

Fatih PEKER



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**DOĞU AKDENİZ BÖLGESİNİN  
RÜZGAR ENERJİ POTANSİYELİNİN  
İNCELENMESİ**

**Fatih PEKER**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2019

HAZİRAN 2019



**DOĞU AKDENİZ BÖLGESİNİN RÜZGAR ENERJİ POTANSİYELİNİN  
İNCELENMESİ**

**Fatih PEKER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Haziran 2019**

Fatih PEKER tarafından hazırlanan "DOĞU AKDENİZ BÖLGESİNİN RÜZGAR ENERJİ POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Cuma KARAKUŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.



**Başkan:** Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

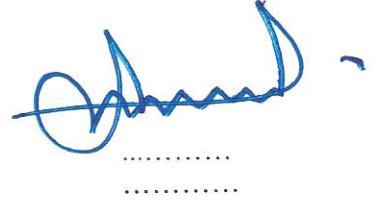
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.



**Üye:** Dr. Öğr. Üy. Engin PINAR

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.



Tez Savunma Tarihi:

10 / 06 / 2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.



Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fatih PEKER

10 / 06 / 2019

DOĞU AKDENİZ BÖLGESİNİN RÜZGAR ENERJİ POTANSİYELİNİN  
İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Fatih PEKER

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Türkiye'nin yüksek enerji ihtiyacı ve bu enerji ihtiyacını yerli kaynaklardan sağlamaya çalışması, son yıllarda ülkenin enerji politikalarını yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde yoğunlaşmasını sağlamıştır. Türkiye yüksek rüzgar enerji potansiyeline sahip bir ülkedir. Ancak halen rüzgar açısından birçok verimli bölge ekonomiye kazandırılmayı beklemektedir. Bu çalışmada rüzgar potansiyeli yüksek bir bölge analiz edilmiş ve bölgeye kurulacağı varsayılan bir rüzgar enerji santralinin ön fizibilite çalışmaları yapılmıştır.

Bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Hatay ili Belen ilçesinde yapılan çalışmanın birinci bölümünde, 2013-2016 yılları arasında Belen meteoroloji istasyonunda kaydedilen saatlik rüzgar hızı ve rüzgar yönü verileri kullanarak WAsP programı yardımı ile her yıl için ayrı ayrı rüzgar enerji potansiyeli incelenmiştir. Aynı bölge içerisinde 2012 yılından beri enerji üretimine devam eden ve gerçek elektrik enerjisi üretim miktarı bilinen bir rüzgar enerji santrali de bulunmaktadır. Bölgedeki rüzgar enerji santralinde bulunan iki adet rüzgar türbini referans türbinler olarak seçilmiştir. İki türbinin gerçek üretim değerleri ile WAsP programı yardımıyla bulunan yıllık elektrik enerjisi üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Bu iki rüzgar türbini teorik çalışmaya noktasal olarak hata analizi yapılmasına olanak sağlamıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında ise çalışmanın ilk kısmında hazırlanan rüzgar enerji potansiyeli atlası üzerinde rüzgar açısından verimli olduğu tespit edilen, Güzelyayla yerleşimine 30 MW'lık rüzgar enerji santrali kurulacağı varsayılmıştır. Yapılan teknik analiz sonucu enerji santralinin yıllık üretim miktarı ve kapasite faktörü bulunmuştur. Bu veriler ışığında RETScreen programı yardımı ile santralin ön fizibilite çalışması yapılmıştır. Kurulacak enerji santralinin basit geri ödeme süresi, öz sermaye geri ödeme süresi, karlılık, nakit akışı ve eşdeğer CO<sub>2</sub> emisyon azaltılması gibi birçok sonuca ulaşılmıştır.

Sonuç olarak Belen bölgesinde rüzgar enerji potansiyelinin yüksek ve çok yüksek olarak sınıflandırılan alanlara sahip olduğu ve hali hazırda kurulu santrallerin bulunduğu bölgeler dışında, rüzgar potansiyeli yüksek alanlar olduğu tespit edilmiştir. Bu alanlara rüzgar enerjisi santrali kurulabileceği ve olumlu sonuçlar alınabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Rüzgar enerjisi, WAsP, RETScreen, Weibull dağılımı, finansal analiz  
Sayfa Adedi : 92  
Danışman : Doç. Dr. Cuma KARAKUŞ

INVESTIGATION OF WIND POTENTIAL OF THE EASTERN MEDITERRANEAN  
REGION  
(M. Sc. Thesis)

Fatih PEKER

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

JUNE 2019

ABSTRACT

Turkey's energy policies in recent years has focused on renewable energy resources according to the Country's high energy needs and working to ensure that its energy needs from domestic sources. Turkey is a country with the highest wind energy potential. However, in terms of wind, many fertile regions have still not been brought into economy. In this study, a region with high wind potential was analyzed and pre-feasibility studies of a wind power plant, which is supposed to be installed in the region, were conducted.

The study was carried out in two stages. In the first part of the study conducted in Belen district of Hatay province, the wind energy potential for each year was examined with the help of WAsP program by using the data of Belen meteorological station between 2013-2016. There is also a wind power plant in the same region that has been operating since 2012 and has a real energy production value. Two wind turbines were selected as reference in the wind power plant region. The actual production values of the two turbines and the annual electric energy production values were compared by WAsP program. These two wind turbines allowed to do error analysis in theoretical studies.

In the second part of the study, it is assumed that 30 MW wind power plant will be installed in Guzelyayla region which is found to be efficient in terms of wind on the wind energy potential atlas prepared in the first part of the study. As a result of the technical analysis, the annual production amount and capacity factor of the power plant were found. In the light of these data, pre-feasibility study of the plant was carried out with the help of RetScreen program. With this study, many results have been obtained such as simple payback period, equity repayment period, profitability, cash flow and equivalent CO<sub>2</sub> emission reduction of the power plant to be installed.

As a result, it is determined that Belen region have high and very high wind energy potential areas and there are areas with high wind energy potentials have been identified, except in the regions where already plants are installed. It is concluded that wind power plant can be established and positive results can be obtained in these areas.

Key Words : Wind energy, WAsP, RETScreen, Weibull distribution, financial analysis

Pages : 92

Consultant : Assoc. Prof. Dr. Cuma KARAKUŞ

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam ve tez yazım süreci boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgmeden, sabırla ve hoş görüyle çalışmama yön veren, tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Cuma KARAKUŞ'a minnettarlığımı ve saygılarımı sunarım. Yüksek lisans sürecim boyunca bana önemli katkılar sunan ve beni yönlendiren Sayın Öğr. Gör. Dr. İlker MERT'e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamda tecrübelerini ve bilgisini paylaşan, Sayın Fatih Anıl'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamdaki verileri sağlayan Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğüne teşekkürlerimi sunarım. Bugünlere gelmemde büyük emeği olan anne ve babama saygı ve sevgilerimi sunarım. Çalışmam boyunca bana destek olan sevgili karım Nihan'a ve canım kızım Leyla Ece'ye sevgilerimi sunarım. Çalışmam sürecinde emeği geçen herkese teşekkür ederim.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
HARİTALARIN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
2.1. Materyal .....	27
2.1.1. Rüzgar hızı ve yönü.....	26
2.1.2. Bölge konum bilgileri .....	30
2.1.3. Mikro konuşlandırma (Mikro siting).....	33
2.1.4. Bölge pürüzlülüğü (Roughness) .....	36
2.1.5. Yakın çevre engelleri (Obstacle) .....	39
2.1.6. Rüzgar türbini özellikleri .....	40
2.1.7. Finansal veriler .....	43
2.2. Yöntem.....	47
2.2.1. WAsP paket programı .....	47
2.2.2. Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları .....	50
2.2.3. Rüzgar türbininin ürettiği enerjinin bulunması .....	55



	viii
2.2.4. Hata analizi.....	56
2.2.5. Kapasite faktörü .....	57
2.2.6. RETScreen paket programı.....	57
3. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	62
3.1. Belen Bölgesinin Rüzgar Enerji Potansiyelinin İncelenmesi .....	62
3.2. Güzelyayla Bölgesi Fizibilite Çalışması .....	71
3.2.1. Teknik bulgular .....	72
3.2.2. Finansal bulgular .....	76
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR .....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	92

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1. Türkiye'nin 2016-2018 yılları arasında kaynaklara göre lisanslı elektrik üretim miktarı.....	14
Çizelge 1.2. 2018 Yılı elektrik enerjisi üretim miktarının kaynaklara göre dağılımı .....	15
Çizelge 1.3. Türkiye'deki 2018 yılı toplam lisanslı kurulu güç tesislerinin kaynaklara göre dağılımı .....	16
Çizelge 1.4. Hatay bölgesindeki rüzgar enerji santralleri .....	21
Çizelge 2.1. Meteoroloji Genel Müdürlüğü Meteorolojik veri bilgi satış ve sunum sistemi saatlik rüzgar hızı ve rüzgar yönü verileri .....	27
Çizelge 2.2. 2016 yılı sektörlerde oluşan ortalama rüzgar hızları frekans değerleri ve Weibull parametreleri.....	28
Çizelge 2.3. Belen ilçesi saat bazında ortalama rüzgar hızları.....	29
Çizelge 2.4. Belen meteoroloji istasyonu konum bilgileri.....	31
Çizelge 2.5. Referans türbin konum bilgileri .....	32
Çizelge 2.6. Güzelyayla RES türbin konum bilgileri.....	32
Çizelge 2.7. Güzelyayla RES türbinler arası mesafe.....	35
Çizelge 2.8. Pürüzlülük sınıfları.....	37
Çizelge 2.9. 2016 Yılı rüzgar atlası.....	39
Çizelge 2.10. Referans Türbin Özellikleri .....	42
Çizelge 2.11. Referans türbinin hıza bağımlı güç değerinin değişimi .....	40
Çizelge 3.1. Yıllara göre sektör bazında rüzgar esme sıklığı, Weibull parametreleri, ortalama rüzgar hızları ve güç yoğunluğu, a. 2013 yılı, b. 2014 yılı, c. 2015 yılı, d. 2016 yılı .....	63
Çizelge 3.2. Belen bölgesi 2013-2016 yılları rüzgar atlası, a. 2013 yılı, b. 2014 yılı, c. 2015 yılı, d. 2016 yılı .....	65
Çizelge 3.3. Referans Türbin 2016 yılı verileri .....	68
Çizelge 3.4. Referans türbinlerin 2013-2016 yıllarındaki emre amade katsayıları.....	70

Çizelge 3.5. B06 türbinin 2013-2016 yılları arasında gerçekleşen gerçek üretim değerlerinin çalışmada bulunan teorik değerler ile karşılaştırılması .....	70
Çizelge 3.6. B16 türbinin 2013-2016 yılları arasında gerçekleşen gerçek üretim değerlerinin çalışmada bulunan teorik değerler ile karşılaştırılması .....	70
Çizelge 3.7. Güzelyayla RES’de bulunan türbinlerin konum, ortalama hız ve güç yoğunluğu bulguları. ....	74
Çizelge 3.8. Güzelyayla RES elektrik üretim miktarı sonuçları .....	74
Çizelge 3.9. Güzelyayla RES’inde üretilen toplam enerji miktarı.....	75
Çizelge 3.10. Teknik analiz sonucu Retscreen programına işlenecek veriler.....	76
Çizelge 3.11. Genel ekonomik veriler ve finansman bilgileri .....	77
Çizelge 3.12. Güzelyayla RES’nin yıllık cirosu.....	78
Çizelge 3.13. Sera gazı azaltımı tablosu .....	79
Çizelge 3.14. Güzelyayla RES’nin yıllara göre nakit akış çizelgesi .....	79
Çizelge 3.15. Finansal sürdürülebilirlik değerleri.....	80
Çizelge 3.16. Güzelyayla RES’nin maliyetleri, tasarrufları ve hasılatları tablosu.....	82

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Genel olarak rüzgar çeşitlerinin sınıflandırılması.....	4
Şekil 1.2. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırması.....	5
Şekil 1.3. Vestas V90 3 MW 50 Hz rüzgar türbini.....	6
Şekil 1.4. Dünyada ve Türkiye’de kurulu RES’lerin toplam kapasitesinin 2013-2018 yılları arasındaki değişimi.....	8
Şekil 1.5. Dünyadaki RES’lerin yıllara göre artış miktarı ve artış oranı .....	8
Şekil 1.6. Dünyadaki RES’lerin ülke bazında dağılımı ve kapasitesinin yıllara göre değişimi.....	9
Şekil 1.7. Avrupa ülkelerinin 2000-2017 yılları arasındaki elektrik santrali yatırımları.....	10
Şekil 1.8. Avrupa ülkelerinin 2018 yılı kümülatif rüzgar enerjisi santrali kapasitesi.....	11
Şekil 1.9. Avrupa ülkelerinin 2022 kümülatif rüzgar enerjisi santrali kapasitesi senaryosu.....	13
Şekil 1.10. Türkiye’nin 2016-2018 Yılları Arasında Lisanslı Elektrik Üretimine kaynaklara göre dağılım yüzdeleri ve yıllık toplam elektrik üretim miktarlarının grafikleri; a. 2016 yılı, b. 2017 yılı, c.2018 yılı, d. Lisanslı elektrik üretimi 2016-2018 .....	15
Şekil 1.11. Türkiye’deki enerji santrallerinin kaynaklara göre dağılım grafiği.....	16
Şekil 1.12. Türkiye’deki rüzgar enerji santrallerinin yıllara göre toplam kapasiteleri ...	17
Şekil 1.13 Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri yatırımlarının yıllara göre değişimi	18
Şekil 1.14. Türkiye’deki işletmedeki rüzgar enerji santrallerinin şehirlere göre dağılımı .....	19
Şekil 2.1. Sektör bazında ortalama rüzgar hızlarının frekans grafiği. ....	28
Şekil 2.2. Rüzgar hızlarının frekans değerleri (tüm sektörler).....	29
Şekil 2.3. Belen bölgesi yıllara göre aylık 10 m’de ölçülen rüzgar hızı ortalamaları.....	30
Şekil 2.4. Türbinler arası olması gereken minimum mesafe .....	34
Şekil 2.5. Meteoroloji istasyonu çevresindeki engellerin konum bilgileri .....	38

