



BALIKESİR RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI VE TÜRBLİNLERİN EKONOMİK ANALİZ KAPSAMINDA KARŞILAŞTIRILMASI

Asiye ASLAN*

*Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Gönen Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü
10900 Gönen, Balıkesir, asiye_aslan@yahoo.com

(Geliş Tarihi: 11.04.2017, Kabul Tarihi: 30.10.2017)

Özet: Balıkesir İli Türkiye’de rüzgar enerjisi alanında ilk sıralarda yer almaktadır. İl genelinde birçok lokasyonda rüzgar enerjisi santralleri kurulmuş ve kurulmaya devam etmektedir. Bu çalışmada Balıkesir ilinde 11 farklı lokasyonun (Bandırma, Edremit, Akçaldede (Balya), Ayvalık, Erdek, Gönen, Bigadiç, Manyas, Dursunbey, Susurluk ve Burhaniye) rüzgar enerjisi potansiyeli araştırılmıştır. Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nden temin edilen ve 2011-2015 yılları arasındaki 10 m yükseklikte ölçülen rüzgar hız verileri analiz edilmiştir. Weibull ve Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları rüzgar hız dağılım eğrileri elde etmek için kullanılmıştır. Farklı yükseklikler için Weibull parametreleri ekstrapolasyon metodu kullanılarak hesaplanmıştır. En yüksek ortalama rüzgar hızı 6,42 m/s ile Akçaldede’de, en düşük ortalama rüzgar hızı ise 1,69 m/s ile Dursunbey’de elde edilmiştir. Weibull şekil parametresi k 1,68 ile 1,16 aralığında, ölçek parametresi c ise 6,66 ile 1,50 m/s aralığında değişmektedir. Bölgede hakim rüzgar yönü K (0°) ve KKD ($22,5^\circ$)’dur. Güçleri 1000 kW ile 3000 kW arasında değişen beş adet rüzgar türbini ekonomik analiz yöntemleri kapsamında her bir lokasyon için karşılaştırılmıştır. En iyi performans Akçaldede lokasyonunun da Vestas V90 (2000 kW, 125 m) türbini için elde edilmiştir. Bu çalışmanın amacı bölgede rüzgar enerjisinin geliştirilmesine bilimsel olarak katkıda bulunmaktır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerjisi, Weibull dağılımı, Ekonomik değerlendirme

INVESTIGATION OF BALIKESİR WIND ENERGY POTENTIAL AND COMPARISON OF THE TURBINES BASED ON THE ECONOMICAL ANALYSIS

Abstract: Balıkesir Province is in the first places in the field of wind energy in Turkey. Wind power plants in many locations throughout the province have been established and continues to be established. In this study, wind energy potential of 11 different locations in Balıkesir (Bandırma, Edremit, Akçaldede (Balya), Ayvalık, Erdek, Gönen, Bigadiç, Manyas, Dursunbey, Susurluk ve Burhaniye) were investigated. The wind speed measurement data from the Turkish State Meteorological Service for 2011-2015 at a height of 10 m were analysed. Weibull and Rayleigh probability density functions were used to obtain wind speed distribution curves. The wind speed data and Weibull parameters for different heights were calculated using an extrapolation method. The highest mean wind speed was obtained with 6,42 m/s in Akçaldede, while the lowest mean wind speed was obtained with 1,69 m/s in Dursunbey. Weibull shape parameter k varied between 1,68 and 1,16 while the scale parameter c varied between 6,66 and 1,50 m/s. The prevailing winds in the region were N (0°) and NNE ($22,5^\circ$). A comparison of the five wind turbines with rated power ranging from 1000 kW to 3000 kW was performed based on economic analysis for each location. Best performance has been achieved in the Akçaldede location with Vestas V90 (2000 kW, 125 m) turbine. The aim of this study is to scientifically contribute to the development of wind energy in the region.

Keywords: Wind energy, Weibull distribution, Economic evaluation

SEMBOLLER

A	alan (m^2)	f_R	Rayleigh dağılım fonksiyonu
BCR	fayda maliyet oranı	h	yükseklik
B_A	elektrik satışından yıllık gelir (\$)	i	gözlem sayısı
c	Weibull ölçek parametresi (m/s)	I	reel iskonto oranı
C	maliyet (\$/kW h)	IRR	iç karlılık oranı (%)
C_A	toplam yıllık operasyon maliyeti (\$)	k	Weibull şekil parametresi
C_f	kapasite faktörü	P	rüzgar gücü (W/m^2)
C_I	ilk yatırım maliyetleri (\$)	PBP	geri ödeme süresi (yıl)
COM	işletme ve bakım maliyeti (\$)	P_{out}	çıkış gücü (W)
E_{out}	enerji çıkışı (kW h/yıl)	P_R	nominal güç (W)
f_W	Weibull dağılım fonksiyonu	R^2	korelasyon katsayısı

<i>RMSE</i>	kök ortalama kare hatası
<i>n</i>	makinenin ömrü (yıl)
<i>NPV</i>	net şimdiki değer (\$)
<i>v</i>	rüzgar hızı (m/s)
<i>v_m</i>	ortalama rüzgar hızı (m/s)
<i>v_i</i>	açma hızı (m/s)
<i>v_o</i>	kesme hızı (m/s)
<i>v_r</i>	nominal hız (m/s)
<i>T</i>	zaman (s)
<i>ρ</i>	hava yoğunluğu (kg/m ³)
<i>Γ</i>	gama fonksiyonu
<i>σ</i>	standart sapma

GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları tüm dünya için gelecekteki yaşamın bir anahtarı olarak kabul edilmektedir. 1990'lı yıllarda dünya gündeminde daha fazla yer almaya başlayan küresel ısınma ve çevre duyarlılığıyla da yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanımı ve yaygınlaştırılması amacıyla politikalar oluşturulmaya başlanmıştır. Yenilenebilir enerjilerin diğer enerji türleri gibi bitip tükenme riskleri yoktur, sonsuzdurlar. Rüzgar enerjisi yurtdışından bağımsız, doğaya ve insan sağlığına zarar vermeyen, doğal ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir (Erdoğan, 2009, Seydioğulları, 2013).

Türkiye coğrafi özelliklerinden dolayı özellikle Marmara Bölgesi, Ege Bölgesi ile Güneydoğu Anadolu kıyılarında önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir. Marmara Bölgesi 3,29 m/s, Güneydoğu Anadolu Bölgesi 2,69 m/s ve Ege Bölgesi 2,65 m/s yıllık ortalama rüzgar hızlarına sahiptir. Marmara Bölgesi'nde yıllık ortalama rüzgar güç yoğunluğu ise 51,91 W/m²'dir (Dursun ve Gökçöl, 2014; İlkılıç vd., 2011). Türkiye'de, 2015 yılı sonu yıllık rüzgar enerjisi üretim miktarı 11,652 GWh'dir (İnternet, 2017a). Temmuz 2016 itibarıyla işletmede olan lisanslı rüzgar enerjisi santrallerinin (RES) kurulu gücü ise 5146,35 MW'dır (İnternet, 2017b). Ülkemizde RES'lere yönelik yapılan yatırımların önemli miktarda artmasıyla rüzgar enerjisi hızla büyüyen bir enerji kaynağı olmuştur.

Rüzgar özellikleri ve rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek için dünyada pek çok ülkede çeşitli araştırmalar ve çalışmalar yapılmıştır. Fyrippis vd. (2010) Yunanistan'ın Naxos adasının kuzey doğusunda kalan Koronos kasabasının rüzgar enerjisi potansiyelini araştırmışlardır. Sonuçlara göre, yıllık ortalama 7,4 m/s rüzgar hızı ve 420 W/m² rüzgar güç yoğunluğu ile lokasyon "Sınıf 7" kategorisine girmektedir. Hakim rüzgar yönü kuzeydoğu ve kuzey-kuzeydoğu yönündedir. Ouammi vd. (2010) İtalya'nın kuzey batısında Liguria bölgesinde bulunan dört farklı meteoroloji istasyonundan (Capo Vado, Casoni, Fontana Fresca ve Monte Settepani) 2002-2008 yılları arası elde edilen rüzgar verilerini kullanarak rüzgar karakteristiklerinin aylık ve sezonluk değişimini araştırmışlardır. Sonuçlara göre, Capo Vado 10 m

yükseklikte aylık ortalama 2,80 m/s ile 9,98 m/s arasında değişen rüzgar hızları ile en iyi lokasyondur. Ahmed (2011) Mısır'da, Kızıl Deniz kıyısında Ras Ghareb bölgesinde 2000-2005 yılları arasında ölçülen verileri kullanarak rüzgar analizi yapmıştır. Yıllık ortalama rüzgar hızları 10 m ve 24,5 m yükseklikler de 8,3 m/s ile 9,8 m/s arasında değişmektedir. Analiz sonuçlarına göre Ras Ghareb lokasyonu elektrik üretimi için uygundur. Shu vd. (2015) beş farklı meteoroloji istasyonunda 6 yıl boyunca kaydedilen rüzgar verilerini kullanarak Hong Kong bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyeli ve rüzgar karakteristiklerinin istatistiksel analizini yapmışlardır. Sonuçlara göre, yıllık Weibull ölçek parametresi 2,85-10,19 m/s ve şekil parametresi 1,65-1,99 arasında değişmektedir. Bununla beraber maksimum rüzgar güç yoğunluğu 915,23 W/m² ile Tai Mo Shan İstasyonunda elde edilirken, Hong Kong İstasyonunda minimum güç yoğunluğu elde edilmiştir. Ammari vd. (2015) Ürdün'de beş farklı lokasyonda rüzgar analizi yapmışlardır. Rüzgar hızı ve güç yoğunluğu yıllık ortalama Ras Moneef'de 5,5 m/s ve 160 W/m², Azraq South'da 4,0 m/s ve 175 W/m², Safawi'de 4,5 m/s ve 94 W/m², Queen Alia Havaalanında 3,13 m/s ve 31 W/m² ve Aqaba Havaalanında 6,0 m/s ve 215 W/m² olarak elde edilmiştir. Falezpour vd. (2015) İran'da Tabriz ve Ardabil şehirlerinin rüzgar enerjisi potansiyelini ve ekonomisini değerlendirmişlerdir. 10 m yükseklikte 6 yıl boyunca elde edilen verilerle saatlik, günlük, sezonluk, aylık ve yıllık rüzgar hız değişimlerini analiz etmişlerdir. Sonuçlar göstermektedir ki, en yüksek rüzgar güç potansiyeli Tabriz'de Ağustos ve Haziran'da, Ardabil'de ise Ekim ve Eylül aylarında elde edilmektedir.

