



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YALOVA ÜNİVERSİTESİ'NDE RÜZGAR POTANSİYELİ BELİRLEME VE
ÖRNEK UYGULAMA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elif KURBAN
175103009**

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Fikret YÜKSEL

HAZİRAN 2021



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YALOVA ÜNİVERSİTESİ'NDE RÜZGAR POTANSİYELİ BELİRLEME VE
ÖRNEK UYGULAMA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elif KURBAN
175103009**

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Fikret YÜKSEL

HAZİRAN 2021

ÖNSÖZ

Öncelikle her an ve her durum için Rabbime sonsuz şükürler olsun.

Lisans eğitimimin ilk yılından bu yana eğitim-öğretim anlamında büyük emek ve desteklerinin yanında baba şefkatini de hissettiren danışmanım Prof. Dr. Fikret YÜKSEL'e sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

En büyük zenginliğim ve destekçim aileme,

Tüm maddi ve manevi desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a,

Tanıdığım ilk günden beri her anlamda varlığı, yardımı ve desteği ile hep yanımda olan İbrahim ASİL'e

Tüm desteğinden ve varlığından dolayı Osman Gazi ÇETİNKAYA'ya

Lisans eğitimimden bu yana güzel enerjisini ve yardımlarını eksik etmeyen İdris ÖZTEMUR'a

Yüksek lisans eğitimimden bu yana desteğini hissettiren arkadaşım-ablam Serap YARALI'ya,

Ayrıca hayatımın her anında yanımda olan dostlarıma sayısız teşekkür ederim.

Mayıs 2021

Elif Kurban
Enerji Sistemleri Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
	No
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xv
ABSTRACT	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması	4
1.2. Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Belirleme Yöntemleri	7
1.2.1 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA)	7
1.2.2 WAsP	11
1.2.3 WindPRO	13
1.2.4 Weibull Dağılımı.....	15
2. MATERYAL ve METOD.....	19
2.1 Yalova Üniversitesi İçin Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlemesi	19
2.1.1 Yalova Üniversitesi İçin Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) Kullanımı.....	21
2.1.2 Yalova Üniversitesi İçin Weibull Dağılımı Kullanımı	25
2.2 Rüzgar Enerjisi Ölçümleri ve Ham Veriler.....	36
2.2.1 Yöntem ve Değerlendirme	38
3. TARTIŞMA ve SONUÇ	41



KAYNAKLAR.....	45
EKLER	47
ÖZGEÇMİŞ	83





KISALTMALAR

AEP	: Rüzgar Türbininin yıllık enerji üretimi
EİGM	: Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EİEI	: Elektrik Enerjisi Kaynakları Araştırma ve Geliştirme İdaresi Başkanlığı
IEC	: International Electrotechnical Commission
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
NNE	: Kuzey- kuzeydoğu
REPA	: Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	: Rüzgar Enerjisi Santrali
RWC	: Bölgesel Rüzgar İklimi
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TÜREB	: Türkiye Rüzgar Enerji Birliği



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1: Yalova'daki rüzgar enerjisi santrallerinin özellikleri.....	20
Çizelge 2.2: Yalova iline kurulabilecek RES güç kapasitesi.....	24
Çizelge 2.3: Yalova Üniversitesi için 10 yıllık (01.01.2012 - 18.04.2021) yılı rüzgar hızı ve frekans verileri.....	25
Çizelge 2.4: Yalova Üniversitesi için 10 yıllık (01.01.2012 - 18.04.2021) yılı rüzgar hızı ve weibull verileri.....	26
Çizelge 2.5: $\ln(V)$ ve $\ln(-\ln(1-F(V)))$ değerleri ile hesaplanmış regresyon analizi.....	27
Çizelge 2.6: Yalova Üniversitesi için 10 yıllık (01.01.2012 - 18.04.2021) yılı rüzgar potansiyeli bulguları.....	29
Çizelge 2.7: Yalova Üniversitesi için 10 yılın ayrı ayrı (01.01.2012 - 18.04.2021) yıllık rüzgar potansiyeli bulguları.....	30
Çizelge 2.8: Yalova Üniversitesi için 10 yıllık (01.01.2012 - 18.04.2021) yılı rüzgar potansiyeli bulguları (WindPRO).....	34
Çizelge 2.9: Yalova Üniversitesi Excel ve WindPRO rüzgar potansiyeli bulgularının karşılaştırılması.....	34
Çizelge 2.10: Yalova Üniversitesi için 50m yükseklik için rüzgar hızı değerleri	36
Çizelge 2.11: Yalova Üniversitesi ve 25 farklı çalışmanın 10 m yüksekliğindeki rüzgar hızı verilerinin ve EİGM - REPA'da incelenmiş verilerin listesi.....	37
Çizelge 2.12: Yalova Üniversitesi ve 25 farklı çalışmanın 10 m yüksekliğindeki rüzgar hızı verileri ile EİGM - REPA'da incelenmiş verilerin karşılaştırılması.....	39

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Türkiye için rüzgar enerjisi santralleri kurulum grafiği.....	2
Şekil 1.2 Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 50 metre yükseklikteki ortalama güç yoğunluğu dağılımı (W/m ²)	8
Şekil 1.3 Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 50 metre yükseklikteki ortalama rüzgar hızları dağılımı (m/s).....	8
Şekil 1.4 Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 100 metre yükseklikteki ortalama güç yoğunluğu dağılımı (W/m ²)	9
Şekil 1.5 Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 100 metre yükseklikteki ortalama rüzgar hızları dağılımı (m/s).....	9
Şekil 1.6 Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki ortalama rüzgar hızları dağılımı (m/s)	10
Şekil 1.7 Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki ortalama güç yoğunluğu dağılımı (W/m ²)	10
Şekil 1.8 Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki kapasite faktörü dağılımı (%).....	10
Şekil 1.9 WAsP programının işleyiş mekanizması.....	12
Şekil 1.10 WindPRO programı farklı modülleri.....	13
Şekil 2.1 Yalova için rüzgar enerjisi santralleri kurulum grafiği	19
Şekil 2.2 Yalova'daki rüzgar enerjisi santrallerinin konumları.....	20
Şekil 2.3 Yalova Üniversitesi kampüs alanının uydu görünümü (Google Earth).....	21
Şekil 2.4 Yalova Üniversitesi kampüs alanının yükselti değerleri (Global Mapper).....	22
Şekil 2.5 Yalova Üniversitesi kampüs alanının pürüzlülük değerleri (Global Mapper).....	22
Şekil 2.6 Yalova Üniversitesi için 50 m'de rüzgar hızı dağılımı (m/s)..	23
Şekil 2.7 Yalova Üniversitesi için 50 m'de kapasite faktörü dağılımı (%).....	23
Şekil 2.8 Yalova Üniversitesi için 50 m'de kullanılamaz alanlar.....	24
Şekil 2.9 Ölçüm verilerinin frekans (fi) grafiği.....	26
Şekil 2.10 ln(V) ve ln(-ln(1-F(V))) değerlerinin kesişim grafiği.....	28



Şekil 2.11 Weibull $f(V)$ değerlerinin hız ve % eksenlerinde incelendiği Weibull Grafiği.....	28
Şekil 2.12 Yalova Üniversitesi için 10 yılın ayrı ayrı (01.01.2012 - 18.04.2021) yıllık frekans (fi) eğrileri.....	31
Şekil 2.13 Yalova Üniversitesi için 10 yılın ayrı ayrı (01.01.2012 - 18.04.2021) yıllık Weibull eğrileri.....	31
Şekil 2.14 Yalova Üniversitesi için 10 yılın ayrı ayrı (01.01.2012 - 18.04.2021) yıllık ortalama rüzgar hızı verileri (m/s).....	32
Şekil 2.15 Yalova Üniversitesi için 10 yılın ayrı ayrı (01.01.2012 - 18.04.2021) yıllık enerji potansiyeli verileri (kWh/m ² -yıl).....	32
Şekil 2.16 Yalova Üniversitesi kampüs alanı sınırları içerisindeki ortalama rüzgar hızı dağılımları haritası (WAsP).....	33
Şekil 2.17 Yalova Üniversitesi kampüs alanı sınırları içerisindeki hakim rüzgar yönünü gösteren rüzgar gülü (WindPRO).....	33
Şekil 2.18 Rüzgar hızı ve % eksenlerinde incelendiği Weibull Grafiği (WinPRO).....	34
Şekil 2.19 EK C.1 ve EK C.2’de yer alan 4 rüzgar türbininin yerleşim haritası	35



YALOVA ÜNİVERSİTESİ'NDE RÜZGAR POTANSİYELİ BELİRLEME VE ÖRNEK UYGULAMA

ÖZET

Fosil yakıtların gün geçtikçe tükenecek olması ve zararlı gazlar ile CO₂'nin atmosferdeki yoğunluğunun giderek artması nedeniyle dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynakları önemsenmektedir. Türkiye bu eğilimde benzer artışı göstererek, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimini arttırmak ve petrole olan bağımlılığı düşürme çabası içerisinde. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde, uygulanabilirlik açısından en elverişli olanı rüzgar enerjisidir. Türkiye'de 2020 yılı verilerine göre 8 GW'tan daha yüksek bir kurulu güce sahiptir.

Yalova Üniversitesi için temin edilen 10 yıllık (01.01.2012 ile 18.04.2021 yılları arası) rüzgar verileri baz alınarak incelenen REPA haritaları, Weibull dağılımı kullanılarak hesaplanan rüzgar hızı verileri ve kullanılan bilgisayar programları (WAsP ve WindPRO) ile Yalova Üniversitesi'nde rüzgar potansiyeli belirleme çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda Yalova Üniversitesi'nin ortalama rüzgar hızı değeri (V_m) 3.76 m/s ve rüzgar gücü potansiyeli (E_D) 62.7 W/m² olarak tespit edilmiştir.

Türkiye'nin farklı illerinde yapılan bu tarz çalışmalar ile il bazlı rüzgar hızı ve güç yoğunluğu değerlerine ulaşılmıştır. Yapılan farklı çalışmalarda kullanılan yöntemlerin başında gelen Weibull yoğunluk fonksiyonu, Rayleigh ve bilgisayar programları kullanılmıştır. İncelenen çalışmalarda en iyi hesaplama ve analizin Weibull dağılımı ile elde edildiği sonucuna varılmıştır. Fakat diğer unsurlarda (Modelleme, Türbin konuşlandırması v.b.) bilgisayar programlarından genellikle WAsP ve WindPRO tercih edilmiştir. Bütün bu çalışmalar ve Yalova Üniversitesi için yapmış olduğumuz çalışma sonucunda hesaplanmış rüzgar hızı verileri REPA'dan analiz edilen rüzgar hızı verileri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu incelenen çalışmalardaki değerler REPA değerlerinden ortalama %20.4 oranında yüksek gösterildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerji potansiyeli; Rüzgar hızı; Weibull; WAsP; WindPRO; REPA.



DETERMINATION OF WIND POTENTIAL AT YALOVA UNIVERSITY AND SAMPLE APPLICATION

ABSTRACT

Due to the fact that all the fossil fuels will be consumed day by day and the percentage of harmful gases and CO₂ in the atmosphere gradually increases therefore renewable energy resources are considering highly important worldwide. Turkey is showing a similar development in this trend to increase of efforts to reduce dependence on the oil and that the orientation towards renewable energy sources. Among the renewable energy sources, wind energy is the most favorable in terms of applicability. According to data from the year of 2020, Turkey has greater than 8 GW of installed capacity.

Determining wind potential at Yalova University with REPA maps, wind speed data calculated using the Weibull distribution and computer programs used (WAsP and WindPRO), which were analyzed on the basis of 10-year wind data provided for Yalova University (between 01.01.2012 and 18.04.2021) work has been done. As a result of the study, Yalova University's average wind speed value (V_m) was determined as 3.76 m/s and wind power potential (E_D) 62.7 W/m².

As a result of this kind of studies in different cities in Turkey which carried out, the wind speed and the power density have been reached based on its related cities. Weibull density function, Rayleigh and computer programs, which are the leading methods in this kind of different studies have been used but in the other cases (Modeling, Turbine deployment, etc.), WAsP and WindPRO were generally preferred as computer programs. The calculated wind speed data as a result of all these studies and the study we have done for Yalova University were compared with the wind speed data analyzed from the REPA. As a result of the comparisons reviewed, it was determined the values in the studies examined were shown to be 20.4% higher than the REPA values.

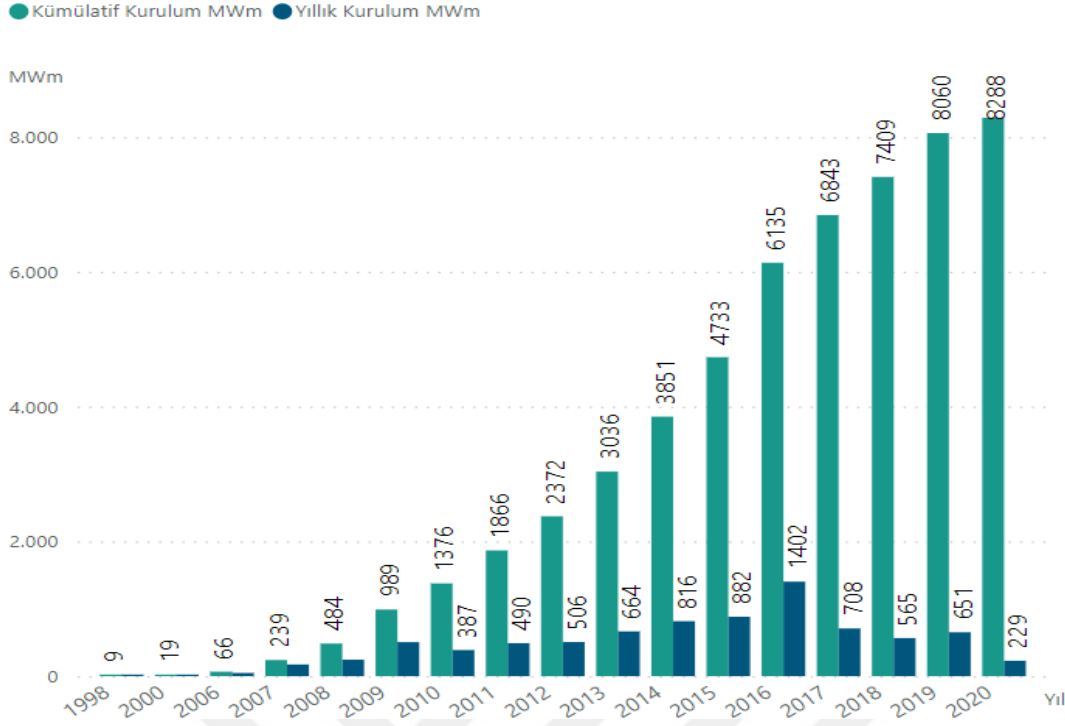
Keywords: Potential of wind energy; Wind velocity; Weibull; WAsP; WindPRO; REPA.



1. GİRİŞ

Fosil yakıtların yer yüzeyinde eşit dağılım sergilememesi bir kısım ülkelerin enerjide dışa bağımlı olmasını gerektirmektedir. Ülkemiz de petrol ve doğal gaz bakımından (yeterince yerli üretim olmaması sebebiyle) dışa bağımlıdır. Kömür yatakları yeterli olmakla birlikte, söz konusu kaynakların büyük çoğunluğu düşük kalite, bir kısmı ise orta kalitede (enerji içeriği, kül miktarı vb. değerlendirmeler) yer almaktadır. Fosil yakıt kullanım miktarlarını ve buna bağlı olarak dışa bağımlılığı düşürmek ve fosil yakıtların sebep olduğu atmosfer kirliliğini minimize etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının içerisinde rüzgar enerjisi ön sıralarda yer edinmiştir ve günümüzde oldukça rağbet görmektedir. Rüzgar enerjisi sürdürülebilir kalkınmada ve enerji ihtiyacının karşılanmasında alternatif enerji üretimi metotları arasında potansiyeli yüksek kaynaktır. Bu nedenle rüzgar potansiyeli yüksek olan bölgelerde rüzgar türbinleri kullanılarak rüzgar enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülmesi gerçekleştirilir. Rüzgar türbinlerinin kurulum maliyetlerinin yüksek olması uygulanabilirlik analizlerinin detaylı yapılmasını gerektirir.

Rüzgar enerjisinin uygulanabilir olması, rüzgar enerji sistemleri kurmak için girişimcilere yön vermesi ve benzeri sebeplerle ülkeler enerji potansiyellerini gösterir haritalar ve çizelgeler geliştirmektedir. Türkiye'de de Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB) tarafından sürekli güncellenen veriler ile hazırlanmış tablo ve grafiklerle illerin rüzgar potansiyeli üzerine istatistik veriler verilmektedir. TÜREB'in Türkiye için rüzgar enerjisi santralleri kurulum grafiği (1998-2020 yılları) incelendiğinde gelinen noktada 8 GW'tın üzerine çıkmış olduğu görülmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Türkiye için rüzgar enerjisi santralleri kurulum grafiği [1]

TÜREB'in 1998 ile 2020 yılları için yıllık kümülatif kurulum (MWm) verilerinden rüzgar enerjisine olan talep ve yapılan çalışmalarda sürekli artış yaşandığı sonucuna ulaşılmaktadır. Rüzgar enerji santrali (RES)'nin kurulumuna karar vermeden önce sağlıklı olarak rüzgar enerji potansiyeli belirlenmelidir. Türbin kapasitesini belirleyen en büyük etmen türbin kule yüksekliğindeki rüzgar hızıdır (Denklem 1).

Türbin kule yüksekliğindeki rüzgar hızı V (m/s) ise; hıza bağlı olarak rüzgarın sağlayacağı kinetik enerji potansiyeli;

$$E = \frac{1}{2} mV^2 (\text{Joule}) \quad (1.1)$$

olarak verilir.

Eşitlik (1.1) de verilen kütleli debi miktarı türbin kanatlarının süpürdüğü alan ($A[m^2]$) ve ilgili şartlardaki hava yoğunluğu ile ilişkilendirilir ise;

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \rho AV^3 (\text{Joule/s}) (\text{Watt}) \quad (1.2)$$

olarak elde edilir. Burada;

(ρ) havanın yoğunluğu (kg/m³),

(V) rüzgar hızı (m/s),

(A) türbin kanatlarının dönmesinde süpürülen dairesel alanı (m²) göstermektedir.

Rüzgar hızının dağılımının belirlenmesinde kullanılan birçok dağılım fonksiyonu vardır. Bunlardan en yaygın kullanılanları: İki parametrelili Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonlarıdır. Rayleigh dağılımında parametrelerin hesaplanması daha kolay olmasına rağmen tek parametrelili olduğu için Weibull'a göre daha az esneklik. Bu sebeple iki parametrelili Weibull dağılımı rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerinde daha sık kullanılmaktadır.

İki Parametrelili Weibull dağılımı fonksiyonu ile analiz yapılmak istendiğinde belli bir bölgenin daha önceden ölçülmüş olan rüzgar verilerine ihtiyaç duyulur. Bu rüzgar verileri kullanılarak ortalama rüzgar hızı ve enerji potansiyelinin belirlenmesi için öncelikle Weibull parametreleri k ve c'nin bulunması gereklidir. Rüzgar hızı için iki parametrelili Weibull dağılımının genel ifadesi:

$$f_w(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (1.3)$$

şeklinde. Burada $f_w(V)$ gözlemlenen rüzgar hızı V'nin olasılık fonksiyonu, k ve c Weibull parametreleridir [19].

Ayrıca herhangi bir noktada ölçülen saatlik rüzgar hızı ve yön veri ile frekans ve olasılığını modellemek için farklı bilgisayar programları (WindPro ve WAsP gibi) kullanılmaktadır. Bu programlar ile Weibull dağılımına ulaşmanın yanı sıra bölgeye farklı rüzgar türbinleri yerleştirilerek istatistikler yapılabilmektedir.

Rüzgar türbin değerlendirmelerinde farklı yüksekliklerdeki hız değerleri göz önüne alınarak en yüksek rüzgar gücünü en az maliyetle elde edilebilecek pozisyon belirlenmeye çalışılır. Bu nedenle belirlenen bir bölgede ölçülen yükseklikten farklı yükseklikteki rüzgar hızını tespit etmek için hız, yükseklik ve zemin yapısına bağlı olarak çıkarılan "Hellman Bağıntısı" kullanılır (Denklemler 1.3.).

$$\frac{V_1}{V_2} = \left[\frac{h_1}{h_2}\right]^\alpha \quad (1.4)$$

Burada;

(h1) V1 hızının ölçüldüğü yükseklik,

(h2) rüzgar hızının hesaplanacağı yükseklik,

(V1) h1 yüksekliğindeki rüzgar hızı,

(V2) h2 yüksekliğindeki rüzgar hızı,

(α) zemin pürüzlülük faktörüdür. (Pürüzlülük faktörü 0.1-0.4 değerleri arasındadır).

Zemin yapısına bağlı olarak;

α : 0,1 su ve buz yüzeyini,

α : 0.14 küçük ot ve bozkırları,

α : 0.2 engebeli kırsal alanları,

α : 0.25 ise ormanlık alan ve küçük yerleşim bölgelerini tanımlar.

1.1 Literatür Taraması

Rüzgar enerji sistemleri üzerine pek çok çalışmalar yapılmış, yapılmaya da devam edilmektedir. Akpınar, E. ve Akpınar S. (2004), Weibull yoğunluk fonksiyonu ile Elazığ iline ait Maden ilçesinin beş yıllık (1998-2002) saatlik ortalama rüzgar verilerini kullanarak rüzgar enerji potansiyelini belirlemişlerdir. Meteorolojiden alınan veriler ile yapılan hesaplamalar ve analizler sonucunda k şekil parametresinin ortalama değeri 1.60 ve c ölçek faktörünün ortalama değeri 5.83 m/s olarak bulmuşlardır. Ulaşılan bu değerler ile Maden ilçesinin yıllık ortalama rüzgar hızı 5.63 m/s ve ortalama güç yoğunluğunu 244.65 W/m² olarak hesaplamışlardır. Weibull dağılımının yanı sıra Rayleigh dağılımını da kullanmalarına rağmen yaptıkları hata analizleri ve uygunluk modellemeleri sonucunda Weibullfonksiyonlarının daha doğru sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir [2].

Bilgili ve arkadaşları (2004), Doğu Akdeniz bölgesine yönelik Antakya ve İskenderun bölgelerinin 10 m lik meteoroloji istasyonlarından alınan beş yıllık (1997-2001) saatlik veriler ile rüzgar enerji potansiyeli çalışması yapmışlardır. Weibull fonksiyonlarını kullanarak yapılan hesaplamalar ve analizler sonucu Antakya ve İskenderun için (Ortalama rakımlar dikkate alınarak) sırasıyla rüzgar hızlarını 5.5 m/s ve 3.2 m/s olarak bulmuşlardır. Yine sırasıyla güç yoğunluğu değerleri de 220 W/m² ve 198 W/m² olarak hesaplamışlardır. Bu bölgelerin hakim rüzgar yönlerini bulurken ve rüzgar atlası oluştururken de WAsP programından faydalanmışlardır [3].