Şekil 2.6. Referans türbin rüzgar hızına bağlı güç eğrisi.....	43
Şekil 2.7. WAsP programı ekran görüntüsü .....	49
Şekil 2.8. Ölçek parametresi (c) sabitken, şekil parametresinin (k) değişimi.....	54
Şekil 2.9. Şekil parametresi (k) sabitken ölçek parametresinin (c) değişimi.....	54
Şekil 2.10. RETScreen programının iş akış şeması .....	58
Şekil 2.11. Retscreen veri tabanı İskenderun konumu için iklim ve konum bilgileri.....	59
Şekil 2.12. Retscreen emisyon analizi modülü .....	60
Şekil 3.1. 2016 Yılı hakim rüzgar yönü ve rüzgar hızlarına göre frekans eğrisi grafiği	65
Şekil 3.2. Referans türbinlerde üretilen gerçek ve teorik değerlerin karşılaştırılması....	71
Şekil 3.3. Retscreen güç tesisi enerji modeli.....	76
Şekil 3.4. Güzelyayla RES bölgesinin RETScreen programı yardımıyla hesaplanan emisyon analizi .....	73
Şekil 3.5. Güzelyayla RES nakit akışı .....	81
Şekil 3.6. Güzelyayla RES kümülatif nakit akışı.....	81

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1 Türbin arkasında oluşan ölü akış bölgesi izi .....	36
Resim 2.2. Vestas V90-3.0 MW VCS 50 Hz türbin.....	41



## HARİTALARIN LİSTESİ

<b>Harita</b>	<b>Sayfa</b>
Harita 1.1. Avrupa ülkelerinin 2018 sonu itibari ile kurulu ve kurulmakta olan rüzgar enerjisi.....	12
Harita 1.2. Hatay ili rüzgar enerji santrallerinin yerleşim haritası.....	20
Harita 2.1. Hatay ili haritası .....	31
Harita 2.2. Güzelyayla RES bölgesinin haritası.....	33
Harita 2.3. Belen bölgesindeki analiz bölgesinin uydu görüntüsü .....	35
Harita 2.4. Hatay pürüzlülük haritası- Corine Land Cover 2006.....	38
Harita 2.5. Belen Meteoroloji istasyonu çevresindeki engeller .....	39
Harita 2.6. WAsP ortalama hız analizinin Google Earth uydu haritalarının üzerine iz düşümünün işlenmiş görüntüsü.....	50
Harita 3.1. Belen ilçesi 2016 yılı 80 m. Rüzgar hızı atlası .....	67
Harita 3.2. 2016 yılı rüzgar hızı atlasının uydu görünümü .....	68
Harita 3.3. Belen ilçesi 2016 yılı güç yoğunluğu atlası. ....	69
Harita 3.4. Güzelyayla RES'inin türbin yerleşiminin haritası.....	72
Harita 3.5. 2016 Yılı Güzelyayla bölgesi rüzgar enerjisi potansiyeli atlası (80 m).....	73
Harita 3.6. 2016 Yılı Güzelyayla bölgesi ortalama rüzgar hızı atlası (80 m). ....	73

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>A</b>	Alan [ $m^2$ ]
<b>c</b>	Weibull ölçek parametresi [m/s]
<b><math>f_w(v)</math></b>	Weibull dağılım fonksiyonu
<b><math>\Gamma()</math></b>	Gamma fonksiyonu
<b>k</b>	Weibull şekil parametresi
<b><math>\rho</math></b>	Havanın yoğunluğu [ $kg/m^3$ ]
<b><math>\sigma</math></b>	Standart sapma [m/s]
<b>n</b>	Belirli periyotta gözlem sayısı
<b>v</b>	Rüzgar hızı [m/s]
<b><math>v_i</math></b>	Türbinin devreye giriş (cut in) hızı (m/s)
<b><math>v_R</math></b>	Türbinin tam kapasiteye ulaştığı rüzgar hızı (m/s)
<b><math>v_o</math></b>	Türbinin devreden çıkış (cut out) hızı (m/s)
<b><math>v_m</math></b>	Ortalama rüzgar hızı [m/s]
<b>Hz</b>	Hertz
<b>h</b>	Yükseklik (m)
<b><math>C_f</math></b>	Kapasite Faktörü (%)
<b>z</b>	Pürüzlülük Uzunluğu
<b>tCO<sub>2</sub></b>	Ton Karbondioksit

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>AEP</b>	Yıllık Enerji Üretimi (Annual Energy Production)
<b>BEÜM</b>	Birim Enerji Üretim Maliyeti
<b>BGÖS</b>	Basit Geri Ödeme Süresi
<b>DTU</b>	Danimarka Teknik Üniversitesi
<b>EAK</b>	Emre Amade Katsayısı
<b>EİE</b>	Elektrik İşleri Etüt İdaresi



**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>ETKB</b>	T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
<b>EWEA</b>	Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği (The European Wind Energy Association)
<b>FM</b>	Finansal maliyet
<b>GWEC</b>	Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi (Global Wind Energy Council)
<b>İBM</b>	İşletme ve bakım maliyeti
<b>İKO</b>	İç Karlılık Oranı
<b>MEVBİS</b>	Meteorolojik Veri Bilgi Satış Ve Sunum Sistemi
<b>NBD</b>	Net Bugünkü Değer
<b>OWC</b>	Observed Wind Climate
<b>REPA</b>	Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası
<b>RES</b>	Rüzgar Enerji Santrali
<b>RETScreen</b>	Clean Energy Management Software
<b>TÜREB</b>	Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
<b>USEIA</b>	United State Energy Information Administration
<b>WAsP</b>	Wind Atlas Analysis and Application Program
<b>WCA</b>	WAsP Climate Analyst
<b>WWEA</b>	Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği (World Wind Energy Association)
<b>YEÜ</b>	Yıllık Enerji Üretimi
<b>YSM</b>	Yıllık Sermaye Maliyeti

## 1. GİRİŞ

Dünyada nüfusun artması, sanayi ve teknolojiadaki gelişmeler enerjiye olan ihtiyacı gün geçtikçe artırmaktadır. Ülkeler ekonomik gelişmelerini sürdürebilmek adına daha çok üretmek, daha çok üretmek içinse daha çok enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Halihazırda kullanılan fosil yakıtların yakın bir zamanda tükenecek olması, fiyat dalgalanmaları, karbon emisyonları ve nakil problemleri ülkeleri farklı enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtların en önemli alternatiflerinden biri olarak büyük önem taşımaktadır (Bilgili, Şahin ve Şimşek, 2010).

Yenilenebilir enerji kaynakları yerel ve sürdürülebilir olması, dışa bağımlılığı azaltması açısından dünyadaki birçok ülkenin dikkatini çekmektedir. Dünyada yatırımları yapılan başlıca yenilenebilir enerji kaynakları rüzgar, güneş, jeotermal, hidroelektrik, dalga ve hidrojenidir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisi fosil kökenli yakıtlara iyi bir alternatif olduğu değerlendirilmektedir. Rüzgar enerjisi santrallerinin teknolojik gelişmeler ile işletme ve bakım maliyetlerinin çok düşük olması, yapılan yatırımın 20-25 yıl gibi uzun ömürlü olması, her hangi bir yakıtta ihtiyaç duymaması gibi avantajları, santrallere yatırım yapan yatırımcıların dikkatini çekmiş ve rüzgar enerji santralleri karlı enerji yatırımları haline gelmiştir.

Dünyadaki rüzgar enerjisi santralleri sayısı gün geçtikçe artmaktadır. 2018 yılı sonu itibari ile Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği raporuna göre rüzgar enerji santralleri, dünyadaki toplam enerji ihtiyacının %6'sından fazlasını karşılamaya başlamıştır. Dünyada 2018 yılında 53,9 GW rüzgar enerji santrali kurularak, toplam kurulu güç Ocak 2019 itibari ile 600 GW'a ulaşmıştır (WWEA, 2019). Avrupa'da 2018 yılı sonu itibari ile kurulu toplam rüzgar enerjisi santrali 189 GW'tır. Bunların 170 GW'ı kara üstü (on-shore) santral olup, 19 GW'ı deniz üstü (offshore) santraldir. Avrupa'da Danimarka elektrik ihtiyacının %41'ini rüzgar enerjisi santrallerinden karşılayarak bu alandaki rekoru elinde tutmaktadır (EWEA, 2019). Türkiye'de ise 2018 yılı sonu itibari ile RES kurulu toplam gücü 7,4 GW' tır. Türkiye RES kurulu güç bakımından dünyada 11., Avrupa'da ise 6. büyük ülkedir (EWEA, 2019; GWEC,2019).

Enerji ihtiyaçlarının artması ile Türkiye'nin yüksek rüzgâr enerji potansiyeli, gün geçtikçe önem kazanmakta ve yatırımlar artmaktadır. Türkiye 2018 sonu itibari ile üretilen toplam

elektrik enerjisi 303 900,00 GWs' tir. Üretilen bu elektrik enerjisinin 95 728,50 GWs' ni yani %31,50' ini yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaya başlamıştır. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarının ise %20,95' ini rüzgar enerjisi oluşturmaktadır. 2018 yılında 20 057,40 GWs elektrik enerjisi kurulu rüzgar enerjisi santrallerinden karşılanmıştır (ETKB, 2019a).

Ülkenin gelişimini önündeki en büyük engellerden biri olan enerji ithalatı, dışa bağımlılığı artırmakta ve cari açığın en önemli sebeplerinden biri olmaktadır. Son dönemde yapılan yatırımlar ile Türkiye enerji ihtiyacını öz kaynakları ile karşılamaya çalışmaktadır. Türkiye 2022 yılına kadar yaklaşık 3,3 GW rüzgar santrali yatırımı yapmayı planlamaktadır (EWEA, 2017a). Bu yatırımlar ile fosil yakıtların ithalatının azaltılmasının yanında karbon emisyonunu azaltması ve yatırımlar sayesinde istihdamın artırılması planlanmaktadır. 2015 yılında rüzgar türbinlerinden üretilen enerji ile doğalgaz ithalatı 574 milyon \$, karbon emisyonu ise 5,88 milyon ton azalmıştır. Ayrıca bu santrallerde yaklaşık 15 000 kişi istihdam edilmiştir (TUREB, 2016). Hatay ili Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek illeri arasında önemli bir konuma sahiptir. Hatay ilinde 364,50 MW'lık kurulu güç ile Türkiye'nin işletmedeki RES'lerin bulunduğu iller sıralamasında dördüncü büyük ildir. İnşası devam eden RES'lerin tamamlanması ile mevcut kurulu güç 410 MW olacaktır. Bu kurulu gücün 144,3 MW'lık kısmı Belen ilçesindedir (TUREB, 2019a).

Yatırımlar yapılırken rüzgar enerjisi santralının kurulacağı alan büyük önem taşımaktadır. RES'lerin maliyetlerinin büyük kısmı kurulum aşamasında ödenmektedir. Bununla birlikte RES'lerin kurulacağı alanının iklimsel ve topografik yapıları yatırım maliyetlerinin geri ödeme süresini etkilemektedir. Yanlış yatırımlar geri ödeme sürelerini dolayısıyla karlılığı negatif yönde etkilemektedir.

Bu çalışmada WAsP programı kullanılarak bölgenin 2013-2016 yılları arasında dört yıllık rüzgar hızı ve rüzgar yönü verileri ile çalışılmıştır. Çalışmanın yapılabilmesi için Belen Bölgesinde yaklaşık 42 217 140,62 m<sup>2</sup> alan analiz edilmiştir. Analiz bölgesi (242912, 4038444) - (251856, 4043176) koordinat noktaları arasında bulunmaktadır. Bölge yatayda 91 dikeyde 172 kısma ayrılarak 15 652 site oluşturulmuştur. Bölgenin topografyası, engeller, bölgedeki rüzgar enerjisi santralleri gerçekte aynı olacak şekilde programa işlenmiştir. Çalışma iki kısımda gerçekleşmiştir.

