130.969	129.309	66.768	319.086	285.231	122.154

Tablo 3’te elde edilen verilere göre; ölçüm yapılan bölgenin Eylül, Ekim, Kasım ayları için ham rüzgar verilerinin ortalama güç yoğunluğu değerleri sırasıyla $75.263 W/m^2$, $66.853 W/m^2$ ve $123.307 W/m^2$ iken, bölgede Eylül, Ekim, Kasım ayları için Weibull dağılımı verilere uygulandığında en yüksek ortalama güç yoğunluğu değerlerinin sırasıyla $172.547 W/m^2$, $130.969 W/m^2$ ve $319.086 W/m^2$ olacağı tahmin edilmiştir.

Moment yöntemi ile parametreleri belirlenen dağılımlara ait hız değeri “ $V_m (m/s)$ ”, dağılımlardan elde edilen ortalama hız değeri “ $V_d (m/s)$ ”, standart sapma değeri “ $\sigma_m (m/s)$ ”, ve dağılımlardan elde edilen ortalama standart sapma “ $\sigma_D (m/s)$ ” değerleri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Moment yöntemi ile parametreleri belirlenen dağılımlara ait değerler

Aylar	Eylül			Ekim			Kasım		
	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma
V_m	5.0058	5.0058	5.0058	4.8119	4.8119	4.8119	5.9012	5.9012	5.9012
V_d	5.0058	5.0058	5.0058	4.8119	4.8119	4.8119	5.9012	5.9012	5.9012
σ_m	3.0778	3.0778	3.0778	2.5650	2.5650	2.5650	3.9448	3.9448	3.9448
σ_D	3.0778	2.6166	3.0776	2.5650	2.5153	2.5648	3.9448	3.0847	3.9445

Tablo 4’te standart sapma ve dağılımlardan elde edilen ortalama standart sapma değerleri ele alındığında; Rayleigh dağılımı için Eylül, Ekim, Kasım aylarında sırasıyla %17.62, %1.97 ve %27.88 iyileşme oranları tahmin edilmektedir.

Dağılımlar yoluyla yapılan tahminlerin sonucunda, bu yüzdesel iyileşmelerle rüzgar hızları daha kararlı olacaktır ve ölçümlerde oluşabilecek hata oranının enerji üretim tahminlerindeki etkisi azalacaktır. MLE yöntemi ile parametreleri belirlenen dağılımlara ait hız değeri “ V_m (m/s)”, dağılımlardan elde edilen ortalama hız değeri “ V_d (m/s)”, standart sapma değeri “ σ_m (m/s)”, ve dağılımlardan elde edilen ortalama standart sapma “ σ_D (m/s)” değerleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. MLE yöntemi ile parametreleri belirlenen dağılımlara ait değerler

Aylar	Eylül			Ekim			Kasım		
	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma
V_m	5.0058	5.0058	5.0058	4.8119	4.8119	4.8119	5.9012	5.9012	5.9012
V_d	5.0240	5.2077	5.0058	4.8065	4.8324	4.8119	5.9119	6.2906	5.9012
σ_m	3.0778	3.0778	3.0778	2.5650	2.5650	2.5650	3.9448	3.9448	3.9448
σ_D	3.0188	2.7222	3.1018	2.5772	2.5260	2.8421	3.9056	3.2882	4.0947

Tablo 5’te ortalama hız ve dağılımlardan elde edilen ortalama hız değerleri ele alındığında; Rayleigh dağılımı için Eylül, Ekim, Kasım aylarında sırasıyla %4.03, %0.42 ve %6.59 oranlarında artış görülmektedir. Dağılımlar yoluyla yapılan tahminlere göre; ortalama rüzgar hızının artması dolayısıyla enerji üretim yoğunluğunun daha fazla olacağı tahmin edilmektedir.