Rüzgar enerjisi uygulamaları bakımından son derece uygun bölgelere sahip ülkemizde de birçok araştırma yapılmıştır. Uçar ve Balo (2009a) Türkiye'de altı farklı lokasyonun rüzgar karakteristiklerini analiz etmişlerdir. Çalışmalarında 2000-2006 yılları arasındaki rüzgar verilerini kullanmışlardır. 10 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgar hızları Erzurum, Elazığ, Bingöl, Kars, Manisa, Niğde için sırasıyla; 8,7, 8,5, 5,9, 6,9, 7,4 ve 8,0 m/s olarak elde edilmiştir. Tüm istasyonlar için dört farklı türbin seçerek kapasite faktörü ve yıllık enerji üretimini hesaplamışlardır. Onat ve Ersöz (2011) Samandağ, Amasra ve Güney bölgeleri için iki farklı yazılım kullanarak rüzgar özellikleri ve enerji potansiyelini belirlemişlerdir. Bu bölgelerde kurulacak bir rüzgar çiftliğinin enerji üretimi ve kapasite kullanım oranlarını tahmin etmişlerdir. Sonuç olarak, rüzgarın güvenilirliği, rüzgar potansiyelinin dağılımı ve kapasite kullanım oranları açısından seçilen alanların rüzgar santrallerinin kurulması için iyi bir konumda olduğunu belirtmişlerdir. Öner vd. (2013) Çanakkale İncebe bölgesi için rüzgar enerjisi potansiyelini araştırmışlardır. 2009-2010 yılları arasındaki hakim rüzgar yönü, hızı ve sıklık dağılımı verileri kullanılarak ortalama rüzgar hızı ve potansiyel enerji üretimi belirlenmiştir. Yıllık ortalama rüzgar hızı 4,26 m/s ve güç yoğunluğu 115,5 W/m² olarak elde edilmiş ve analize göre en sık rüzgar hızının yüksek değerinde olduğu belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre olası bir rüzgar çiftliği tasarımı gerçekleştirilmiştir. Küçükali ve Dinçkal (2014) Türkiye'nin Batı Karadeniz

Kıyı Bölgesini kapsayan çalışmalarında 50 m yükseklikte ölçüm direği ile toplanan rüzgar verilerinin istatistiksel analizini yapmışlardır. Rüzgar hızı ölçümleri kullanılarak üç farklı rüzgar türbininin enerji üretim performansını değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak %17-34 arasında türbin tipine bağlı olarak kapasite faktöründe artış olabileceğini hesaplamışlardır. Bilir vd. (2015) Ankara Atılım Üniversitesi Kampüs alanına kurulan bir meteoroloji istasyonunda bir yıl süreyle 20 m ve 30 m yükseklikte ölçülen rüzgar hız verilerini analiz etmişlerdir. Bölgenin enerji ve güç yoğunluğu sezonluk ve aylık olarak hesaplanmıştır. Maksimum güç yoğunluğu 98 W/m² ile Mart ayı için elde edilmiştir. Üç farklı türbin seçilerek yapılan değerlendirmede, küçük ölçekli rüzgar türbin kurulumunun bölgeye daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Aslan vd. (2016) Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü rüzgar enerjisi potansiyelini araştırmışlardır. Deneysel sistem 2013 yılı Haziran ayında devreye alınarak 17 Temmuz 2013 tarihinden 17 Temmuz 2014 tarihine kadar 20 m ile 76 m arasında değişen beş farklı yükseklikte rüzgar hızı verileri kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yıllık ortalama rüzgar hızı 5,276 m/s ile 4,640 m/s arasında, yıllık ortalama güç yoğunluğu 175 W/m² ile 97 W/m² arasında değişmektedir. Hakim rüzgar yönü kuzey ve kuzey batı yönlerindedir. 50 m'de yıllık ortalama güç yoğunluğu 145 W/m²'dir. Mevcut literatürde görüldüğü gibi, yapılan çalışmalar genellikle Türkiye'nin farklı bölgelerinde rüzgar enerjisi potansiyelini ve özelliklerini belirlemeye yöneliktir. Özellikle uygun türbin performansı belirlenmesi için teknik ve ekonomik analizlerin birlikte uygulandığı kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamış olması, böyle bir çalışmanın gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

Balıkesir, Marmara Bölgesi'nin Güney Marmara Bölümü'nde, topraklarının bir kısmı ise Ege Bölgesi'nde yer alan ve hem Marmara hem de Ege Denizi'ne kıyısı bulunan bir ildir. Temmuz 2016 yılı itibariyle 969,75 MW kurulu güce sahip Balıkesir ili Türkiye'de rüzgar enerjisi alanında birinci sıradadır. Balıkesir ilinin sahip olduğu bu kurulu güç, Türkiye'nin toplam rüzgar enerjisi kurulu gücünün %18,84'ünü oluşturmaktadır (İnternet, 2017b). Bu çalışmada Balıkesir ili genelinde rüzgar enerjisi potansiyeli ve rüzgar özellikleri araştırılmıştır. Bunun için 11 farklı lokasyonda (Bandırma, Edremit, Akçaldede (Balya), Ayvalık, Erdek, Gönen, Bigadiç, Manyas, Dursunbey, Susurluk ve Burhaniye) 2011-2015 yılları arasındaki rüzgar verileri analiz edilmiştir. Bölgedeki en iyi lokasyon ve en uygun türbin kapasitesini belirlemek amacıyla teknik ve ekonomik analizler birlikte kapsamlı bir şekilde yapılmıştır. Rüzgar enerjisi santrali kurulmasının uygun bulunduğu lokasyonlar için beş farklı rüzgar türbininin performansı karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma enerji maliyet tahmini (C), net şimdiki değer (NPV), fayda maliyet oranı (BCR), geri ödeme süresi (PBP), ve iç karlılık oranı (IRR) gibi ekonomik analizler temelinde gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber, türbinlerin minimum ve maksimum göbek yükseklikleri için sonuçlar ayrı ayrı hesaplanıp, göbek yüksekliğinin türbin performansına etkisi görülmüştür. Bu kapsamda çalışmanın bölgede yapılan

araştırmaların geliştirilmesine ve literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

MATERYAL VE METOT

Rüzgar Verileri

Bu çalışmada Balıkesir ilinde aktif olan meteoroloji istasyonlarından temin edilen ve beş yıl boyunca 2011-2015 yılları arasında saatlik ölçülen rüzgar hız verileri analiz edilmiştir. 10 m yükseklikte ölçülen tüm veriler Ankara Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. İstasyonlara ait bilgiler Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Meteoroloji istasyonlarının koordinatları.

İstasyon	Enlem	Boylam
Bandırma	40° 19' 52"	27° 59' 45"
Edremit	39° 35' 22"	27° 01' 09"
Akçaldede	39° 42' 00"	27° 36' 00"
Ayvalık	39° 31' 13"	26° 68' 61"
Erdek	40° 39' 72"	27° 78' 85"
Gönen	40° 11' 35"	27° 64' 26"
Bigadiç	39° 39' 95"	28° 12' 06"
Manyas	40° 04' 71"	27° 97' 48"
Dursunbey	39° 57' 78"	28° 63' 22"
Susurluk	39° 91' 73"	28° 16' 47"
Burhaniye	39° 49' 83"	26° 97' 55"

Weibull ve Rayleigh Dağılım Fonksiyonları

Rüzgar hızı verilerini tanımlamak için kullanılan en yaygın dağılım fonksiyonları Weibull ve Rayleigh fonksiyonlarıdır. Weibull dağılımı genel olarak ölçek ve şekil parametresi olmak üzere iki parametrelili bir dağılımdır. Rayleigh dağılımı ise şekil parametresinin 2,0 olduğu Weibull dağılımının özel bir örneğidir (Johnson, 2001).

Weibull dağılımının genel ifadesi aşağıdaki gibidir (Adaramola ve Oyewola, 2001; Akpınar, 2006);

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

burada v rüzgar hızı, c Weibull ölçek parametresi ve k ise Weibull şekil parametresidir. Enerji potansiyelinin belirlenmesi için öncelikle Weibull parametrelerinin bulunması gereklidir. Bunun için çeşitli yöntemler olmasına rağmen bu çalışmada, Weibull parametreleri ortalama rüzgar hızı ve standart sapma değerleri kullanılarak moment metodu ile elde edilmiştir (Uçar ve Balo, 2009b; Gökçek vd., 2007; Mohammadi ve Mostafaeipour, 2013a). Buna göre Weibull parametreleri k ve c değerleri,

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1.086} \quad 1 \leq k \leq 10 \quad (2)$$

$$c = \frac{v_m}{\Gamma(1 + 1/k)} \quad (3)$$

ifadeleri ile bulunabilir. Burada v_m ve σ sırasıyla ortalama rüzgar hızı ve standart sapmadır. Aşağıdaki eşitlikler yardımıyla bulunabilirler.

$$v_m = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n v_i \right] \quad (4)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - v_m)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$\Gamma()$, gama fonksiyonudur ve herhangi bir y değeri için aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} \exp(-x) x^{y-1} dx \quad (6)$$

Rayleigh dağılımı ise aşağıdaki eşitlik yardımıyla bulunabilir (Uçar ve Balo, 2009b; Gökçek vd., 2007):

$$f_R(v) = \frac{\pi v}{2v_m^2} \exp \left[- \left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{v}{v_m} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Rüzgar Güç Yoğunluğu

Bilindiği gibi, kanat süpürme alanı A olan bir rüzgar türbininin v hızında meydana getireceği rüzgar gücü potansiyeli,

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (8)$$

şeklinde ifade edilir. Ortalama rüzgar gücü yoğunluğu en genel halde aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$\frac{P(v)}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \quad (9)$$

burada ρ havanın yoğunluğudur ve $1,225 \text{ kg/m}^3$ olarak alınır. Weibull dağılımı için ortalama güç yoğunluğu aşağıdaki gibi elde edilir (Islam vd., 2011, Mohammadi ve Mostafaeipour, 2013a; Eskin vd., 2008):

$$\frac{P_W}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (10)$$

Kapasite Faktörü ve Üretilen Enerji Miktarı

Bir rüzgar türbinin performansını değerlendirmek için kapasite faktörü önemli göstergelerden birisidir. Kapasite faktörü (C_f), rüzgar türbininin çıkış gücünün (P_{out}) nominal gücüne (P_R) oranını temsil eder. Rüzgar

türbininin kapasite faktörü aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Mohammadi ve Mostafaeipour, 2013a; Akpınar ve Akpınar, 2005);

$$C_f = \frac{P_{out}}{P_R} = \frac{e^{-(v_i/c)^k} - e^{-(v_r/c)^k}}{(v_r/c)^k - (v_i/c)^k} - e^{-(v_o/c)^k} \quad (11)$$

denklemden sırasıyla, v_i , v_r ve v_o açma rüzgar hızı, nominal hız ve kesme rüzgar hızıdır. Herhangi bir (T) zaman periyodu için rüzgar türbininden elde edilen enerji aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$E_{out} = C_f P_R T \quad (12)$$

$T=d.24$ ve d gün sayısıdır. Bu çalışmada gün sayısı 365 alınmıştır.