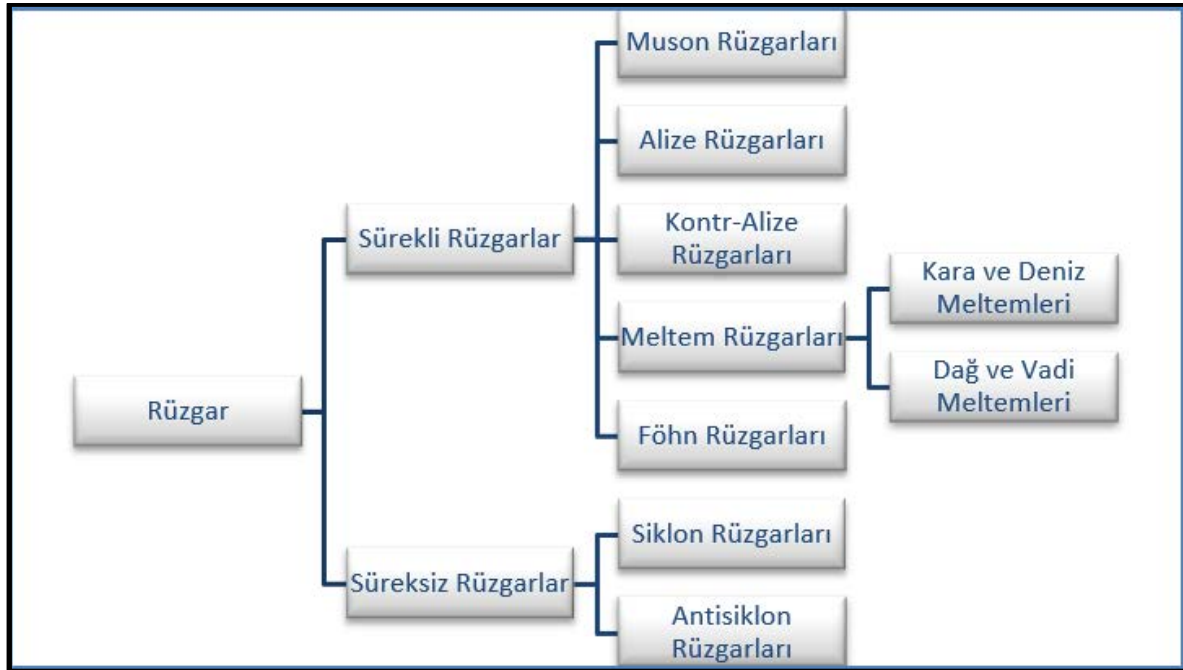
Çalışmanın ilk kısmında Belen bölgesinde kurulu olan ve hali hazırda enerji üretimine devam eden bir rüzgar çiftliğinin 2013-2016 yılları arasında konumu, marka ve modeli, enerji üretim değerleri bilinen iki adet rüzgar türbini referans olarak alınacaktır. Referans türbinlerin bulunduğu rüzgar enerji santrali, gerçeğe daha yakın sonuçlara ulaşabilmek adına, rüzgar türbinlerin birbiri ile etkileşim halinde olacağı ve bu etkileşimin üretilen enerjiyi değiştireceği ön görüşü ile RES'inin bütün olarak simüle edilecektir. Bu simülasyon sonucunda dört yılın üretilen enerji miktarları santralin işletme duruşları ve türbinlerin ölü akış bölgesi kayıpları da göz önünde bulundurularak gerçek veriler ile karşılaştırılacak, karşılaştırma sonuçları bağıl ve mutlak hata olarak tablolar halinde gösterilecektir.

Çalışmanın ikinci kısmında analiz bölgesinde bulunan Güzelyayla yerleşimine 30 MW bir rüzgar enerji santrali kurulacağı varsayımla bölgenin tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. Bu analize çalışmanın ilk bölümünde bulunan hata oranları yansıtılarak yapılacak olan santralin geri ödeme süreleri, CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılması, toplam net karı gibi fizibilite sonuçları değerlendirilecektir. Bu veriler ışığında yapılan fizibilite ile yatırım faydaları ortaya konmuştur.

## Rüzgar enerjisi

### Rüzgar ve oluşumu

Dünyanın kendi etrafında dönmesi ile güneş atmosferin farklı bölümlerini farklı sıcaklıklarda ısıtır. Atmosferin bir kısmı güneşin etkisiyle ısınırken diğer kısmı soğumaya başlamaktadır. Bu olay atmosferde ısı potansiyeli farklı hava kütleleri meydana getirmektedir. Soğuk ve yüksek basınç altındaki hava kütleleri daha sıcak ve düşük basınç alanına doğru hareket ederler. Rüzgar, ısı enerjisinin kinetik enerjiye dönüşmesinden meydana gelmektedir. Rüzgarlar sürekliliklerine göre iki gruba ayrılır. Tüm yıl esen sürekli rüzgarlar ve belli zamanlarda esen süreksiz rüzgarlar. Tayfun, tornada, harikeyn ve girdaplar süreksiz rüzgarlardan bazılarıdır. Şekil 1.1'de genel olarak rüzgar çeşitlerinin sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 1.1. Genel olarak rüzgar çeşitlerinin sınıflandırılması (Özdamar, 2000)

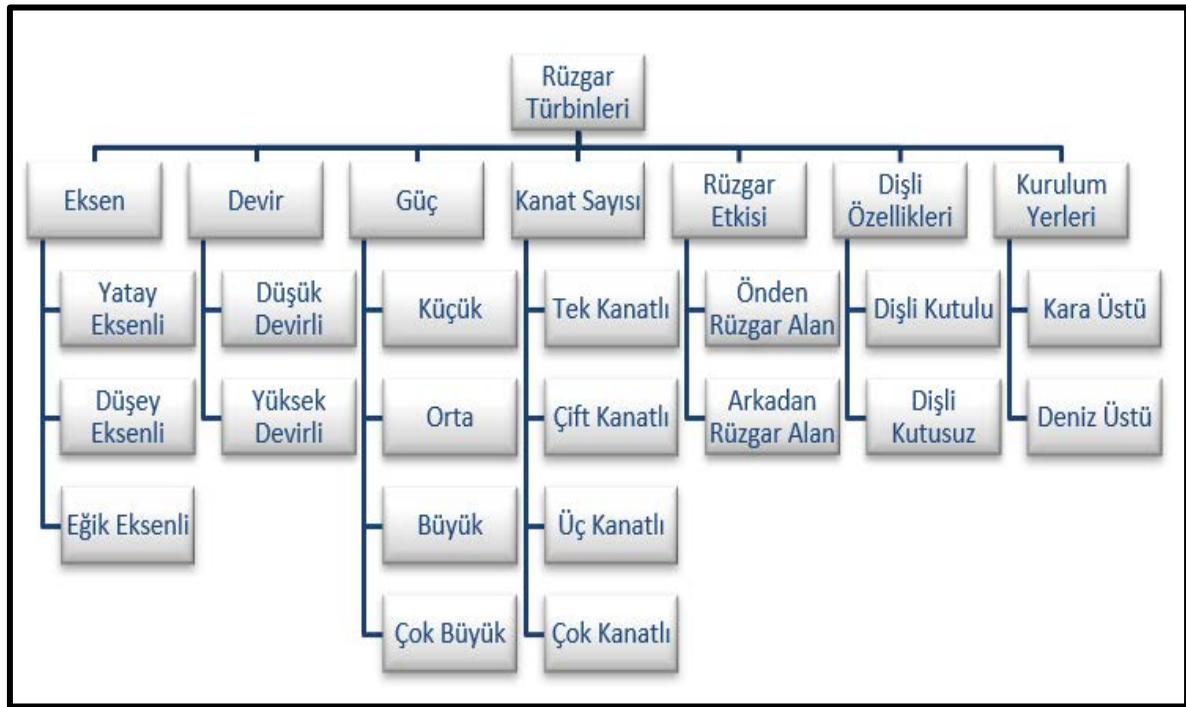
Kıta ve okyanusların aynı miktarda güneş ısısına maruz kalsalar bile özgül ısıları farklı olduğundan ısınma soğuma süreleri farklıdır. Bu nedenle karalar hızlı ısınır, hızlı soğur; denizler yavaş ısınır, yavaş soğur. Bu olay muson rüzgarlarının oluşum sebebidir. Yaz musonları Hint okyanusundan Asya kıtasına, kış musonları ise Asya kıtasından Hint okyanusuna doğru oluşmaktadır. Alize rüzgarları, yılın her döneminde her iki yarım kürede 30° de bulunan yüksek basınç kuşağından ekvatordeki düşük basınç kuşağına doğru eserler. Kontralize rüzgarlarıysa, yüksek atmosfer şartlarında alize rüzgarlarının tersi yönünde eserler. Kontralize rüzgarları ekvatorda ısınan havanın yükselmesi ile ekvatorun uzaklaşmalarıdır. Meltem rüzgarları, kara-deniz ve dağ-vadi meltemleri olarak iki grupta incelenebilir. Karaların denizden daha hızlı ısınıp soğuması ve aynı şekilde dağlarında vadilerden daha hızlı ısınıp soğumasından ötürü üzerlerindeki havanın sıcaklık ve basınç farkından hareketi ile oluşurlar. Föhn rüzgarları hareket halinde bir hava kütesinin dağa çarparak yükselirken her 100 m' de 0,5 °C soğuması ve dağın yamacına ulaştığında alçalarak her 100 m' de 1 °C ısınması hareketi ile oluşur (Özdamar, 2000).

### Rüzgar türbinleri ve bileşenleri

Rüzgar türbinleri, rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye, üretilen bu mekanik enerjiyi de elektrik enerjisine dönüştüren mekanizmalardır. Rüzgar türbinleri bu enerji çevrimlerini

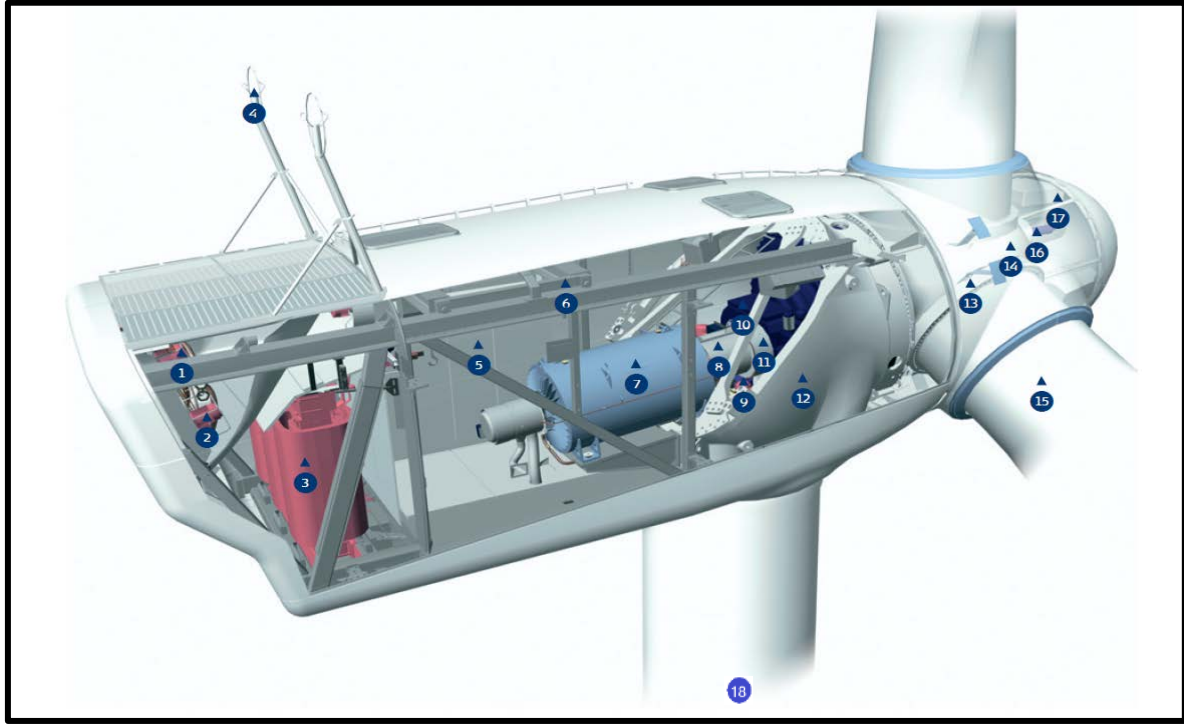
farklı tasarımlar ile gerçekleştirilebilir. Rüzgar türbinleri tasarımsal özelliklerine, eksenlerine, bileşenlerine veya kurulum yapıldığı yerlere göre sınıflandırılabilir. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması Şekil 1.2’de verilmiştir.

Rüzgar türbinleri eksenlerine göre üçe ayrılır ve yatay, düşey ve eğik olarak sınıflandırılır. Devir sayılarına göre düşük ve yüksek olarak veya güç kapasitelerine göre farklı kullanım amaçlarına göre (Ticari, konut, güç santrali, vs.) farklı ebatlarda türbinler mevcuttur. Kanat sayılarına göre rüzgar türbinleri bir, iki, üç kanatlı ve çok kanatlı olmak üzere dört çeşittir. Günümüzde ticari amaçlı kullanılan türbinlerin büyük oranı üç kanatlıdır. Rüzgarın etkisinin önden yada arkadan olan türbinlerde mevcuttur. Genel kullanım önden rüzgar etkili türbinlerde olsa arkadan rüzgar etkili yaw mekanizması olmayan rüzgar türbinleri de mevcuttur. Güç aktarım elemanlarına göre dişli kutulu ve dişli kutusuz tipler vardır. Rüzgar türbinlerinin kurulum yerine göre ikiye ayrılır. Kara üstü rüzgar türbinleri on-shore ve deniz üstü rüzgar türbinleri off-shore olarak adlandırılır. Denizler kara parçalarına göre rüzgar enerjisi potansiyeli açısından hem pürüzlülük katsayılarının sıfır olması, hem yakın çevre engelleri olmayışı açısından daha uygun alanlardır. Buna karşılık deniz üstü RES’nin maliyetleri, işletmenin ve altyapının denizin üzerinde kurulu olmasından dolayı kara üstü santrallere göre daha yüksektir (Özdamar, 2000; Özgener, 2002).