Ayrıca standart sapma ve dağılımlardan elde edilen ortalama standart sapma değerleri analiz edildiğinde; Rayleigh dağılımı için Eylül, Ekim, Kasım aylarında sırasıyla %13.06, %1.54 ve %19.96 iyileşme oranları tahmin edilmektedir. Dağılımlar yoluyla yapılan tahminlere göre; bu yüzdesel iyileşmelerle rüzgar veri hızlarının daha kararlı olacak ve ölçümlerde oluşabilecek hata oranının enerji üretim tahminlerindeki etkisi azalacaktır. Moment yöntemi ile parametreleri belirlenen dağılımların; RMSE, χ^2 ve R^2 uyum iyiliği testlerinin sonuçları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Moment yöntemi için uyum iyiliği testlerinin sonuçları

Aylar	Eylül			Ekim			Kasım		
	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma
RMSE	0.01805	0.01399	0.01727	0.01829	0.01794	0.02256	0.01829	0.01659	0.01817
χ^2	0.00035	0.00021	0.00032	0.00036	0.00035	0.00055	0.00036	0.00030	0.00036
R^2	0.88114	0.92846	0.89107	0.88741	0.89159	0.82857	0.83208	0.86184	0.83434

RMSE, χ^2 kriterleri en küçük değerlerine göre en iyi dağılımı belirlemektedir. R^2 kriteri ise bir modelin tahmin gücünün ölçüsü olarak 0 ve 1 arasında değişmektedir. R^2 kriterinin 1'e yaklaşması modelin tahmin gücünün arttığının göstergesidir.

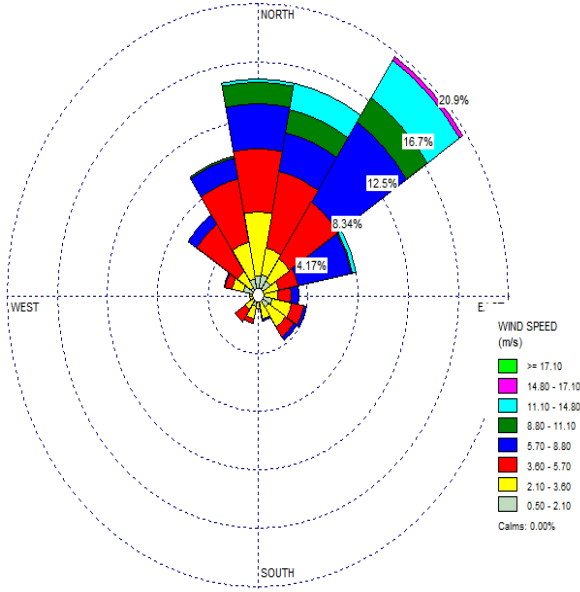
Tablo 6'da RMSE, χ^2 ve R^2 uyum iyiliği test kriterleri incelendiğinde; Eylül, Ekim, Kasım ayları için Rayleigh dağılımının daha başarılı modelleme yaptığı ve uygun yaklaşım getirdiği görülmektedir. MLE yöntemi ile parametreleri belirlenen dağılımların; RMSE, χ^2 ve R^2 uyum iyiliği testlerinin sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. MLE yöntemi için uyum iyiliği testlerinin sonuçları

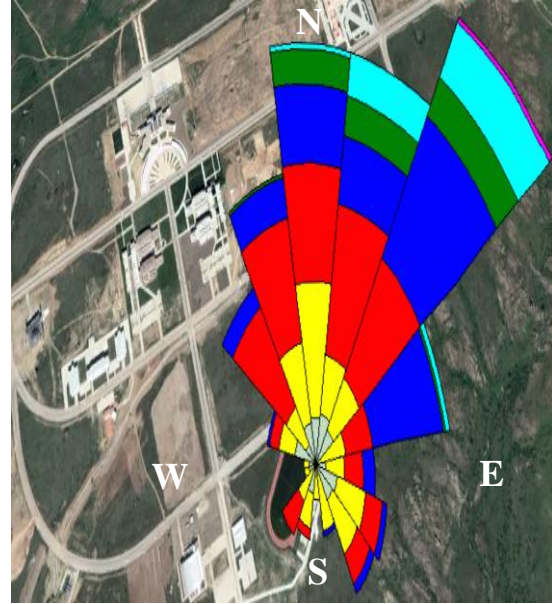
Aylar	Eylül			Ekim			Kasım		
	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma	Weibull	Rayleigh	Gamma
RMSE	0.01716	0.01401	0.01754	0.01846	0.01773	0.02359	0.01801	0.01768	0.01897
χ^2	0.00032	0.00021	0.00033	0.00037	0.00034	0.00060	0.00035	0.00034	0.00039
R^2	0.89252	0.92837	0.88764	0.88529	0.89414	0.81259	0.83725	0.84306	0.81931

RMSE, χ^2 kriterleri en küçük değerlerine göre en iyi dağılımı belirlemektedir. R^2 kriteri ise bir modelin tahmin gücünün ölçüsü olarak 0 ve 1 arasında değişmektedir. R^2 kriterinin 1'e yaklaşması modelin tahmin gücünün arttığının göstergesidir. Tablo 7'de RMSE, χ^2 ve R^2 uyum iyiliği test kriterleri incelendiğinde; Eylül, Ekim, Kasım ayları için Rayleigh dağılımının daha başarılı modelleme yaptığı ve uygun yaklaşım getirdiği görülmektedir.