Ekstrapolasyon Yöntemi

Eğer rüzgar hızı ve Weibull parametreleri belirli bir yükseklik için biliniyorsa, farklı yükseklikler için aşağıdaki ifadeler kullanılarak hesaplanabilir (Eskin vd., 2008; Mohammadi ve Mostafaeipour, 2013b);

$$\frac{v_h}{v_o} = \left(\frac{h}{h_o} \right)^n \quad (13)$$

$$k_h = k_o \left[1 - 0.088 \ln \left(\frac{h_o}{10} \right) \right] / \left[1 - 0.088 \ln \left(\frac{h}{10} \right) \right] \quad (14)$$

$$c_h = c_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^n \quad (15)$$

denklemden h_o bilinen yükseklik, c_o bilinen Weibull ölçek parametresi ve k_o ise bilinen Weibull şekil parametresidir. Üs olan n değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$n = [0.37 - 0.088 \ln(c_o)] / \left[1 - 0.088 \ln \left(\frac{h}{10} \right) \right] \quad (16)$$

Hata Analizi

Bu çalışmada kullanılan yöntemler iki farklı hata hesabı formülü ile analiz edildi. Bunlardan ilki R -kare hata formülüdür (Arslan, 2010):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (17)$$

İkinci hata formülü $RMSE$ 'dir;

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \right]^{0.5} \quad (18)$$

burada n gözlem sayısı, y 'ler gerçek değerler, x 'ler Weibull veya Rayleigh dağılımı ile hesaplanan değerler ve \bar{y} ortalama gerçek değerdir. R -kare değeri büyük ya da $RMSE$ değeri küçük dağılım fonksiyonu en iyi dağılım fonksiyonu olarak kabul edilir.

Ekonomik Analiz

Bu çalışmada, rüzgar türbininin enerji maliyetinin hesaplanmasında aşağıdaki prosedür takip edilmiştir (Mathew, 2006; Mohammadi ve Mostafaepour, 2013b). C_I projenin ilk yatırım maliyeti, C_{OM} operasyon ve bakım maliyeti olarak düşünüldüğünde; C_{OM} , C_I değerinin m kadar yüzdesi olarak ifade edilebilir:

$$C_{OM} = mC_I \quad (19)$$

Türbinin n yıllık ömrü için, operasyon ve bakım maliyetleri iskonto değerinin bugünkü değeri (present value- PV) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$PV(C_{OM})_{1-n} = mC_I \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \quad (20)$$

denklemden I , reel iskonto oranıdır ve aşağıdaki gibi faiz (i) ve enflasyon (r) oranları yardımıyla hesaplanabilir:

$$1+I = \frac{1+i}{1+r} \quad (21)$$

İlk yatırım C_I dahil olmak üzere, tüm masrafların birikmiş net bugünkü değeri (net present value- NPV) ise aşağıdaki gibidir:

$$NPV(C_A)_{1-n} = C_I \left\{ 1 + m \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \right\} \quad (22)$$

Bir sonuç olarak, projenin yıllık operasyon maliyeti aşağıdaki denklemden elde edilebilir:

$$NPV(C_A) = \frac{NPV(C_A)_{1-n}}{n} = \frac{C_I}{n} \left\{ 1 + m \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \right\} \quad (23)$$

Bir yılda türbinden elde edilen enerji miktarı ise aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$E_{out} = 8760P_R C_f \quad (24)$$

Rüzgardan üretilen elektriğin maliyeti para/kWh cinsinden aşağıdaki denklem ile elde edilebilir:

$$C = \frac{NPV(C_A)}{E_{out}} = \frac{C_I}{8760n} \left(\frac{1}{P_R C_f} \right) \left\{ 1 + m \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \right\} \quad (25)$$

Rüzgar enerjisinin faydaları ise enerji üretim maliyeti esas alınarak değerlendirilir. Proje elektrik satış yoluyla yılda B_A kadar bir yarar elde ederse, o zaman projenin ömrü boyunca tüm faydaların birikmiş net bugünkü değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$NPV(B_A)_{1-n} = B_A \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \quad (26)$$

Net bugünkü değer (Net present value- NPV), projenin nakit girişlerinin bugünkü değeri ile nakit çıkışlarının bugünkü değeri arasındaki farka eşittir. NPV 0'dan büyükse, proje ekonomik açıdan kabul edilebilir. Net bugünkü değer aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$NPV = B_A \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] - \left\{ C_I \left[1 + m \left(\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right] \right\} \quad (27)$$

Fayda maliyet oranı (Benefit cost ratio- BCR), tüm faydaların birikmiş bugünkü değerinin, başlangıçtaki yatırım da dahil olmak üzere, tüm maliyetlerin birikmiş bugünkü değerine oranıdır. BCR 1'den büyükse bir proje kabul edilebilir. BCR aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$BCR = \frac{B_A \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right]}{C_I \left[1 + m \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \right]} \quad (28)$$

Geri ödeme süresi (Payback period- PBP), tüm maliyetlerin net bugünkü değeri ile tüm faydaların net bugünkü değerinin eşit olduğu süre olarak hesaplanır. Bu noktada türbin projesi yatırımcıya kar sağlamaya başlar. PBP aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$PBP = - \frac{\ln \left(1 - \frac{IC_I}{B_A - mC_I} \right)}{\ln(1+I)} \quad (29)$$

İç karlılık oranı (Internal rate of return- IRR), projenin net bugünkü değerini sifıra eşit kılan indirgeme oranıdır. IRR aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir:

$$B_A \left[\frac{(1 + IRR)^n - 1}{IRR(1 + IRR)^n} \right] = \left\{ C_I \left[1 + m \left(\frac{(1 + IRR)^n - 1}{IRR(1 + IRR)^n} \right) \right] \right\} \quad (30)$$

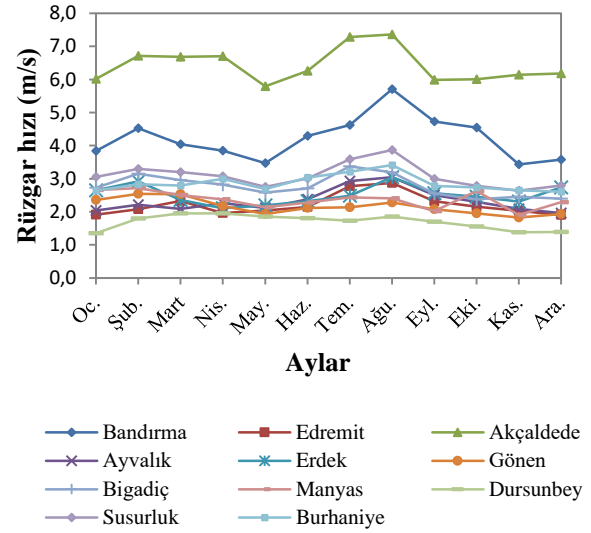
IRR, Newton-Raphson yöntemi veya deneme yanılma yöntemi gibi teknikler kullanılarak çözülebilir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Balıkesir ili sınırları içinde 11 farklı meteoroloji istasyonundan 2011-2015 yılları arasında elde edilen rüzgar hız verileri analiz edilmiştir. Şekil 1'de Bandırma, Edremit, Akçaldede, Ayvalık, Erdek, Gönen, Bigadiç, Manyas, Dursunbey, Susurluk ve Burhaniye istasyonlarına ait 2011-2015 yılları arası 5 yıllık ortalama rüzgar hızı aylık dağılımı verilmiştir. En yüksek ortalama hız Akçaldede'de, daha sonra Bandırma'da elde edilmiştir. Bunu Susurluk, Bigadiç, Burhaniye ve diğer lokasyonlar izlemektedir. Şekilden rüzgar hızlarının Ağustos ayında en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Beş yıllık ortalama sonuçlara göre maksimum rüzgar hızı 7,36 m/s ile Ağustos ayında Akçaldede'de ve minimum rüzgar hızı 1,35 m/s ile Ocak ayında Dursunbey'de elde edilmiştir.

2011-2015 yılları arası ortalama rüzgar hızı ve hesaplanan Weibull parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablodan en yüksek ortalama rüzgar hızının 6,42 m/s ile Akçaldede'de en düşük ortalama rüzgar hızının ise 1,69 m/s ile Dursunbey'de elde edildiği görülmektedir. Weibull şekil parametresi k değeri 1,68 ile 1,16 aralığında değişirken, Dursunbey'de 1 den küçük değer elde edilmiştir. Weibull ölçek parametresi c değeri ise 6,66 m/s ile 1,50 m/s aralığında değişmektedir.

Şekil 2'de Bandırma, Edremit, Akçaldede, Ayvalık, Erdek, Gönen, Bigadiç, Manyas, Dursunbey, Susurluk ve Burhaniye istasyonlarına ait rüzgar hızlarının frekans dağılımları gösterilmiştir. Weibull ve Rayleigh olasılık dağılımının değerleri (1) ve (7) eşitlikleri ile kullanılarak elde edilmiştir. Weibull ve Rayleigh dağılımları karşılaştırıldığında Weibull dağılımının gerçek dağılıma daha yakın olduğu görülmektedir.

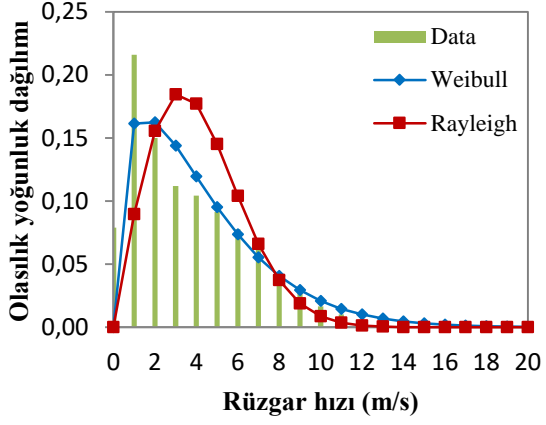


Şekil 1. Rüzgar hızının aylık dağılımı.