Şekil 1.2. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması (Özdamar, 2000)

Şekil 1.3'de çalışmada da kullanılan Vestas V90 3 MW 50 Hz rüzgar türbininin şematik gösterim verilmiştir. Rüzgar türbini, yatay eksenli, üç kanatlı ve kara üstü türbinidir. V90 - 90 metre kanat çapını, 3 MW ise nominal güç kapasitesini göstermektedir. Türbin parçaları numaralarla işaretlenip, karşılık gelen türbin elemanları genel anlamda ifade edilmiştir.



Şekil 1.3. Vestas V90 3 MW 50 Hz rüzgar türbini bileşenleri (Vestas, 2009)

- |                                    |                        |
|------------------------------------|------------------------|
| 1- Yağ soğutucu                    | 10- Redüktör           |
| 2- Jeneratör için su soğutucu      | 11- Mekanik fren diski |
| 3- Yüksek gerilim trafosu          | 12- Makine temeli      |
| 4- Ultrasonik rüzgar sensörleri    | 13- Kanat yatağı       |
| 5- Üst denetleyici ile dönüştürücü | 14- Kanat göbeği       |
| 6- Servis vinci                    | 15- Kanat              |
| 7- Hız ayar jeneratörü             | 16- Zift silindiri     |
| 8- Kompozit disk bağlantısı        | 17- Hub denetleyici    |
| 9- Yaw dişler                      | 18- Kule               |

Redüktör, iki kademeli bir planet dişlinin ve 1 kademli bir helisel dişlinin birleşmesi ile meydana gelmiştir. Ana dişli, torku rotordan jeneratöre iletir. Düşük hızlı giriş şaftı geleneksel bir ana şaft kullanılmadan doğrudan göbeğe sabitlenmiştir (Vestas, 2004).

Yaw sistemi dahili sürtünmeli düz rulman sistemidir. Sistem nacellenin (makine bölümü) kule üzerinde dönmesini sağlayan mekanizmadır. Sistem, kuvvetleri nacelleden kuleye iletir. Jeneratör, dört kutuplu sargılı asenkron jeneratördür. Genellikle rüzgar türbininde kullanılan bu jeneratörlerin tercih edilmesinin sebebi sağlamlık, mekanik anlamda basitlik ve ani rüzgar artışında oluşan tork titreşimlerinin azaltılmasında oldukça iyi olmasıdır (Apaydın, Üstün ve Kurban, 2009). Bu jeneratörler geniş bir hız aralığında rotorun hızının değişmesine olanak verir. Bu sayede güç şebekesindeki güç dalgalanmalarını azaltır. Ayrıca düşük rüzgar hızlarında güç üretimini optimize eder. Su soğutmalı sisteme sahiptir. Servis vinci nacelledeki sistem montajının yapılması ve arıza, bakım gibi durumlarda montaj ve de-montaj işlemlerinde kullanılır. Kule, makine dairesini ve kanatları taşıyan sistemdir. İçerisinde nacelleye ulaşımı mümkün kılan bakım merdiveni ve güvenlik platformları vardır. Çalışmada kullanılan Vestas V90 3 MW türbinin kule yüksekliği 80 m'dir. Kanatlar, fiber cam takviyeli epoksi ve karbon fiberden yapılmıştır. Kanatların aerodinamik tasarımı sayesinde sesi ve türbine uygulanan mekanik kuvvetleri en aza indirir. Çalışmada kullanılan Vestas "V90 3 MW" türbini üç adet 44 metre kanata sahiptir. Her bir kanat, kanat ucunda yıldırım alıcıları ve bıçağın içinden geçen bakır tel iletkeninden oluşan bir yıldırım korunma sistemine sahiptir.

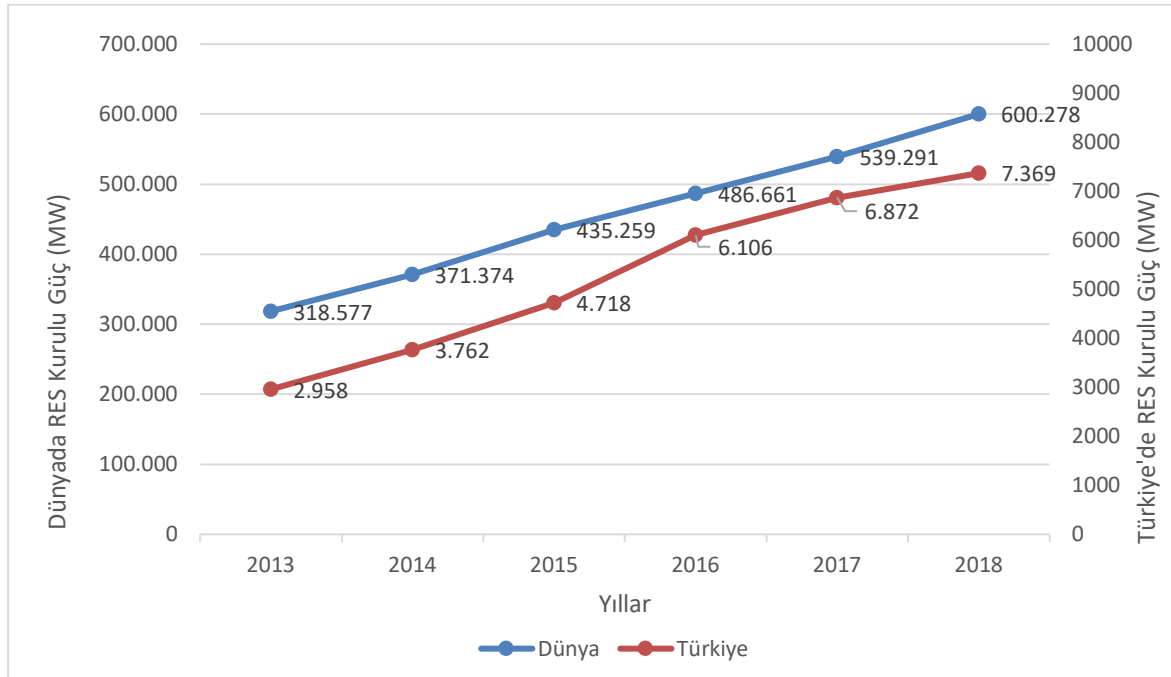
Trafo nacellenin arka kısmında ayrı bir bölmede bulunur. Rüzgar türbinleri için tasarlanmış bu trafo, üç fazlı, kuru tip ve dökme reçineli trafodur. Rotorun elektriksel hızı dışarıdan kontrol edilir ve böylece rotor gerilimi değiştirilebilir. Gerilim değeri 10 kV ile 34,5 kV arasında 0,5 kV'lık aralıklarla değişebilir. Maksimum gerilim 36 kV'tur (Vestas, 2004).

### *Dünyada rüzgar enerjisi ve güncel WWEA verileri*

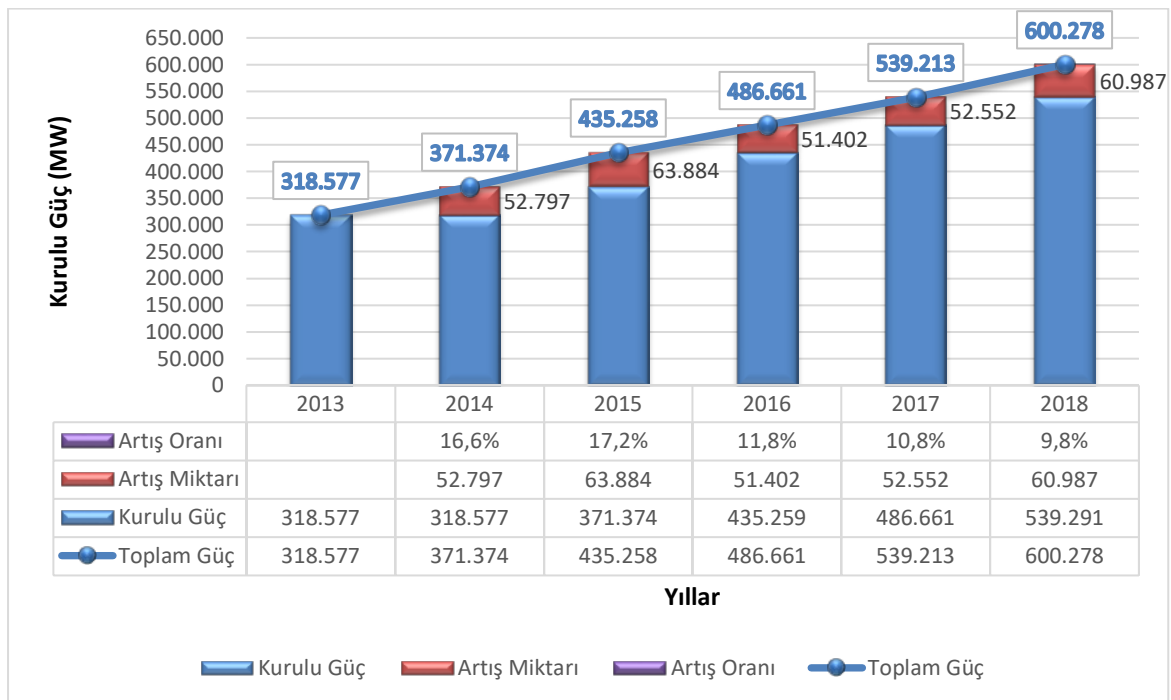
Dünya rüzgar enerjisi birliği (WWEA) 100 ülkeden 600 katılımcı ile kar amacı olmayan bir dernektir. 2001 yılında Almanya'nın Bonn şehrinde kurulmuştur. WWEA'nın amaçları arasında rüzgar enerjisi yatırımlarını gerçekleştiren uluslar ve yatırımcıları arasında iletişimi sağlamak için bir platform oluşturmak, tavsiyelerde bulunmak ve uluslararası teknoloji transferini artırmak gibi hedefleri bulunmaktadır. WWEA'nın Nisan 2019 tarihinde yayınladığı istatistik raporuna göre, dünyada 2018 yılı sonunda kurulu rüzgar enerjisi santrali toplam kapasitesi 600 278 Megawatta ulaşmıştır. Dünyadaki kurulu güç kapasitesi 2014 yılında 52 797 MW artarak ( %16,6) toplam kapasite 371 374 MW, 2015 yılında 63 884 (%17,2) artarak 435 835 MW, 2016 yılında 51 402 MW artarak (%11,8) 455 835



MW, 2017 yılında 52 552 MW (%10,8) artarak 539 291 MW, 2018 yılında ise 53 900 MW artarak toplam kurulu güç 600 278 MW'a ulaşmıştır. Dünyada ve Türkiye'deki kurulu toplam RES'lerin 2013-2018 yılları arasındaki değişimi Şekil 1.4' de verilmiştir. Dünyadaki RES'lerin artışı ve artış oranları Şekil 1.5' de verilmiştir (WWEA, 2019)

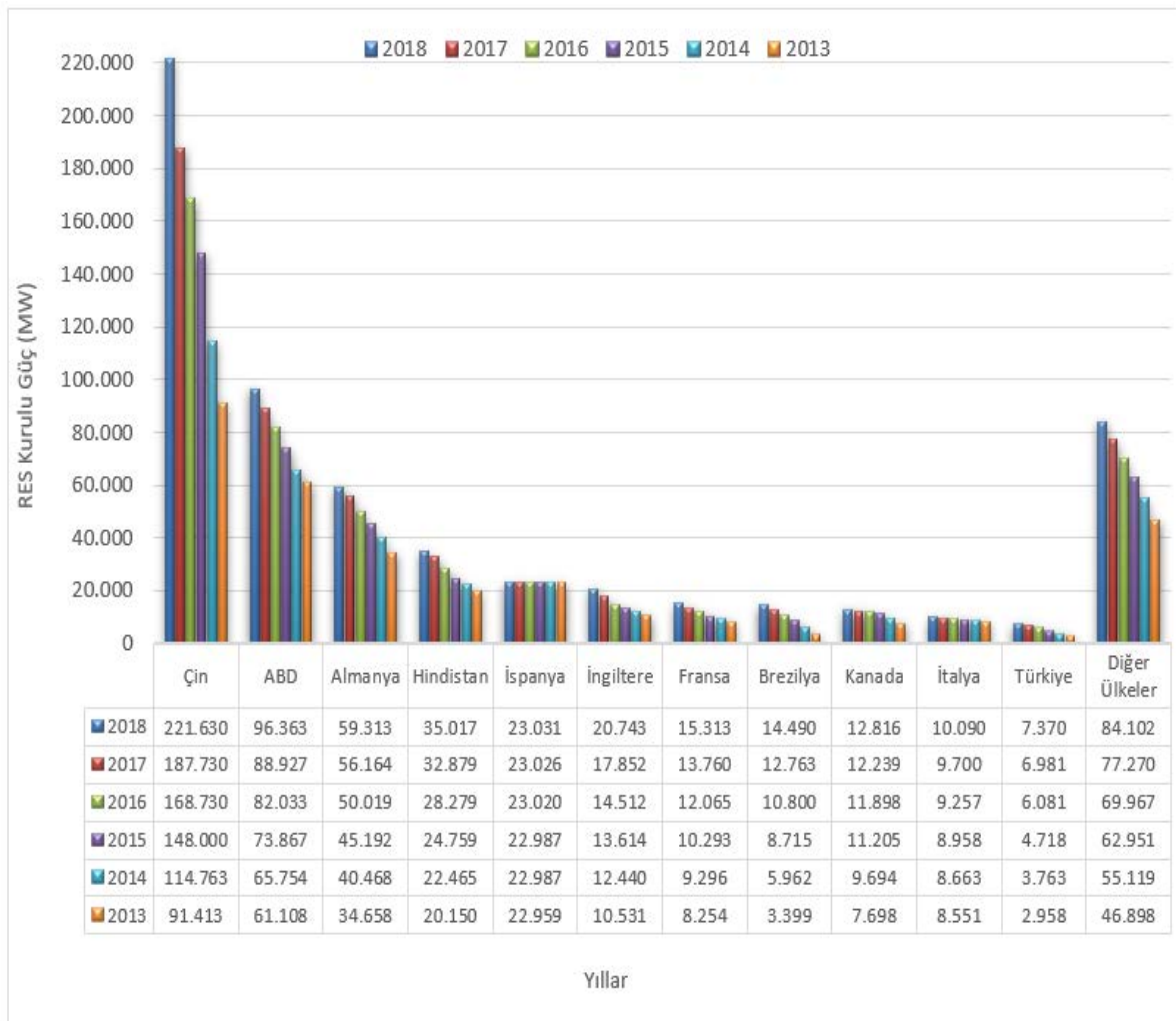


Şekil 1.4. Dünyada ve Türkiye'de kurulu RES'lerin toplam kapasitesinin 2013-2018 yılları arasındaki değişimi