Rüzgârın hız, frekans ve yön dağılımları WRPLOT programı yardımı ile oluşturulmuştur. Eylül ayma ait rüzgar gülü grafiği Şekil 3.a'da gösterilmiştir. Eylül ayına ait kampüs alanının harita üzerindeki rüzgar krokisi Şekil 3.b'de gösterilmiştir.

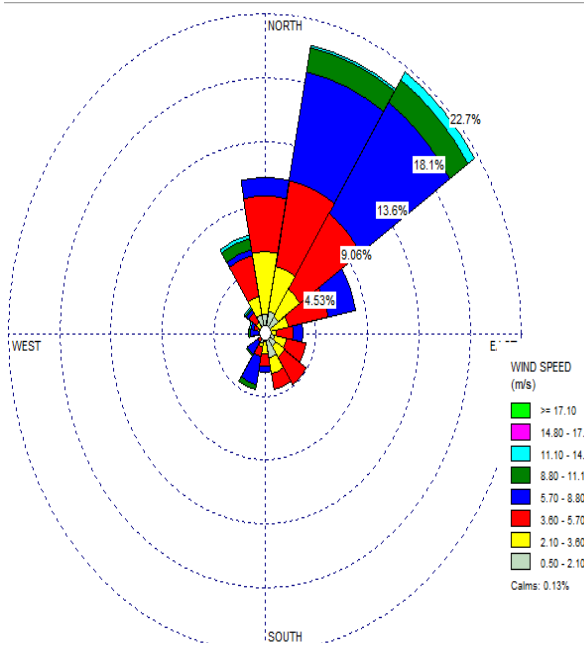


Şekil 3.a Rüzgar gülü grafiği

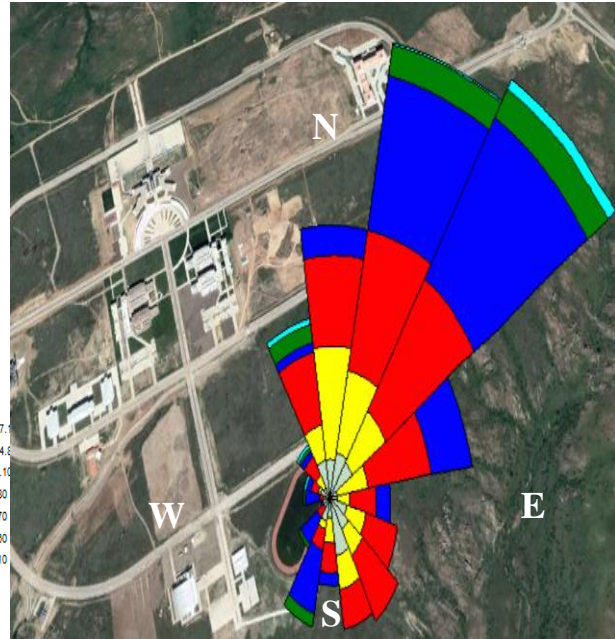


Şekil 3.b Kampüs alanı rüzgar krokisi

Ekim ayına ait rüzgar gülü grafiği Şekil 4.a'da gösterilmiştir. Ekim ayına ait kampüs alanının harita üzerindeki rüzgar krokisi Şekil 4.b'de gösterilmiştir.