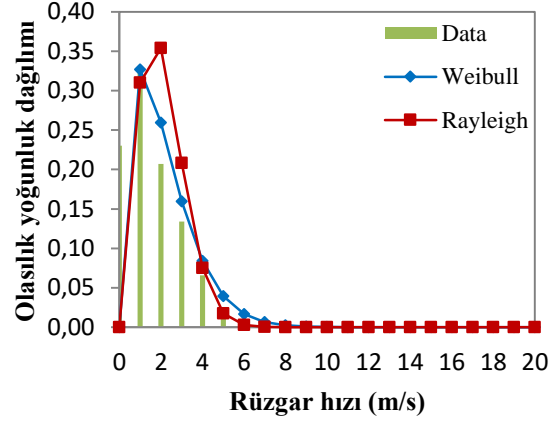
Tablo 2. 2011-2015 yılları arası ortalama rüzgar karakteristikleri.

İstasyon	Ortalama rüzgar hızı	Standart sapma	Weibull parametresi	Weibull parametresi
	v_m (m/s)	σ (m/s)	k	c (m/s)
Bandırma	4,22	3,19	1,31	4,43
Edremit	2,21	1,47	1,43	2,26
Akçaldede	6,42	4,76	1,32	6,66
Ayvalık	2,32	1,57	1,43	2,40
Erdek	2,51	1,89	1,39	2,79
Gönen	2,15	1,69	1,20	2,13
Bigadiç	2,77	2,36	1,16	2,85
Manyas	2,36	2,02	1,17	2,48
Dursunbey	1,69	1,59	<1	1,50
Susurluk	3,08	1,97	1,61	3,41
Burhaniye	2,86	1,80	1,68	3,24

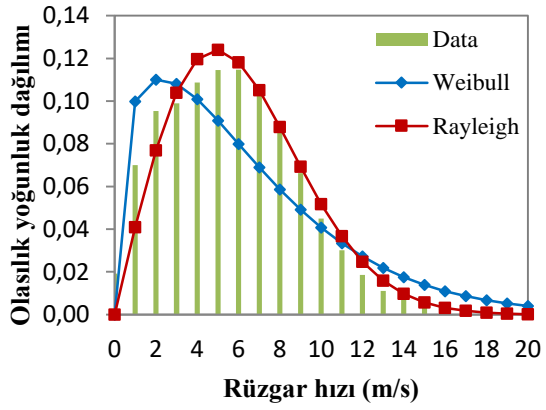
(17) ve (18) numaralı denklemleri kullanarak tüm istasyonlar için R^2 ve $RMSE$ değerleri elde edilmiştir. Weibull dağılımı için en yüksek R^2 , 0,92428 ile Burhaniye'de, Rayleigh dağılımı için en iyi en yüksek R^2 , 0,95204 ile Akçaldede'de elde edilirken, Weibull dağılımı için en düşük $RMSE$, 0,0178 ile Akçaldede'de, Rayleigh dağılımı için en düşük $RMSE$, 0,0099 ile Akçaldede'de elde edilmiştir. R^2 büyükse veya $RMSE$ küçük ise dağıtım fonksiyonu en iyi dağılım fonksiyonu olarak kabul edilir. Akçaldede istasyonundan elde edilen veriler Weibull ve Rayleigh modeline en uygundur. Bununla birlikte her iki fonksiyonun değerleri kabul edilebilir sınırlardadır.



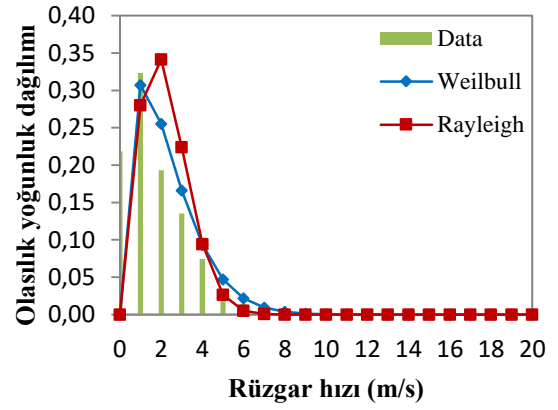
(a) Bandırma



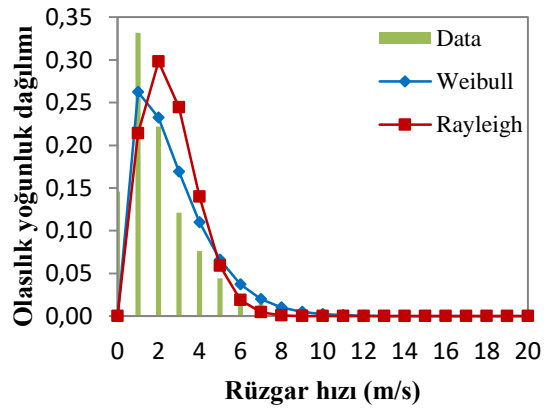
(b) Edremit



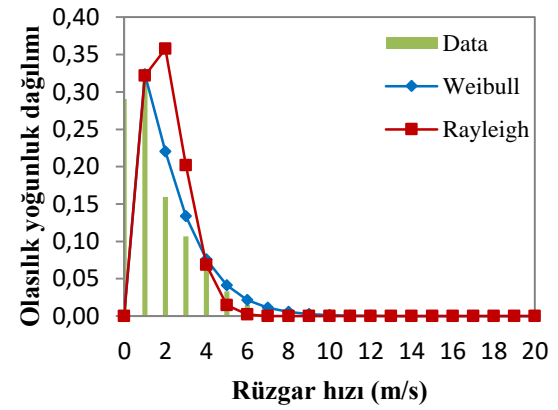
(c) Akçaldede



(d) Ayvalık

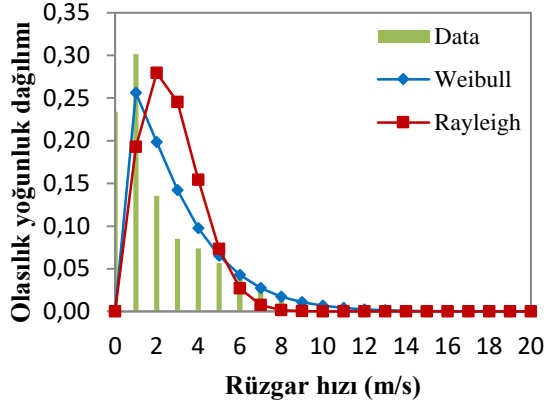


(e) Erdek

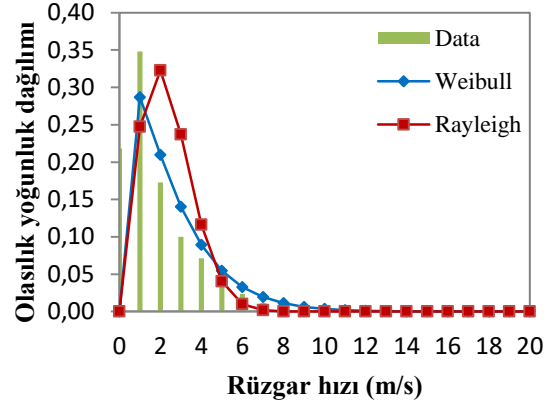


(f) Gönen

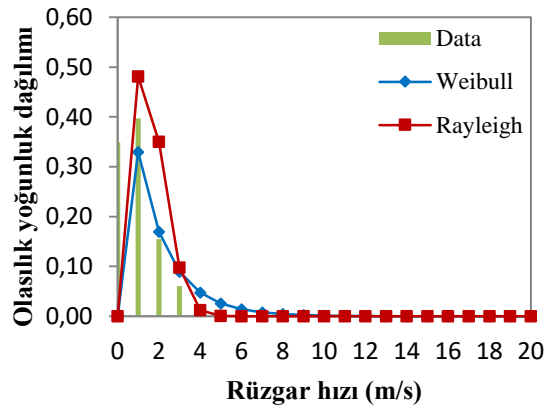
Şekil 2. Ölçümlerden elde edilen veriler ile Weibull ve Rayleigh dağılımlarının karşılaştırılması.