Şekil 1.5. Dünyadaki RES'lerin yıllara göre artış miktarı ve artış oranı

Dünyadaki en büyük rüzgar enerjisi kurulu gücüne sahip olan ülke 2018 sonu itibari ile toplam 221 GW ile Çin olmuştur. Çin 2018 yılında yaptığı yatırımlarla 200 GW sınırını geçen ilk ve tek ülkedir. Çin'i toplam 96 GW'lık kurulu güç ile ABD, 59 GW ile Almanya, 35 GW ile Hindistan takip etmektedir. Türkiye ise 2018 yılı sonu itibari ile 7,4 GW kurulu güç kapasitesi ile dünyada 11. sıradadır. Dünyadaki RES'lerin ülke bazında dağılımı ve kapasitenin yıllara göre değişimi Şekil 1.6'da verilmiştir (WWEA, 2018; WWEA, 2019).

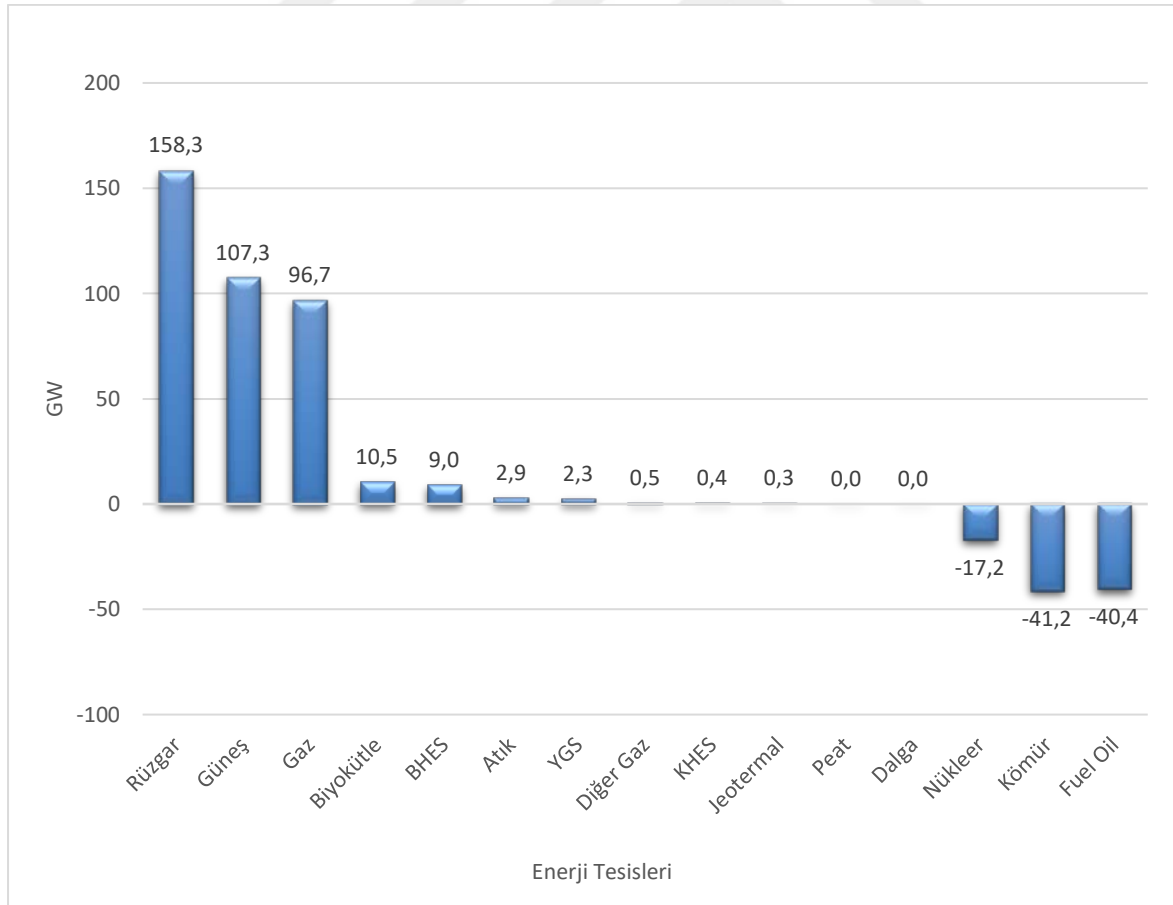


Şekil 1.6. Dünyadaki RES'lerin ülke bazında dağılımı ve kapasitesinin yıllara göre değişimi

### Avrupa rüzgar enerjisi ve güncel EWEA verileri

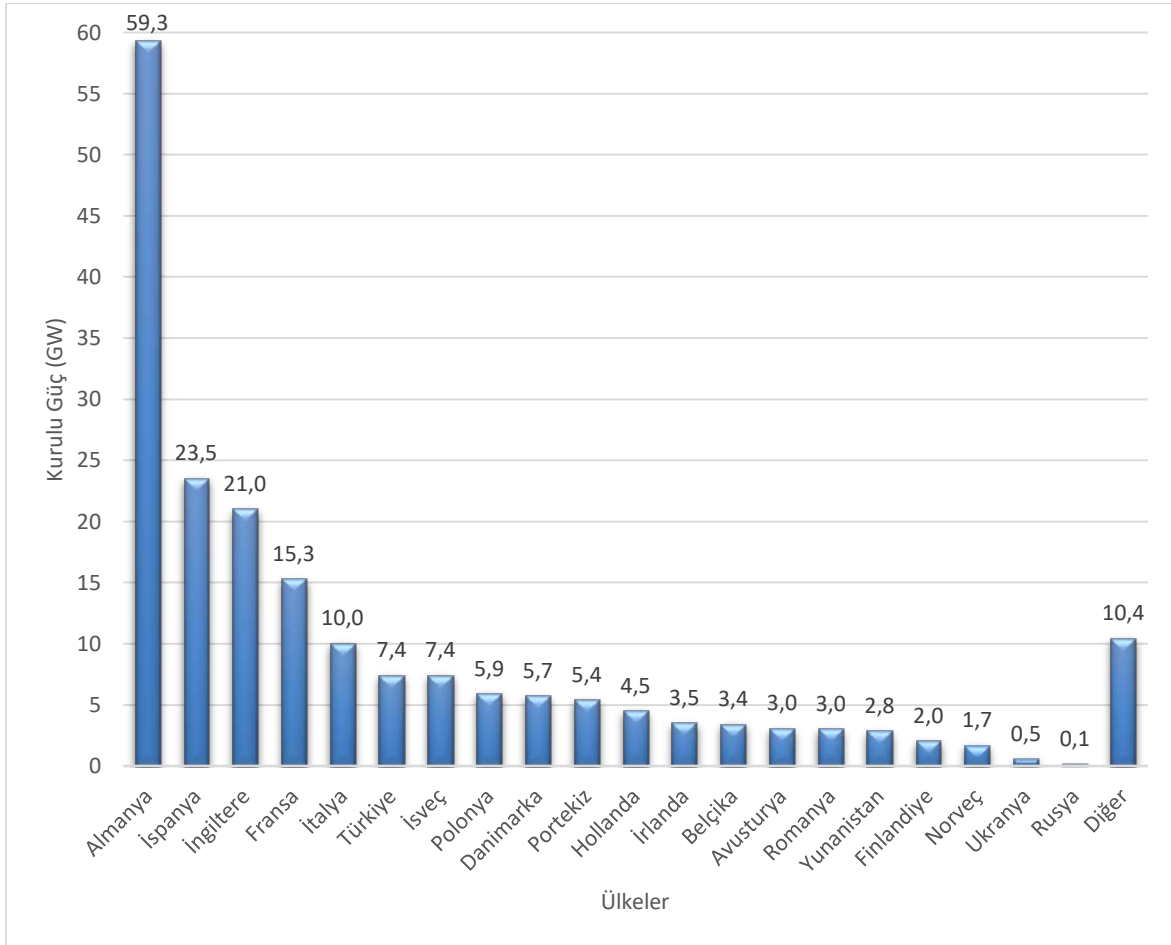
Avrupa rüzgar endüstrisinin uluslararası politikalarını, iletişimini, araştırmaları ve analizleri aktif olarak koordine etmek amacıyla 1982 yılında Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği kurulmuştur. Birlik 40 ülkede 450'den fazla üyeye sahip olup, geliştirici, araştırmacıları, yüklenicileri, finansçıları, sigorta şirketlerini ve danışmanları kapsayan geniş bir üye grubun

iletişimini ve etkileşimini sağlamaktadır. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği 2018 yılı sonu raporlarına göre, Avrupa’da 2018 yılında rüzgar enerjisinden 362 TWs elektrik üretilmiş olup ve bu üretim miktarı Avrupa’nın toplam ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin %14’ini karşılamaktadır (EWEA, 2019). EWEA’nın 2030 yılı senaryosuna göre Avrupa ülkeleri elektrik enerjisi ihtiyacının %30’una denk gelen 888 TWs elektrik enerjisini rüzgar enerjisi santrallerinden karşılamayı planlamaktadır (EWEA, 2017b). Avrupa’daki 2018 yılı yeni enerji santrallerinin yatırımlarının %44’ünü rüzgar enerjisi santralleri oluşturmaktadır. Son 17 yılda Avrupa’da yapılan enerji yatırımları incelendiğinde, nükleer enerjiden ve fosil yakıt yatırımlarının çoğundan hızla uzaklaştığı, hatta var olan tesislerini azalttığı görülmektedir. Bu zaman aralığında elektrik enerjisi üretmek için yaptığı enerji yatırımlarının rüzgar enerjisi santrallerine 158,3 GW, güneş enerjisi santrallerine 107,3 GW, gaz çevrim santrallerine 96,7 GW yatırım yapmıştır. Ayrıca 17,2 GW nükleer santralinden, 41,2 GW kömür santrali ve 40,4 GW fuel-oil santralini kapatmıştır. Avrupa ülkelerinin 2000-2017 yılları arasındaki elektrik santrali yatırımları Şekil 1.7’ de verilmiştir (EWEA, 2017c)