Bilgili ve arkadaşları (2010), Türkiye'nin güney, güneybatı ve batı kıyısında bulunan Akhisar, Bababurnu, Belen, Datça, Foça, Gelendost, Gelibolu, Gökçeada ve Söke ilçelerindeki Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından elde edilen 10 m yüksekliğe ait rüzgar verilerini analiz etmişlerdir. İncelenen bölgelerin rüzgar hızları Weibull dağılımı ile sırasıyla 5.88 m/s, 5.96 m/s, 6.97 m/s, 5.63 m/s, 5.73 m/s, 5.05 m/s, 6.85 m/s, 7.23 m/s, 4.10 m/s olarak hesaplamışlardır. En yüksek rüzgar gücü potansiyelinin sırasıyla; 526 W/m² ile Gökçeada'da, 410 W/m² ile Gelibolu'da, 387 W/m² ile Belen'de olduğunu ortaya koymuşlardır. Yapılan hesaplamalarda ayrıca Rayleigh yöntemini de denemişlerdir fakat Weibull dağılımının daha iyi sonuç verdiğini görmüşlerdir. Ayrıca yaptıkları enerji potansiyeli analizlerinde WAsP programını kullanmışlardır [4].

Çelik (2011), Çanakkale iline ait Bozcaada'da 10 m yüksekliğinde elde ettiği altı yıllık (2000-2005) saatlik rüzgar verileri ile Türkiye'nin en çok kurulu gücüne sahip Çanakkale ilinde rüzgar enerjisi potansiyeli incelemesi yapmıştır. Weibull yoğunluk fonksiyonunu kullanarak c ve k parametrelerinin değerlerini sırasıyla 7.2 m / s ve 1.8 olarak bulmuştur. Bu değerlerden yola çıkarak da ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğunu Çanakkale ve Bozcaada için sırasıyla 4.6 m/s, 6.4 m/s, 139 W/m², ve 350 W/m² olarak hesaplamıştır. Hesaplamalarında Weibull dağılımının yanı sıra Rayleigh dağılımını da denemiş fakat Weibull'un gerçek verilere daha yakın sonuçlar verdiğini görmüştür [5].

Çetin ve arkadaşları (2011), İzmir'in Menemen ilçesinde 10 m yüksekliğinde bir yıllık (2008) saatlik rüzgar verilerini Weibull dağılımı ile analiz etmişlerdir. Ölçülen verileri Hellman korelasyonu yardımıyla 80-100 m yüksekliğine taşımışlardır Ayrıca incelenen veri hesaplamalarında, Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonlarını denemiş Weibull'u daha uyumlu bulmamışlardır. Bu bölge için ayrıca kullandıkları bilgisayar programında 2.5 MW'lık 6 farklı türbin yerleştirerek performans değerlendirmeleri yapmışlardır [6].

Eskin ve arkadaşları (2008), Uğurlu ve Çınaraltı istasyonlarında 3 yıl, Aydıncık ve Ulusal Hava İstasyonu'nda ise 10 yıl boyunca toplanan 10 m yükseklikte ölçülmüş rüzgar verilerini kullanarak Gökçeada'nın rüzgar enerji potansiyelini analiz etmişlerdir. 10 m yükseklikte ölçülen verilere göre ortalama rüzgar hızını 7.8 m/s olarak hesaplamışlardır. Veriler Hellman korelasyonu ile 50 m yüksekliğe ekstrapole edilerek Weibull dağılımının uyumlu sonuçlar vermesi ile hesaplamalarını yapmışlardır [7].

Gökçek ve arkadaşları (2007), Elektrik Enerjisi Kaynakları Araştırma ve Geliştirme İdaresi Başkanlığı'ndan (EIEİ) alınan 10 m yükseklikte ölçülmüş bir yıllık (2004) rüzgar verileri ile Kırklareli ilinin rüzgar enerji potansiyelini incelemiştir. Weibull k şekil ve c ölçek parametreleri sırasıyla 1.75 ve 5.5 m/s bulunmuştur. Rayleigh dağılım fonksiyonlarını da kullanarak bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli sonuçlarını elde etmişlerdir. Fakat yapılan hata kontrolleri ile Weibull dağılımının daha gerçek verilere daha yakın olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan hesaplamalar sonucunda ortalama rüzgar hızını 4.68 m/s ve Weibull fonksiyonuna bağlı güç yoğunluğunu ise 138.85 W/m² olarak bulmuşlardır [8].

Karslı ve Geçit (2003), Gaziantep ili Nurdağı ilçesinin Türkiye Elektrik Güç Kaynakları Geliştirme İdaresi Başkanlığı tarafından 10 m'de ölçülmüş rüzgar verileri incelemiştir. Bu veriler kullanılarak ortalama rüzgar hızını 7.3 m/s ve güç yoğunluğunu 222 W/m² olarak bulmuşlardır. Nur dağının sahip olduğu en yüksek noktada rüzgar hızının 23.3 m/s olduğunu tespit etmişlerdir [9].

Köse ve Özgören (2005), Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat kampüs bölgesinde kurulan ölçüm istasyonundan 2003-2005 yılları arasında 21 aylık toplanan 10 ve 20 m yüksekliğinde ölçülmüş verileri kullanarak bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemiştir. Hesaplamalarında Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonlarını kullanmış ve birbiryle uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Yapılan hesaplamalar sonucunda da ortalama rüzgar hızı değerini 5.52 m/s olarak bulmuşlardır [10].

Özerdem ve Türkeli (2003), İzmir Çeşme Yarımadasında bulunan İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü yerleşkesinin bir yıllık 10 ve 30 m yüksekliğinde ölçülmüş rüzgar verilerini incelemiştir. Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları ile hesaplamalarını yapmışlar ve Weibull'u daha uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan hesaplamalar sonucunda 10 m yüksekliği için ortalama rüzgar hızı 7.03 m/s ve 30 m için 8.14 m/s olarak bulmuşlardır. Çalışmada 'WAsP ve WindPRO' yazılımlarını kullanarak enerji hesaplamaları ve rüzgar istatistikleri analiz etmişlerdir [11].

Şahin ve arkadaşları (2005); Doğu Akdeniz'in 7 farklı bölgesindeki ölçüm istasyonlarından alınan on yıllık (1992-2001) rüzgar verilerini incelemiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda en yüksek güç yoğunluğu değerini 500 W/m² olarak bulmuşlardır. Böylece rüzgar enerjisi açısından Doğu Akdeniz'in en uygun bölgelerinin Antakya ve Samandağ olduğunu tespit etmişlerdir [12].

Türksoy (1995), Bozcaada'da 10 m yükseklikte ölçülen on üç yıllık rüzgar verileri ile Bozcaada'nın rüzgar güç potansiyelini değerlendirmiştir. Çalışmasında rüzgar atlas istatistikleri ve Bozcaada'nın enerji yoğunluğu analizi için WAsP programı kullanmıştır. Yapılan analiz ve hesaplamalar sonucunda ortalama rüzgar hızı 6.4 m/s ve güç yoğunluğunu da 324 W/m² olarak bulmuştur [13].

Uçar ve Balo (2009), Türkiye'nin 6 farklı ilinden (Erzurum, Elazığ, Bingöl, Kars, Manisa, Niğde) 10 m yüksekliğindeki meteoroloji istasyonlarından topladığı yedi yıllık (2000-2006) rüzgar verileri ile bu bölgelerin rüzgar karakteristik analizlerini yapmışlardır. Ölçülen verilere göre ortalama hız değerlerini illere göre sırasıyla 8.7 m/s, 8.5 m/s, 5.9 m/s, 6.9 m/s, 7.4 m/s ve 8.0 m/s olarak bulmuşlardır. Ortalama yıllık k Weibull şekil parametresinin değerleri 1.71 ile 1.96 arasında değişirken c ölçek parametresinin yıllık değerlerinin 6.81 ile 9.71 arasında değiştiğini hesaplamışlardır. Ayrıca 4 farklı türbin kullanılarak enerji üretim ve kapasite faktörü hesaplamaları yapmışlardır. Yapılan hesaplamalar ve değerlendirmeler sonucunda builler arasında en yüksek enerji çıktısı Erzurum'da bulunurken, en düşük enerji çıktısı Bingöl'de olduğu tespit edilmiştir [14].

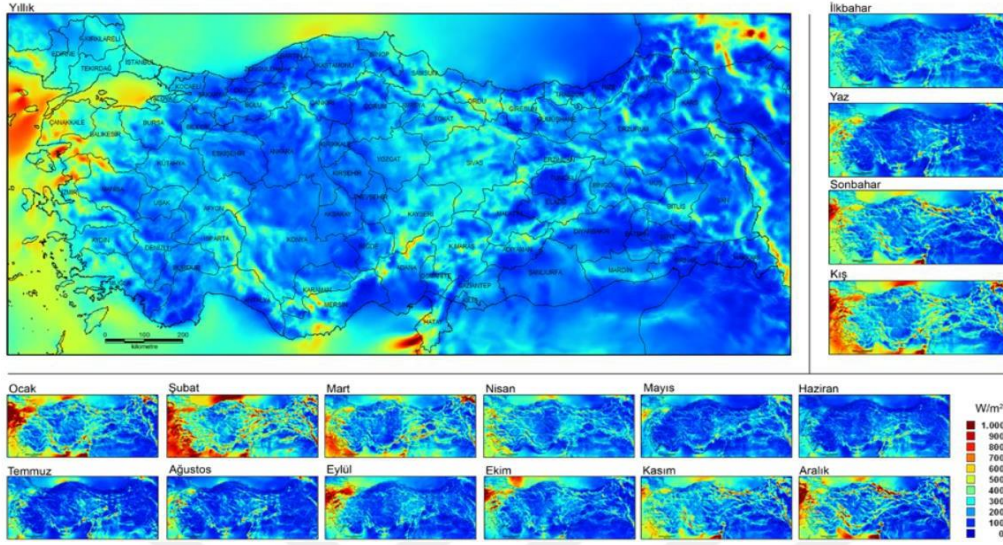
1.2 Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Belirleme Yöntemleri

Bir bölgede rüzgar enerjisi santrali kurmayı planlarken o bölgede önceden aldığımız rüzgar verileri ile kapsamlı hesaplamalar ve istatistikler yapmak gerekmektedir. Bu hesaplamaların en doğru şekilde yapılması için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler; Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM) tarafından hazırlanan Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), weibull dağılımı ve farklı bilgisayar programlarıdır (WindPro ve WAsP gibi). Bu kısımda da verilen örnekler hakkında bilgilendirme yapılacaktır.

1.2.1 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA)

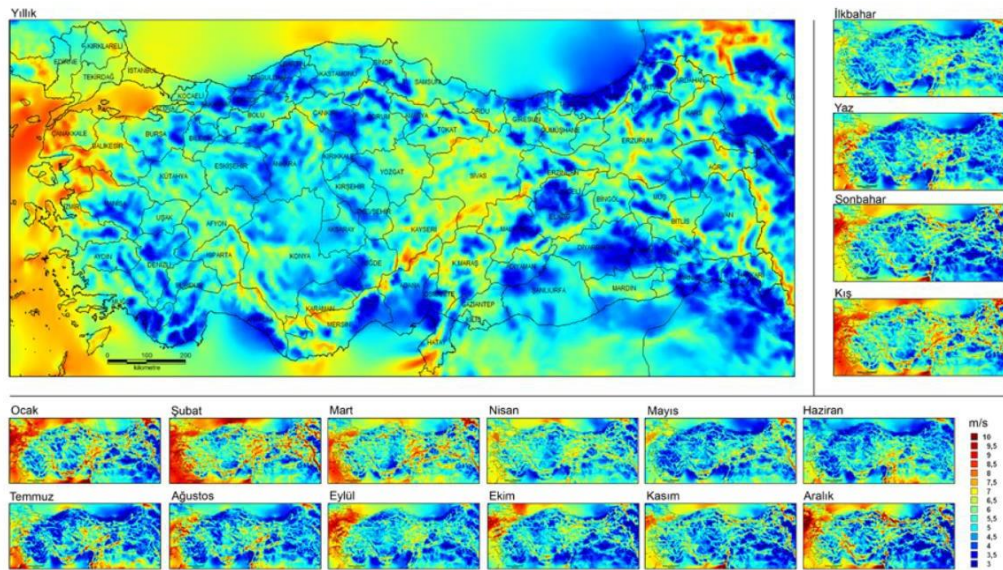
T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM) tarafından hazırlanan Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), rüzgar enerjisi potansiyeli incelemelerinde en basit haliyle bize fikir sunacak özelliklere sahiptir. Her il için de yapılmış özel atlaslar rüzgar enerjisi potansiyeli için gerekli öngörüü vermektedir. Fakat REPA'lar belli yüksekliklerde hazırlandığından ve RES'ler noktasal olarak ölçümler gerektirdiğinden kurulum için yeterli değildirler.

Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 50 metre yükseklikteki ortalama güç yoğunluğu dağılımını gösteren Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Şekil 1.2'de görülmektedir.



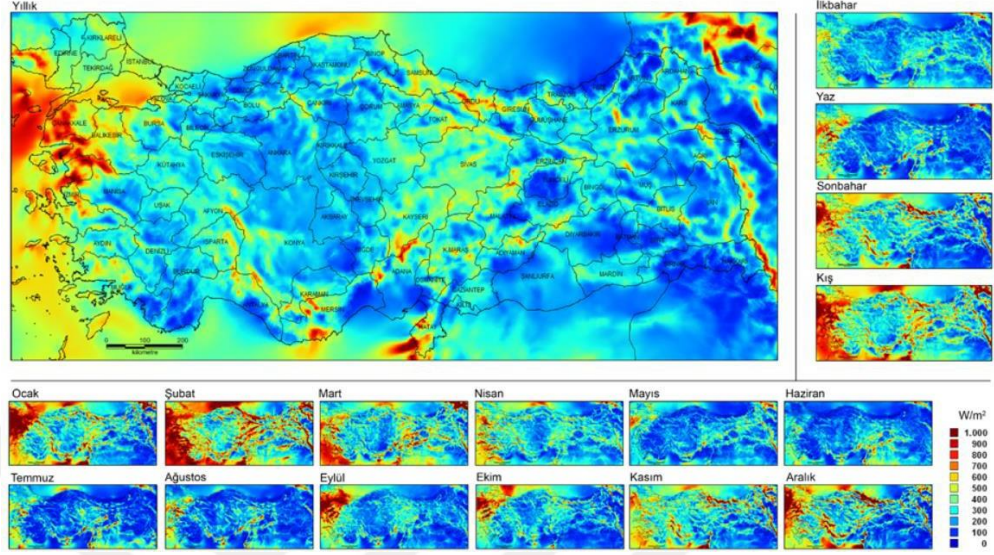
Şekil 1.2 Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 50 metre yükseklikteki ortalama güç yoğunluğu dağılımı (W/m^2) [15]

Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 50 metre yükseklikteki ortalama rüzgar hızları dağılımını gösteren Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Şekil 1.3'te görülmektedir.



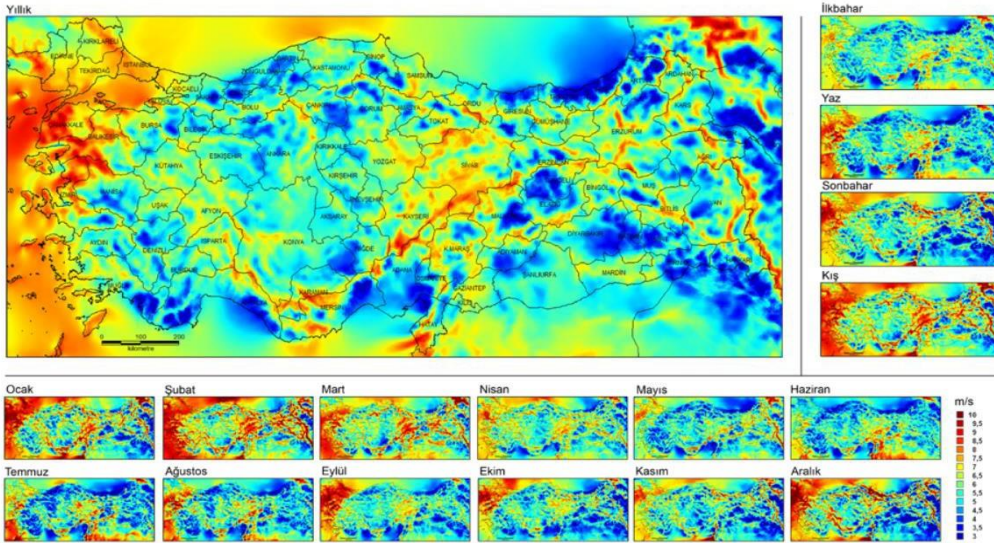
Şekil 1.3 Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 50 metre yükseklikteki ortalama rüzgar hızları dağılımı (m/s) [15]

Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 100 metre yükseklikteki ortalama güç yoğunluğu dağılımını gösteren Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Şekil 1.4'te görülmektedir.



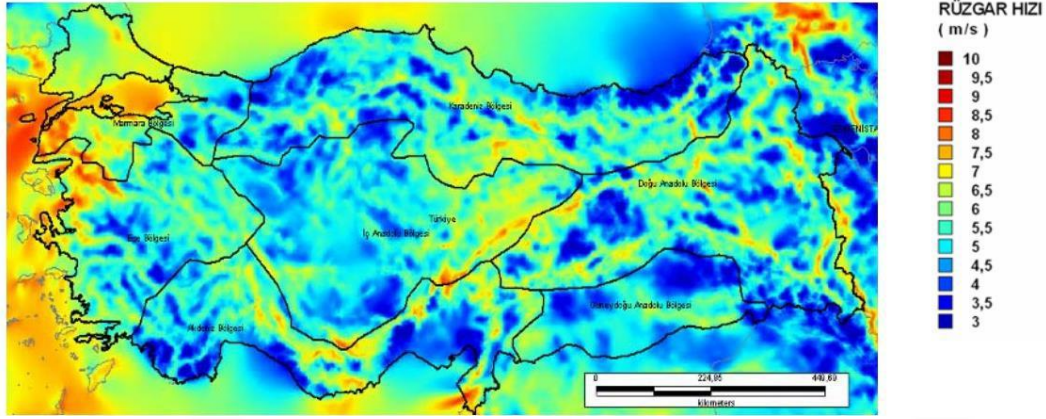
Şekil 1.4 Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 100 metre yükseklikteki ortalama güç yoğunluğu dağılımı (W/m^2) [15]

Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 100 metre yükseklikteki ortalama rüzgar hızları dağılımını gösteren Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Şekil 1.5'te görülmektedir.

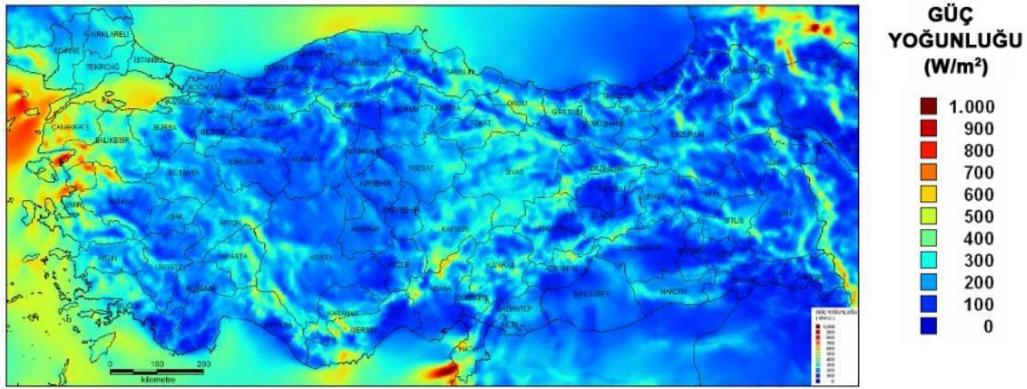


Şekil 1.5 Türkiye geneli mevsimlere ve aylara göre düzenlenmiş 100 metre yükseklikteki ortalama rüzgar hızları dağılımı (m/s) [15]

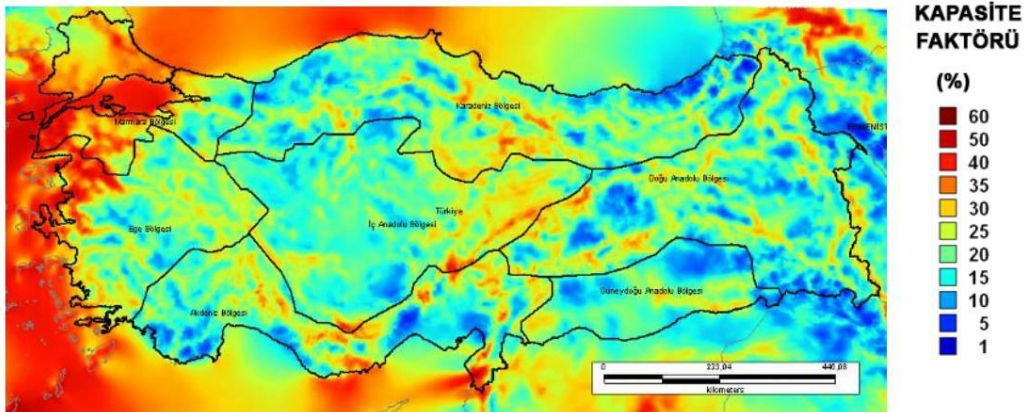
REPA'lar ile ayrıca farklı parametrelerin dağılımlarını da göstermektedir: Şekil 1.6, 1.7 ve 1.8'de Türkiye'nin rüzgar hızı, güç yoğunluğu ve kapasite faktörü verileri yer almaktadır.



Şekil 1.6 Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki ortalama rüzgar hızları dağılımı (m/s) [15]



Şekil 1.7 Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki ortalama güç yoğunluğu dağılımı (W/m²) [15]



Şekil 1.8 Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki kapasite faktörü dağılımı (%) [15]

1.2.2 WAsP

WAsP programının açılımı (Wind Atlas Analysis and Application Program). WAsP programı 1987 yılında DTU Risø National Laboratory Wind Energy and Atmospheric Physics bölümü tarafından kurulmuştur. WAsP programı, rüzgar türbinleri ve rüzgar tarlaları için rüzgar kaynağı değerlendirmesi, yerleştirme ve enerji verimi hesaplamaları için endüstri standartlı bir bilgisayar programıdır. Bu program tüm dünyada her türlü arazide bulunan mevkiler için kullanılır ve rüzgarverim analizinden rüzgar çiftliği için enerji veriminin hesaplanmasına kadar sürecin her adımı için modeller ve araçlar içerir [16].

Tipik bir WAsP programı:

- Tekli rüzgar türbinleri ve rüzgar tarlası için enerji veriminin hesaplanması.
- Rüzgar tarlası verimliliğinin hesaplanması.
- Seçilen alanlar üzerinde rüzgar kaynağı ve türbülans haritalaması.
- Rüzgar türbinlerinin ve rüzgar tarlalarının konumlandırması.
- IEC (International Electrotechnical Commission) saha değerlendirmesi için rüzgar koşullarının hesaplanması, örneğin tekli rüzgar türbini için ortalama rüzgar hızı, rüzgar akışı eğimi rüzgar kayması ve ortam türbülansı (Tam değerlendirme olması için WAsP mühendisliği gerektirir).