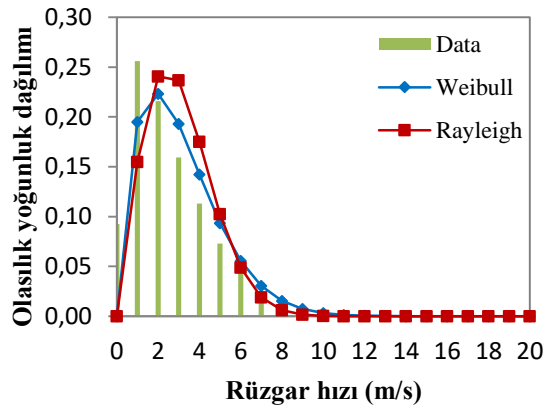
(g) Bigadiç



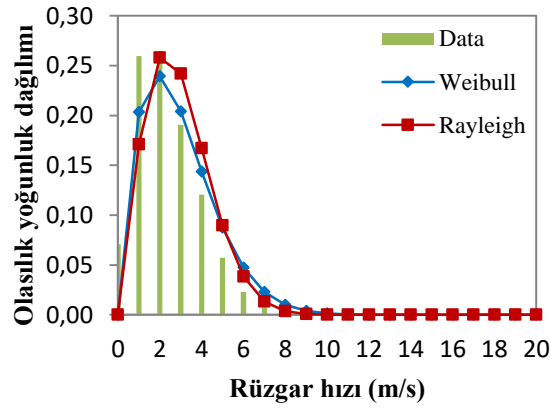
(h) Manyas



(i) Dursunbey



(j) Susurluk

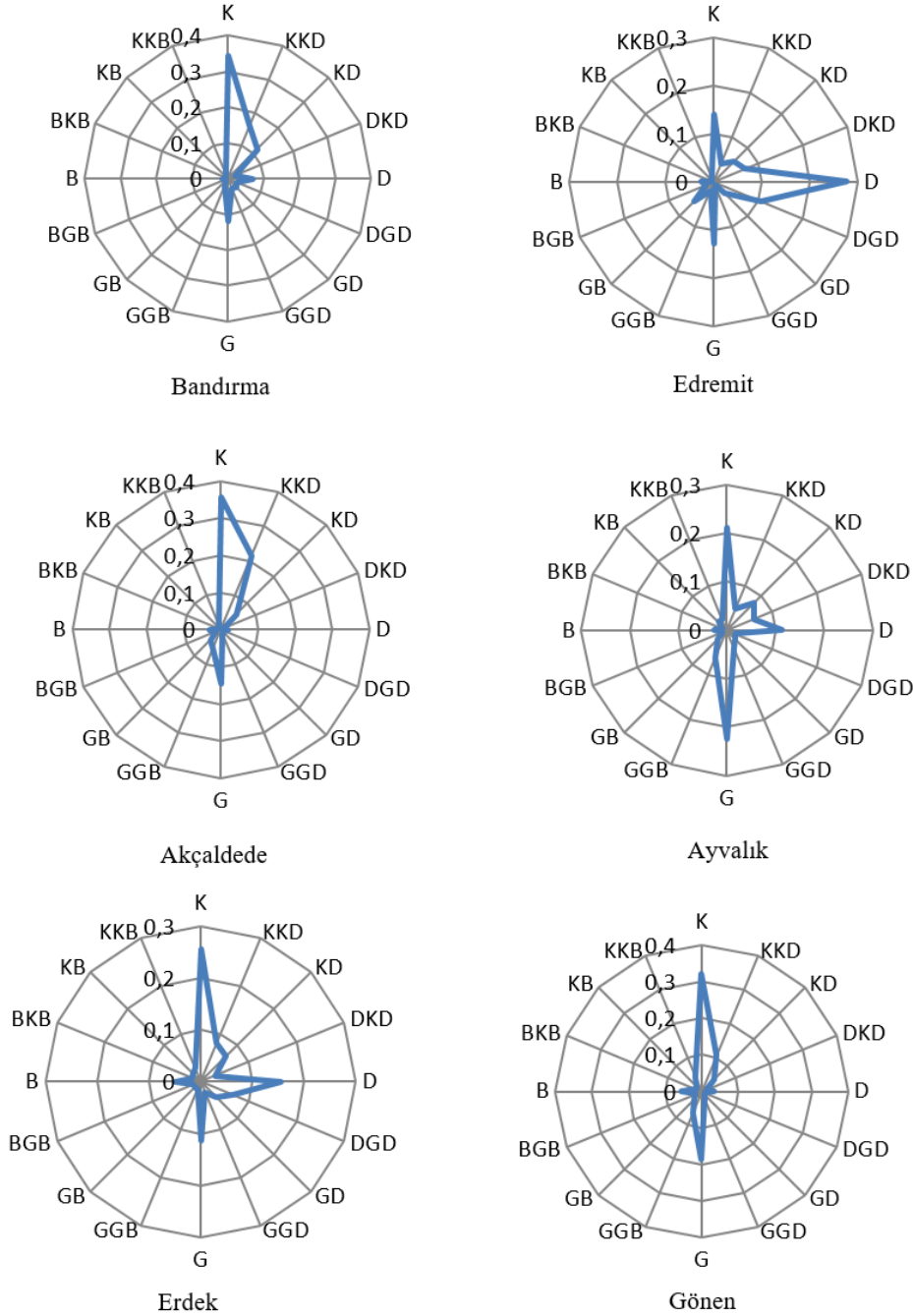


(k) Burhaniye

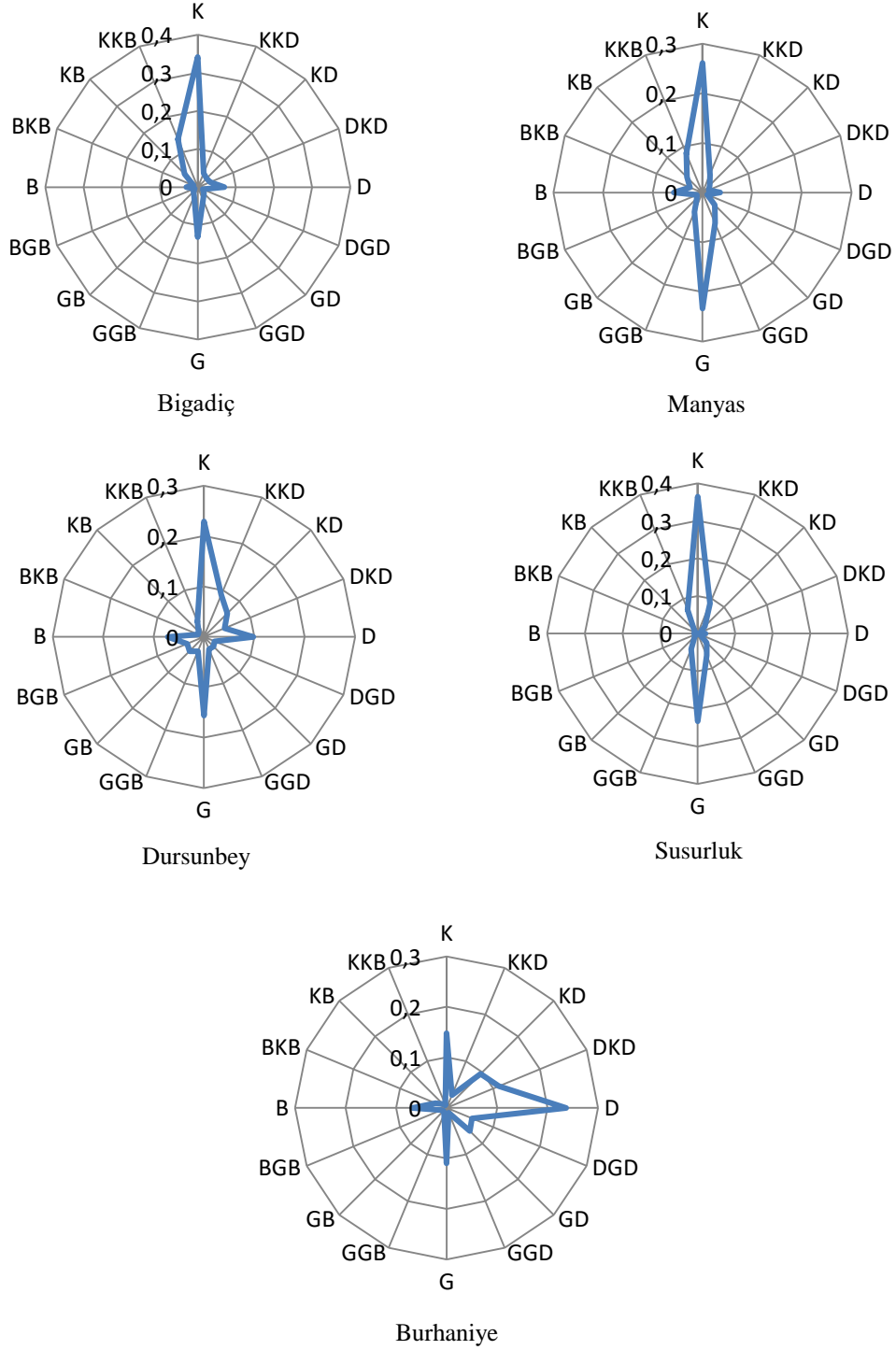
Şekil 2. (Devamı) Ölçümlerden elde edilen veriler ile Weibull ve Rayleigh dağılımlarının karşılaştırılması.

Rüzgar enerjisi potansiyellerinin değerlendirmesinde rüzgar hızı kadar rüzgar yönü bilgisi de önemlidir. Şekil 3'te Bandırma, Edremit, Akçaldede, Ayvalık, Erdek, Gönen, Bigadiç, Manyas, Dursunbey, Susurluk ve Burhaniye istasyonlarına ait rüzgar yön dağılımları gösterilmiştir. Hakim rüzgar yönleri; Bandırma'da %34 K (0°) ve %16 KKD (22,5°), Edremit'te %27 D (90°) ve %14 K (0°), Akçaldede'de %36 K (0°) ve %22 KKD (22,5°), Ayvalık'ta %22 G (270°) ve %21 K (0°),

Erdek'te %26 K (0°) ve %15 D (90°), Gönen'de %32 K (0°) ve %11 KKD (22,5°), Bigadiç'te %34 K (0°) ve %13 G (270°), Manyas'ta %26 K (0°) ve %23 G (270°), Dursunbey'de %23 K (0°) ve %16 G (270°), Susurluk'ta %36 K (0°) ve %23 G (270°), ve Burhaniye'de %24 D (90°) ve %15 K (0°) olarak belirlenmiştir. Tüm lokasyonlarda ağırlıklı olarak hakim rüzgar yönünün K (0°) ve KKD (22,5°) olduğu görülürken, en zayıf rüzgar yönünün ise B (180°) olduğu görülmektedir.



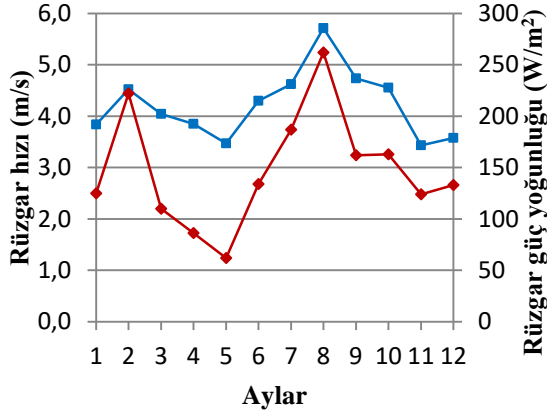
Şekil 3. Rüzgar yön dağılımı.



Şekil 3. (Devamı) Rüzgar yön dağılımı.

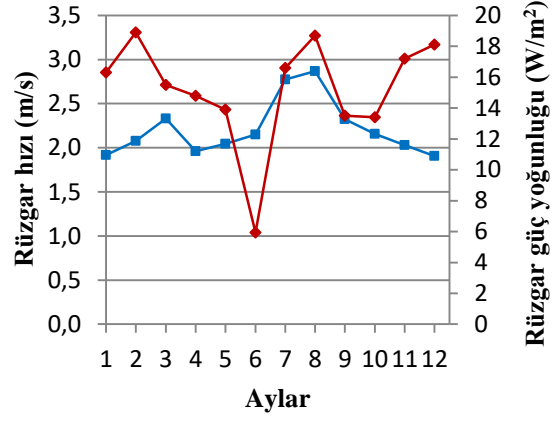
Şekil 4'te Bandırma, Edremit, Akçaldede, Ayvalık, Erdek, Gönen, Bigadiç, Manyas, Dursunbey, Susurluk ve Burhaniye istasyonlarına ait rüzgar hız ve güç yoğunluğunun aylık dağılımları birlikte verilmiştir. En yüksek aylık ortalama rüzgar gücü potansiyeli Akçaldede istasyonundan 859 W/m^2 (Ağustos) olarak elde

edilmiştir. Bunu 262 W/m^2 (Ağustos) ile Bandırma istasyonu, $91,5 \text{ W/m}^2$ (Ocak) ile Bigadiç istasyonu ve $81,9 \text{ W/m}^2$ (Ağustos) ile Susurluk İstasyonu ve diğerleri izlemektedir. En düşük aylık ortalama rüzgar gücü potansiyeli ise $12,2 \text{ W/m}^2$ (Temmuz) ile Dursunbey istasyonundan elde edilmiştir.