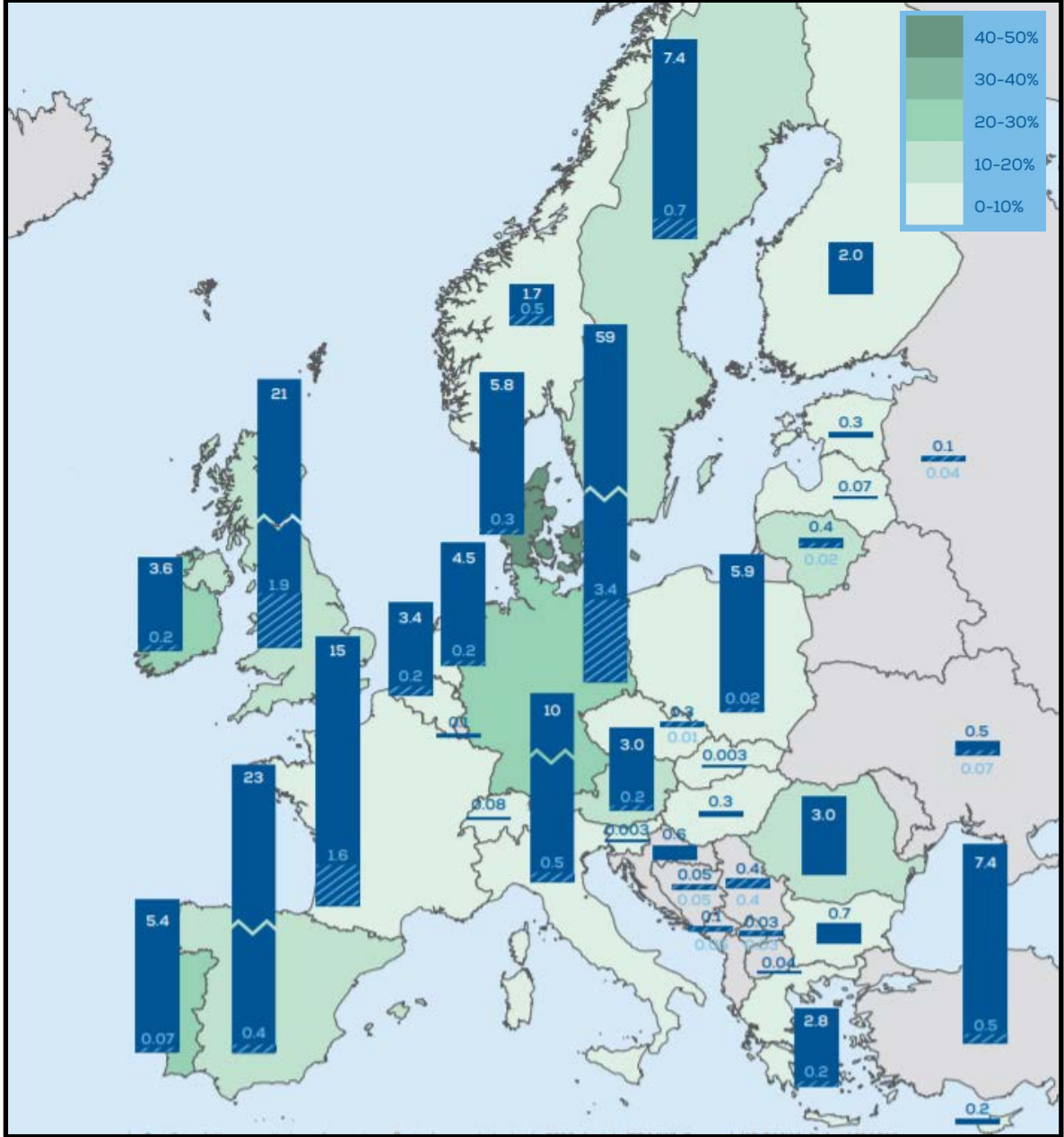
Şekil 1.7. Avrupa ülkelerinin 2000-2017 yılları arasındaki elektrik santrali yatırımları (EWEA, 2017c)

Avrupa ülkelerinde 2018 yılı itibari ile RES'ne yapılan yatırım 11.7 GW artarak 2018 yılı sonu itibari ile 189 GW'a ulaşmıştır. Avrupa Birliği ülkeleri arasında kurulu rüzgar enerjisi santrali kapasitesi bakımından ilk sırada 59,3 GW ile Almanya gelmektedir. Almanya'yı 23,5 GW kurulu güç ile İspanya, 21 GW ile İngiltere ve 15,3 GW ile Fransa takip etmektedir. Avrupa ülkelerinin 2018 yılı kümülatif Rüzgar enerjisi santrali kapasitesi Şekil 1.8' de verilmiştir (EWEA, 2019).



Şekil 1.8. Avrupa ülkelerinin 2018 yılı kümülatif rüzgar enerjisi santrali kapasitesi (EWEA, 2019)

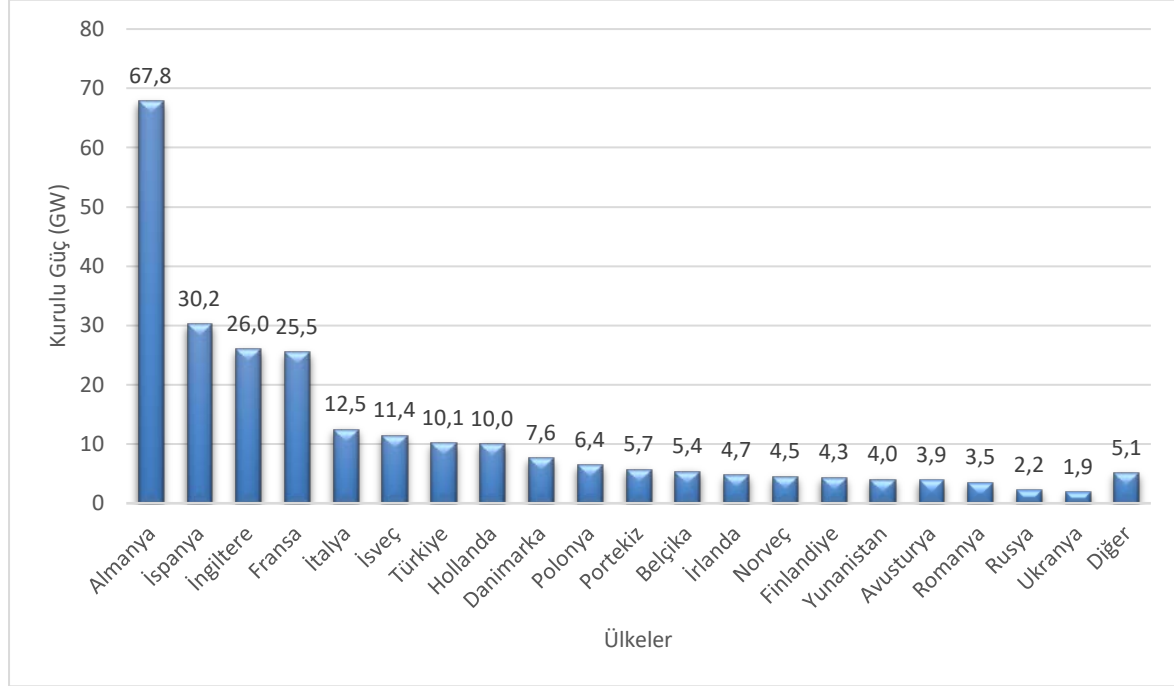
Birliğe üye olmayan Avrupa ülkeleri arasında en büyük kurulu güç 7,4 GW ile Türkiye'dedir. Türkiye kurulu rüzgar enerjisi santrali bakımından Almanya, İspanya, İngiltere, Fransa ve İtalya'nın ardından Avrupa'nın 6. büyük ülkesidir. Avrupa'da enerji ihtiyacının %41' ini RES'lerden karşılayan Danimarka, bu alandaki rekoru elinde tutmaktadır. Avrupa ülkelerinin 2018 yılı sonu itibari ile kurulu ve kurulmakta olan rüzgar enerjisi santralleri ve güç taleplerindeki rüzgar enerjisinin payı haritası Harita 1.1' de verilmiştir.



Harita 1.1. Avrupa ülkelerinin 2018 yılı sonu itibari ile kurulu ve kurulmakta olan rüzgar enerjisi santralleri ve güç taleplerindeki rüzgar enerjisinin payı haritası (EWEA, 2019).

Avrupa ülkeleri 2018 ile 2022 arasında kara üstü RES'ne ortalama 13,2 GW / yıl yatırım yapmayı planlamaktadır. 2022 sonunda 65,8 GW yatırım yapılarak, toplam RES kapasitesini 253 GW ulaşması öngörülmektedir. Almanya 13,6 GW brüt RES yatırımı ile kara üstü RES'de pazarın %21'ine sahip olarak lider konumda olacaktır. Almanya'nın ardından 2022 yılına kadar Fransa 9,7 GW, İspanya 7,2 GW ve İsveç 4,7 GW yatırım yapmayı planlamaktadır. AB üyesi olmayan ülkelere Norveç ve Türkiye 2022 yılına kadar 3,3 GW yeni yatırım yapmayı ve Rusya ise toplam 2 GW kurulu güç eşliğini aşmayı hedeflemektedir.

2022 yılında Pazar lideri Almanya 67,8 GW kapasiteye ulaşacak olup onu 30,2 GW ile İspanya, 26 GW İngiltere ve 25,5 GW ile Fransa takip edecektir. İtalya, İsveç, Türkiye ve Hollanda 10 GW kapasite eşiğini geçeceklerdir. Avrupa ülkelerinin 2022 kümülatif Rüzgar enerjisi santrali kapasitesi senaryosu Şekil 1.9' da verilmiştir [EWEA, 2017a).



Şekil 1.9. Avrupa ülkelerinin 2022 kümülatif rüzgar enerjisi santrali kapasitesi senaryosu (EWEA,2017a)

### Türkiye’de rüzgar enerjisi ve güncel TUREB Verileri

Türkiye rüzgar enerjisi birliği 10.10.1992 tarihinde kurulmuş olup kar amacı gütmeyen, rüzgar enerjisindeki teknolojileri, uygulamaları, yenilikleri takip etmek ve rüzgar enerjisi kullanımını yaygınlaştırmayı amaçlayan; rüzgar enerjisi konusunda Türkiye’deki en önemli sivil toplum kuruluşudur. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Türkiye Elektrik İletim AŞ, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Enerji Piyasası Denetleme Kurumu ve T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile koordine çalışmaktadır. Kurum altı ayda bir Türkiye rüzgar enerjisi istatistiği raporu yayınlamaktadır. Bu raporlar Türkiye’de mevcut ve kurulmakta olan santraller, rüzgar enerjisi kullanımını ve gelişimi hakkında bilgi vermektedir.

Türkiye yüksek nüfusu ve gelişmekte olan sanayisi ile yüksek enerji ihtiyacı olan bir ülkedir. Bu ihtiyaç her geçen yıl artmaktadır. Elektrik İletişim AŞ verilerine göre Türkiye elektrik

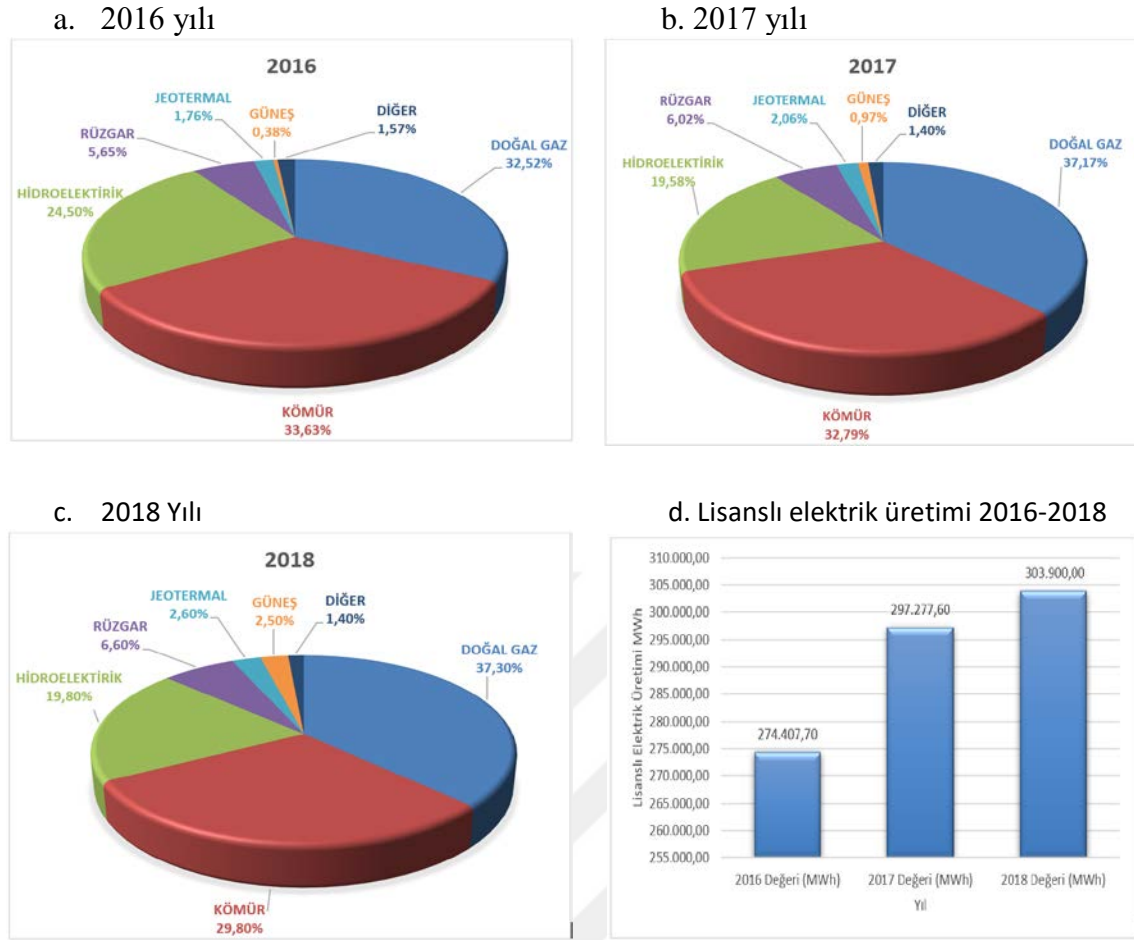
tüketimini karşılamak için 2016 yılında 274 407,7 GWs elektrik üretmiştir. Bu üretim 2017 yılında %8,66 artarak 297 277,60 GWs, 2018 yılında ise %2,23 artarak 303 900,00 GWh'a ulaşmıştır (ETKB, 2019a; EPDK, 2018). Çizelge 1.1' de Türkiye'nin 2016-2018 yılları arasında kaynaklara göre lisanslı elektrik üretim miktarı verilmiştir.