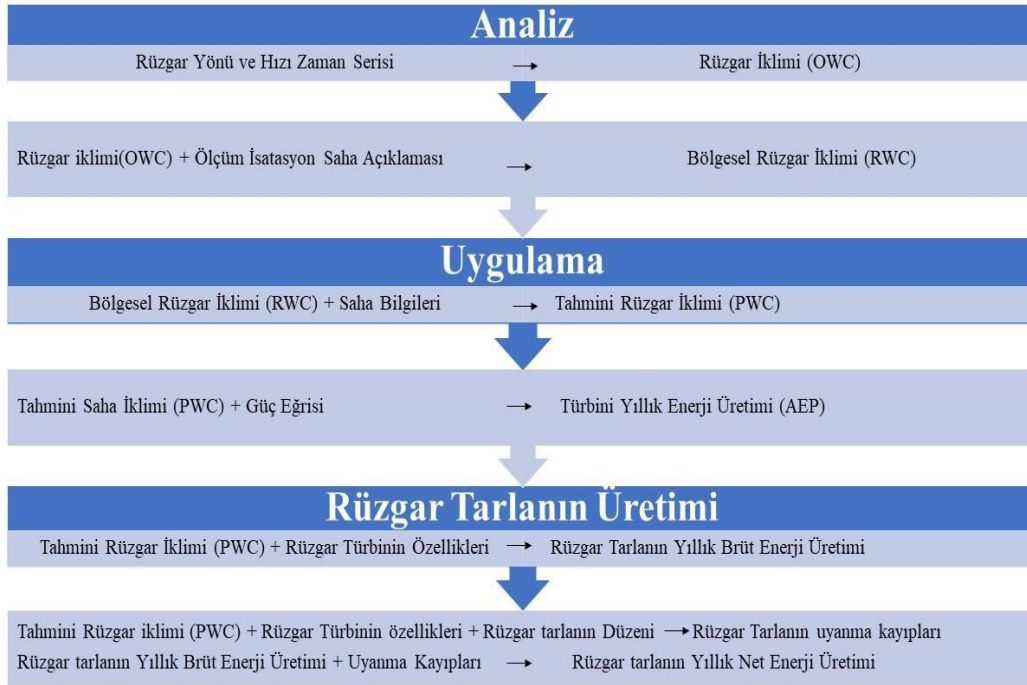
WAsP programı veri analizlerini, iki parametrelili Weibull dağılımına uygun bir şekilde yapmaktadır. Bu yazılım, dört değişik girdi bilgisini kendi alt modellerinde değerlendirerek, bölgesel rüzgar atlası istatistiklerini hesaplamaktadır [17]. WAsP programında kullanılan temel bilgiler:

- Rüzgar verisi.
- Bölge pürüzlülük bilgileri.
- Yakın çevre engel bilgileri.
- Bölgenin topoğrafyası.

WAsP programı beş ana hesaplama bölümünden oluşur [16]:

- Verilerin analizi: Bu seçenek, gözlemlenen, sahaya özgü rüzgar ikliminin istatistiksel bir özetini sağlamak için herhangi bir rüzgar ölçüm serisinin analizini mümkün kılar ve gözlemlenen, sahaya özgü rüzgar ikliminin istatistiksel bir özetini sunar.

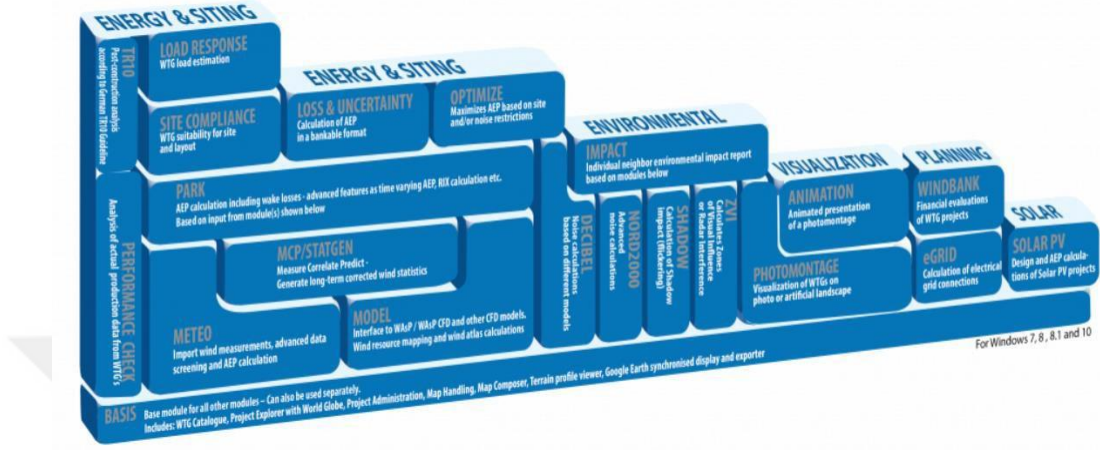
- Rüzgar atlası verilerinin oluşturulması: Analiz edilen rüzgar verileri, bölgesel bir rüzgar iklimine veya rüzgar atlası veri seti oluşturur. Rüzgar atlası veri setleri sahadan bağımsızdır.
 - Rüzgar iklim tahmini: WASP tarafından hesaplanan veya başka bir kaynaktan elde edilen bir rüzgar atlası veri kümesini kullanarak program, rüzgar atlası oluşturmak için kullanılan ters hesaplamayı gerçekleştirerek herhangi bir noktadaki rüzgar iklimini tahmin edebilir. Modeller, öngörülen sahanın etrafındaki arazinin açıklamalarını sunarak bu sahadaki gerçek, beklenen rüzgar iklimini tahmin edebilir.
 - Rüzgar gücünün potansiyelinin tahmini: Ortalama rüzgarın toplam enerji içeriği WASP tarafından hesaplanır. Ayrıca, bir rüzgar türbininin fiili, yıllık ortalama enerji üretiminin bir tahmini, WASP ile rüzgar türbinin güç eğrisi tarafından elde edilebilmektedir.
 - Rüzgar tarlasının üretiminin hesaplanması: Rüzgar türbininin itme katsayısı eğrisi ve rüzgar çiftliği yerleşimi göz önüne alındığında WASP, bir rüzgar tarlasındaki her türbin için ve tüm tarlanın net yıllık enerji üretimini tahmin edebilmektedir..
- WASP programının işleyiş mekanizması Şekil 1.9'da da görüldüğü üzere analiz, uygulama ve rüzgar tarlanın üretimi olmak üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır[16]:



Şekil 1.9 WASP programının işleyiş mekanizması [16]

1.2.3 WindPRO

WindPRO rüzgar enerjisi projelerinin tasarımı, geliştirilmesi ve değerlendirilmesi için bir yazılım uygulamasıdır. WindPRO, bir dizi modülden oluşur ve her bir modülün farklı bir amacı vardır. Bu modüller [18]:



Şekil 1.10 WindPRO programı farklı modülleri [18]

1- BASIS

WindPRO BASIS modülü tüm WindPRO hesaplama modüllerinin temelini oluşturmaktadır. BASIS ile, tipik olarak harita üzerinde konumlandırılan arka plan haritaları ve rüzgar türbinlerinden oluşan bir proje oluşturma erişiminiz vardır. Ayrıca, dijital yükseklik kontur çizgileri, çevre için gürültü hesaplamaları vb. diğer nesnelerin çoğu da BASIS modülünden oluşturulabilir. Ayrıca rüzgar türbini kataloğu, BASIS modülü aracılığıyla yönetilmektedir.

2- METEO

Bu modülle, gelecekteki rüzgar türbininin yer alacağı arazi ile (arazinin pürüzsüzlük faktörü göz önüne alınır) tutarlı olarak rüzgar verilerine dayalı enerji üretimini hesaplayabilirsiniz. Ölçümler önerilen rüzgar türbininin göbek yüksekliğinden farklı bir yükseklikte alınırsa, veriler bir rüzgar gradyanı üssü verilerek ekstrapole edilebilir. Yalnızca düz ve basit arazide (düşük engebeli) yükseklik ekstrapolasyonunun basit kuralları izlemesi beklenebilir. Modül, METEO nesnesi ve Meteo analizörünün bir karışımı olan ölçülen rüzgar verilerini içe aktarmak, taramak, analiz etmek için kapsamlı araçlara erişim sağlar.

METEO modülü normalde daha çok WAsP Interface ile bir Rüzgar İstatistiğinin oluşturulması için ölçülen rüzgar verilerini içe aktarmak, analiz etmek ve hazırlamak için kullanılmaktadır.

3- Model (ATLAS)

Bu modülle, bir arazi tanımına (pürüzsüz, basit tepeler ve engeller) ve bir Rüzgar İstatistiğine dayanan basit ATLAS modeline (Wind Atlas Method)'a göre enerji üretimini hesaplayabilirsiniz. Pürüzlülük modeli WAsP'deki ile aynıdır, ancak tepeler ve engeller WAsP'a göre daha az karmaşık akış modelleriyle hesaplanır. Bu nedenle, ATLAS yalnızca karmaşık olmayan arazilerde kullanılmalı ve asla dağlık arazide kullanılmamalıdır. ATLAS modelinin geleceği, model maliyetinin önemli olduğu daha küçük projeler (daha küçük türbinler) olacaktır.

4- Model (WAsP Interface)

Bu modül ile enerji üretimini WAsP'yi (RISØ, DK yazılımı) "hesaplama motoru" olarak kullanarak hesaplayabilirsiniz. WAsP'ye dahil edilen gelişmiş akış modeli ile Rüzgar Atlası yöntemi kullanılarak karmaşık arazilerin değerlendirilmesi yapılabilir. WAsP Interface, verileri hazırlamak ve kontrol etmek için WAsP için bir ön işlemcidir ve sonuçları bir raporda yazdırmak için bir son işlemcidir. Ayrıca, hesaplamaların kalitesini değerlendirmek için kullanıcıya değerli geri bildirimler sağlayan bir dizi analiz yapmak ve yazdırmak için kullanılır.

5- MCP/STATGEN

Bu modül, rüzgar ölçümlerinin uzun vadeli düzeltilmesi ve uzun vadeli düzeltilmiş rüzgar verilerine dayalı rüzgar istatistiklerinin oluşturulması için kullanılmaktadır. Bu modül ile METEO ve WAsP Interface modülleri ile ölçülen rüzgar verileri Rüzgar İstatistiklerine dönüştürülebilir. Modül, ölçülmüş rüzgar verilerini sadece belirlenmiş belirlenmiş bölgenin arazi koşullarına uygun bir rüzgar iklimi oluşturulmasını sağlar.

6- Model (Resource)

Bu modül, WAsP hesaplamasından ve isteğe bağlı bir rüzgar türbininin .rsf veya .wrg dosyasına dayalı bir rüzgar kaynağı haritası oluşturmak için bağımsız bir şekilde kullanılabilir. WAsP Interface modülü ile birlikte RESOURCE modülü, tek bir süreçte çok geniş alanlar için rüzgar kaynağı haritasını hesaplayabilir ve oluşturabilir. Kullanılan rüzgar verilerini sorunsuz bir şekilde değiştirebilir ve dijital haritaları WAsP hesaplamasında kullanılmak üzere otomatik olarak optimize edebilir (WAsP, bir kaynak hesaplamasında yalnızca sınırlı boyutlu harita dosyalarını işleyebilir). Son olarak, yerel engeller dahil edilebilir ve bir seferde birden fazla göbek yüksekliği (hub height) için hesaplamalar yapılabilir. WAsP'yi bağımsız bir

ürün olarak kullanırken bu yetenekler mevcut değildir. RESOURCE modülü ayrıca .rsf dosyalarına dayalı olarak OPTIMIZE modülüne anahtar girişi sağlar.

7- PARK

Bu modül rüzgar tarlaları için uyanma kayıplarını ve AEP (rüzgar türbininin yıllık enerji üretimi)'yi hesaplamak için kullanılır. PARK hesaplaması için girişler rüzgar türbini pozisyonları, türleri ve göbek yükseklikleri (hub heights), artı daha önce bahsedilen üç modülden birinden (ATLAS, METEO veya WAsP Interface), RESOURCE modülünden bir .rsf dosyasından veya bir CFD modelinden gönderilen rüzgar verileri. PARK modülünü kullanmak için, daha önce bahsedilen dört modülden birinin mevcut olması gerekir. PARK modülü, METEO verilerine dayalı olarak zamanla değişen AEP'yi de hesaplayabilir.

8- OPTIMIZE

Bu modül, büyük ölçekli park tasarımı için kullanışlı bir araç olan PARK Tasarım Nesnesine erişim sağlar. otomatik optimizasyon için bir parametre varyasyonu çalıştırabilir. Diğer otomatik enerji optimizasyon algoritması, daha karmaşıkarazilerde kullanıma dayanmaktadır. OPTIMIZE, PARK modülünü ve MODEL (RESOURCE) modülünü temel alır ve yalnızca her iki modül de mevcut olduğunda kullanılabilir [18]. Rüzgar enerji alanlarından alınan değerlerden hareketle elde edilebilecek enerji miktarının değerlendirilmesinde kullanılan bir başka yaklaşım da Weibull Dağılımı olarak isimlendirilir.

1.2.4 Weibull Dağılımı

Belli bir bölgedeki rüzgar potansiyelini belirlemek için olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılmaktadır. Olasılık yoğunluk fonksiyonu rüzgar hızlarının dağılımını tanımlayan matematiksel bir fonksiyondur. Bir olasılık dağılımının fonksiyonu $f(V)$, birikmiş olasılık dağılım fonksiyonunun $F(V)$ türevi olarak tanımlanır. V (m/sn) rüzgar hızı olduğunda onun olasılık yoğunluk fonksiyonu, (1.5) koşullarını sağlayan fonksiyondur. [19].

Hız değişim fonksiyonunun değişimleri toplamı 1'e eşit olup, fonksiyon daima sıfırdan büyüktür. Bağntı olarak ifade edilirse;

$$\int_0^{\infty} f(V)dV = 1 \longrightarrow f(V) > 0 \quad (1.5)$$

Kümülatif dağılım fonksiyonu

$$F(V > V^*) = 1 - \int_0^{V^*} f(V) dV = \int_{V^*}^{\infty} f(V) dV \quad (1.6)$$

şeklinde tanımlanır. (1.6)'dan doğal sonuç olarak (1.7) hesaplanabilir.

$$F(V_1 < V < V_2) = \int_{V_1}^{V_2} f(V) dV \quad (1.7)$$

Rüzgar hızı için İki Parametrelili Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun genel formu [19]:

$$f_w(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (1.8)$$

şeklindedir. Ortalama rüzgar hızı ve enerji potansiyelinin belirlenmesi için öncelikle Weibull parametreleri k ve c'nin bulunması gereklidir [19].

Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu,

$$F_w(V) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (1.9)$$

şeklindedir. Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu, rüzgar hızının, belli bir V değerinden küçük yada eşit gerçekleşme olma olasılığını verir [19].

Formülü kısaltmak adına $x = \left(\frac{V}{c}\right)^k$ kabulü ile Weibull olasılık fonksiyonu veya parametreleri (k, c) bilindiği zaman ortalama hız denklem 1.10'daki gibi hesaplanabilir [20]

$$V_m = c \int_c^{\infty} (e^{-x}) (e^{1/k}) dx \quad (1.10)$$

Denklem 1.10 standart Gamma fonksiyonu formudur. Ortalama hız Gamma fonksiyonu kullanılarak denklem 1.11'deki şekilde hesaplanabilir [20]:

$$V_m = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (1.11)$$

Formülü kısaltmak adına $n = \left(1 + \frac{1}{k}\right)$ kabulü ile Gamma fonksiyonu yaklaşık olarak denklem 1.12'deki gibi hesaplanır [20]:

$$\Gamma(n) = (\sqrt{2\pi})(n^{n-1})(e^{-n}) \left(1 + \frac{1}{12n} - \frac{1}{51840n^3} + \dots\right) \quad (1.12)$$

Küpkök ortalama hız ise denklem 1.13'teki gibi hesaplanmıştır [20]:

$$V_{rmc} = \left[c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \right]^{1/3} \quad (1.13)$$

Weibull parametreleri k ve c ise grafik yöntemi ile şu şekilde elde edilir:

- Kümülatif dağılım fonksiyonu denklem 1.14'teki gibidir [20]:

$$1 - F(V) = \exp \left(- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right) \quad (1.14)$$

- Denklem 1.14'teki eşitliğin her iki tarafının 2 kez logaritması alınır

$$\ln \{ -\ln[1 - F(V)] \} = k \ln(V_i) - k \ln(c) \quad (1.15)$$

denklem 1.15 elde edilmektedir [20]. Denklemdeki terimlerden $\ln(V_i)$ değerlerini x eksenine, $\ln \{ -\ln[1 - F(V)] \}$ değerleri ise, y eksenine yerleştirilerek bir grafik hazırlanır. Çizilen eğrinin eğimi k şekil faktörünü verirken, eğrinin Y-eksenini kestiği yer ise $-k \ln(c)$ değerine eşit olmaktadır. Grafiği hazırlanan verilere eğri uydurularak, eğrinin denklemi elde edilerek k ve c değerleri bulunabilir [20]. Weibull yaklaşımı ile ulaşılan ortalama hız değeri ile rüzgar enerjisi hesabı aşağıdaki gibi yapılır:

- Birim rotor alanı başına rüzgar gücü potansiyeli, V rüzgar hızı olmak üzere;

$$P_v = \frac{1}{2} \rho_a A V^3 \quad (1.16)$$

denklem 1.16 ile hesaplanır [20]. Rüzgar hızı V'nin hüküm sürdüğü zaman oranı ise $f(V)$ ile verilmiştir. V hızının katkısıyla birim zamandaki enerji potansiyeli $P_v \cdot f(v)$ şeklinde hesaplanabilir. Rüzgar rejimindeki bütün hız değerlerinin katkısıyla birim zamanda ve birim rotor alanı başına toplam güç potansiyeli 'enerji yoğunluğu potansiyeli' olarak ifade edilir. Buradaki hava yoğunluğu da bu tezdeki hesaplamalarda $1,23 \text{ kg/m}^3$ olarak kabul edilip standart değer olarak kullanılmıştır.

- Enerji yoğunluğu potansiyeli (birim rotor alanı başına güç potansiyeli) denklem 1.17 bağıntısı ile hesaplanabilir [20]:

$$E_D = \frac{\rho_a}{2} V_{rmc}^3 \quad (1.17)$$

- Belli bir periyottaki enerji potansiyeli denklem 1.18 bağıntısı ile hesaplanabilir [20]:

$$E_I = E_D T \quad (1.18)$$

Burada T periyot uzunluğudur. Eğer $T=24$ alınır, E_I günlük enerji değerini, $T=8760$ ($365 \text{ gün} \cdot 24 \text{ saat}$) alınır, E_I enerji yıllık miktarını verir [20].

- Mod hızı (en sık görülen hız) denklem 1.19 bağıntısı ile hesaplanabilir [20]:

$$V_{\text{mod}} = c \left(\frac{k-1}{k} \right)^{1/k} \quad (1.19)$$

Diğer yandan, rüzgar rejiminde hız değerleri değişkendir ve toplam enerji hesaplanırken, bütün hızlar hesaba dahil edilir [20]:

- Rejime maksimum enerjiyi sağlayan hız:

$$V_{E,MAX} = \frac{c(k+2)^{1/k}}{k^{1/k}} \quad (1.20)$$

Böylelikle ele alınan konumdaki rüzgar enerjisi potansiyeline dair tüm verilerden hareketle belli bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli hesapları yapılabilir [20].

Ayrıca Hellman Bağıntısına benzer olarak kullanılan ve ek olarak referans bölgesindeki pürüzlülüğün de dikkate alındığı Prof.Dr. Yusuf Ali KARA'nın ders notlarında yer alan bilgiler ile farklı bir bölgedeki rüzgar hızı değerleri hesaplanabilir. İlk olarak rüzgar hızının yüzey özelliklerinden etkilenmediği (hız profilinin benzer olduğu) belli bir yükseklik değeri kabul edilir. Bu değer genellikle 60 m olarak kabul edilir. Ve bir referans yerin verileri kullanılarak başka bir yerde farklı bir yükseklikteki hız aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$V(Z) = V(Z_R) \frac{\ln(60/Z_{OR}) \ln(Z/Z_O)}{\ln(60/Z_O) \ln(Z_R/Z_{OR})} \quad (1.21)$$

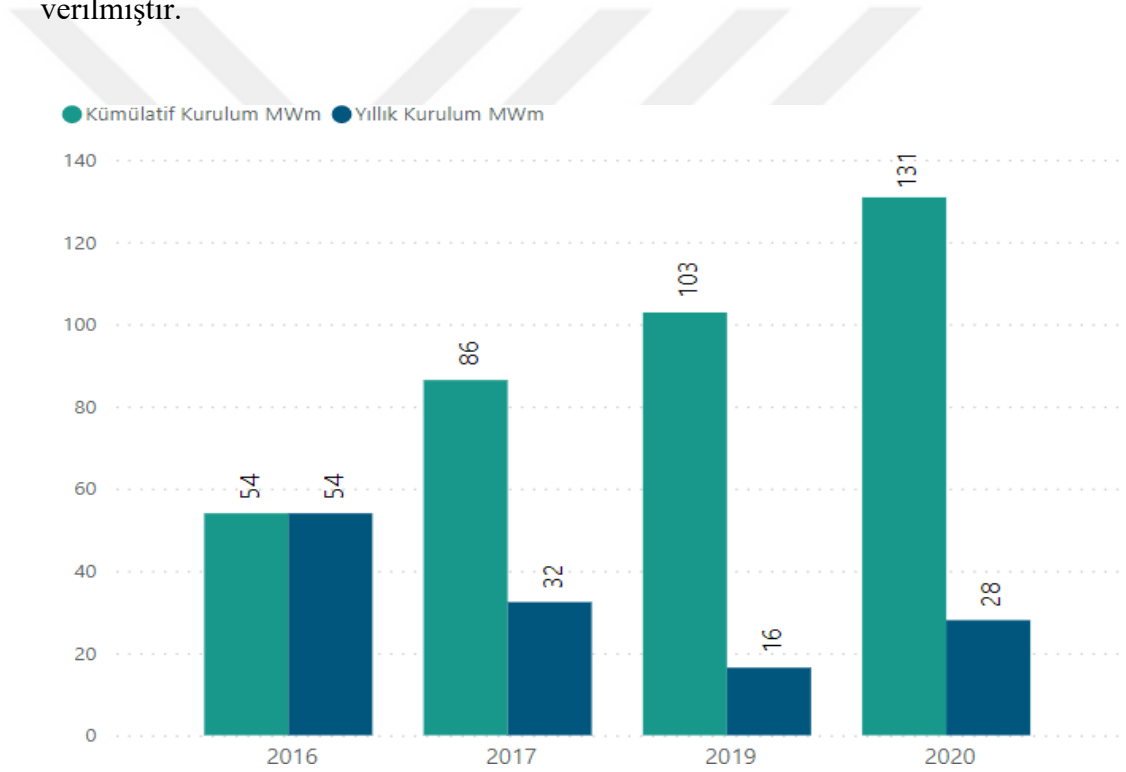
Burada ZR, ZOR ve V(ZR) referans yerin (ölçüm istasyonu) yüksekliği ve pürüzlülük yüksekliği, ve ölçülen hız değerini Z, ZO ve V(Z) ise türbinin kurulacağı yerin yüksekliği, pürüzlülük yüksekliği ve hesaplanmak istenen hızıdır. Bu formül, referans yer ile türbinin kurulacağı yerdeki hız profilinin benzer olduğu kabulüne dayanır.

2. MATERYAL VE METOD

Yalova Üniversitesi rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgar enerji potansiyeli belirleme çalışmaları yapılmış çalışma sonuçları ile karşılaştırılması hedeflenmiştir.