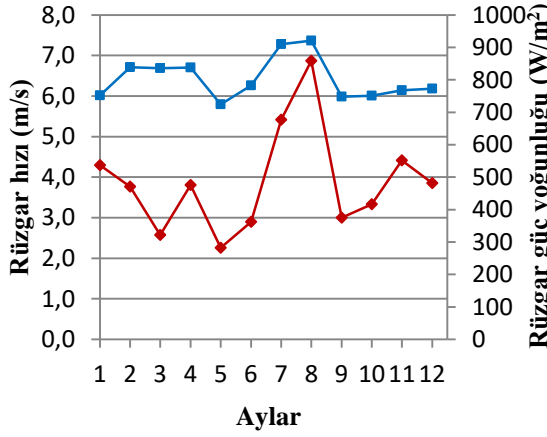
— Rüzgar hızı — Rüzgar güç yoğunluğu

(a) Bandırma



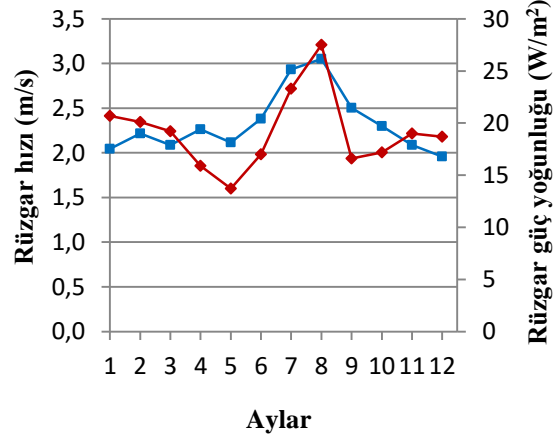
— Rüzgar hızı — Rüzgar güç yoğunluğu

(b) Edremit



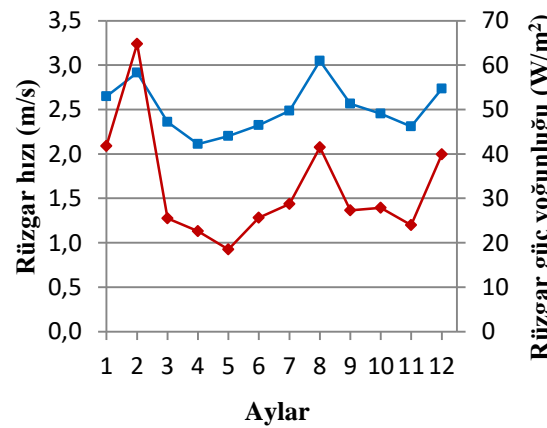
— Rüzgar hızı — Rüzgar güç yoğunluğu

(c) Akçaldede



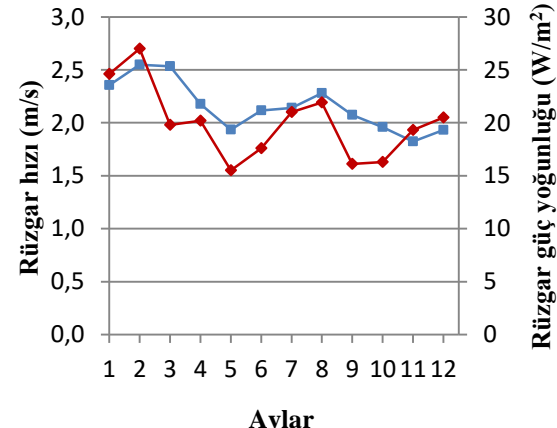
— Rüzgar hızı — Rüzgar güç yoğunluğu

(d) Ayvalık



— Rüzgar hızı — Rüzgar güç yoğunluğu

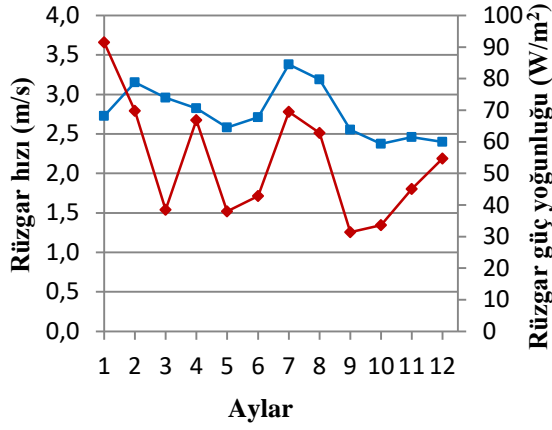
(e) Erdek



— Rüzgar hızı — Rüzgar güç yoğunluğu

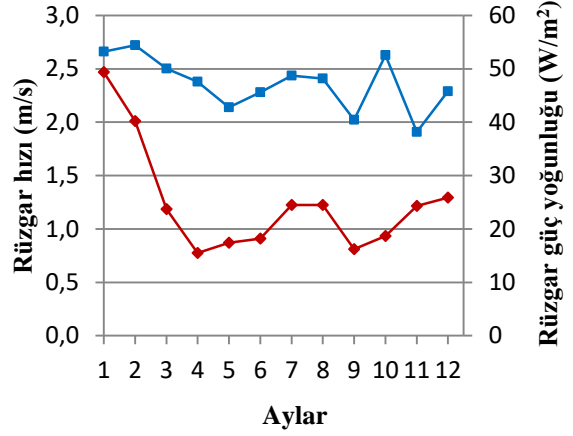
(f) Gönen

Şekil 4. Rüzgar hız ve güç yoğunluğunun aylık dağılımı.



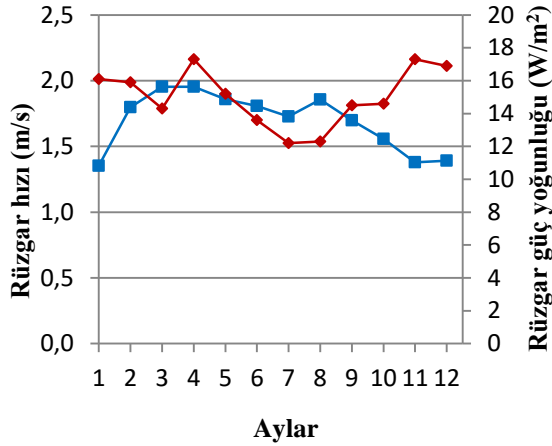
■ Rüzgar hızı ◆ Rüzgar güç yoğunluğu

(g) Bigadiç



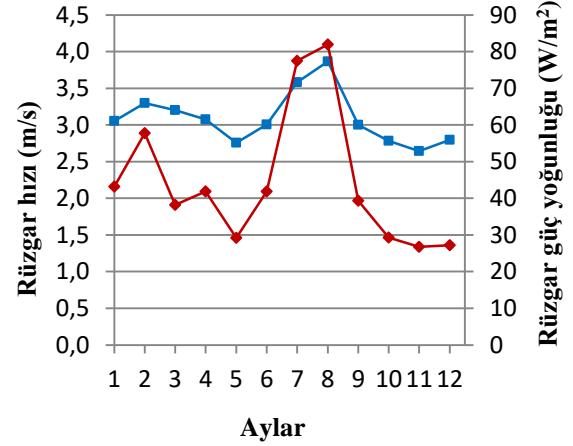
■ Rüzgar hızı ◆ Rüzgar güç yoğunluğu

(h) Manyas



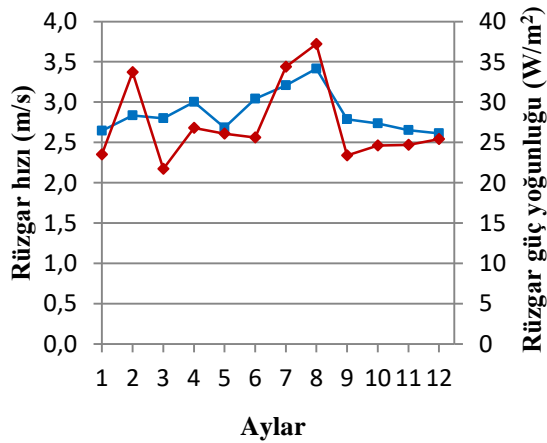
■ Rüzgar hızı ◆ Rüzgar güç yoğunluğu

(i) Dursunbey



■ Rüzgar hızı ◆ Rüzgar güç yoğunluğu

(j) Susurluk



■ Rüzgar hızı ◆ Rüzgar güç yoğunluğu

(k) Burhaniye

Şekil 4. (Devamı) Rüzgar hız ve güç yoğunluğunun aylık dağılımı.

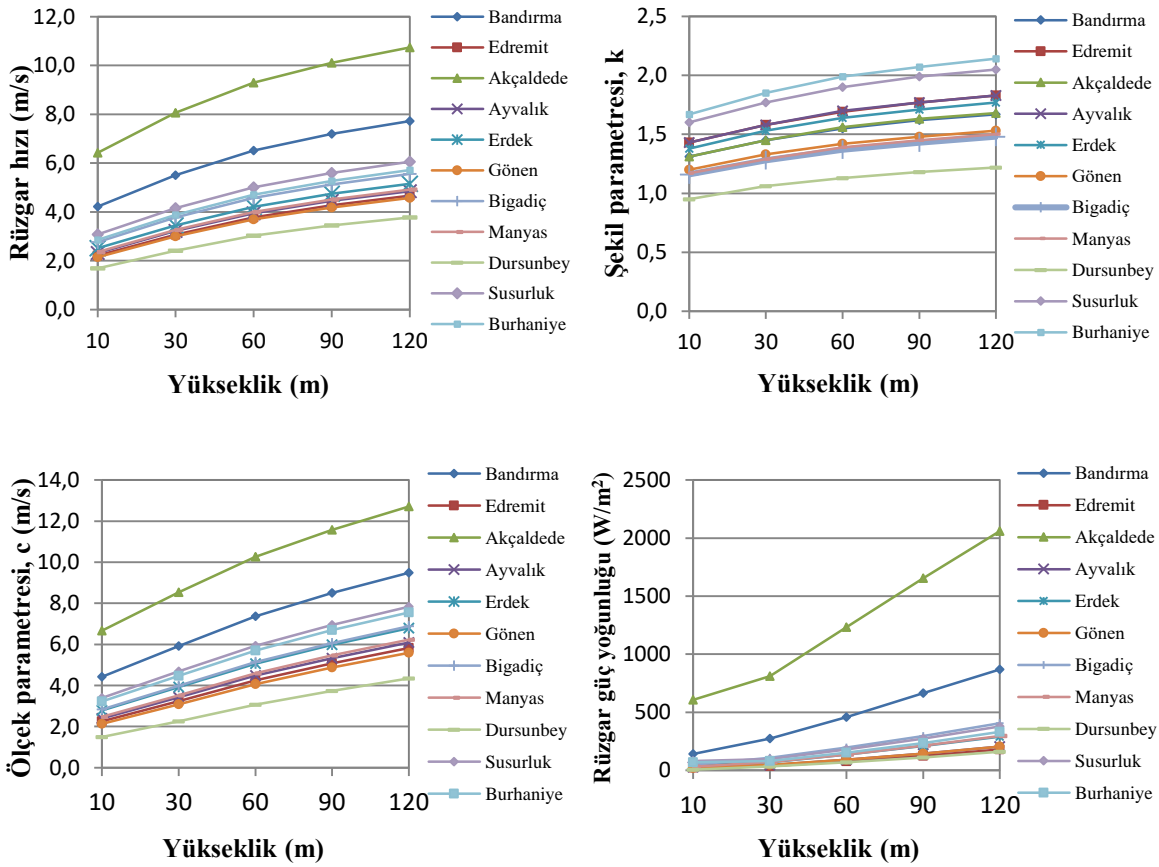
Pasifik Kuzeybatı Laboratuvarı (The Pacific Northwest Laboratory-PNL) 10 m ve 30 m yükseklikteki rüzgar hızı ve gücü sınıflandırmasına göre, en düşükten en yükseğe yedi farklı rüzgar kategorisi oluşmaktadır (Mohammadi ve Mostafaipoor, 2013b). 10 m rüzgar gücü sınıflandırması esas alındığında, Akçaldede yıllık ortalama 484.25 W/m^2 ile "Sınıf 7", Bandırma yıllık ortalama 147.50 W/m^2 ile "Sınıf 2", diğer lokasyonlar ise $\leq 100 \text{ W/m}^2$ ile "Sınıf 1" kategorisine girmektedir. Buna göre Akçaldede bölgesi mükemmel, Bandırma bölgesi orta, diğer bölgeler ise zayıf lokasyon olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmada ekonomik analiz kapsamında güçleri 1000-3000 kW arasında değişen beş farklı türbin karşılaştırılmıştır. Tablo 3'te seçilen rüzgar türbinlerinin teknik özellikleri verilmiştir.