Çizelge 1.1. Türkiye'nin 2016-2018 yılları arasında kaynaklara göre lisanslı elektrik üretim miktarı (ETKB, 2019a; EPDK, 2017).

Kaynak Türü	2016 Değeri (GWh)	Pay (%)	2017 Değeri (GWh)	Pay (%)	2018 Değeri (GWh)	Pay (%)	2016-2017 Değişimi (%)	2017-2018 Değişimi (%)
DOĞALGAZ	89 227,10	32,52	110 490,0	37,17	113 354,70	37,3	%23,83	%2,59
KÖMÜR	92 273,10	33,63	97 476,3	32,79	90 562,20	29,8	%5,64	%-7,09
HİDROELEKTRİK	67 230,90	24,50	58 218,5	19,59	60 172,20	19,8	%-13,41	%3,36
RÜZGAR	15 517,10	5,65	17 903,8	6,02	20 057,40	6,6	%15,38	%12,03
JEOTERMAL	4 818,50	1,76	6 127,5	2,06	7 901,40	2,6	%27,17	%28,95
GÜNEŞ	1 043,10	0,38	2 889,3	0,97	7 597,50	2,5	%176,99	%162,95
DİĞER	4 297,90	1,56	4 172,2	1,40	4 254,60	1,4	%-2,92	%1,97
Genel Toplam	274 407,70	100	297 277,6	100	303 900,00	100	%8,33	%2,23

TEİAŞ'ın verilerine göre, Türkiye'de üretilen elektriğin büyük bir bölümü doğalgaz ve ithal kömür gibi yüksek ithalat oranı olan kaynaklardan üretilmektedir. 2018 yılında üretilen elektriğin %37,3'ü doğalgazdan, %29,8'i kömürden (linyit, taş kömürü ve ithal kömür) elde edilmiştir. Enerjideki yüksek dışa bağımlılık, Türkiye'deki enerji yatırımlarını yerli kaynaklar olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. 2016-2018 yılları arasındaki elektrik üretimi irdelendiğinde doğalgaz kullanımının artışının negatif yönde seyrettiği ve kömür kullanımının 2018 yılında bir önceki yıla göre %7,09 düşüş gösterdiği görülmektedir (ETKB, 2019a).

Türkiye yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek bir ülkedir. Bu kaynakların en önemlisi hidroelektrik santralleridir. Cumhuriyet tarihi boyunca yatırım yapılan hidroelektrik santralleri 2018 yılı sonu itibari ile toplam elektrik ihtiyacımızın yaklaşık %20'sini karşılamaktadır. Hidroelektrik santrallerini, son yıllarda önemli yatırımlar yapılan ve enerjideki dışa bağımlılığı azaltma, yerli üretim gibi politikalarının bir sonucu olan rüzgar, güneş ve jeotermal enerji santralleri takip etmektedir. 2018 yılında Türkiye'nin toplam elektrik üretiminin %6,6'sını rüzgar enerjisinden, %2,6'ını güneşten ve %2,5'ini Jeotermal enerjiden karşılamıştır (ETKB, 2019a). Şekil 1.10' da Türkiye'nin 2016-2018 Yılları Arasında Lisanslı Elektrik Üretim miktarlarının kaynaklara göre dağılım yüzdeleri ve yıllık toplam elektrik üretim miktarlarının grafikleri verilmiştir.



Şekil 1.10. Türkiye'nin 2016-2018 Yılları Arasında Lisanslı Elektrik Üretimine kaynaklara göre dağılım yüzdeleri ve yıllık toplam elektrik üretim miktarlarının grafikleri; a. 2016 yılı, b. 2017 yılı, c.2018 yılı, d. Lisanslı elektrik üretimi 2016-2018 (ETKB, 2019a; TEİAŞ, 2017).

2018 yılı sonu itibari ile yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi miktarının, toplam üretilen elektrik enerjisi miktarına oranı Çizelge 1.2' de verilmiştir.

Çizelge 1.2. 2018 Yılı elektrik enerjisi üretim miktarının kaynaklara göre dağılımı (ETKB, 2019a)

Kaynak Türü	2018 Üretim Miktarı (GWh)	Pay (%)
Yenilenebilir Enerji	95.728,50	%31,50
Fosil Yakıtlar	203.916,90	%67,10
Diğer	4.254,60	%1,40
Toplam	303.900,00	%100,00

2018 yılında Türkiye'de üretilen elektriğin %31,5'lik kısmı yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmiştir. 2018 yılı üretimi yaklaşık 95.728,50 GWh'tir.

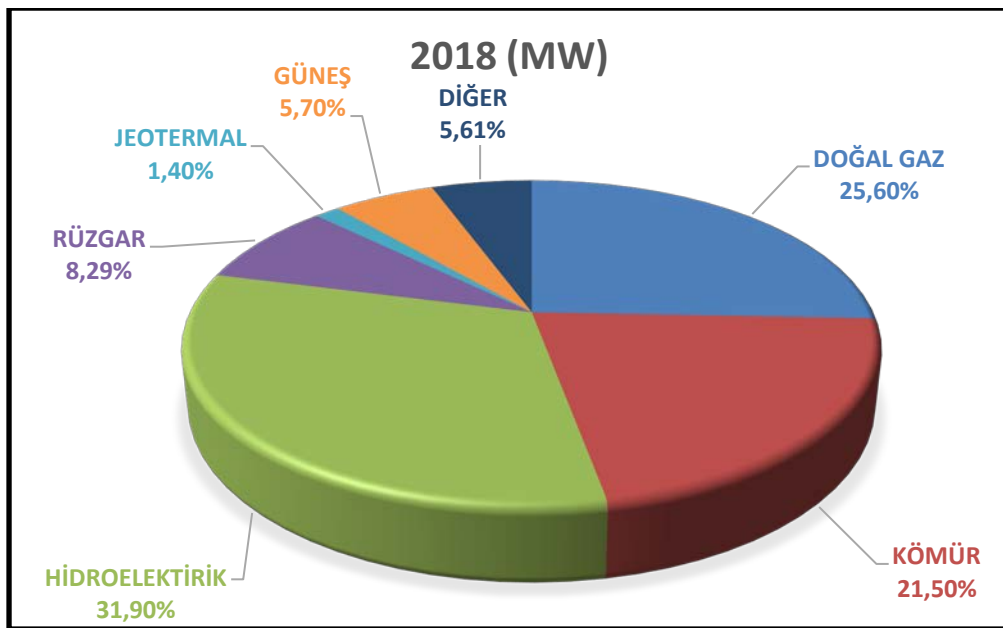


Türkiye’deki toplam kurulu güç göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güç santralleri içindeki oranı %47,32 olarak bulunmaktadır. Türkiye’deki 2018 yılı toplam lisanslı kurulu güç tesislerinin kaynaklara göre dağılımı Çizelge 1.3’ de verilmiştir.

Çizelge 1.3. Türkiye’deki 2018 yılı toplam lisanslı kurulu güç tesislerinin kaynaklara göre dağılımı (ETKB, 2019a; TUREB, 2019a)

Kaynak Türü	2018 Değeri (MW)	Pay (%)	Santral Adedi
DOĞAL GAZ	22.764,75	25,60	320
KÖMÜR	19.118,84	21,50	42
HİDROELEKTİRİK	28.367,02	31,90	653
RÜZGAR	7.369,35	8,29	249
JEOTERMAL	1.244,95	1,40	48
GÜNEŞ	5.068,71	5,70	5.868
DİĞER	4.991,20	5,61	243
Genel Toplam	88.924,82	100,00	7.423

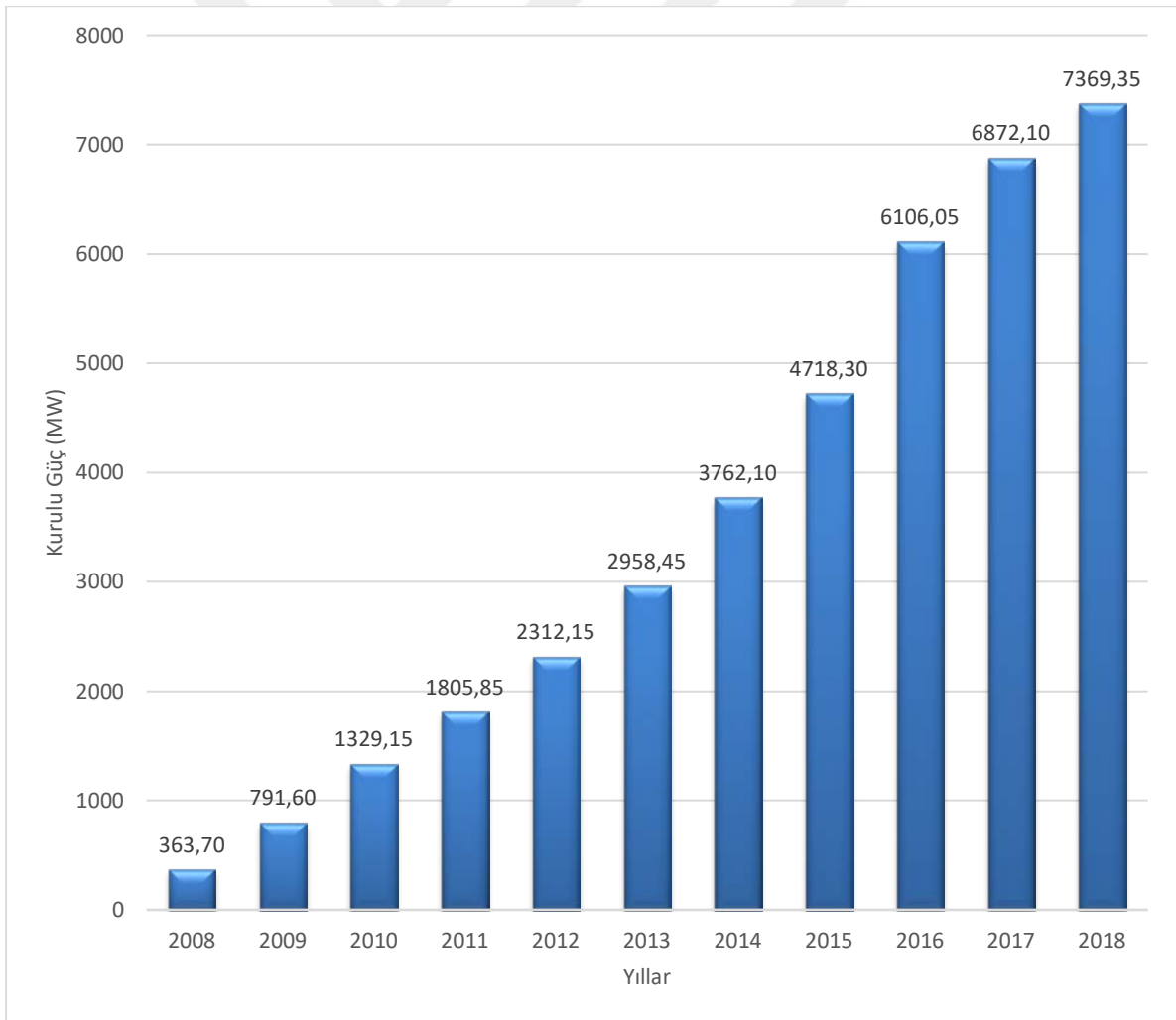
Türkiye’deki hidroelektrik santrallerinin toplam kapasitesi 2018 yılı sonu itibari ile 28.247,77 MW ulaşmıştır. Hidroelektrik santralleri tüm enerji santrallerinin %31,90’ını oluşturmaktadır. Hidroelektrik santrallerini %25,60 oranla doğalgaz çevrim santralleri, %21,50 oranıyla kömür santralleri ve 2018 senesinde 7.000 MW sınırını geçen rüzgar enerji santralleri takip etmektedir (ETKB, 2019a; TUREB, 2019a). Şekil 1.11’de Türkiye’deki enerji santrallerinin kaynaklara göre dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil 1.11. Türkiye’deki enerji santrallerinin kaynaklara göre dağılım grafiği (ETKB, 2019a)