2.1 Yalova Üniversitesi İçin Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi

Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB) tarafından sürekli güncellenen veriler ile hazırlanmış grafiklerden yararlanarak Yalova için 2016, 2017, 2019 ve 2020 yılları için kümülatif kurulum/yıllık kurulum (MWm) verilerinin değişimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Yalova için rüzgar enerjisi santralleri kurulum grafiği [1]

TÜREB'in 2021 yılı Rüzgar Enerjisi Santralleri Raporu'nda yer alan bilgilere göre Yalova'da aktif 4 adet Rüzgar Enerjisi Santrali (RES) bulunmaktadır. Söz konusu santrallerin Yalova haritasındaki yerleri Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Yalova'daki rüzgar enerjisi santrallerinin konumları [1]

Yalova'da işletmede bulunan Rüzgar Enerjisi Santrali (RES) hakkında yatırımcı, firma adı, proje adı, kurulu güç (MWm), türbin gücü (MW) ve işletmeye giriş tarihi gibi bilgiler de Çizelge 2.1'de verilmiştir. Buradan da 2018 yılında veri olmama sebebinin de o yılda işletmeye alından Rüzgar Enerjisi Santrali (RES) olmadığı sonucuna varılmaktadır.

Çizelge 2.1: Yalova'da kurulu rüzgar enerjisi santrallerinin özellikleri [1]

Yatırımcı	Firma Adı	Proje Adı	Kurulu Güç (MWm)	Türbin Gücü (MW)	İşletmeye Giriş Tarihi
AĞAOĞLU ENERJİ	Marmarares Elektrik	Esenköy RES	32,4	3,6	2017
BEREKET ENERJİ	Arova RES Elektrik	Yalova RES	54	1,5	2016
DEMİRER ENERJİ	Güvenres Enerji	Çakıl RES	28	4	2020
DEMİRER ENERJİ	Güvenres Enerji	Çakıl RES	16,45	2,35	2019

2.1.1 Yalova Üniversitesi İçin Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) Kullanımı

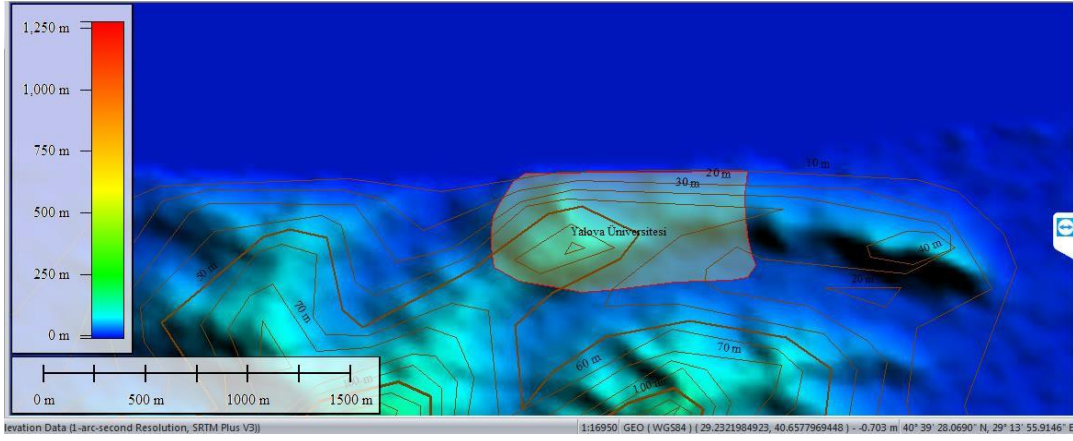
Yalova Üniversitesi rüzgar enerji potansiyelini belirlemek için kurulması planlanan ölçüm istasyonu dönemin küresel sorunu olan koronavirüs vakası dolayısı ile kurulamamıştır. Fakat Climate Copernicus sitesi sayesinde Yalova Üniversitesi'nin konumu olan 40°39'10"N-29°12'46"E koordinatları için 100 m istasyon yüksekliğinde 10 yıllık (01.01.2012 ile 18.04.2021 yılları arası) rüzgar verileri temin edilmiştir.



Şekil 2.3 Yalova Üniversitesi kampüs alanının uydu görünümü (Google Earth)

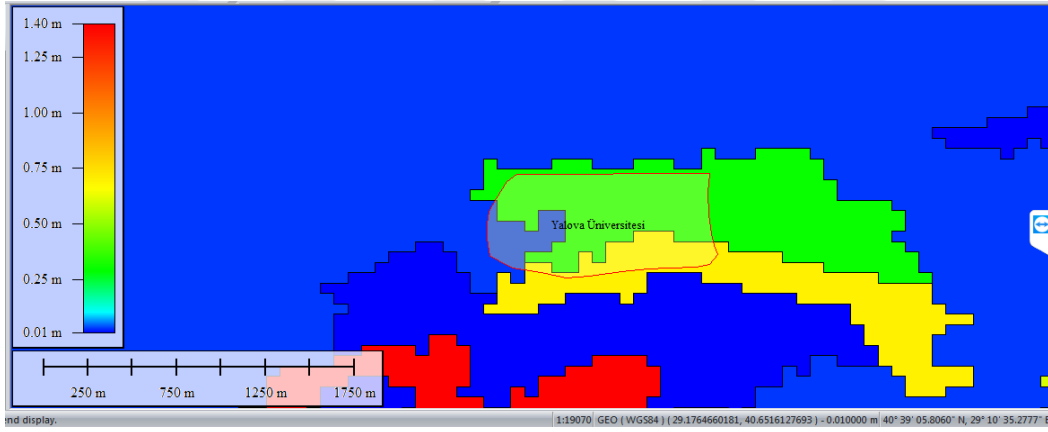
Ayrıca Google Earth bilgisayar programı kullanılarak Şekil 2.3'te görüldüğü üzere Yalova Üniversitesi'nin kampüs alanının sınırları belirlenmiştir. Belirlenen bu sınırlar Global Mapper programına entegre edilip bölgenin yükseltisi ve pürüzlülüğü incelenmiştir.

Şekil 2.4'te görüldüğü üzere Yalova Üniversitesi'nin kampüs alanının sınırlarının yaklaşık 20 - 100m yüksekliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



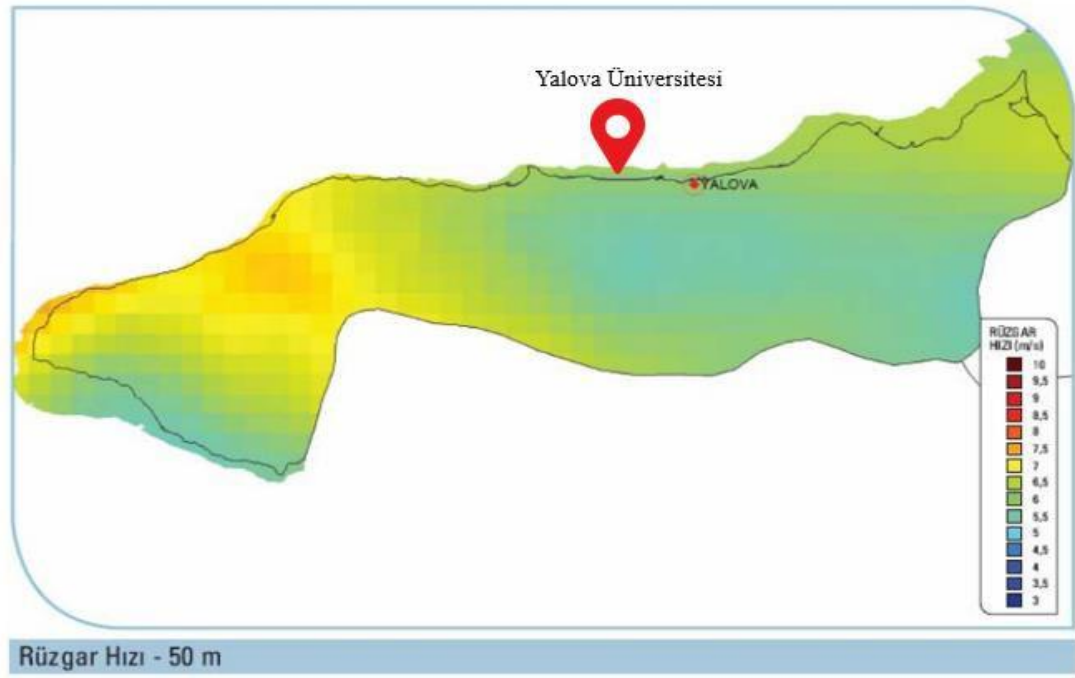
Şekil 2.4 Yalova Üniversitesi kampüs alanının yükselti değerleri (Global Mapper)

Şekil 2.5 incelendiğinde de Yalova Üniversitesi'nin kampüs alanının sınırlarının yaklaşık 0.20 - 0.70 m pürüzlülüğe sahip olduğu görülmüştür.



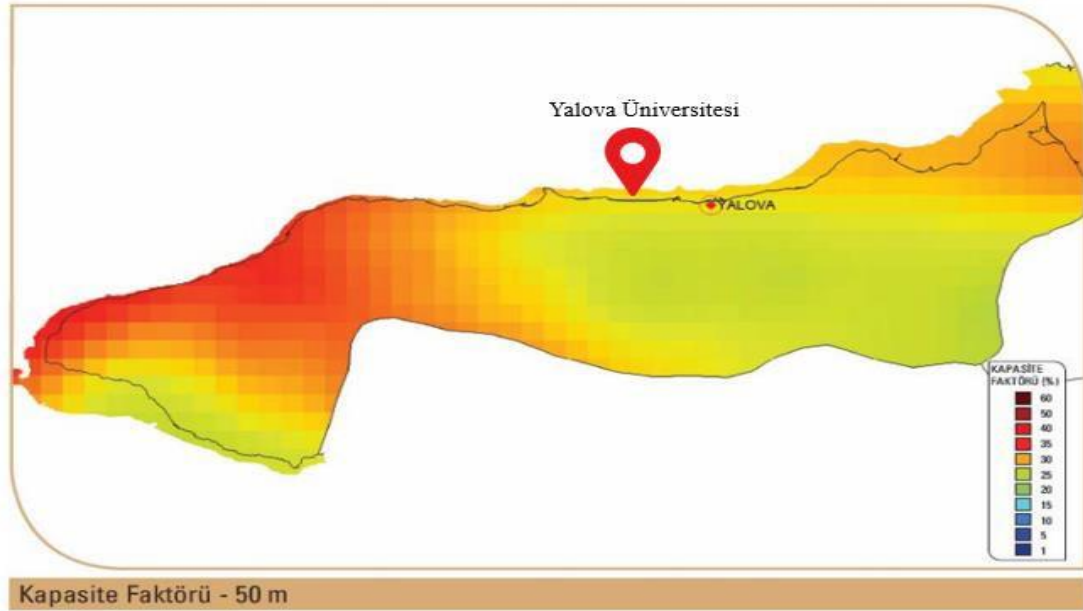
Şekil 2.5 Yalova Üniversitesi kampüs alanının pürüzlülük değerleri (Global Mapper)

EİGM (Enerji İşleri Genel Müdürlüğü)'nin hazırlamış olduğu REPA (Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası) verilerine göre Yalova Üniversitesi'nin konumu baz alındığında Şekil 2.6'da görüldüğü üzere 50 m yükseklikteki rüzgar hızı yaklaşık 6 m/s olarak belirlenmiştir. Bu bölge EİGM tarafından Yalova'da RES kulumu için minimum belirlenen 7 m/s rüzgar hızı için yakın bir değere sahip olduğu anlamına gelmektedir.



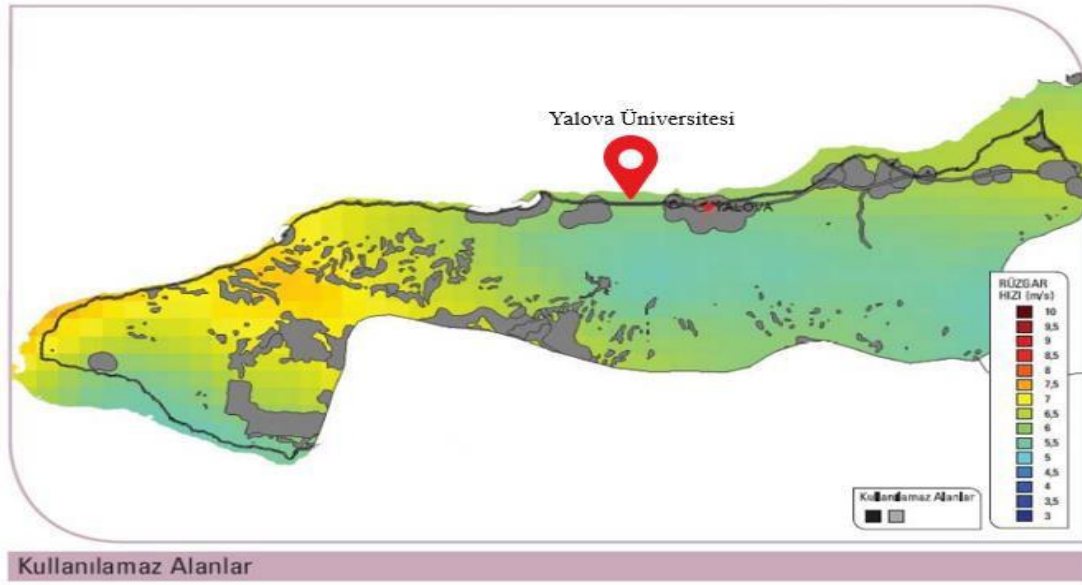
Şekil 2.6 Yalova Üniversitesi için 50 m'de rüzgar hızı dağılımı (m/s) [15]

Şekil 2.7'de yer alan REPA'ya göre Yalova Üniversitesi'nin kapasite faktörü %30 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.7 Yalova Üniversitesi için 50 m'de kapasite faktörü dağılımı (%) [15]

Şekil 2.6'da Yalova ili genelinde kullanılamaz alanların görünümü verilmiştir. Kullanılamaz alanlar incelendiğinde Üniversitesi'nin kullanılamaz alanlara girmediği görülmektedir.



Şekil 2.8 Yalova Üniversitesi için 50 m'de kullanılmaz alanlar [15]

EİGM'nin Yalova ili için hazırlamış olduğu REPA dosyasında yer alan Çizelge 2.3'e göre Yalova ilinde kurulabilecek RES'ler için toplam alan 106,62 km² ve toplam kurulu güç 533,12 MW'tır.

Çizelge 2.2: Yalova iline kurulabilecek RES güç kapasitesi [15]

50 m'de Rüzgar Gücü (W/ m ²)	50 m'de Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Alan (km ²)	Toplam Kurulu Güç (MW)
300-400	6,8-7,5	77,36	386,80
400-500	7,5-8,1	29,20	146,00
500-600	8,1-8,6	0,06	0,32
600-800	8,6-9,5	0,00	0,00
>800	>9,5	0,00	0,00
Toplam		106,62	533,12

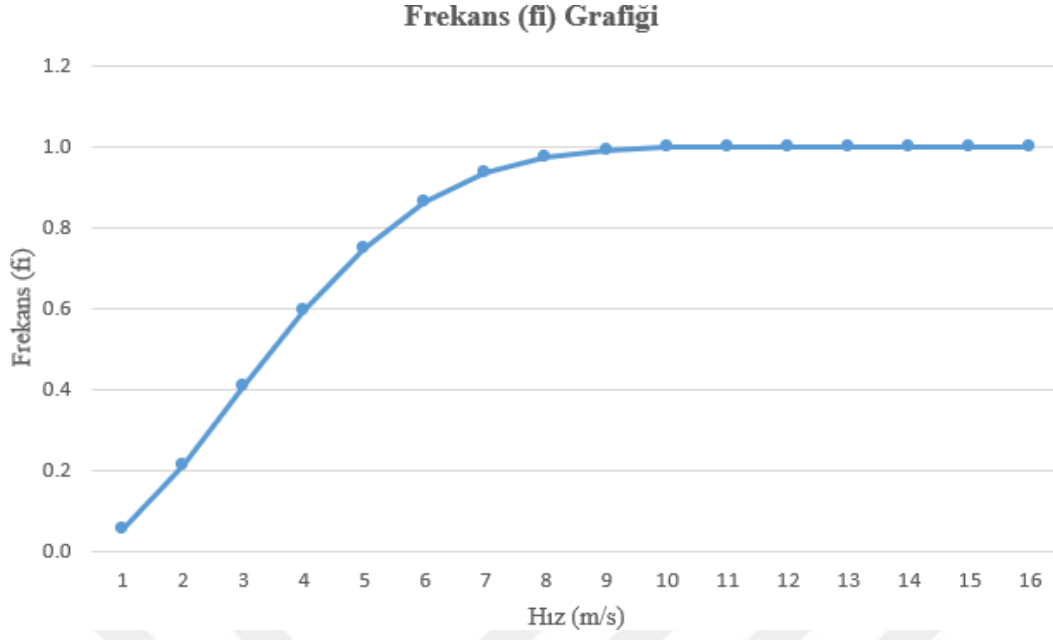
2.1.2 Yalova Üniversitesi İçin Weibull Dağılımı Kullanımı

Yalova Üniversitesi'nin rüzgar potansiyelini belirlemede Climate Copernicus sitesinden temin edilen Yalova Üniversitesi'nin konumu olan 40°39'10"N- 29°12'46"E koordinatları için 100 m istasyon yüksekliğinde 10 yıllık (01.01.2012 ile 18.04.2021 yılları arası) saatlik (815002 saat) rüzgar verileri kullanılmıştır. Bu veriler ile weibull dağılımını hesaplamak için 1.2.4 Wibull Dağılımı kısmında yer alan formüller Excel'e entegre edilerek kullanılmış ve rüzgar hızı değerlerine bağlı olarak Çizelge 2.3'teki frekans değerlerine ulaşılmıştır.

Çizelge 2.3: Yalova Üniversitesi için 10 yıllık (01.01.2012 - 18.04.2021) yılı rüzgar hızı ve frekans verileri

Hız, V (m/s)	Frekans	Toplam Frekans	Frekans (fi), F(V)
0	4191	4191	0.05142205099
1	12876	17067	0.20940590415
2	16156	33223	0.40763416849
3	15109	48332	0.59301612230
4	12634	60966	0.74803072317
5	9427	70393	0.86369659640
6	5724	76117	0.93392800177
7	3013	79130	0.97089641972
8	1523	80653	0.98958307772
9	604	81257	0.99699393880
10	164	81421	0.99900615936
11	53	81474	0.99965645015
12	14	81488	0.99982822507
13	12	81500	0.99997546072
14	2	81502	1
15	0	81502	1

Çizelge 2.3'te hesaplanıp listelenmiş olan Frekans (fi) değerlerinin hız verilerine göre olan grafiği Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.9 Ölçüm verilerinin frekans (fi) grafiği

1-15 m/s aralığındaki hız verileri ve Çizelge 2.3'te hesaplanmış olan frekans ($F(V)$) değerleri kullanılıp $\ln(V)$ ve $\ln(-\ln(1-F(V)))$ değerleri hesaplanarak, Çizelge 2.4'teki çizelge oluşturulmuştur.

Çizelge 2.4: Yalova Üniversitesi için 10 yıllık (01.01.2012 - 18.04.2021) yılı rüzgar hızı ve weibull verileri

Hız, V (m/s)	$\ln(V)$	$\ln(-\ln(1-F(V)))$	Weibull f(V)
1	0	-2.941408654	0.445110242
2	0.693147181	-1.448294896	0.749557501
3	1.098612289	-0.646968277	0.848657919
4	1.386294361	-0.106492593	0.765092604
5	1.609437912	0.320958313	0.579185949
6	1.791759469	0.689576799	0.377005490
7	1.945910149	0.999532103	0.213706193
8	2.079441542	1.263248963	0.106299396
9	2.197224577	1.518270344	0.046626196
10	2.302585093	1.759085548	0.018096073
11	2.397895273	1.933538750	0.006229429
12	2.484906650	2.076459391	0.001905484
13	2.564949357	2.159790992	0.000518626
14	2.639057330	2.362290295	0.000125738
15	2.708050201	-	2.71777E-05

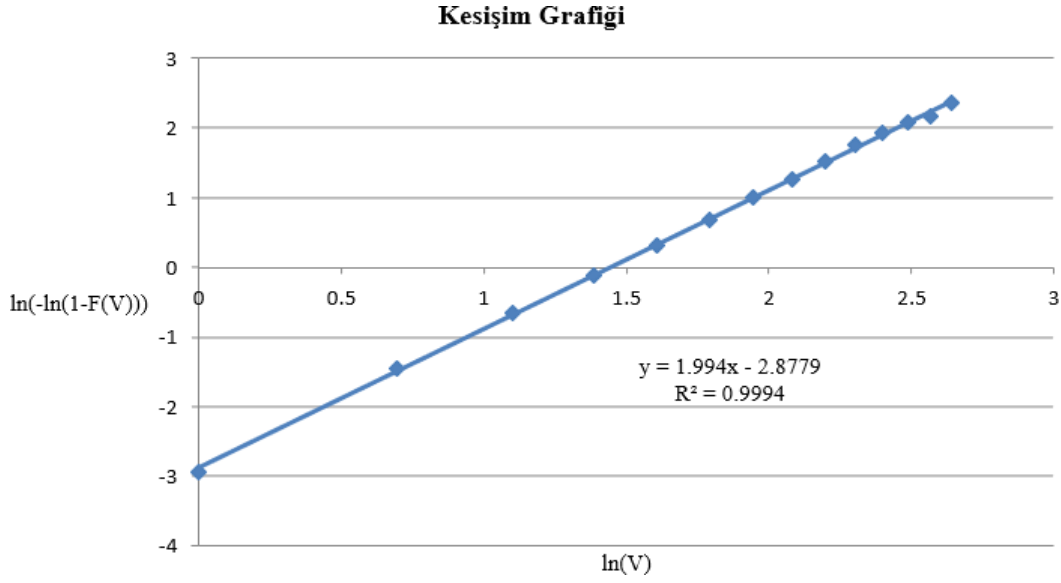
Çizelge 2.4'te yer alan $\ln(V)$ x eksenini $\ln(-\ln(1-F(V)))$ de y eksenini karşılamak üzere Excel'de regresyon analizi yapılmıştır (Çizelge 2.5).Yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen “X Değişkeni 1” değeri k parametresini verirken ÜS(- (Kesişim/X Değişkeni 1)) formülünün hesaplanması sonucunda da c parametresi elde edilmiştir.