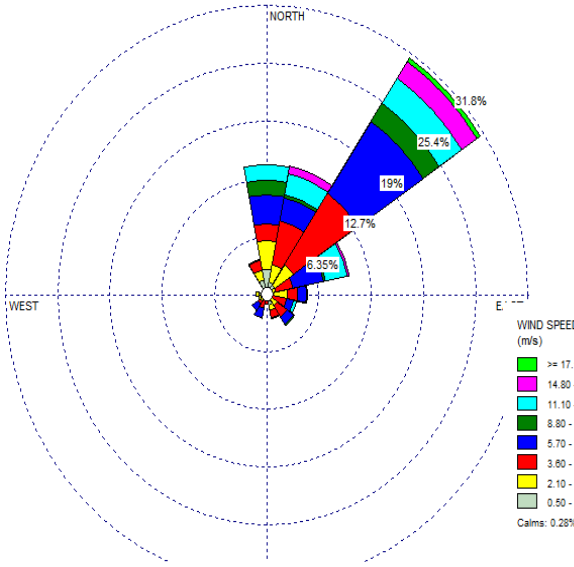


Şekil 4.a Rüzgar gülü grafiği

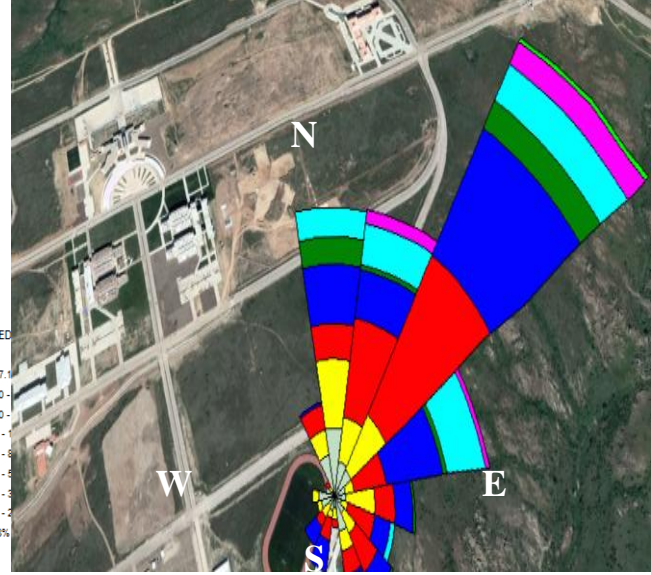


Şekil 4.b Kampüs alanı rüzgar krokisi

Kasım ayına ait rüzgar gülü grafiği Şekil 5.a’da gösterilmiştir. Kasım ayına ait kampüs alanının harita üzerindeki rüzgar krokisi Şekil 5.b’de gösterilmiştir.



Şekil 5.a Rüzgar gülü grafiği



Şekil 5.b Kampüs alanı rüzgar krokisi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 2018 yılı sonbahar dönemi için kampüs içerisinde konumlandırılan rüzgar ölçüm istasyonundan, 5 dakika aralıklarla ölçülen ortalama rüzgar hızı verileri kullanılarak Kırklareli Üniversitesi Kayalı Kampüsü'nün dönemsel rüzgar enerji potansiyeli istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bölgenin rüzgar enerjisi potansiyel tahmininde Weibull, Rayleigh ve Gamma dağılımları kullanılmıştır. Bu dağılımlarının parametreleri, Moment ve MLE yöntemleri ile hesaplanmıştır. RMSE, χ^2 ve R^2 yaklaşım metodları dağılımların uyum iyiliği testlerini belirlemek amacıyla uygulanmıştır. Çalışma sonuçları özetlenecek olursa;

Çalışılan aylar için dağılımların moment ve MLE methoduna göre k ve c parametreleri hesaplanmıştır.

Dağılımlardan elde edilen en yüksek ortalama güç yoğunluğu değerleri; Eylül ayı için moment metodu ile hesaplanan Weibull dağılımında $176.179 W/m^2$, Ekim ayı için MLE metodu ile hesaplanan Weibull dağılımında $130.969 W/m^2$, Kasım ayı için moment metodu ile hesaplanan

Weibull dağılımında $322.550 W/m^2$ şeklindedir.

Ham rüzgar verilerinden en yüksek ortalama hızın Kasım ayında $5.9012 m/s$ olduğu görülmektedir. Dağılımların istatistiksel analizleri sonucunda Kasım ayı için MLE metodu ile hesaplanan Rayleigh dağılımında $6.2906 m/s$ 'ye ulaşılabileceği tahmin edilmiştir.