Rüzgar türbinlerinin proje planlaması ve ekonomisini değerlendirmek için türbin göbek yüksekliğinde rüzgar hızı ve Weibull parametreleri bilgisi talep edilir. Şekil 5'te tüm lokasyonlarda rüzgar hızı, Weibull şekil ve ölçek parametreleri ve rüzgar güç yoğunluğunun 10 m de ölçülen değerler ile (13) ve (16) eşitlikleri kullanılarak ekstrapolasyon yöntemiyle hesaplanan 30 m, 60 m, 90 m ve 120 m yüksekliklerdeki değişimi gösterilmiştir.

Tablo 3. Rüzgar türbinlerinin teknik özellikleri (İnternet, 2017c).

Türbin modelleri	Nordex N54/1000	GE Energy 1.5sle	Vestas V90/2000	Nordex N90/2500	Vestas V112/3000
Nominal güç (kW)	1000	1500	2000	2500	3000
Göbek yük. (min-max) (m)	60-70	61,4-85	95-125	65-80	84-119
Açma rüzgar hızı (m/s)	3.5	3	3	3	3,5
Nominal rüzgar hızı (m/s)	15,5	15	13,5	13,5	15,5
Kesme rüzgar hızı (m/s)	25	25	25	25	25



Şekil 5. Rüzgar hızı, şekil ve ölçek parametresi ve güç yoğunluğunun yükseklikle değişimi.

Kapasite faktörü bir türbinin değerlendirilmesinde en önemli göstergelerden biridir. Tablo 4'te seçilen türbinlerin minimum ve maksimum göbek yükseklikleri için eşitlik (11) kullanılarak hesaplanan kapasite faktörü değerleri verilmiştir. En yüksek kapasite faktörü değerleri Akçaldede lokasyonu için elde edilirken, en düşük kapasite faktörü Dursunbey lokasyonu için elde edilmiştir. Tipik bir rüzgar türbininin kapasite faktörü değeri rüzgar türbininin kurulduğu yerin rüzgar kapasitesine bağlı olarak % 20 ile % 35 arasındadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, kapasite faktörü değeri % 25 ve üzeri olan bölgelere rüzgar santrali kurulmasına izin vermektedir (Köse ve Özgören, 2001). Bu nedenle bölgede Bandırma, Akçaldede, Bigadiç, Susurluk ve Burhaniye lokasyonlarında rüzgar santrali kurulması diğer lokasyonlara göre daha uygun görülmektedir.

Tablo 5'te seçilen türbinlerin minimum ve maksimum göbek yükseklikleri için eşitlik (12) kullanılarak

hesaplanan yıllık enerji üretim değerleri verilmiştir. En yüksek performans Akçaldede'de en düşük performans ise Edremit ve Dursunbey'de elde edilmiştir.

Enerji maliyetlerinin hesaplanmasında ve *NPV*, *BCR*, *PBP*, *IRR* analizlerinin yapılmasında kullanılan ekonomik veriler ve ilgili parametreler çeşitli kaynaklardan derlenerek Tablo 6'da özetlenmiştir.

Tablo 7'de enerji maliyetleri verilmiştir. Sonuçlar tüm lokasyonlarda kWh başına en düşük enerji maliyetinin Akçaldede istasyonunda 0,027 \$/kWh olarak elde edildiğini göstermektedir. Türkiye'deki elektrik satış tarifesi 0,11 \$/kWh (İnternet, 2016) olarak alındığında Akçaldede istasyonunda maksimum göbek yüksekliğinde Vestas V90 türbini için üretim maliyetini elektrik fiyatından 0,083 cent daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4. Kapasite faktörü (C_f).

	(m)	Bandırma	Edremit	Akçaldede	Ayvalık	Erdek	Gönen	Bigadiç	Manyas	Dursunbey	Susurluk	Burhaniye
N54	60	0,24	0,06	0,40	0,07	0,10	0,07	0,14	0,10	0,06	0,12	0,10
	70	0,26	0,07	0,42	0,08	0,11	0,09	0,15	0,12	0,07	0,13	0,11
GE	61,4	0,27	0,07	0,42	0,08	0,12	0,09	0,16	0,13	0,07	0,14	0,12
	85	0,31	0,10	0,47	0,11	0,15	0,12	0,19	0,16	0,10	0,18	0,15
V90	95	0,38	0,13	0,54	0,15	0,20	0,16	0,24	0,20	0,12	0,24	0,21
	125	0,43	0,18	0,58	0,19	0,24	0,20	0,29	0,24	0,16	0,29	0,26
N90	65	0,32	0,09	0,48	0,11	0,15	0,11	0,19	0,15	0,09	0,18	0,15
	80	0,35	0,11	0,51	0,13	0,18	0,13	0,27	0,18	0,11	0,21	0,18
V112	84	0,29	0,08	0,45	0,09	0,13	0,10	0,17	0,14	0,08	0,16	0,13
	119	0,35	0,12	0,50	0,13	0,18	0,14	0,22	0,18	0,11	0,21	0,18

Tablo 5. Yıllık enerji çıkışı (E_{out} , MWh).

	(m)	Bandırma	Edremit	Akçaldede	Ayvalık	Erdek	Gönen	Bigadiç	Manyas	Dursunbey	Susurluk	Burhaniye
N54	60	2105	518	3473	597	878	655	1196	919	525	1039	865
	70	2281	604	3660	691	996	752	1329	1035	604	1173	986
GE	61,4	3501	976	5576	1110	1564	1201	2078	1644	975	1826	1542
	85	4136	1309	6183	1476	2020	1572	2558	2075	1282	2331	2000
V90	95	6612	2361	9384	2636	3525	2730	4251	3490	2181	4139	3627
	125	7525	3081	10180	3377	4354	3432	5048	4278	2762	5112	4575
N90	65	6900	2069	10473	2355	3269	2492	4155	3324	1974	3884	3346
	80	7615	2509	11146	2818	3839	2942	4742	3849	2338	4540	3937
V112	84	7543	2181	11740	2477	3488	2676	4547	3589	2171	4086	3468
	119	9094	3146	13168	3492	4702	3692	5798	4730	3004	5465	4762

Tablo 6. Ekonomik parametreler.

Parametreler	Değer	Kaynak
Türbinin ilk yatırım maliyeti	<20 kW için 2550 \$/kW 20-200 kW için 1900 \$/kW >200 kW için 1300 \$/kW	Gökçek ve Genç (2009) Mohammadi ve Mostafaeipour (2013b)
Kurulum, ulaşım, özel ücret vs. dahil olmak üzere, diğer başlangıç maliyetleri	Türbin maliyetinin %30'u	Mathew (2006)
Yıllık işletme ve bakım maliyetleri	Türbin maliyetinin %5'i	Mathew (2006)
Faiz ve enflasyon oranı	%12 ve %8	Kabul edildi
Türbin ömrü	20 yıl	Kabul edildi

Tablo 7. Birim maliyet (\$/kW h).

	(m)	Bandırma	Edremit	Akçaldede	Ayvalık	Erdek	Gönen	Bigadiç	Manyas	Dursunbey	Susurluk	Burhaniye
N54	60	0,067	0,274	0,040	0,238	0,162	0,218	0,119	0,155	0,274	0,137	0,165
	70	0,062	0,234	0,038	0,207	0,143	0,190	0,107	0,137	0,238	0,120	0,144
GE	61,4	0,060	0,218	0,038	0,192	0,136	0,178	0,102	0,129	0,218	0,116	0,138
	85	0,051	0,163	0,034	0,144	0,105	0,136	0,083	0,103	0,167	0,091	0,106
V90	95	0,042	0,120	0,030	0,108	0,080	0,104	0,066	0,081	0,130	0,068	0,078
	125	0,037	0,092	0,027	0,084	0,065	0,083	0,056	0,066	0,103	0,055	0,062
N90	65	0,051	0,172	0,033	0,151	0,108	0,143	0,085	0,107	0,180	0,091	0,106
	80	0,046	0,142	0,031	0,126	0,092	0,120	0,075	0,092	0,152	0,078	0,090
V112	84	0,056	0,195	0,036	0,172	0,122	0,160	0,093	0,119	0,197	0,104	0,123
	119	0,046	0,136	0,032	0,122	0,091	0,115	0,073	0,090	0,142	0,078	0,089

Tablo 8. *PBP, BCR, NPV ve IRR* karşılaştırılması.