Çizelge 2.5: $\ln(V)$ ve $\ln(-\ln(1-F(V)))$ değerleri ile hesaplanmış regresyon analizi

ÖZET ÇIKIŞI						
Regresyon İstatistikleri						
Çoklu R	0.99971395					
R Kare	0.99942797					
Ayarlı R Kare	0.99938030					
Standart Hata	0.03843569					
Gözlem	14					
ANOVA						
	df	SS	MS	F	Anlamlılık F	
Regresyon	1	30.97310	30.97310	20965.9838	8E-21	
Fark	12	0.017728	0.001477			
Toplam	13	30.99083				
	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri	Düşük %95	Yüksek %95
Kesişim	-2.87794470	0.026824	-107.29	2.88E-19	-2.936	-2.82
X Değişkeni 1	1.99398086	0.013771	144.80	7.91E-21	1.964	2.024

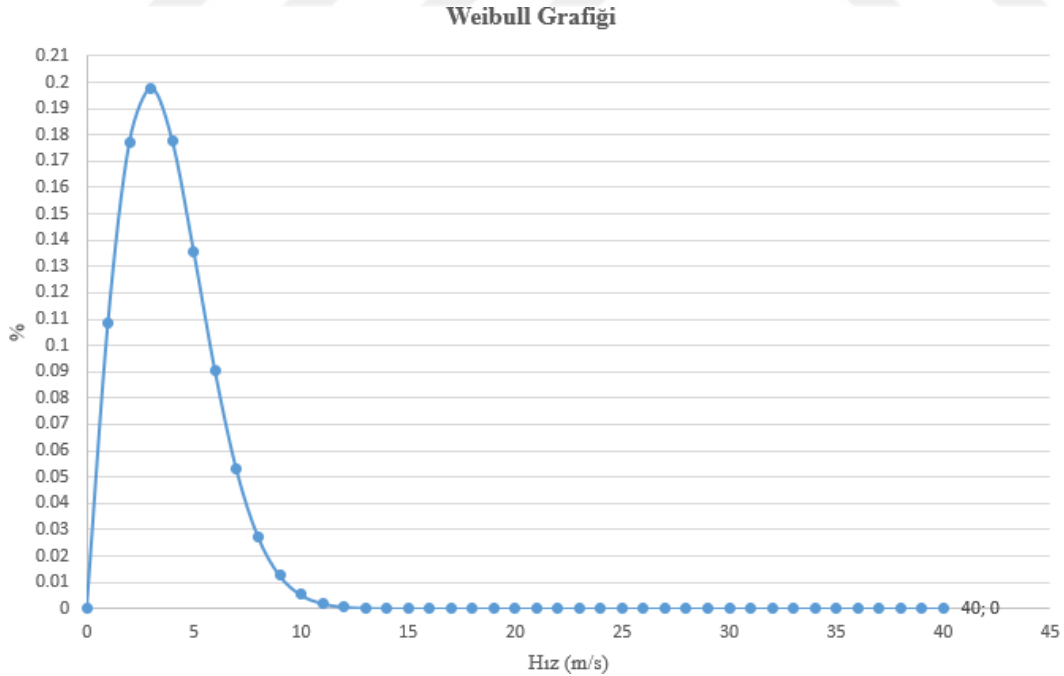
Ayrıca Çizelge 2.5'te yer alan Weibull $f(V)$ değerleri de k ve c parametrelerinin bulunmasının ardından 1.2.4 Wibull Dağılımı bölümünde yer alan Denklem 1.8 kullanılarak elde edilmiştir.

$\ln(V)$ x eksenini $\ln(-\ln(1-F(V)))$ de y eksenini oluşturacak şekilde çizilen grafikte yer alan kesişim noktası denkleminde ($y = 1.994x - 2.8779$) de k ve c parametrelerine ulaşılabilir (Şekil 2.8). Grafikte yer alan denklemdeki x'in katsayısı regresyon analizindeki “X Değişkeni 1” değerini verirken sabit katsayı da “Kesişim”i vermiştir.



Şekil 2.10 $\ln(V)$ ve $\ln(-\ln(1-F(V)))$ değerlerinin kesişim grafiği

Çizelge 2.4'te hesaplanıp listelenmiş olan Weibull $f(V)$ değerlerinin hız ve % eksenlerinde incelendiği Weibull Dağılımını gösteren Weibull Grafiği Şekil 2.9'da görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Bu grafik ile Yalova Üniversitesi'nde rüzgar hızı değerlerinin yüzdelik olarak görülme miktarı incelenmiştir.



Şekil 2.11 Weibull $f(V)$ değerlerinin hız ve % eksenlerinde incelendiği Weibull Grafiği

Çizelge 2.6: Yalova Üniversitesi için 10 yıllık (01.01.2012 - 18.04.2021) yılı
rüzgar potansiyeli bulguları

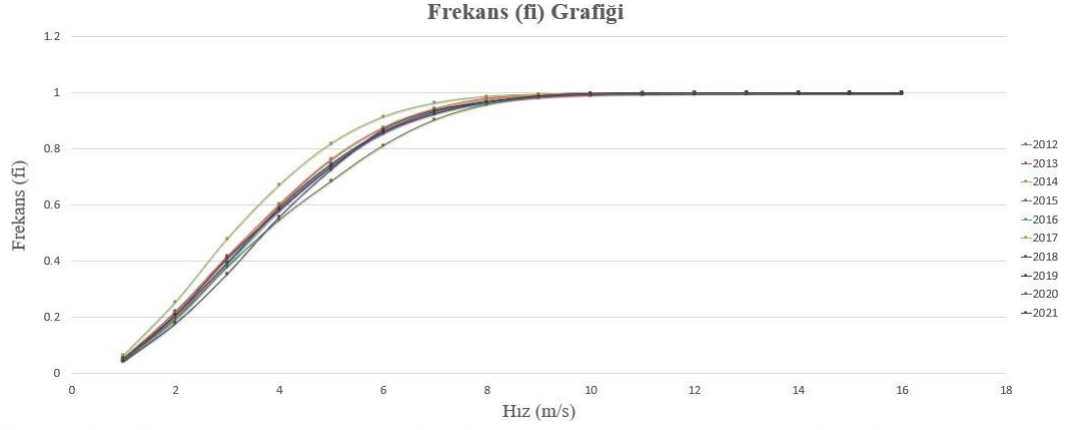
Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		1.993980861
c	m/s	4.234715345
n		1.501509327
V _m	m/s	3.753081310
V _{mod}	m/s	2.986733042
V _{max}	m/s	5.999596748
n _{rms}		2.504527982
n _{gama}		1.333586293
V _{rms}		4.661202067
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	62.282911601
Enerji potansiyeli, E _I	kWh/m ² -yıl	545.598305627
Teorik üretilebilir enerji, E _I	kWh/m ² -yıl	321.903000320

Çizelge 2.6'da ölçülen veriler sonucunda 1.2.4 Wibull Dağılımı bölümünde yer alan denklemler kullanılarak Excel'de hesaplanmış rüzgar hızı, rüzgar gücü ve rüzgar enerji potansiyeli değerleri verilmiştir. Böylece Yalova Üniversitesi' için 10 yıllık veriler sonucunda Yalova Üniversitesi'nin Rüzgar gücü potansiyeli (E_D) (Denklem 1.17 kullanılarak hesaplanmıştır), Enerji potansiyeli (E_I) (Denklem 1.18 kullanılarak hesaplanmıştır) ve Teorik üretilebilir enerji (E_I)(E_I*0,59(betz limiti)) sırasıyla 62.283 W/m², 545.598 kWh/m²-yıl ve 321.903 kWh/m²-yıl olarak hesaplanmıştır.

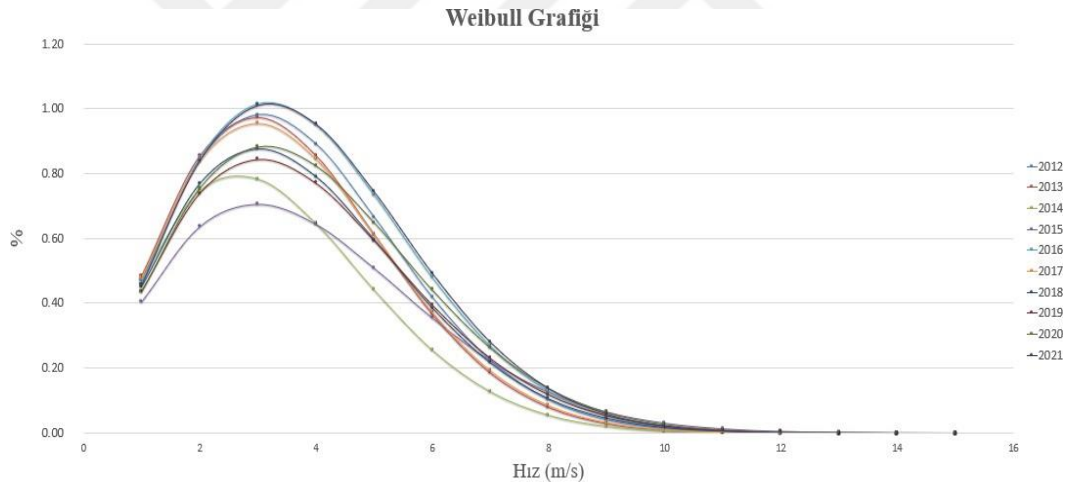
Çizelge 2.7: Yalova Üniversitesi için 10 yılın ayrı ayrı (01.01.2012 - 18.04.2021) yıllık rüzgar potansiyeli bulguları

Yıl	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
k	2.077	2.074	1.955	1.892	2.097	2.062	2.012	1.991	2.017	2.094
c	4.203	4.052	3.834	4.416	4.341	4.087	4.227	4.310	4.415	4.386
V _m	1.481	1.482	1.511	1.528	1.477	1.485	1.497	1.502	1.496	1.478
V _{mod}	3.723	3.589	3.399	3.919	3.845	3.620	3.746	3.820	3.912	3.885
V _{max}	3.064	2.950	2.658	2.968	3.187	2.962	3.004	3.036	3.144	3.217
V _{rms}	5.816	5.611	5.497	6.464	5.975	5.678	5.957	6.112	6.213	6.041
ED	2.444	2.446	2.534	2.585	2.431	2.455	2.491	2.507	2.487	2.433
EI	1.27	1.281	1.362	1.414	1.268	1.288	1.321	1.336	1.318	1.269

EK A.1 ile EK A.10 arasında yer alan 2012 ile 2021 yılları arasındaki 10 yıllık veriler kullanılarak Çizelge 2.7'deki sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile de Şekil 2.12 ve 2.13'teki frekans ve Weibull grafikleri oluşturulmuştur.

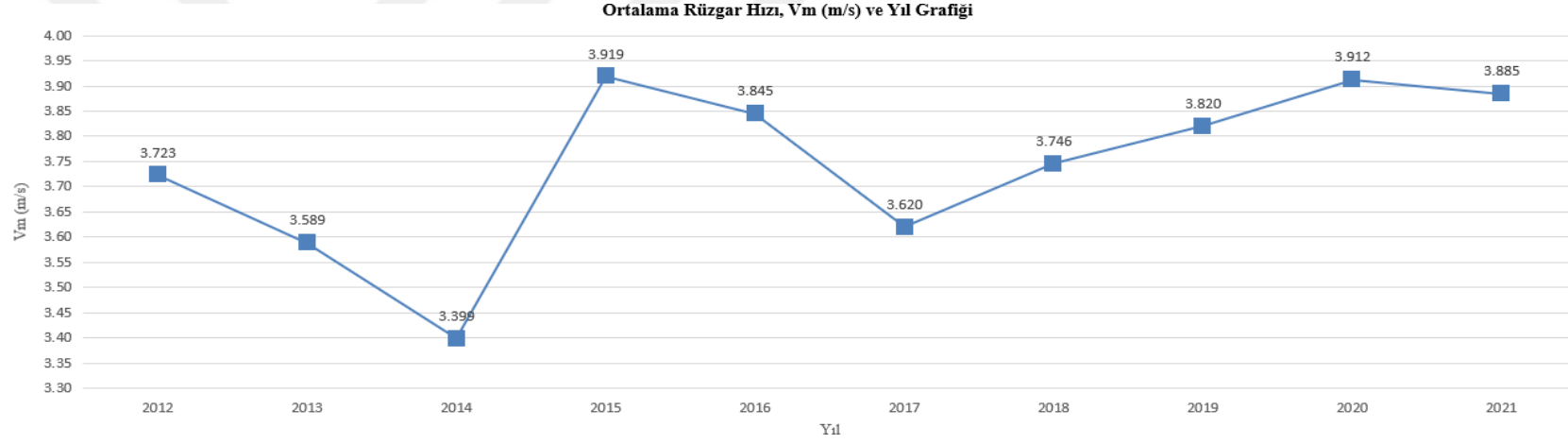


Şekil 2.12 Yalova Üniversitesi için 10 yılın ayrı ayrı (01.01.2012 - 18.04.2021) yıllık frekans (fi) eğrileri

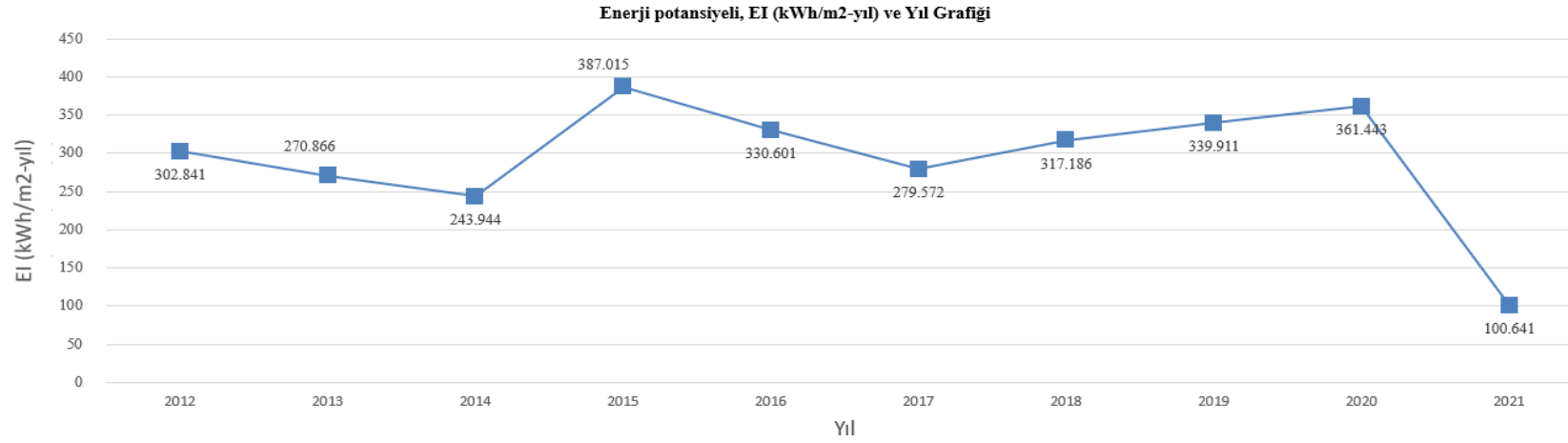


Şekil 2.13 Yalova Üniversitesi için 10 yılın ayrı ayrı (01.01.2012 - 18.04.2021) yıllık Weibull eğrileri

Çizelge 2.7'deki sonuçlar elde edilmiş verilerdeki. Ortalama rüzgar hızı (V_m) ve Enerji Potansiyeli (EI) grafikleri de Şekil 2.14 ve 2.15'te yer almaktadır. Bu şekillerin incelenmesi sonucunda da en yüksek ortalama hız 3.919 m/s ile ve enerji potansiyeli 387.015 kWh/m²-yıl ile 2001 yılında gerçekleştiği görülmektedir.



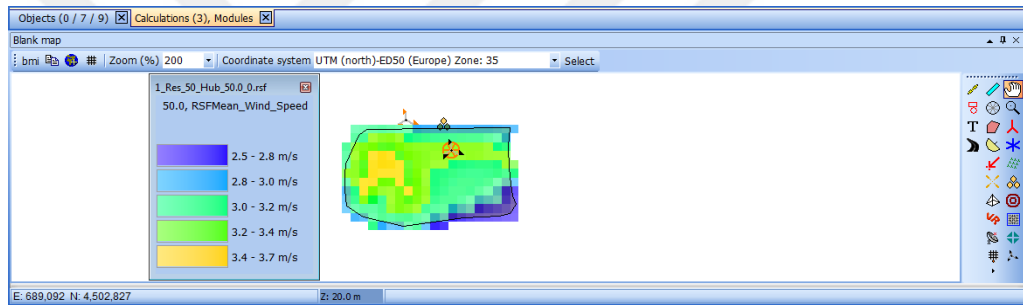
Şekil 2.14 Yalova Üniversitesi için 10 yılın ayrı ayrı (01.01.2012 - 18.04.2021) yıllık ortalama rüzgar hızı verileri (m/s)



Şekil 2.15 Yalova Üniversitesi için 10 yılın ayrı ayrı (01.01.2012 - 18.04.2021) yıllık enerji potansiyeli verileri (kWh/m²-yıl)

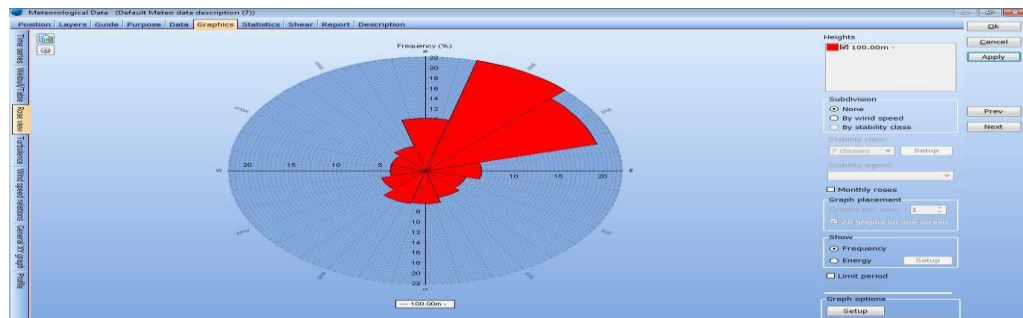
Yalova Üniversitesi kampüs alanı sınırları için 10 yıllık (01.01.2012 - 18.04.2021) saatlik rüzgar verileri kullanılarak ve Excel’de hesaplamalar yaparak Yalova Üniversitesi’nin rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenmiştir. 1.1 Literatür Taraması kısmında incelediğimiz çalışmalardan yola çıkarak WAsP ve WindPRO programlarının en tutarlı ve en sık kullanılan yazılımlar olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Böylece temin edilen aynı 10 yıllık rüzgar verileri WAsP ve WindPRO’da da kullanılarak Yalova Üniversitesi’nin rüzgar enerjisi potansiyeli belirleme çalışması yapılmıştır.

Bilgisayar programları kullanılarak Yalova Üniversitesi’nin kampüs alanı sınırları içerisindeki ortalama rüzgar hızı dağılımları haritası oluşturulmuştur (Şekil 1.16). Şekil 1.16’yı Şekil 2.3 ile birlikte incelendiğinde en yüksek ortalama rüzgar hızına sahip olan bölgenin Yalova Üniversitesi Rektörlük binasının bulunduğu (en yüksek bölge) alan olduğu tespit edilmiştir.



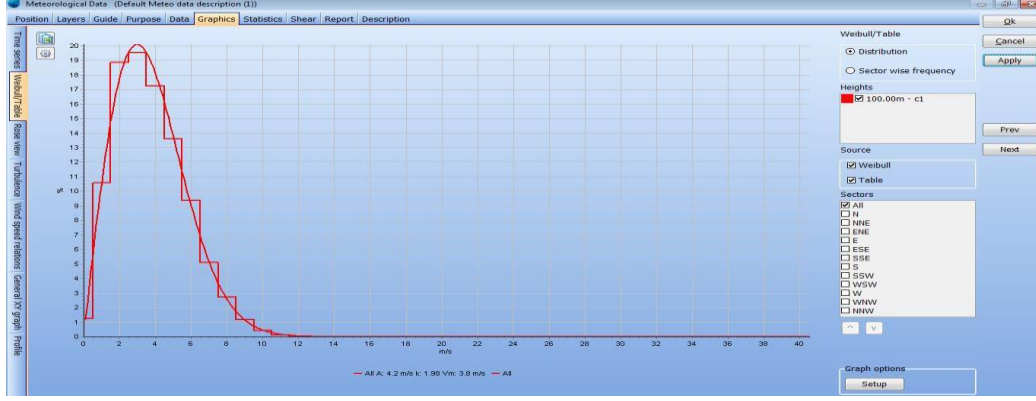
Şekil 2.16 Yalova Üniversitesi kampüs alanı sınırları içerisindeki ortalama rüzgar hızı dağılımları haritası (WAsP)

Ayrıca yazılımlar sayesinde 10 yıllık rüzgar verileri ve Yalova Üniversitesinin koordinatları kullanılarak hakim rüzgar yönünün NNE (Kuzey-kuzeydoğu) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1.17).



Şekil 2.17 Yalova Üniversitesi kampüs alanı sınırları içerisindeki hakim rüzgar yönünü gösteren rüzgar gülü (WindPRO)

Şekil 2.11 de Excel’de yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler ile oluşturulan Weibull Grafiği ile WinPRO yazılımı ile oluşturulmuş (Şekil 1.18) Weibull Grafiği’nin birebir örtüştüğü görülmüştür.



Şekil 2.18 Rüzgar hızı ve % eksenlerinde incelendiği Weibull Grafiği (WinPRO)

WindPRO’da Yalova Üniversitesi’nin 10 yıllık rüzgar verilerinin analiz edilmesi sonucunda EK B.1’de yer aldığı üzere Çizelge 2.8’deki sonuçlara ulaşılmıştır.

Çizelge 2.8: Yalova Üniversitesi için 10 yıllık (01.01.2012 - 18.04.2021) yılı rüzgar potansiyeli bulguları (WindPRO)

Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		1.9834
c	m/s	4.24
V _m	m/s	3.76
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	62.7

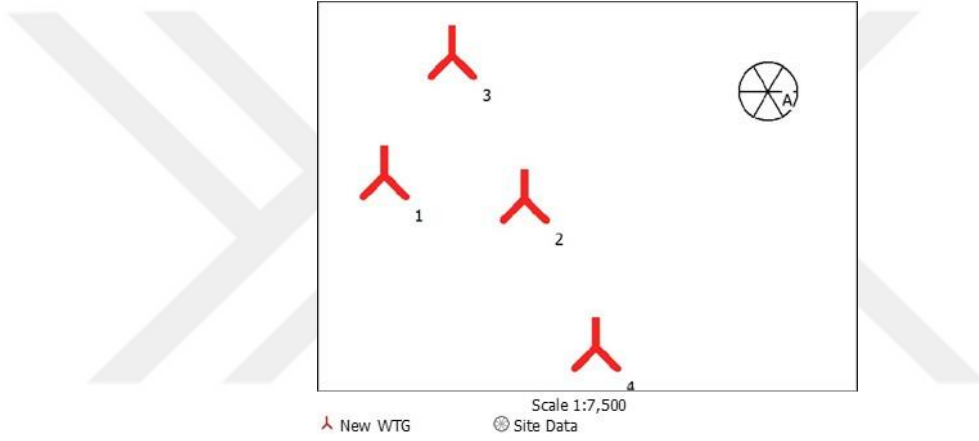
Çizelge 2.8’deki bulgular ile Çizelge 2.6’daki Excel’de yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen bulgular kıyaslandığında neredeyse birebir aynı olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 2.9).

Çizelge 2.9: Yalova Üniversitesi Excel ve WindPRO rüzgar potansiyeli bulgularının karşılaştırılması

Bulgular	Birimler	Sonuçlar (Excel)	Sonuçlar (WindPRO)
k		1.9940	1.9834
c	m/s	4.23	4.24
V _m	m/s	3.75	3.76
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	62.3	62.7

WindPRO programı kullanılarak farklı marka ve yüksekliklere sahip türbinler, Yalova Üniversitesi kampüs alanı sınırları içerisine yerleştirilerek enerji hesabı yapılmıştır. Bu hesapların ve tabloların da yer aldığı raporlar EK C.1 ve EK C.2’de verilmiştir.