R^2 kriteri bir modelin tahmin gücünün ölçüsü olarak 0 ve 1 değerleri aralığında değişmektedir. R^2 kriterinin 1'e yaklaşması modelin tahmin gücünün arttığının göstergesidir. Dağılımlardan elde edilen moment metodu için R^2 kriteri ele alındığında; Eylül ayı için Rayleigh dağılımında 0.92846, Ekim ayı için Rayleigh dağılımında 0.89159 ve Kasım ayı için Rayleigh dağılımında 0.86184 şeklindedir.

Dağılımlardan elde edilen MLE metodu için R^2 kriteri ele alındığında; Eylül ayı için Rayleigh dağılımında 0.92837, Ekim ayı için Rayleigh dağılımında 0.89414 ve Kasım ayı için Rayleigh dağılımında 0.84306 şeklindedir.

Ölçülen aylara ait rüzgargülü grafikleri incelendiğinde; Eylül ayı için baskın olan yönün 1758 adet ölçüm ile Kuzey-Doğu (45°), Ekim ayı için 1960 adet ölçüm ile Kuzey-Doğu (45°), Kasım ayı için 2468 adet ölçüm ile Kuzey-Doğu (45°) olduğu bulunmuştur.

Analiz sonucunda her iki yöntem için de en yüksek aylık güç yoğunluğu değerleri sırasıyla Weibull, Rayleigh ve Gamma dağılımlarından tahmin edilmiştir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın verilerine göre, ülkemizde yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve $7.5 m/s$ üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 Megawatt gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilmiştir. 25 metre yüksekliğe sahip ölçüm istasyonundan alınan verilerin dönemsel istatistiksel analizi yapıldığında elde edilen hız değerleri umut vericidir. Ölçüm alınan yüksekliklerdeki rüzgar hızlarının seçilecek olan türbinin göbek yüksekliğine taşınması bazı katsayılar yardımıyla mümkündür. Daha sağlıklı bir değerlendirmeye varabilmek için bölgenin yıllık potansiyelinin istatistiksel analiz sonuçlarının elde edilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Küçükkalay A.M., Endüstri Devrimi ve Ekonomik Sonuçlarının Analizi, S.2(Güz), S 51–68, 1997.
- [2] Hocaoğlu, F. O. ve Kurban, M., Rüzgar Gücünden Elektrik Enerjisi Üretimi için Rüzgar Türbini Tasarımı, 1. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, 2005.
- [3] İlkılıç, C., Türkbay, İ., Determination and utilization of wind energy potential for Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, C 14, S 2202-2207, 2010.
- [4] Toklu, M., Rüzgar Enerjisi Ve Elazığ Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [5] Lipman, N.H., Musgrove, P.J., Wind Energy for the Eighties, England., 1982.
- [6] http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_-1.pdf, Erişim Tarihi: 27.11.2018
- [7] Şenel, M. C., Koç, E., Dünyada ve Türkiye’de rüzgar enerjisi durumu-Genel değerlendirme, Mühendis ve Makine, C 56, S 46-56, 2015.
- [8] http://www.emo.org.tr/ekler/34427e6be0fae4a_ek.pdf, Erişim Tarihi: 28.11.2018
- [9] Çelik, A. N., Review of Turkey’s current energy status: A case study for wind energy potential of Çanakkale province, Renewable and Sustainable Energy Reviews, C 15 S 2743-2749, 2011.
- [10] https://www.tureb.com.tr/files/tureb_sayfa/duyurular/2018/03/turkiye_ruzgar_enerjisi_istatistik_raporu_ocak_2018.pdf Erişim Tarihi: 30.11.2018
- [11] Kurban, M., Kantar Y.M., Hocaoğlu, F.O., Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Araştırılmasında Weibull Ve Rayleigh Dağılımlarının Kullanılması, Sakarya University Journal of Science, C 10, S 14-21, (2006).
- [12] Kurban, M., Hocaoğlu, F.O, Kantar Y.M., Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Tahmininde Kullanılan İki Farklı İstatistiksel Dağılımın Karşılaştırmalı Analizi, Pamukkale University Journal Of Engineering Science, C 13, S 103-109, 2007.
- [13] Bilgili, M., Şahin B., Şimşek E., Türkiye’nin Güney, Güneybatı Ve Batı Bölgelerindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, C 30 S 01-12, 2010.
- [14] Talayoğlu, S., Denizli İlinin Tavas İlçesine Ait Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Hesaplanması Ve Ekonomik Analiz, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [15] Gülersoy, T., Çetin N.S., Menemen Bölgesinde Rüzgar Türbinleri için Rayleigh ve Weibull Dağılımlarının Kullanılması, Politeknik Dergisi, C 13, S 209-213, 2010.
- [16] Güngör A., Evaluation Of The Studies Carried Out On Wind Characteristics Of The Western Part Of Turkey, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, C 1, S 41-49, 2012.
- [17] Yazar, A.H., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Avşar Kampüsünde Rüzgâr Enerjisi