	N54 1000kW		GE 1500kW		V90 2000kW		N90 2500kW		V112 3000kW	
	60m	70m	61,4m	85m	95m	125m	65m	80m	84m	119m
BANDIRMA										
<i>PBP</i>	15,73	13,32	12,74	9,46	7,08	5,86	9,41	8,04	11,06	8,07
<i>BCR</i>	1,10	1,19	1,22	1,44	1,73	1,97	1,68	1,85	1,32	1,59
<i>NPV</i>	304570	566483	967580	1910464	4197341	5559282	4191859	5239510	2760189	5078128
<i>IRR</i>	1,073	1,088	1,093	1,126	1,167	1,199	1,127	1,148	1,108	1,147
AKÇALDEDE										
<i>PBP</i>	6,58	6,10	5,96	5,16	4,34	3,91	5,05	4,65	5,55	4,74
<i>BCR</i>	1,82	1,92	1,95	2,16	2,46	2,68	2,55	2,71	2,05	2,31
<i>NPV</i>	2347482	2622496	4071244	4975531	8335568	9540364	9528332	10510504	9006819	11167600
<i>IRR</i>	1,179	1,192	1,196	1,224	1,263	1,290	1,229	1,247	1,210	1,242
BİGADIÇ										
<i>PBP</i>	>20	>20	>20	>20	15,45	10,99	>20	20,17	>20	19,26
<i>BCR</i>	<1	<1	<1	<1	1,11	1,32	1,01	1,15	<1	1,01
<i>NPV</i>	<0	<0	<0	<0	661518	1866314	66732	950688	<0	127973
<i>IRR</i>	0	0	0	0	1,075	1,108	1,031	1,054	1,016	1,058
SUSURLUK										
<i>PBP</i>	>20	>20	>20	>20	16,33	10,79	>20	>20	>20	>20
<i>BCR</i>	<1	<1	<1	<1	1,08	1,34	<1	1,10	<1	<1
<i>NPV</i>	<0	<0	<0	<0	504373	1944894	<0	656036	<0	<0
<i>IRR</i>	0	0	0	0	1,070	1,110	1,020	1,047	0	0
BURHANIYE										
<i>PBP</i>	>20	>20	>20	>20	>20	13,22	>20	>20	>20	>20
<i>BCR</i>	<1	<1	<1	<1	1,08	1,20	<1	<1	<1	<1
<i>NPV</i>	<0	<0	<0	<0	504373	1159155	<0	<0	<0	<0
<i>IRR</i>	0	0	0	0	1,047	1,089	0	0	0	0

Tablo 8’de kapasite faktörü değeri % 25 ve üzeri olarak belirlenen Bandırma, Akçaldede, Bigadiç, Susurluk ve Burhaniye lokasyonlarında türbin modellerine göre *PBP, BCR, NPV ve IRR* analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Diğer lokasyonlarda tüm türbin modellerinde *PBP, BCR, NPV ve IRR* sonuçları sırasıyla >20, <1, <0 ve 0 olarak elde edildiği için tabloda yer verilmemiştir. Tablodan tüm lokasyonlarda en iyi performansın Akçaldede lokasyonunda Vestas V90 (2000 kW, 125 m) türbini için elde edildiği görülmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- En yüksek ortalama rüzgar hızı 6,42 m/s ile Akçaldede’de, en düşük ortalama rüzgar hızı ise 1,69 m/s ile Dursunbey’de elde edilmiştir.
- Beş yıllık ortalama sonuçlara göre maksimum rüzgar hızı 7,36 m/s ile Ağustos ayında Akçaldede’de ve minimum rüzgar hızı 1,35 m/s ile Ocak ayında Dursunbey’de elde edilmiştir.
- Weibull şekil parametresi *k* değeri 1,68 ile 1,16 aralığında değişirken Dursunbey’de 1 den küçük değer elde edilmiştir. Weibull ölçek

parametresi *c* değeri ise 6,66 ile 1,50 m/s aralığında değişmektedir.

- Tüm lokasyonlarda hakim rüzgar yönünün K (0°) ve KKD (22,5°) olduğu görülürken, en zayıf rüzgar yönünün ise B (180°) olduğu görülmektedir.
- 10 m rüzgar gücü sınıflandırması esas alındığında, Akçaldede yıllık ortalama 484,25 W/m² ile "Sınıf 7", Bandırma yıllık ortalama 147,50 W/m² ile "Sınıf 2", diğer lokasyonlar ise ≤100 W/m² ile "Sınıf 1" kategorisine girmektedir.
- En yüksek kapasite faktörü değerleri Akçaldede lokasyonu için elde edilirken, en düşük kapasite faktörü Dursunbey lokasyonu için elde edilmiştir. Bandırma, Akçaldede, Bigadiç, Susurluk ve Burhaniye lokasyonlarında rüzgar türbini kurulması daha uygun görülmektedir.
- En düşük enerji maliyeti Akçaldede istasyonunda 0,027 \$/kWh olarak elde edilmiştir.
- Tüm lokasyonlar arasında en iyi performans Akçaldede lokasyonunda Vestas V90 (2000 kW, 125 m) türbini için elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Adaramola MS., Oyewola OM., 2011, Evaluating the performance of wind turbines in selected locations in Oyo state, Nigeria, *Renew Energy*, 36, 3297-3304.
- Ahmed S. A., 2011, Investigation of wind characteristics and wind energy potential at Ras Ghareb, Egypt, *Renew Sust Energ Rev*, 15, 2750-55.
- Akpınar EK., Akpınar S., 2005, An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics, *Energy Convers Manage*, 46,1848-67.
- Akpınar EK., 2006, A statistical investigation of wind energy potential, *Energy Sourc, Part A: Recov Utilization Environ Effects*, 28, 807-820.
- Ammari H.D., Al-Rwashdeh S. S., Al-Najideen M. I., 2015, Evaluation of wind energy potential and electricity generation at five locations in Jordan, *Sust Cities and Society*, 15,135-143.
- Arslan O., 2010, Technoeconomic analysis of electricity generation from wind energy in Kutahya, Turkey, *Energy*, 35, 120-131.
- Aslan A., Yüksel B., Akyol T., 2016, Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü rüzgar enerjisi potansiyelinin araştırılması, *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*,18(2), 37-47.
- Bilir L., İmir M., Devrim Y., Albostan A., 2015, An investigation on wind energy potential and small scale wind turbine performance at İncek region-Ankara, Turkey, *Energy Convers Manage*, 103, 910-23.
- Dursun B., Gökçöl C., 2014, Impacts of the renewable energy law on the developments of wind energy in Turkey, *Renew Sust Energ Rev*, 13, 1361-71.
- Erdoğan, E., 2009, On the wind energy in Turkey, *Renew Sust Energ Rev*, 13, 1361-71.
- Eskin N., Artar H., Tolun S., 2008, Wind energy potential of Gokceada Island in Turkey, *Renew Sust Energy Rev*, 12, 839-51.
- Fazelpour F., Soltani N., Soltani S., Rosen M.A., 2015, Assessment of wind energy potential and economics in the north-western Iranian cities of Tabriz and Ardabil, 2015, *Renew Sust Energy Rev*, 45, 87-99.
- Fyrippis I, Axaopoulos P.J., Panayiotou G, 2010, Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece, *Appl Energy*, 87, 577-586.
- Gökçek M., Bayülgen A., Bekdemir S., 2007, Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey, *Renew Energy*, 32, 1739-52.
- Gökçek M., Genç MS., 2009, Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems (WECSs) in Central Turkey, *Appl Energy*, 86, 2731-9.
- İslam MR., Saidur R., Rahim NA., 2011, Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull distribution function, *Energy*, 36, 985-992.
- İlkılıç C., Aydın H., Behçet R, 2011, The current status of wind energy in Turkey and in the world, *Energy Policy* 39, 961-967.
- Johnson GL., 2001, Wind energy systems, *Electronic edition*, Manhattan, KS.
- Köse F., Özgören M., 2005, Rüzgar enerjisi potansiyeli ölçümü ve rüzgar türbini seçimi, *Mühendis ve Makina*, Cilt: 46 Sayı: 551.
- Küçükali S., Dinçkal, Ç., 2014, Wind energy resource assessment of Izmit in the West Black Sea Coastal Region of Turkey, *Renew Sust Energy Rev*, 30, 790-795.
- Mathew S., 2006, Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Mohammadi K., Mostafaeipour A., 2013a, Using different methods for comprehensive study of wind turbine utilization in Zarrineh, Iran, *Energy Convers Manage*, 65, 463-470.
- Mohammadi K., Mostafaeipour A., 2013b, Economic feasibility of developing wind turbines in Aligoodarz, Iran, *Energy Convers Manage*, 76, 645-653.
- Onat N., Ersöz S., 2011, Analysis of wind climate and wind energy potential of regions in Turkey, *Energy*, 36, 148-156.
- Ouammia A, Dagdougui H, Sacile R, Mimet A, 2010, Monthly and seasonal assessment of wind energy characteristics at four monitored locations in Liguria region (Italy), *Renew Sust Energ Rev*, 14, 1959-68.
- Öner Y., Özçira S., Bekiroğlu N., Şenol İ., 2013, A comparative analysis of wind power density prediction methods for Canakkale, Intepe region, Turkey, *Renew Sust Energy Rev*, 23, 491-502.
- Seydioğulları, H. S., 2013, Sürdürülebilir Kalkınma için Yenilenebilir Enerji, *Planlama*, 23, 19-25.
- Shu ZR., Li QS., Chan PW, 2015, Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong, *Energy Convers Manage*, 101, 644-57.

Uçar A., Balo F., 2009a, Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey, *Appl Energy*, 86, 1864-1872.

Uçar A., Balo F., 2009b, Investigation of wind characteristics and assessment of wind-generation potentiality in Uludag-Bursa, Turkey, *Appl Energy*, 86, 333-339.

İnternet, 2016, <http://enerjienstitusu.com/elektrik-fiyatlari> (erişim 27.10.2016)

İnternet, 2017a, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <http://www.enerji.gov.tr> (erişim 10.01.2017)

İnternet, 2017b, Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, <http://www.tureb.com.tr> (erişim 10.01.2017)

İnternet, 2017c, Wind Energy Market Intelligence, <http://www.thewindpower.net> (erişim 10.01.2017)



Asiye ASLAN

1997 yılında Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. 2000 yılında aynı Üniversitede Yüksek Lisansını tamamlamıştır. 1998-2001 yılları arasında Gönen Kaplıcaları İşletmesi A.Ş.'de Jeotermal Enerji Müdürü olarak çalışmıştır. 2001 yılında Balıkesir Üniversitesi Gönen Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2010 yılında doktorasını tamamlamıştır. 2011 yılında aynı üniversitede Yrd. Doç. Dr. ünvanı almıştır. 2015 yılından itibaren Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi Gönen Meslek Yüksekokulunda görev yapmaktadır. Yenilenebilir Enerji Kaynakları konularında çalışmaktadır.