EK C.1’de Yalova Üniversitesi kampüs alanı sınırları içerisinde 4 farklı bölgeye 110 metre yüksekliğe sahip 3500 kW’lık ENERCON marka rüzgar türbinleri yerleştirilmiştir. Türbinlerin sırasıyla yıllık şu miktarda enerji üretme potansiyeli olduğu görülmüştür: 3467.3, 3308.8, 2221.1 ve 3514.2 MWh. Bu 4 türbinin bir arada yerleştirilip çalıştırılması ile de yıllık toplamda 12511.3 MWh enerji üretebileceği tespit edilmiştir.



Şekil 2.19 EK C.1 ve EK C.2’de yer alan 4 rüzgar türbininin yerleşim haritası

EK C.2’de ise Yalova Üniversitesi kampüs alanı sınırları içerisinde 4 farklı bölgeye 164 metre yüksekliğe sahip 5700 kW’lık NORDEX marka rüzgar türbinleri yerleştirilmiştir. Türbinlerin sırasıyla yıllık şu miktarda enerji üretme potansiyeli olduğu görülmüştür: 5060.8, 4421.0, 2820.0 ve 5227.1 MWh. Bu 4 türbinin bir arada yerleştirilip çalıştırılması ile de yıllık toplamda 17528.9 MWh enerji üretebileceği tespit edilmiştir.

EK C.1 ve EK C.2’deki raporların incelenmesi ile Yalova Üniversitesi kampüs alanı sınırları içerisinde farklı güç ve yükseklik özelliklerine sahip türbinlerin ne şekilde sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca 4 farklı bölgede aynı türbinler kullanarak da alanın yükselti ve pürüzlülüğüne bağlı olarak farklılıklar oluştuğu görülmüştür.

2.2 Rüzgar Enerjisi Ölçümleri ve Ham Veriler

Yalova Üniversitesi'nin rüzgar potansiyeli belirleme çalışması REPA'lar, Excel'de Weibull dağılımı formülleri ile yapılan hesaplamalar ve bilgisayar programları (WAsP ve WindPRO) kullanılarak üç farklı yöntem ile belirlenmiştir. Excel ve WindPRO ile ulaşılan bulgular 100 m yükseklikte alınan ölçümlere göre yapılmıştır. Verilerimiz meteoroloji istasyonundan 10 m yükseklikte alındığı bilindiğinden rüzgar hızı 3.75 m/s olarak belirlenmiştir. İstasyonun bulunduğu bölgede kurulması planlanan rüzgar santrali için 50 m yükseklikteki hızı için istasyon ve santralin bulunduğu yerlerdeki pürüzlülük yükseklikleri sırasıyla 0.3 m ve 0.14 m olarak belirlenmiştir. Böylece Denklem 1.21'de yer alan bağıntı kullanılarak Yalova Üniversitesi için 50 m'deki rüzgar hızı değeri 5.5 m/s olarak elde edilmiştir.

Çizelge 2.10: Yalova Üniversitesi için 50m yükseklik için rüzgar hızı değerleri

Yükseklik (m)	V _m (m/s)	EİGM - REPA 50m Rüzgar Hızı (m/s)
50	5.5	5.5

Yalova Üniversitesi için yapılan bu rüzgar potansiyeli belirleme çalışmasının sonuçlarının REPA ile karşılaştırılması için de bir çalışma yapılmıştır. Hatta bu karşılaştırma 1.1 Literatür Taraması kısmında yapılan 25 farklı çalışma için de gerçekleştirilmiştir. Böylece Yalova Üniversitesi için yapılan bu karşılaştırma Türkiye'nin farklı illerinde 10 m yükseklikte alınan verilerle yapılan rüzgar potansiyeli belirleme çalışmaları ile de kıyaslanmıştır. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM) tarafından Türkiye'nin ve her ilin ayrı ayrı hazırlanmış olan Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA)'ndan yapılan çalışmalarda tüm illerin "Ortalama Rüzgar Hızı" değerleri tespit edilerek çalışma verileri ile aynı tabloda listelenmiştir (Çizelge 2.11).

Çizelge 2.11: Yalova Üniversitesi ve 25 farklı çalışmanın 10 m yüksekliğindeki rüzgar hızı verilerinin ve EİGM - REPA’da incelenmiş verilerin listesi

Ölçüm Yapılan Bölge	10 m Yükseklikte Ölçülmüş Rüzgar Hızı Verileri (m/s)	EİGM - REPA 50m Rüzgar Hızı Verileri (m/s)
Yalova (Yalova Üniversitesi)	3.75	5.50
Elazığ (Maden)	5.63	6.70
Hatay (Antakya)	5.50	7.40
Hatay (iskenderun)	3.20	4.00
Manisa (Akhisar)	5.88	6.50
Çanakkale (Bababurnu)	5.96	7.00
Hatay (Belen)	6.97	7.50
Muğla (Datça)	5.63	7.00
İzmir (Foça)	5.73	7.50
Isparta (Gelendost)	5.05	5.50
Çanakkale (Gelibolu)	6.85	7.50
Çanakkale (Gökçeada)	7.23	8.00
Aydın (Söke)	4.10	5.00
Çanakkale (Bozcaada)	7.20	8.00
Çanakkale (Gökçeada)	7.80	8.00
Kırklareli	4.68	6.00
Gaziantep (Nurdağı)	7.30	6.50
Konya (Selçuk Üni.)	5.52	5.00
İzmir (Çeşme)	7.03	7.50
Çanakkale (Bozcaada)	6.40	8.00
Erzurum	8.70	7.00
Elazığ	8.50	6.00
Bingöl	5.90	6.50
Kars	6.90	6.50
Manisa	7.40	7.50
Niğde	8.00	7.00

2.2.1 Yöntem ve Değerlendirme

Çizelge 2.11'deki verilen değerlerden hareketle kıyaslama yapılırken 10 m yüksekliğindeki rüzgar hızı verileri Hellman Bağıntısı (Denklem 1.4) kullanılarak ve pürüzlülük faktörü (α) 0,2 alınarak (bu değer sadece Yalova Üniversitesi için 0.14 kullanılmıştır) 50 m yüksekliğe ekstrapole edilmiştir. Böylece REPA'dan tespit edilen standart 50 m yüksekliğindeki rüzgar hızı verileri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmadaki farklılığı net görebilmek adına 26 çalışmadaki verilerin yapılmış REPA'dan incelenmiş verilerden yüzde ne kadar fazla olduğu (aralarındaki fark(%)) tespit edilmiştir (Çizelge 2.12).

Çizelge 2.12'de belirlenmiş olan "Aralarındaki Farklar"ın tüm çalışmalar için tüm yüzdelerin toplamına toplam çalışma sayısı bölünerek aritmetik ortalaması alınmıştır. Denklem 1.21'de hesaplandığı üzere REPA'dan analiz edilen rüzgar hızı verilerinden çalışmalarda ulaşılan rüzgar hızı verilerinin %16.92 oranında yüksek olduğu tespit edilmiştir.

$$Fark = \frac{530.45}{26} = 20.4 \text{ m/s} \quad (2.1)$$

Çizelge 2.12: Yalova Üniversitesi ve 25 farklı çalışmanın 10 m yüksekliğindeki rüzgar hızı verileri ile EİGM - REPA’da incelenmiş verilerin karşılaştırılması

Ölçüm Yapılan Bölge	10 m Yükseklikte Ölçülmüş Rüzgar Hızı Verileri (m/s)	50 m Yüksekliğe Ekstrapole Edilmiş Rüzgar Hızı Verileri (m/s) ($\alpha=0.2$)	EİGM - REPA 50m Rüzgar Hızı Verileri (m/s)	Aradaki Farklılık (%)
Yalova (Yalova Üniversitesi)	2.72	5.50	5.50	0.00
Elazığ (Maden)	5.63	7.77	6.70	13.77
Hatay (Antakya)	5.50	7.59	7.40	2.50
Hatay (iskenderun)	3.20	4.42	4.00	9.50
Manisa (Akhisar)	5.88	8.11	6.50	19.85
Çanakkale (Bababurnu)	5.96	8.22	7.00	14.84
Hatay (Belen)	6.97	9.62	7.50	22.04
Muğla (Datça)	5.63	7.77	7.00	9.91
İzmir (Foça)	5.73	7.91	7.50	5.18
Isparta (Gelendost)	5.05	6.97	5.50	21.09
Çanakkale (Gelibolu)	6.85	9.45	7.50	20.63
Çanakkale (Gökçeada)	7.23	9.98	8.00	19.84
Aydın (Söke)	4.10	5.66	5.00	11.66
Çanakkale (Bozcaada)	7.20	9.93	8.00	19.44
Çanakkale (Gökçeada)	7.80	10.76	8.00	25.65
Kırklareli	4.68	6.46	6.00	7.12
Gaziantep (Nurdağı)	7.30	10.07	6.50	35.45
Konya (Selçuk Üni.)	5.52	7.62	5.00	34.38
İzmir (Çeşme)	7.03	9.70	7.50	22.68
Çanakkale (Bozcaada)	6.40	8.83	8.00	9.40
Erzurum	8.70	12.00	7.00	41.67
Elazığ	8.50	11.73	6.00	48.85
Bingöl	5.90	8.14	6.50	20.15
Kars	6.90	9.52	6.50	31.72
Manisa	7.40	10.21	7.50	26.54
Niğde	8.00	11.04	7.00	36.59

Çizelge 2.12'deki verilerden en yüksek farkı veren rüzgar hızı değerlerinden yola çıkılarak satın alınacak bir rüzgar türbini için kaba bir maliyet hesabı yapıldığında bu veri farklılığının etkisi daha net anlaşılacaktır. %48.85 ile en yüksek farklılığı gösteren Elazığ ili rüzgar hızı verilerini ele aldığımızda Denklem 1 den de görüleceğiüzere bu hız farkı küpü oranında değişiklik göstermektedir. Tüm bu incelenen çalışmaların aksine yapmış olduğumuz çalışmada ulaştığımız ortalama rüzgar hızı verileri REPA ile kıyaslandığında daha düşük ve böylece fark negatif değer olduğu görülmüştür.



3. TARTIŞMA ve SONUÇ

TÜREB'in istatistiklerinde de görmüş olduğumuz gibi yapılan çalışmaların artmasıyla Türkiye'nin rüzgar enerjisi kümülatif kurulumu 8 GW'ı aşmıştır. Rüzgar türbinlerinin yerli olarak üretilmemesinden kaynaklı olarak yeni santrallerin kurulumunun maliyeti yüksek ve kurulum süreci uzun vakit almaktadır. Tüm bunlara rağmen amortisman süresi ömrünün yarısından bile az olması rüzgar enerjisinden faydalanmamız için geçerli bir sebeptir.

Türkiye'nin bir çok bölgesinde Rüzgar Enerjisi Santralleri (RES) yer almaktadır. Yaptığımız çalışmada da Türkiye'nin en küçük ili olan Yalova'da bile 4 adet RES'in olduğu görülmektedir. Bunlara ek olarak da inşa halinde olan ve izinleri alınan daha bir çok çalışma olduğu bilinmektedir. Bütün bunlardan yola çıkarak ver Lisans eğitimi aldığım Yalova Üniversitesi için de rüzgar enerjisi alanındaki potansiyeli araştırması bu çalışmada detaylı bir şekilde yapılmıştır.

Bu çalışmada Yalova Üniversitesi'nin rüzgar potansiyelini belirlemede Climate Copernicus sitesinden temin edilen Yalova Üniversitesi'nin konumu olan 40°39'10"N-29°12'46"E koordinatları için 100 m istasyon yüksekliğinde 10 yıllık (01.01.2012 ile 18.04.2021 yılları arası) saatlik (815002 saat) rüzgar verileri kullanılmıştır. Bu veriler ile iki farklı şekilde hesaplama yapılmıştır. Öncelikle Weibull dağılımı bağıntıları kullanılarak Excel'de hız, güç ve enerji verilerine ulaşılmıştır. İkinci olarak da WAsP ve WindPRO bilgisayar programlarına verilerin entegre edilmesi ile rüzgar potansiyeli belirleme çalışması yapılmıştır.

Excel'de yapılan çalışmada Yalova Üniversitesi'nin rüzgar potansiyeli için bize gerekli olan verilerin yer aldığı şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- V(m) değeri yaklaşık 3.75 m/s, Vrms değeri yaklaşık 4.66 m/s, Vmod yaklaşık 2.99 m/s ve maksimum rüzgar hızı ise yaklaşık 6 m/s olarak hesaplanmıştır.

- Rüzgar Gücü Potansiyeli 62.28 W/m², Enerji Potansiyeli 545.598 kWh/m²-yıl ve Teorik Üretilebilir Enerji 321.903 kWh/m²-yıl olarak hesaplanmıştır.

WindPRO'da yapılan çalışmada Yalova Üniversitesi'nin rüzgar potansiyeli için bize gerekli olan verilerin yer aldığı şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Vm değeri 3.76 m/s ve Rüzgar Gücü Potansiyeli 62.7 W/m² olarak tespit edilmiştir.

Böylece Yalova Üniversitesi'nin rüzgar potansiyeli belirlenmesinde kullanılan bu iki yöntemin karşılaştırılması sonucunda da neredeyse aynı değerlere ulaşıldığı görülmüştür. Böylece yapılan hesaplamaların doğruluğu sonuçlardaki tutarlılık ile ispatlanmıştır.

Bu tezde ayrıca WindPRO yazılımı ile Yalova Üniversitesi kampüs alanı sınırları içerisine rüzgar türbini yerleştirilmesi ile enerji analizi yapılmıştır. 2011'de yapılan TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.)'ın bir araştırmasına göre, Türkiye'de dört kişilik bir ailenin yıllık ortalama elektrik tüketimi yaklaşık 3000 kWh olduğu belirtilmiştir. Böylece 4 adet ENERCON rüzgar türbininin kurulması ile 4170 hanenin, 4 adet NORDEX rüzgar türbininin kurulması ile de 5842 hanenin enerji ihtiyacının karşılanabileceği sonucuna varılmıştır.

Fakat türbinlerle yapılan analizler ve REPA haritalarından görülen veriler doğrultusunda kapasite faktörünün düşüklüğü ve rüzgar hızının yetersizliğinden Yalova Üniversitesi kampüs alanında bu çalışmanın yapılması verimli sonuçlar doğurmayacağını söylemek mümkündür.

Yapılan bu çalışmanın bir diğer amacı da Türkiye'nin farklı bölgelerinde ve farklı illerinde 10 m yüksekliğinde ölçülmüş veriler ile yapılan çalışmalar ile Yalova Üniversitesi için yapılan çalışmanın karşılaştırılarak değerlendirilmesidir. Literatür taramasında yer alan çalışmalarda ulaşılan sonuçlara göre ve WindPRO ile yaptığımız çalışma sonucunda ulaştığımız tutarlılık ile Weibull dağılımının ortalama rüzgar hızını bulmada ve güç yoğunluğunu tespit etmede en uygun metot olduğu açıkça görülmektedir. Rüzgar potansiyeli belirlemede kullanılan bir diğer yöntem olan Rayleigh metodunu (tek parametreliliğinden kaynaklı) çoğu çalışma denemiş ve uyumlu bulmamışlardır. Bu nedenle yapılan çalışmalarda sadece Weibull dağılım fonksiyonlarıyla çalışılması yeterli olacaktır. Ayrıca rüzgar potansiyeli belirleme ve santral sahaları ile ilgili çalışmalar için de yoğun olarak WAsP ve WindPRO yazılımları kullanılmıştır.

Literatür taramasında yer alan Türkiye'nin 25 farklı bölgesinde yapılmış bu çalışmalar ve bu tezde Yalova Üniversitesi için yapmış olduğumuz çalışma sonucunda hesaplanan rüzgar hızları derlenmiştir. Ayrıca REPA'dan aynı bölgelerin 50 m yüksekliğindeki rüzgar hızları tespit edilmiştir. Hellman bağıntısı ile de çalışmadaki değerler 50 m yüksekliğine ekstrapole edilerek REPA ile

karşılaştırılması ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Yalova Üniversitesi için ise referans değerleri bilindiğinden farklı bir bağıntı kullanılıp sonuçta da REPA verisi ile eşit sonuca ulaşılmıştır. Yalova Üniversitesi dışındaki tüm çalışmaların mevcut potansiyelden daha yüksek hesaplandığı ve REPA'daki değerlerden ortalama %20.4 değerinde yüksek sonuçlara ulaştıklarına bu tezde yapılan istatistikler sonucunda ulaşılmıştır.

25 adet çalışma için bu oranın sebebi kullanılan Hellman bağıntısında tüm çalışmalarda kabul yapılarak tek bir pürüzlülük değerinin kullanılması ile 50 m için ulaşılan rüzgar hızı değerinde sapmaların yaşanmasıdır. Yalova Üniversitesi için yapılan çalışmada pürüzlülük değerleri bilindiğinden bu farklılık görülmemiştir.

Bahsi geçen bu sebep ardından bazı sonuçlar doğurabilmektedir. Örnek olarak bu oran çalışmaların hayata geçirilmesi ile belli zararlara sebep olacaktır: Çalışmalara göre tercih edilen rüzgar türbinleri yerine daha düşük kapasiteli türbin seçilmesi yeterli olacağından maliyetin olması gerekenden daha yüksek çıkacağını ve verimin de bu denli düşeceğini söylemek mümkündür.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2211- Yurt İçi Lisansustu Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB) Rüzgar Enerjisi Santralleri Raporu, <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjc1ZjU1N2EtMDU0MS00OGUyLThjM2ItYTdlMWE4ZDMwZjYzIiwidCI6ImU5YzY0NjU4LWFkMWQtNDUwOS1hODk0LTE2NWZhYjU2NjEyMyIsImMiOjI9&pageName=ReportSection8015113d5c5203d1d8c9>, 2020.
- [2] Akpınar, E. K. ve Akpınar, S., Determination of wind energy potential for Maden-Elazığ, Turkey. Energy Conversion and Management. 45, (2004), ss. 2901- 2914.
- [3] Bilgili, M., Şahin, B. ve Kahraman A., Wind energy potential in Antakya and İskenderun regions, Turkey. Renewable Energy. 29, (2004), ss. 1733-1745.
- [4] Bilgili, M., Şahin, B. ve Şimşek, E., Türkiye'nin Güney, Güneybatı ve Batı Bölgelerindeki Rüzgar Potansiyeli. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi. 30, (2010), ss. 1- 12.
- [5] 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. 15, (2011), ss. 2743-2749.
- [6] Çetin, N.S., Çelik, H. ve Başaran, K., Rüzgar türbinlerinde kapasite faktörü ve türbin sınıfı ilişkisi, 6th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 Mayıs 2011 Elazığ: Fırat Üniversitesi.
- [7] Eskin, N., Artar, H. ve Tolun S., Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 12, (2008), ss. 839-851.
- [8] Gökçek, M., Bayülken, A., Bekdemir, Ş., Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey. Renewable Energy. 32, (2007), ss. 1739-1752.
- [9] Karslı, V. M. ve Geçit, C., An investigation on wind power potential of NurdağıGaziantep, Turkey. Renewable Energy. 28, (2003), ss. 823-830.
- [10] Köse, F. Ve Özgören M., Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ölçümü ve Rüzgar Türbin Seçimi. Mühendis ve Makine. 551, (2005), ss. 20-30.

- [11] Özerdem B. ve Türkeli M., An investigation of wind characteristics on the campus of Izmir Institute of Technology, Turkey. Renewable Energy. 28, (2003), ss. 1013-1027.
- [12] Şahin, B., Bilgili, M. ve Akıllı, H., The wind power potential of the eastern Mediterranean region of Turkey. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 93, (2005), ss. 171-183.
- [13] Türksoy, F., Investigation of wind power potential at Bozcaada, Turkey. Renewable Energy. 6, (1995), ss.917-923.
- [14] Uçar, A., Balo, F., Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey. Applied Energy. 86(10), (2009), ss. 1864-1872.
- [15] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/> , 2017-2020.
- [16] Niels G. Mortensen, Duncan N. Heathfield, Lisbeth Myllerup, Lars Landberg ve Ole Rathmann, Getting Started with WAsP 9, 2020.
- [17] Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), Türkiye Rüzgar Atlası, <https://www.mgm.gov.tr/genel/ruzgar-atlasi.aspx> , 2020.
- [18] WindPRO 2.7 User Guide, http://www.emd.dk/files/windpro/manuals/for_print/MANUAL_2.7.pdf , 2020.
- [19] Kurban M., Kantar Y. M. ve Hocaoglu F.O., Weibull Dağılımı Kullanılarak Rüzgar Hız ve Güç Yoğunluklarının İstatistiksel Analizi, Anadolu Üniversitesi İki Eylül Kampüsü, Eskişehir, AKÜ-Fen Bilimleri Dergisi 7(2), (2020), ss. 206-218.
- [20] Küçükaya E., Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemleri ve Bütünleşik Bina Tasarımı Yaklaşımıyla Enerji Kullanımının Değerlendirilmesi, Yalova Üniversitesi Enerjis Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2018.
- [21] Climate Copernicus, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>, Nisan 2021.