Verimliliğinin İzlenmesi Ve Elektrik Üretim Potansiyelinin Araştırılması, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2013.

[18] Taşkın, B., Niğde İlinde Kurulabilecek Rüzgar Enerjisi Santralinin Fiziksel ve Ekonomik Analizi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2013.

[19] Mert, İ., Karakuş, C., Antakya Bölgesinde Rüzgâr Gücü Yoğunluğu ve Rüzgâr Hızı Dağılımı Parametrelerinin İstatistiksel Analizi, Politeknik Dergisi, C 18, S 35-42, 2015.

[20] Akkoyunlu, T., Bodrum, Menteşe, Milas, Yatağan İlçelerinin Rüzgâr Verilerinin Analiz Edilmesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2015.

[21] Kaplan Y.A., Rayleigh Ve Weibull Dağılımları Kullanılarak Osmaniye Bölgesinde Rüzgar Enerjisinin Değerlendirilmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, C 20, S 62-71, 2016.

[22] Korukçu M.Ö., Investigation of long term wind characteristics and wind energy potential in Bandırma, Turkey, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, C 23, S 337-342, 2017.

[23] Emeksiz, C., Doğan Z., Gökrem L., Yavuz A.H., Tokat Bölgesi Rüzgar Karakteristiğinin İstatistiksel Yöntemler İle İncelenmesi, Politeknik Dergisi, C 19, S 481-489, 2016.

[24] Akpınar, A., Assessment of wind power potential along the south western Black Sea coasts, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, C 20, S 573-589, 2016.

[25] Gökdemir A., Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Merkez Kampüsü Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2017.

[26] Çağlar, A., Investigation of Wind Characteristics for Antalya Region by Using Weibull Distribution, Cumhuriyet Science Journal, C 38, S 156-164, 2017.

[27] Jaramillo O. A. Borja M. A., Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case, Renewable Energy, C 29, S 1613-1630, 2004.

[28] Sarkar, A., Singh, S., Mitra, D., Wind climate modeling using Weibull and extreme value distribution, International Journal of Engineering Science and Technology, C 3, S 100-106, 2011.

[29] Olaofe, Z. O., Folly, K. A., Statistical Analysis of Wind Resources at Darling for Energy Production, International Journal of Renewable Energy Research, C 2, S 250-261, 2012.

[30] Yong, H. O. U., Yidong, P. E. N. G., Johnson, A. L., Jing, S. H. I., Empirical Analysis of Wind Power Potential at Multiple Heights for North Dakota Wind Observation Sites, Energy Science & Technology, C 4, S 1-9, 2012.

[31] Cliff, W. C., The Effect of generalized wind characteristics on annual power estimates from wind turbine generators, PNL-2436 Battelle Pacific Northwest Laboratory, Washington, 1977.

[32] Paulo, A.C.R., Ricardo C.S., Carla F.A., Maria E.V.S., Comparison of seven numerical methods for



determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil, Applied Energy, C 89, S 395-400, 2012.

[33] Seguro, J.V., Lambert T.W, Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, C 85, S 75-84, 2000.

[34] Chang T. P., Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application, Appl Energy, C 88, S 272-282, 2011.

[35] Wilks, D.S., Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, C 91, San Francisco, 2006.

[36] Akpınar E.K., Akpınar S., Determination of the wind energy potential for Maden-Elazığ, Turkey, Energy Conversion and Management, C 45, S 2901-2914, 2004.

[37] Li M, Li X. Investigation of wind characteristics and assessment of wind energy potential for Waterloo region, Canada. Energy Conversion and Management, C 46, 3014-30033, 2005.

[38] Ülgen K, Genc A, Hepbaslı A, Oturanc G. Assessment of wind characteristics for energy generation. Energy Sources, C 26, S 1227-1237, 2004.