EKLER

EK A.1	Yalova Üniversitesi için 2021 (18.04.2021'e kadar) yılı rüzgar potansiyeli inceleme verileri
EK A.2	Yalova Üniversitesi için 2020 yılı rüzgar potansiyeli inceleme verileri
EK A.3	Yalova Üniversitesi için 2019 yılı rüzgar potansiyeli inceleme verileri
EK A.4	Yalova Üniversitesi için 2018 yılı rüzgar potansiyeli inceleme verileri
EK A.5	Yalova Üniversitesi için 2017 yılı rüzgar potansiyeli inceleme verileri
EK A.6	Yalova Üniversitesi için 2016 yılı rüzgar potansiyeli inceleme verileri
EK A.7	Yalova Üniversitesi için 2015 yılı rüzgar potansiyeli inceleme verileri
EK A.8	Yalova Üniversitesi için 2014 yılı rüzgar potansiyeli inceleme verileri
EK A.9	Yalova Üniversitesi için 2013 yılı rüzgar potansiyeli inceleme verileri
EK A.10	Yalova Üniversitesi için 2012 yılı rüzgar potansiyeli inceleme verileri
EK B.1	WinPRO rüzgar potansiyeli verileri
EK C.1	WinPRO'da ENERCON rüzgar türbinleri ile rüzgar potansiyeli verileri
EK C.2	WinPRO'da NORDEX rüzgar türbinleri ile rüzgar potansiyeli verileri

EK A.1

Çizelge A.1.1 : Yalova Üniversitesi için 2021 (18.04.2021'e kadar) yılı rüzgar hızı ve frekans verileri

Hız, V (m/s)	Frekans	Toplam Frekans	Frekans (fi), F(V)
0	114	114	0.044015444
1	347	461	0.177992278
2	459	920	0.355212355
3	524	1444	0.557528958
4	437	1881	0.726254826
5	369	2250	0.868725869
6	180	2430	0.938223938
7	72	2502	0.966023166
8	59	2561	0.988803089
9	22	2583	0.997297297
10	4	2587	0.998841699
11	2	2589	0.999613900
12	1	2590	1
13	0	2590	1
14	0	2590	1
15	0	2590	1

Çizelge A.1.2 : Yalova Üniversitesi için 2021 (18.04.2021'e kadar) yılı rüzgar hızı ve weibull verileri

Hız, V (m/s)	ln(V)	ln(-ln(1-F(V)))	Weibull f(V)
1	0	-3.100792370	0.456313430
2	0.693147181	-1.629612611	0.840135160
3	1.098612289	-0.823633501	1.011125886
4	1.386294361	-0.204100701	0.953754986
5	1.609437912	0.258941203	0.744999657
6	1.791759469	0.708266080	0.493328614
7	1.945910149	1.023974708	0.280206943
8	2.079441542	1.218489823	0.137401575
9	2.197224577	1.502324155	0.058385469
10	2.302585093	1.777238381	0.021547053
11	2.397895273	1.911141354	0.006915389
12	2.484906650	2.061711941	0.001931611
13	2.564949357	-	0.000469748
14	2.639057330	-	9.94754E-05
15	2.708050201	-	1.83425E-05

Çizelge A.1.3 : Yalova Üniversitesi için 2021 (18.04.2021'e kadar) yılı rüzgar potansiyeli bulguları

Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		2.093979023
c	m/s	4.385921954
n		1.477559703
V _m	m/s	3.884531063
V _{mod}	m/s	3.216670485
V _{max}	m/s	6.041065260
n _{rms}		2.432679108
n _{gama}		1.269304510
V _{rms}		4.748788640
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	65.860289720
Enerji potansiyeli, E _I	kWh/m ² -yıl	170.578150375
Teorik üretilebilir enerji, E _I	kWh/m ² -yıl	100.641108721

EK A.2**Çizelge A.2.1 : Yalova Üniversitesi için 2020 yılı rüzgar hızı ve frekans verileri**

Hız, V (m/s)	Frekans	Toplam Frekans	Frekans (fi), F(V)
0	431	431	0.049066485
1	1299	1730	0.196948998
2	1615	3345	0.380806011
3	1474	4819	0.548611111
4	1206	6025	0.685906193
5	1112	7137	0.812500000
6	808	7945	0.904485428
7	474	8419	0.958447177
8	255	8674	0.987477231
9	75	8749	0.996015483
10	28	8777	0.999203097
11	7	8784	1
12	0	8784	1
13	0	8784	1
14	0	8784	1
15	0	8784	1

Çizelge A.2.2 : Yalova Üniversitesi için 2020 yılı rüzgar hızı ve weibull verileri

Hız, V (m/s)	$\ln(V)$	$\ln(-\ln(1-F(V)))$	Weibull $f(V)$
1	0	-2.989528974	0.434571477
2	0.693147181	-1.517145678	0.755180422
3	1.098612289	-0.735352080	0.882851082
4	1.386294361	-0.228877421	0.824702500
5	1.609437912	0.146749291	0.649490203
6	1.791759469	0.515201894	0.441584189
7	1.945910149	0.853766802	0.262460790
8	2.079441542	1.157129534	0.137384969
9	2.197224577	1.477095937	0.063633201
10	2.302585093	1.709344621	0.026162171
11	2.397895273	1.964980998	0.009569152
12	2.484906650	-	0.003118751
13	2.564949357	-	0.000906805
14	2.639057330	-	0.000235432
15	2.708050201	-	0.000054618

Çizelge A.2.3 : Yalova Üniversitesi için 2020 yılı rüzgar potansiyeli bulguları

Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		2.017119824
c	m/s	4.415211131
n		1.495756369
V _m	m/s	3.912249244
V _{mod}	m/s	3.144369471
V _{max}	m/s	6.212600075
n _{rms}		2.487269107
n _{gama}		1.317545950
V _{rms}		4.840312477
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	69.742147164
Enerji potansiyeli, E _I	kWh/m ² -yıl	612.615020692
Teorik üretilebilir enerji, E _I	kWh/m ² -yıl	361.442862208

EK A.3**Çizelge A.3.1** : Yalova Üniversitesi için 2019 yılı rüzgar hızı ve frekans verileri

Hız, V (m/s)	Frekans	Toplam Frekans	Frekans (fi), F(V)
0	422	422	0.048173516
1	1400	1822	0.207990868
2	1786	3608	0.411872146
3	1491	5099	0.582077626
4	1351	6450	0.736301370
5	1070	7520	0.858447489
6	586	8106	0.925342466
7	363	8469	0.966780822
8	166	8635	0.985730594
9	77	8712	0.994520548
10	33	8745	0.998287671
11	15	8760	1
12	0	8760	1
13	0	8760	1
14	0	8760	1
15	0	8760	1

Çizelge A.3.2 : Yalova Üniversitesi için 2019 yılı rüzgar hızı ve weibull verileri

Hız, V (m/s)	$\ln(V)$	$\ln(-\ln(1-F(V)))$	Weibull $f(V)$
1	0	-3.008361174	0.437465944
2	0.693147181	-1.455934486	0.739364165
3	1.098612289	-0.633349411	0.844250997
4	1.386294361	-0.136438963	0.771065171
5	1.609437912	0.287393316	0.593958281
6	1.791759469	0.670433428	0.395154405
7	1.945910149	0.953526335	0.229955613
8	2.079441542	1.225135658	0.117950800
9	2.197224577	1.446833673	0.053590573
10	2.302585093	1.649955894	0.021641427
11	2.397895273	1.851583925	0.007786766
12	2.484906650	-	0.002500890
13	2.564949357	-	0.000717969
14	2.639057330	-	0.000184446
15	2.708050201	-	0.000042439

Çizelge A.3.3 : Yalova Üniversitesi için 2019 yılı rüzgar potansiyeli bulguları

Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		1.991195577
c	m/s	4.310117231
n		1.502210838
V _m	m/s	3.820010101
V _{mod}	m/s	3.036281389
V _{max}	m/s	6.111548704
n _{rms}		2.506632515
n _{gama}		1.335568897
V _{rms}		4.746547685
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	65.767095228
Enerji potansiyeli, E _I	kWh/m ² -yıl	576.119754197
Teorik üretilebilir enerji, E _I	kWh/m ² -yıl	339.910654976

EK A.4**Çizelge A.4.1 : Yalova Üniversitesi için 2018 yılı rüzgar hızı ve frekans verileri**

Hız, V (m/s)	Frekans	Toplam Frekans	Frekans (fi), F(V)
0	469	469	0.053538813
1	1346	1815	0.207191781
2	1623	3438	0.392465753
3	1716	5154	0.588356164
4	1376	6530	0.745433790
5	1021	7551	0.861986301
6	626	8177	0.933447489
7	292	8469	0.966780822
8	193	8662	0.988812785
9	71	8733	0.996917808
10	22	8755	0.999429224
11	5	8760	1
12	0	8760	1
13	0	8760	1
14	0	8760	1
15	0	8760	1

Çizelge A.4.2 : Yalova Üniversitesi için 2018 yılı rüzgar hızı ve weibull verileri

Hız, V (m/s)	$\ln(V)$	$\ln(-\ln(1-F(V)))$	Weibull $f(V)$
1	0	-2.899961912	0.450441210
2	0.693147181	-1.460268495	0.768652040
3	1.098612289	-0.696459194	0.875768177
4	1.386294361	-0.119237716	0.790729604
5	1.609437912	0.313491856	0.596860099
6	1.791759469	0.683300023	0.385667372
7	1.945910149	0.996861545	0.216023520
8	2.079441542	1.225135658	0.105673165
9	2.197224577	1.502517003	0.045359248
10	2.302585093	1.754769415	0.017139440
11	2.397895273	2.010695953	0.005713963
12	2.484906650	-	0.001683456
13	2.564949357	-	0.000438857
14	2.639057330	-	0.000101323
15	2.708050201	-	0.000020734

Çizelge A.4.3 : Yalova Üniversitesi için 2018 yılı rüzgar potansiyeli bulguları

Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		2.011746794
c	m/s	4.227051577
n		1.497080449
V _m	m/s	3.745690490
V _{mod}	m/s	3.003712049
V _{max}	m/s	5.957204103
n _{rms}		2.491241347
n _{gama}		1.321203417
V _{rms}		4.638320735
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	61.370186762
Enerji potansiyeli, E _I	kWh/m ² -yıl	537.602836036
Teorik üretilebilir enerji, E _I	kWh/m ² -yıl	317.185673261

EK A.5**Çizelge A.5.1** : Yalova Üniversitesi için 2017 yılı rüzgar hızı ve frekans verileri

Hız, V (m/s)	Frekans	Toplam Frekans	Frekans (fi), F(V)
0	497	497	0.056735160
1	1275	1772	0.202283105
2	1819	3591	0.409931507
3	1699	5290	0.603881279
4	1406	6696	0.764383562
5	978	7674	0.876027397
6	598	8272	0.944292237
7	295	8567	0.977968037
8	136	8703	0.993493151
9	53	8756	0.999543379
10	4	8760	1
11	0	8760	1
12	0	8760	1
13	0	8760	1
14	0	8760	1
15	0	8760	1

Çizelge A.5.2 : Yalova Üniversitesi için 2017 yılı rüzgar hızı ve weibull verileri

Hız, V (m/s)	ln(V)	ln(-ln(1-F(V)))	Weibull f(V)
1	0	-2.840299207	0.477614851
2	0.693147181	-1.487213586	0.837768772
3	1.098612289	-0.639574834	0.955157349
4	1.386294361	-0.076836433	0.845023348
5	1.609437912	0.368489912	0.612413583
6	1.791759469	0.736060435	0.372171613
7	1.945910149	1.060438097	0.191928640
8	2.079441542	1.339009075	0.084558052
9	2.197224577	1.616393648	0.031955396
10	2.302585093	2.040136212	0.010384966
11	2.397895273	-	0.002906958
12	2.484906650	-	0.000701610
13	2.564949357	-	0.000146104
14	2.639057330	-	0.000026261
15	2.708050201	-	0.000004075

Çizelge A.5.3 : Yalova Üniversitesi için 2017 yılı rüzgar potansiyeli bulguları

Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		2.062061247
c	m/s	4.086938801
n		1.484951648
V _m	m/s	3.620267686
V _{mod}	m/s	2.962499927
V _{max}	m/s	5.677925336
n _{rms}		2.454854944
n _{gama}		1.288452878
V _{rms}		4.447210105
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	54.092625240
Enerji potansiyeli, E _I	kWh/m ² -yıl	473.851397099
Teorik üretilebilir enerji, E _I	kWh/m ² -yıl	279.572324288

EK A.6**Çizelge A.6.1** : Yalova Üniversitesi için 2016 yılı rüzgar hızı ve frekans verileri

Hız, V (m/s)	Frekans	Toplam Frekans	Frekans (fi), F(V)
0	375	375	0.042691257
1	1270	1645	0.187272313
2	1744	3389	0.385815118
3	1689	5078	0.578096539
4	1455	6533	0.743738616
5	980	7513	0.855305100
6	638	8151	0.927937158
7	304	8455	0.962545537
8	214	8669	0.986908015
9	91	8760	0.997267760
10	20	8780	0.999544627
11	4	8784	1
12	0	8784	1
13	0	8784	1
14	0	8784	1
15	0	8784	1

Çizelge A.6.2 : Yalova Üniversitesi için 2016 yılı rüzgar hızı ve weibull verileri

Hız, V (m/s)	$\ln(V)$	$\ln(-\ln(1-F(V)))$	Weibull $f(V)$
1	0	-3.132025788	0.461230016
2	0.693147181	-1.573302848	0.848245684
3	1.098612289	-0.718548508	1.016348710
4	1.386294361	-0.147365204	0.951443433
5	1.609437912	0.308629135	0.735261328
6	1.791759469	0.659139361	0.480131220
7	1.945910149	0.967066254	0.268042307
8	2.079441542	1.189253834	0.128749334
9	2.197224577	1.466895767	0.053405011
10	2.302585093	1.775398579	0.019171384
11	2.397895273	2.040491856	0.005963568
12	2.484906650	-	0.001608578
13	2.564949357	-	0.000376361
14	2.639057330	-	0.000076389
15	2.708050201	-	0.000013449

Çizelge A.6.3 : Yalova Üniversitesi için 2016 yılı rüzgar potansiyeli bulguları

Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		2.096668975
c	m/s	4.341279937
n		1.476947011
V _m	m/s	3.844953217
V _{mod}	m/s	3.186977509
V _{max}	m/s	5.975333582
n _{rms}		2.430841032
n _{gama}		1.267744331
V _{rms}		4.698526532
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	63.791111087
Enerji potansiyeli, E _i	kWh/m ² -yıl	560.341119785
Teorik üretilebilir enerji, E _I	kWh/m ² -yıl	330.601260673

EK A.7**Çizelge A.7.1** : Yalova Üniversitesi için 2015 yılı rüzgar hızı ve frekans verileri

Hız, V (m/s)	Frekans	Toplam Frekans	Frekans (fi), F(V)
0	430	430	0.049086758
1	1344	1774	0.202511416
2	1694	3468	0.395890411
3	1727	5195	0.593036530
4	1346	6541	0.746689498
5	979	7520	0.858447489
6	610	8130	0.928082192
7	339	8469	0.966780822
8	143	8612	0.983105023
9	76	8688	0.991780822
10	32	8720	0.995433790
11	14	8734	0.997031963
12	12	8746	0.998401826
13	12	8758	0.999771689
14	2	8760	1
15	0	8760	1

Çizelge A.7.2 : Yalova Üniversitesi için 2015 yılı rüzgar hızı ve weibull verileri

Hız, V (m/s)	ln(V)	ln(-ln(1-F(V)))	Weibull f(V)
1	0	-2.989105305	0.403517353
2	0.693147181	-1.485947822	0.636231455
3	1.098612289	-0.685179688	0.706007545
4	1.386294361	-0.106436816	0.644321649
5	1.609437912	0.317099550	0.508564816
6	1.791759469	0.670433428	0.355338816
7	1.945910149	0.967831914	0.222648928
8	2.079441542	1.225135658	0.126127089
9	2.197224577	1.406278077	0.064954038
10	2.302585093	1.568883604	0.030531525
11	2.397895273	1.684373149	0.013138578
12	2.484906650	1.761275287	0.005188439
13	2.564949357	1.862356764	0.001883854
14	2.639057330	2.126421020	0.000629899
15	2.708050201	-	0.000194219

Çizelge A.7.3 : Yalova Üniversitesi için 2015 yılı rüzgar potansiyeli bulguları

Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		1.892384734
c	m/s	4.415862875
n		1.528433770
V _m	m/s	3.918869826
V _{mod}	m/s	2.968277602
V _{max}	m/s	6.464342788
n _{rms}		2.585301311
n _{gama}		1.414000753
V _{rms}		4.956389852
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	74.880975455
Enerji potansiyeli, E _I	kWh/m ² -yıl	655.957344985
Teorik üretilebilir enerji, E _I	kWh/m ² -yıl	387.014833541

EK A.8**Çizelge A.8.1 : Yalova Üniversitesi için 2014 yılı rüzgar hızı ve frekans verileri**

Hız, V (m/s)	Frekans	Toplam Frekans	Frekans (fi), F(V)
0	559	559	0.063812785
1	1664	2223	0.253767123
2	1983	4206	0.480136986
3	1676	5882	0.671461187
4	1300	7182	0.819863014
5	829	8011	0.914497717
6	433	8444	0.963926941
7	205	8649	0.987328767
8	65	8714	0.994748858
9	31	8745	0.998287671
10	9	8754	0.999315068
11	5	8759	0.999885845
12	1	8760	1
13	0	8760	1
14	0	8760	1
15	0	8760	1

Çizelge A.8.2 : Yalova Üniversitesi için 2014 yılı rüzgar hızı ve weibull verileri

Hız, V (m/s)	$\ln(V)$	$\ln(-\ln(1-F(V)))$	Weibull f(V)
1	0	-2.719012970	0.474459800
2	0.693147181	-1.228547093	0.747162353
3	1.098612289	-0.424357546	0.784172212
4	1.386294361	0.107149182	0.646732452
5	1.609437912	0.538851805	0.441741235
6	1.791759469	0.899841055	0.255936858
7	1.945910149	1.200629914	0.127442401
8	2.079441542	1.474401613	0.054981676
9	2.197224577	1.658096599	0.020662703
10	2.302585093	1.851583925	0.006790207
11	2.397895273	1.985981011	0.001956773
12	2.484906650	2.205848527	0.000495578
13	2.564949357	-	0.000110498
14	2.639057330	-	0.000021721
15	2.708050201	-	0.000003769

Çizelge A.8.3 : Yalova Üniversitesi için 2014 yılı rüzgar potansiyeli bulguları

Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		1.955171554
c	m/s	3.833526747
n		1.511464070
V _m	m/s	3.398954954
V _{mod}	m/s	2.657542636
V _{max}	m/s	5.496630038
n _{rms}		2.534392209
n _{gama}		1.362272683
V _{rms}		4.249650170
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	47.199202131
Enerji potansiyeli, E _i	kWh/m ² -yıl	413.465010671
Teorik üretilebilir enerji, E _I	kWh/m ² -yıl	243.944356296

EK A.9**Çizelge A.9.1** : Yalova Üniversitesi için 2013 yılı rüzgar hızı ve frekans verileri

Hız, V (m/s)	Frekans	Toplam Frekans	Frekans (fi), F(V)
0	480	480	0.054794521
1	1459	1939	0.221347032
2	1727	3666	0.418493151
3	1586	5252	0.599543379
4	1427	6679	0.762442922
5	999	7678	0.876484018
6	592	8270	0.944063927
7	317	8587	0.980251142
8	118	8705	0.993721461
9	49	8754	0.999315068
10	5	8759	0.999885845
11	1	8760	1
12	0	8760	1
13	0	8760	1
14	0	8760	1
15	0	8760	1

Çizelge A.9.2 : Yalova Üniversitesi için 2013 yılı rüzgar hızı ve weibull verileri

Hız, V (m/s)	ln(V)	ln(-ln(1-F(V)))	Weibull f(V)
1	0	-2.876120927	0.484529500
2	0.693147181	-1.385535384	0.855179089
3	1.098612289	-0.612244790	0.974455478
4	1.386294361	-0.088667478	0.856905014
5	1.609437912	0.362799302	0.613971332
6	1.791759469	0.737826394	0.366844988
7	1.945910149	1.059020715	0.184935293
8	2.079441542	1.367279619	0.079174141
9	2.197224577	1.623462703	0.028895757
10	2.302585093	1.985981011	0.009011133
11	2.397895273	2.205848527	0.002404560
12	2.484906650	-	0.000549506
13	2.564949357	-	0.000107597
14	2.639057330	-	1.80560E-05
15	2.708050201	-	2.59697E-06

Çizelge A.9.3 : Yalova Üniversitesi için 2013 yılı rüzgar potansiyeli bulguları

Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		2.074028069
c	m/s	4.051752372
n		1.482153552
V _m	m/s	3.588875758
V _{mod}	m/s	2.950148606
V _{max}	m/s	5.610671508
n _{rms}		2.446460656
n _{gama}		1.281133509
V _{rms}		4.400557417
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	52.408073022
Enerji potansiyeli, E _I	kWh/m ² -yıl	460.352513427
Teorik üretilebilir enerji, E _I	kWh/m ² -yıl	271.607982922

EK A.10**Çizelge A.10.1 : Yalova Üniversitesi için 2012 yılı rüzgar hızı ve frekans verileri**

Hız, V (m/s)	Frekans	Toplam Frekans	Frekans (fi), F(V)
0	414	414	0.047131148
1	1472	1886	0.214708561
2	1706	3592	0.408925319
3	1527	5119	0.582764117
4	1330	6449	0.734175774
5	1090	7539	0.858265027
6	653	8192	0.932604736
7	352	8544	0.972677596
8	174	8718	0.992486339
9	59	8777	0.999203097
10	7	8784	1
11	0	8784	1
12	0	8784	1
13	0	8784	1
14	0	8784	1
15	0	8784	1

Çizelge A.10.2 : Yalova Üniversitesi için 2012 yılı rüzgar hızı ve weibull verileri

Hız, V (m/s)	ln(V)	ln(-ln(1-F(V)))	Weibull f(V)
1	0	-3.030779303	0.469691088
2	0.693147181	-1.420056459	0.841676978
3	1.098612289	-0.642809823	0.981939733
4	1.386294361	-0.134556433	0.892077368
5	1.609437912	0.281352075	0.666479590
6	1.791759469	0.669774329	0.419155019
7	1.945910149	0.992206979	0.224539143
8	2.079441542	1.280947245	0.103132259
9	2.197224577	1.58740341	0.040772592
10	2.302585093	1.964980998	0.013907277
11	2.397895273	-	0.004098738
12	2.484906650	-	0.001044669
13	2.564949357	-	0.000230384
14	2.639057330	-	4.39729E-05
15	2.708050201	-	7.26470E-06

Çizelge A.10.3 : Yalova Üniversitesi için 2012 yılı rüzgar potansiyeli bulguları

Bulgular	Birimler	Sonuçlar
k		2.076919358
c	m/s	4.203365429
n		1.481482344
V _m	m/s	3.723116644
V _{mod}	m/s	3.063802973
V _{max}	m/s	5.816066167
n _{rms}		2.444447031
n _{gama}		1.279390670
V _{rms}		4.563151358
Rüzgar gücü potansiyeli, E _D	W/m ²	58.434554709
Enerji potansiyeli, E _I	kWh/m ² -yıl	513.289128560
Teorik üretilebilir enerji, E _I	kWh/m ² -yıl	302.840585850

EK B.1

Meteorological Data (Default Meteo data description (1))

Position Layers Guide Purpose **Data** Graphics Statistics Shear Report Description

Name: c1 Height [m]: 100.0 Displm. height: 0.0 m Data type: Other/unknown First data: 01.01.2012 Last data: 18.04.2021 9 years 4 months

Time series

☒ Activate ☐ Lock existing time series from: - Deviation from standard time [min]: 0

Column	Required signal	Based on	Signal name	Low limit	High limit
1	Mean wind speed	c1_Wind Speed 100m_Mean (100.0m)	Mean wind speed	-1	75
2	Wind direction	c2_Wind Direction 100 m_Mean (100.0m)	Wind direction	0	360

Add signal Delete signal

Records: 81502 Record interval: 60 min Disabled: 0 Out of range: 0 Duplicates: 0 Errors: 0 Vmean, all: 3.74 Vmean, enabled: 3.74

(Re)load all files for selected height Load new files for selected height

Frequency table data

☒ Activate

Weibull data

☒ Activate A parameter: 4.24 m/s k parameter: 1.9834 Vmean: 3.76 m/s Power density: 62.7 W/m2

Turbulence table data

☐ Activate

Heights

100.00m - c1

Add ... Remove Load all Load new Update online Auto create Setup Export Import

Heights refer to wind speed measurement heights! Other signals can be taken from other heights.

Ok Cancel Apply Prev Next

EK C.1

Project:
1

Licensed user:
Yelen-Gülpınar Enerji Üretim Sanayi Ve Tic. A.Ş.
Mahatma Gandhi Cad. No:47, G.O.P. Çankaya
TR-06700 Ankara
+90 (312) 405 60 80
h.balci / h.balci@yildizlar.com
Calculated:
15.06.2021 13:19/3.1.617

PARK - Main Result

Wake Model N.O. Jensen (RISØ/EMD)

Calculation Settings
Air density calculation mode Individual per WTG
Result for WTG at hub altitude 1.208 kg/m³ to 1.211 kg/m³
Air density relative to standard 98.6 % to 98.9 %
Hub altitude above sea level (asl) 142.3 m to 169.5 m
Annual mean temperature at hub alt. 13.2 °C to 13.4 °C
Pressure at WTGs 993.0 hPa to 996.2 hPa

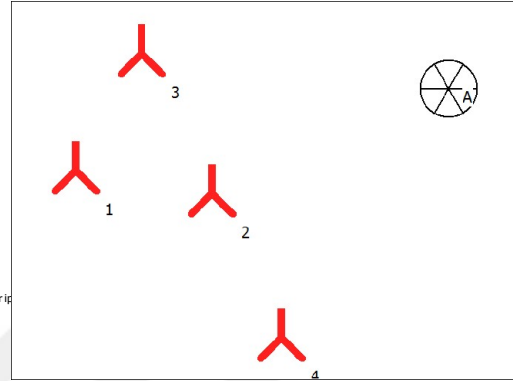
Wake Model Parameters
Wake decay constant 0.075 HH:50m Mixed farmland

Displacement heights from objects

Wake calculation settings
Angle [°] **Wind speed [m/s]**
start end step start end step
0.5 360.0 1.0 0.5 30.5 1.0

Wind statistics TR shortterm (Regression MCP using Default Meteo data description)

WAsP version WAsP 11 Version 11.06.0012



Scale 1:7,500

Key results for height 50.0 m above ground level
Terrain UTM (north)-ED50 (Europe) Zone: 35

New WTG

Site Data

Easting	Northing	Name of wind distribution	Type	Wind energy [kWh/m²]	Mean wind speed [m/s]	Equivalent roughness
A 687,485	4,503,002	Site data: WAsP (13)	WAsP (WAsP 11 Version 11.06.0012)	347	3.3	0.3

Calculated Annual Energy for Wind Farm

Specific results⇒

WTG combination	Result PARK [MWh/y]	Result-10.0% [MWh/y]	GROSS (no loss) Free WTGs [MWh/y]	Park efficiency [%]	Capacity factor [%]	Mean WTG result [MWh/y]	Full load hours [Hours/year]	Mean wind speed @hub height [m/s]
Wind farm	12,511.3	11,260.2	15,212.7	82.2	9.2	2,815.1	804	3.9

⇒ Based on Result-10.0%

Calculated Annual Energy for each of 4 new WTGs with total 14.0 MW rated power

WTG type						Power curve		Annual Energy		Park		
Links	Valid	Manufact.	Type-generator	Power, Rotor rated	diameter	Hub height	Creator	Name	Result	Result-10.0%	Efficiency	Free mean wind speed
						[m]			[MWh]	[MWh]	[%]	[m/s]
1	A	Yes	ENERCON E-138	EP3-3,500	3,500 138.3	110.0	EMD	Level 0 - BM 0s	3,467.3	3,121	89.06	3.89
2	A	Yes	ENERCON E-138	EP3-3,500	3,500 138.3	110.0	EMD	Level 0 - BM 0s	3,308.8	2,978	82.48	3.95
3	A	Yes	ENERCON E-138	EP3-3,500	3,500 138.3	110.0	EMD	Level 0 - BM 0s	2,221.1	1,999	60.52	3.81
4	A	Yes	ENERCON E-138	EP3-3,500	3,500 138.3	110.0	EMD	Level 0 - BM 0s	3,514.2	3,163	96.59	3.80

WTG siting

UTM (north)-ED50 (Europe) Zone: 35

	Easting	Northing	Z	Row data/Description
			[m]	
1 New	687,007	4,502,885	33.9	ENERCON E-138 EP3 3500 138.3 !OI hub: 110.0 m (TOT: 179.1 m) (2)
2 New	687,184	4,502,859	59.5	ENERCON E-138 EP3 3500 138.3 !OI hub: 110.0 m (TOT: 179.1 m) (3)
3 New	687,089	4,503,037	32.3	ENERCON E-138 EP3 3500 138.3 !OI hub: 110.0 m (TOT: 179.1 m) (4)
4 New	687,278	4,502,676	38.6	ENERCON E-138 EP3 3500 138.3 !OI hub: 110.0 m (TOT: 179.1 m) (5)

Project:

1

Licensed user:

Yelen-Gülpınar Enerji Üretim Sanayi Ve Tic. A.Ş.

Mahatma Gandhi Cad. No:47, G.O.P. Çankaya

TR-06700 Ankara

+90 (312) 405 60 80

h.balci / h.balci@yildizlar.com

Calculated:

15.06.2021 13:19/3.1.617

PARK - Power Curve Analysis

WTG: 1 - ENERCON E-138 EP3 3500 138.3 !O! Level 0 - BM 0s, Hub height: 110.0 m**Name:** Level 0 - BM 0s**Source:** Enercon GmbH

Source/Date	Created by	Created	Edited	Stop wind speed	Power control	CT curve type	Generator type	Specific power
				[m/s]				kW/m ²
13.04.2018	EMD	01.08.2017	21.01.2020	25.0	Pitch	User defined	Variable	0.23

According to manufacturer specification document (D0605806-8/D0627418-8).

Enercon reserves the right to change the above specifications without prior notice.

HP curve comparison - Note: For standard air density and weibull k parameter = 2

Vmean	[m/s]	5	6	7	8	9	10
HP value Pitch, variable speed (2013)	[MWh]	7,214	10,547	13,593	16,193	18,317	19,969
ENERCON E-138 EP3 3500 138.3 !O! Level 0 - BM 0s	[MWh]	7,129	10,293	13,222	15,748	17,810	19,387
Check value	[%]	1	2	3	3	3	3

The table shows comparison between annual energy production calculated on basis of simplified "HP-curves" which assume that all WTGs performs quite similar - only specific power loading (kW/m²) and single/dual speed or stall/pitch decides the calculated values. Productions are without wake losses.

For further details, ask at the Danish Energy Agency for project report J.nr. S1171/00-0016 or see windPRO manual chapter 3.5.2.

The method is refined in EMD report "20 Detailed Case Studies comparing Project Design Calculations and actual Energy Productions for Wind Energy Projects worldwide", jan 2003.

Use the table to evaluate if the given power curve is reasonable - if the check value are lower than -5%, the power curve probably is too optimistic due to uncertainty in power curve measurement.

Power curve

Original data, Air density: 1.225 kg/m³

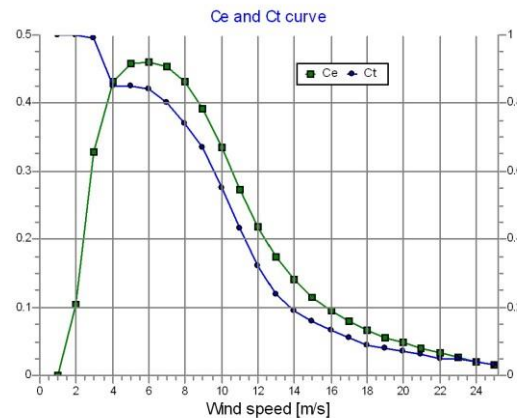
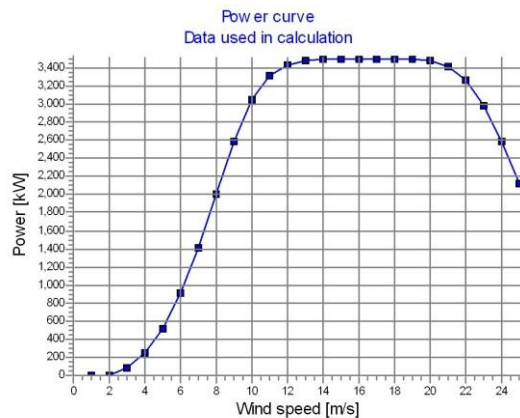
Wind speed Power Ce Wind speed Ct curve

[m/s]	[kW]	[m/s]	
2.0	0.0	0.11	1.32
2.5	34.0	0.24	1.12
3.0	82.0	0.33	0.99
3.5	155.0	0.39	0.91
4.0	254.0	0.43	0.85
4.5	379.0	0.45	0.84
5.0	527.0	0.46	0.85
5.5	705.0	0.46	0.84
6.0	915.0	0.46	0.84
6.5	1157.0	0.46	0.83
7.0	1428.0	0.45	0.80
7.5	1723.0	0.44	0.77
8.0	2029.0	0.43	0.74
8.5	2332.0	0.41	0.71
9.0	2616.0	0.39	0.67
9.5	2885.0	0.36	0.61
10.0	3069.0	0.33	0.55
10.5	3223.0	0.30	0.51
11.0	3333.0	0.27	0.43
11.5	3404.0	0.24	0.36
12.0	3449.0	0.22	0.32
12.5	3474.0	0.19	0.28
13.0	3480.0	0.17	0.24
13.5	3495.0	0.15	0.22
14.0	3498.0	0.14	0.19
14.5	3500.0	0.12	0.17
15.0	3500.0	0.11	0.16
15.5	3500.0	0.10	0.14
16.0	3500.0	0.09	0.13
16.5	3500.0	0.08	0.12
17.0	3500.0	0.08	0.11
17.5	3500.0	0.07	0.10
18.0	3500.0	0.07	0.09
18.5	3500.0	0.06	0.09
19.0	3500.0	0.06	0.08
19.5	3495.0	0.05	0.07
20.0	3484.0	0.05	0.07
20.5	3462.0	0.04	0.06
21.0	3423.0	0.04	0.06
21.5	3363.0	0.04	0.06
22.0	3272.0	0.03	0.05
22.5	3150.0	0.03	0.05
23.0	2994.0	0.03	0.05
23.5	2804.0	0.02	0.04
24.0	2592.0	0.02	0.04
24.5	2363.0	0.02	0.04
25.0	2128.0	0.01	0.03

Power, Efficiency and energy vs. wind speed

Data used in calculation, Air density: 1.211 kg/m³ New windPRO method (adjusted IEC method, improved to match turbine control) <RECOMMENDED>

Wind speed	Power	Ce	Interval	Energy Acc.	Energy Relative
[m/s]	[kW]		[m/s]	[MWh]	[MWh]
1.0	0.0	0.00	0.50-1.50	0.0	0.0
2.0	7.6	0.10	1.50-2.50	23.9	0.7
3.0	80.9	0.33	2.50-3.50	131.6	4.5
4.0	250.9	0.43	3.50-4.50	331.4	14.0
5.0	521.1	0.46	4.50-5.50	538.8	29.6
6.0	905.0	0.46	5.50-6.50	664.0	48.7
7.0	1,413.0	0.45	6.50-7.50	657.4	67.7
8.0	2,009.4	0.43	7.50-8.50	523.4	82.8
9.0	2,593.8	0.39	8.50-9.50	331.7	92.4
10.0	3,048.4	0.34	9.50-10.50	166.7	97.2
11.0	3,318.3	0.27	10.50-11.50	67.3	99.1
12.0	3,441.5	0.22	11.50-12.50	22.5	99.8
13.0	3,485.4	0.17	12.50-13.50	6.5	99.9
14.0	3,497.4	0.14	13.50-14.50	1.7	100.0
15.0	3,500.0	0.11	14.50-15.50	0.4	100.0
16.0	3,500.0	0.09	15.50-16.50	0.1	100.0
17.0	3,500.0	0.08	16.50-17.50	0.0	100.0
18.0	3,500.0	0.07	17.50-18.50	0.0	100.0
19.0	3,500.0	0.06	18.50-19.50	0.0	100.0
20.0	3,487.1	0.05	19.50-20.50	0.0	100.0
21.0	3,423.0	0.04	20.50-21.50	0.0	100.0
22.0	3,272.0	0.03	21.50-22.50	0.0	100.0
23.0	2,994.0	0.03	22.50-23.50	0.0	100.0
24.0	2,592.0	0.02	23.50-24.50	0.0	100.0
25.0	2,128.0	0.01	24.50-25.50	0.0	100.0



EK C.2

Project:
1

Licensed user:
Yelen-Gülpınar Enerji Üretim Sanayi Ve Tic. A.Ş.
Mahatma Gandhi Cad. No:47, G.O.P. Çankaya
TR-06700 Ankara
+90 (312) 405 60 80
h.balci / h.balci@yildizlar.com
Calculated:
15.06.2021 13:37/3.1.617

PARK - Main Result

Wake Model N.O. Jensen (RISØ/EMD)

Calculation Settings
Air density calculation mode Individual per WTG
Result for WTG at hub altitude 1.202 kg/m³ to 1.205 kg/m³
Air density relative to standard 98.1 % to 98.4 %
Hub altitude above sea level (asl) 196.3 m to 223.5 m
Annual mean temperature at hub alt. 12.9 °C to 13.0 °C
Pressure at WTGs 986.6 hPa to 989.8 hPa

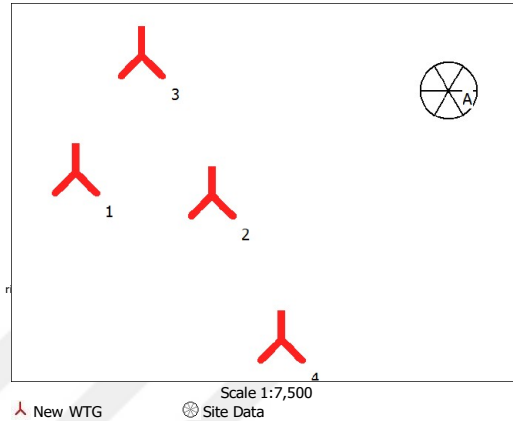
Wake Model Parameters
Wake decay constant 0.075 HH:50m Mixed farmland

Displacement heights from objects

Wake calculation settings
Angle [°] **Wind speed [m/s]**
start end step start end step
0.5 360.0 1.0 0.5 30.5 1.0

Wind statistics TR shortterm (Regression MCP using Default Meteo data desc)

WASP version WASP 11 Version 11.06.0012



Key results for height 50.0 m above ground level
Terrain UTM (north)-ED50 (Europe) Zone: 35

Easting	Northing	Name of wind distribution	Type	Wind energy [kWh/m²]	Mean wind speed [m/s]	Equivalent roughness
A 687,485	4,503,002	Site data: WASP (13)	WASP (WASP 11 Version 11.06.0012)	347	3.3	0.3

Calculated Annual Energy for Wind Farm

Specific results*)

WTG combination	Result PARK [MWh/y]	Result-10.0% [MWh/y]	GROSS (no loss) Free WTGs [MWh/y]	Park efficiency [%]	Capacity factor [%]	Mean WTG result [MWh/y]	Full load hours [Hours/year]	Mean wind speed @hub height [m/s]
Wind farm	17,528.9	15,776.0	22,525.1	77.8	7.9	3,944.0	692	4.1

*) Based on Result-10.0%

Calculated Annual Energy for each of 4 new WTGs with total 22.8 MW rated power

WTG type	Links	Valid	Manufact.	Type-generator	Power, rated	Rotor diameter	Hub height	Power curve Creator	Name	Annual Energy		Park	
										Result	Result-10.0%	Efficiency	Free mean wind speed
					[kW]	[m]	[m]			[MWh]	[MWh]	[%]	[m/s]
1 A	Yes	NORDEX	N163/5.X-5,700	5,700	163.0	164.0		Rough estimate	Rough estimate	5,060.8	4,555	87.88	4.12
2 A	Yes	NORDEX	N163/5.X-5,700	5,700	163.0	164.0		Rough estimate	Rough estimate	4,421.0	3,979	75.01	4.16
3 A	Yes	NORDEX	N163/5.X-5,700	5,700	163.0	164.0		Rough estimate	Rough estimate	2,820.0	2,538	51.71	4.05
4 A	Yes	NORDEX	N163/5.X-5,700	5,700	163.0	164.0		Rough estimate	Rough estimate	5,227.1	4,704	96.47	4.05

WTG siting

UTM (north)-ED50 (Europe) Zone: 35

	Easting	Northing	Z	Row data/Description
			[m]	
1 New	687,007	4,502,885	33.9	NORDEX N163/5.X 5700 163.0 !OI hub: 164.0 m (TOT: 245.5 m) (2)
2 New	687,184	4,502,859	59.5	NORDEX N163/5.X 5700 163.0 !OI hub: 164.0 m (TOT: 245.5 m) (3)
3 New	687,089	4,503,037	32.3	NORDEX N163/5.X 5700 163.0 !OI hub: 164.0 m (TOT: 245.5 m) (4)
4 New	687,278	4,502,676	38.6	NORDEX N163/5.X 5700 163.0 !OI hub: 164.0 m (TOT: 245.5 m) (5)

Project:
1

Licensed user:
Yelen-Gülpinar Enerji Üretim Sanayi Ve Tic. A.Ş.
Mahatma Gandhi Cad. No:47, G.O.P. Çankaya
TR-06700 Ankara
+90 (312) 405 60 80
h.balci / h.balci@yildizlar.com
Calculated:
15.06.2021 13:37/3.1.617

PARK - Power Curve Analysis

WTG: 1 - NORDEX N163/5.X 5700 163.0 !O! Rough estimate, Hub height: 164.0 m

Name: Rough estimate

Source:

Source/Date	Created by	Stop wind speed [m/s]	Power control	CT curve type	Generator type	Specific power kW/m ²
15.06.2021	Rough estimate	25.0	Pitch	Standard pitch	Variable	0.27

HP curve comparison - Note: For standard air density and weibull k parameter = 2

Vmean	[m/s]	5	6	7	8	9	10
HP value Pitch, variable speed (2013)	[MWh]	10,387	15,563	20,455	24,736	28,299	31,117
NORDEX N163/5.X 5700 163.0 !O! Rough estimate	[MWh]	9,808	15,120	20,146	24,526	28,143	30,969
Check value	[%]	6	3	2	1	1	0

The table shows comparison between annual energy production calculated on basis of simplified "HP-curves" which assume that all WTGs performs quite similar - only specific power loading (kW/m²) and single/dual speed or stall/pitch decides the calculated values. Productions are without wake losses.

For further details, ask at the Danish Energy Agency for project report J.nr. 51171/00-0016 or see windPRO manual chapter 3.5.2.

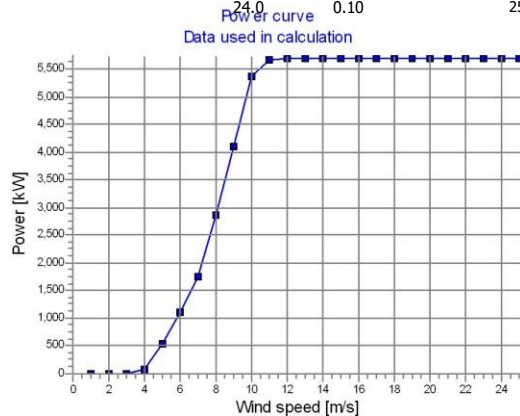
The method is refined in EMD report "20 Detailed Case Studies comparing Project Design Calculations and actual Energy Productions for Wind Energy Projects worldwide", jan 2003.

Use the table to evaluate if the given power curve is reasonable - if the check value are lower than -5%, the power curve probably is too optimistic due to uncertainty in power curve measurement.

Power curve

Original data, Air density: 1.225 kg/m³

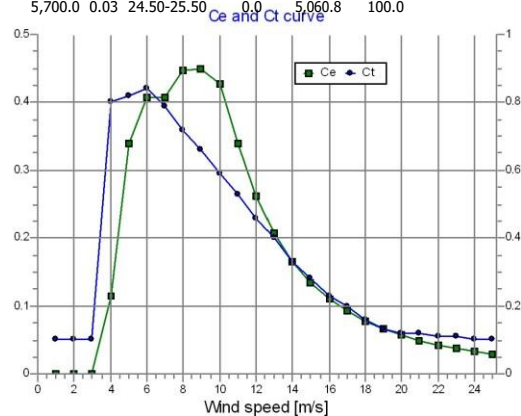
Wind speed [m/s]	Power [kW]	Ce	Wind speed [m/s]	Ct curve
3.0	0.0	0.00	1.0	0.10
4.0	94.9	0.12	2.0	0.10
5.0	544.8	0.34	3.0	0.10
6.0	1,126.4	0.41	4.0	0.80
7.0	2,985.3	0.45	5.0	0.84
8.0	4,183.6	0.45	6.0	0.79
9.0	5,470.3	0.43	7.0	0.72
10.0	5,700.0	0.34	8.0	0.66
11.0	5,700.0	0.26	9.0	0.59
12.0	5,700.0	0.20	10.0	0.53
13.0	5,700.0	0.16	11.0	0.46
14.0	5,700.0	0.13	12.0	0.40
15.0	5,700.0	0.11	13.0	0.33
16.0	5,700.0	0.09	14.0	0.28
17.0	5,700.0	0.08	15.0	0.23
18.0	5,700.0	0.07	16.0	0.20
19.0	5,700.0	0.06	17.0	0.16
20.0	5,700.0	0.05	18.0	0.13
21.0	5,700.0	0.04	19.0	0.12
22.0	5,700.0	0.04	20.0	0.12
23.0	5,700.0	0.03	21.0	0.11
24.0	5,700.0	0.03	22.0	0.11
25.0	5,700.0	0.03	23.0	0.11
			24.0	0.10



Power, Efficiency and energy vs. wind speed

Data used in calculation, Air density: 1.205 kg/m³ New windPRO method (adjusted IEC method, improved to match turbine control) <RECOMMENDED>

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Ce	Interval [m/s]	Energy Acc. [MWh]	Energy Relative [MWh]	Relative [%]
1.0	0.0	0.00	0.50-1.50	0.0	0.0	0.0
2.0	0.0	0.00	1.50-2.50	0.0	0.0	0.0
3.0	0.0	0.00	2.50-3.50	30.0	30.0	0.6
4.0	541.9	0.34	3.50-4.50	568.8	791.9	15.6
5.0	1,106.3	0.41	4.50-5.50	846.2	1,637.2	32.4
6.0	1,757.8	0.41	5.50-6.50	964.4	2,601.6	51.4
7.0	2,872.1	0.45	6.50-7.50	923.5	3,525.2	69.7
8.0	4,112.2	0.45	7.50-8.50	729.6	4,254.8	84.1
9.0	5,376.1	0.43	8.50-9.50	456.2	4,711.0	93.1
10.0	5,677.9	0.34	9.50-10.50	221.2	4,932.2	97.5
11.0	5,700.0	0.26	10.50-11.50	86.3	5,018.5	99.2
12.0	5,700.0	0.21	11.50-12.50	29.6	5,048.1	99.7
13.0	5,700.0	0.17	12.50-13.50	9.2	5,057.3	99.9
14.0	5,700.0	0.13	13.50-14.50	2.6	5,059.9	100.0
15.0	5,700.0	0.11	14.50-15.50	0.7	5,060.6	100.0
16.0	5,700.0	0.09	15.50-16.50	0.2	5,060.8	100.0
17.0	5,700.0	0.08	16.50-17.50	0.0	5,060.8	100.0
18.0	5,700.0	0.07	17.50-18.50	0.0	5,060.8	100.0
19.0	5,700.0	0.06	18.50-19.50	0.0	5,060.8	100.0
20.0	5,700.0	0.05	19.50-20.50	0.0	5,060.8	100.0
21.0	5,700.0	0.04	20.50-21.50	0.0	5,060.8	100.0
22.0	5,700.0	0.04	21.50-22.50	0.0	5,060.8	100.0
23.0	5,700.0	0.03	22.50-23.50	0.0	5,060.8	100.0
24.0	5,700.0	0.03	23.50-24.50	0.0	5,060.8	100.0
25.0	5,700.0	0.03	24.50-25.50	0.0	5,060.8	100.0



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Elif Kurban

Lisans: Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- [1] E. Kurban, Türkiye'de Eşdeğer Yükseklikteki Verilerle Rüzgar Enerji Potansiyeli Çalışmalarının Değerlendirilmesi, V. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi – Mühendislik (BILMES EN 2020), 12-15 Aralık 2020, İstanbul, Türkiye