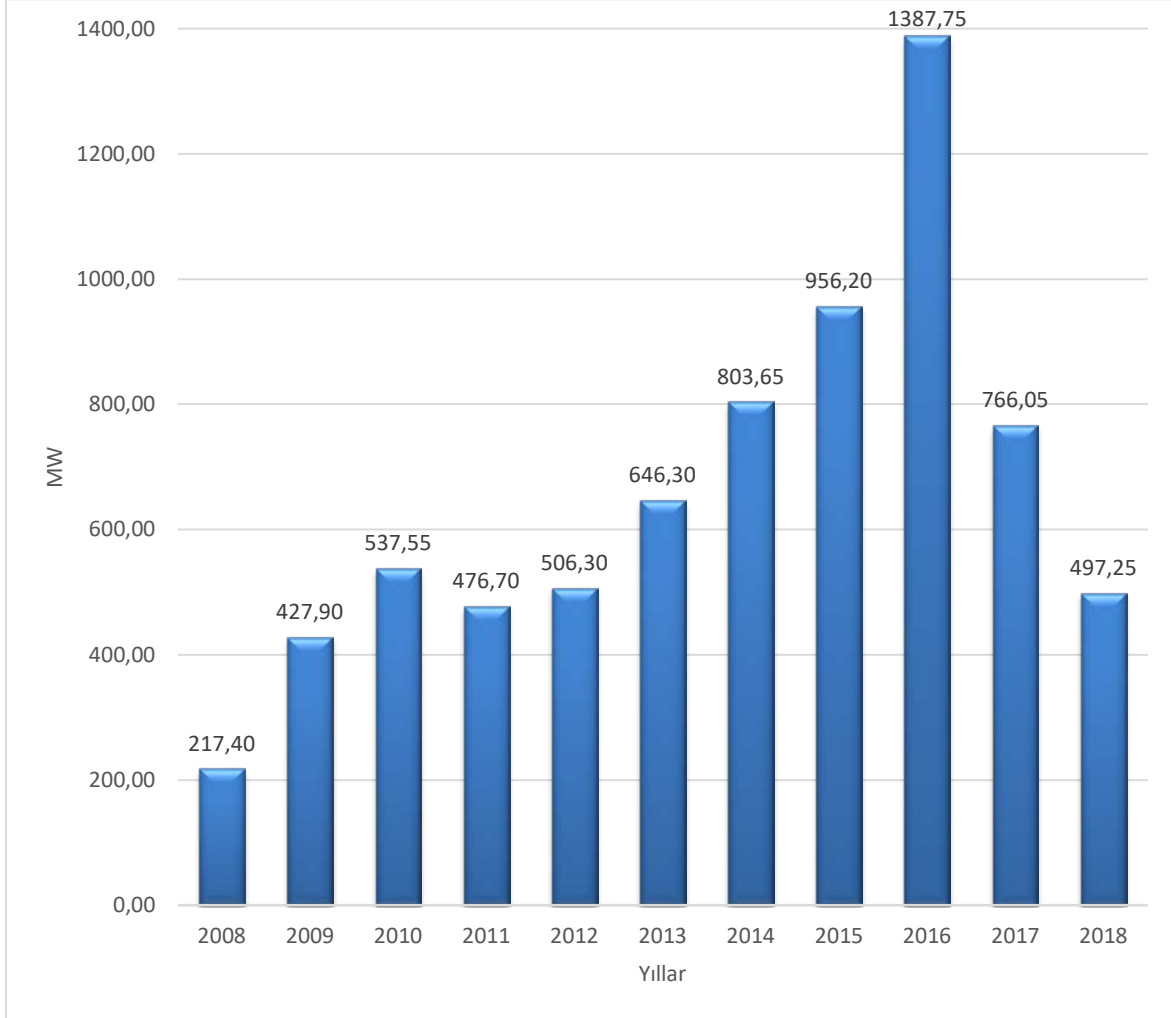
Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek bir ülkedir. Türkiye'nin rüzgar potansiyelini belirlemek amacıyla, Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) WAsP programı yardımıyla hazırlanmıştır. Yer seviyesinden 50 metre yüksekliğinde 7-7,5 m/s ve üzeri rüzgar hızına sahip bölgelere km<sup>2</sup> başına 5 MW RES kurulacağı ön görülmüş ve Türkiye'nin toplam rüzgar enerjisi kapasitesi kara üstü için 48 000 MW olarak bulunmuştur. Aynı varsayımla deniz üstü santrallerin kapasitesi 36 000 MW olarak bulunmuştur (ETKB, 2019b). Türkiye bu potansiyelinin 7365 MW'ını kullanmaktadır. Bu santrallerin tamamı kara üstü santrallerdir. Türkiye'de 2018 sonu itibari ile off-shore santral bulunmamaktadır.

Türkiye rüzgar enerji santralleri yatırımlarına 2008 yılından sonra hız vermiştir. Türkiye'deki Rüzgar enerji santrallerinin yıllara göre toplam kapasiteleri Şekil 1.12'de verilmiştir.



Şekil 1.12. Türkiye'deki rüzgar enerji santrallerinin yıllara göre toplam kapasiteler (TUREB,2019a)

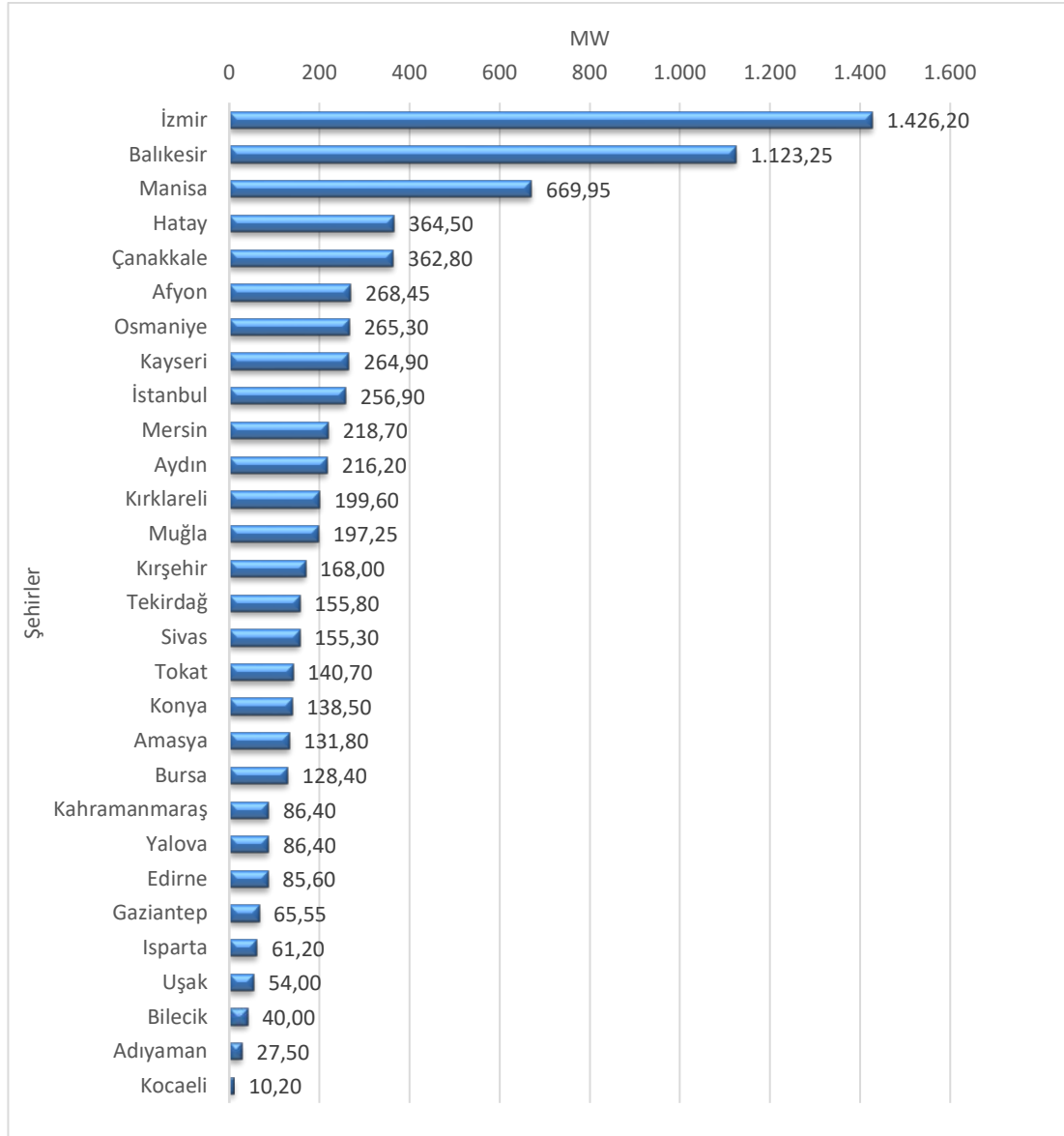
Türkiye’deki Rüzgar enerjisi santralleri yatırımlarının yıllara göre değişimi ise Şekil 1.13’de verilmiştir.



Şekil 1.13. Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri yatırımlarının yıllara göre değişimi (EPDK, 2018)

Türkiye’de rüzgar enerjisine en yüksek oranda yatırım 2016 senesinde 1387,75 MW olarak yapılmıştır. 2010 senesinden çıkarılan yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimine ilişkin kanun ile birlikte yatırımlar hızlanmış ve 2014-2016 yılları arasında en üst seviyeye gelmiştir. 2017-2018 yılları arasında yatırımlar önceki senelere nazaran düşmüştür.

Türkiye’nin birçok şehrinde yüksek rüzgar enerji potansiyeline sahip bölge mevcuttur ve bu bölgelere rüzgar enerjisi santrali yatırımı yapılmaktadır. Bu şehirlerin başında İzmir, Balıkesir, Manisa, Hatay, Çanakkale gibi rüzgar enerji potansiyeli yüksek şehirler gelmektedir. Şekil 1.14’de Türkiye’deki işletmedeki rüzgar enerji santrallerinin şehirlere göre dağılımı verilmiştir.



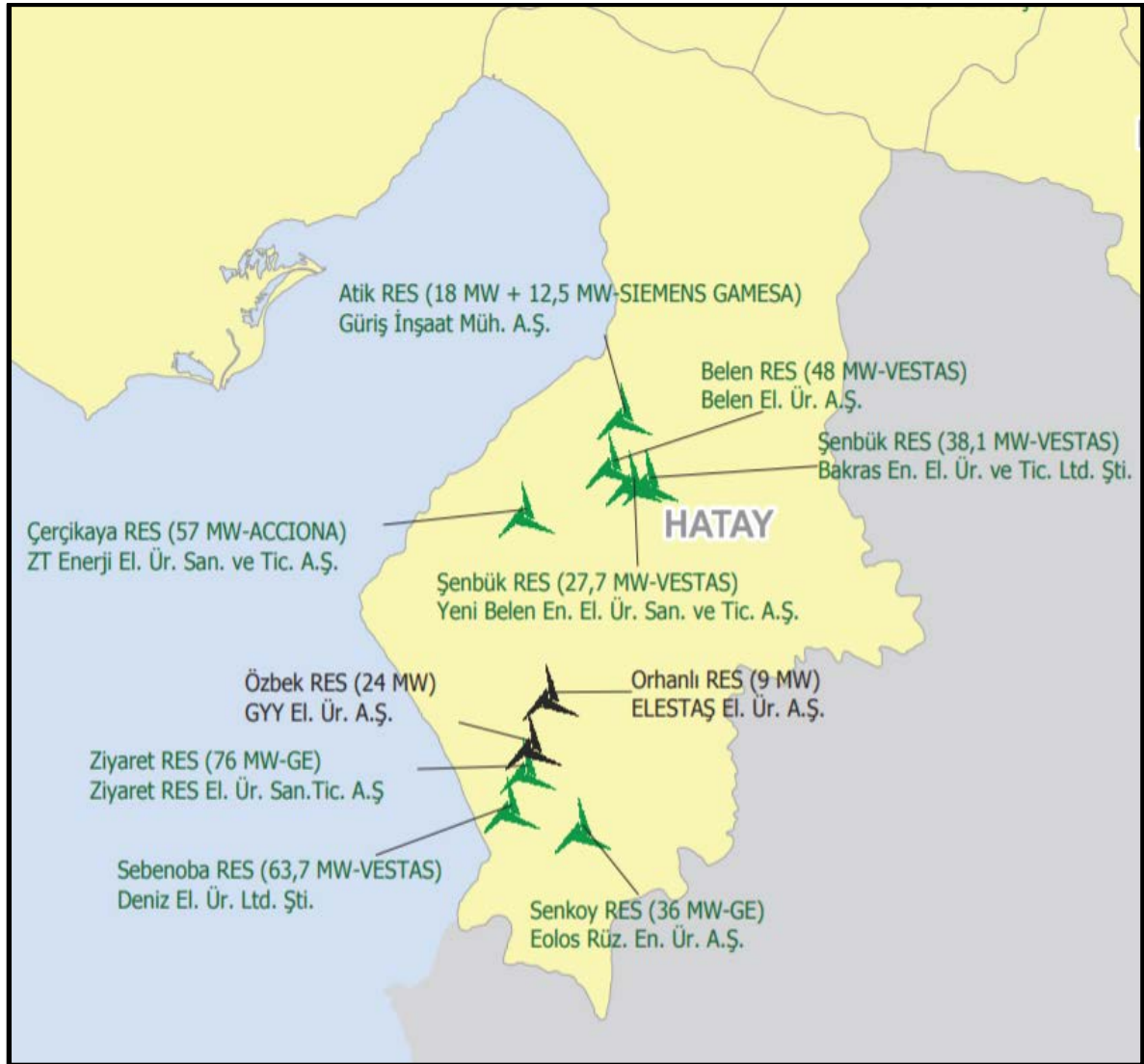
Şekil 1.14. Türkiye’deki işletmedeki Rüzgar Enerji Santrallerinin Şehirlere Göre Dağılımı (TUREB, 2019)

Türkiye’nin işletmedeki rüzgar enerji santralleri göz önünde bulundurulduğunda en büyük yatırım İzmir ve Balıkesir şehirlerine yapılmıştır. İzmir ilinde 1426,20 MW kurulu RES bulunmaktadır. İzmir’i 1123,5 MW kurulu güç ile Balıkesir, 669,95 MW kurulu güç ile Manisa ve 364,50 MW kurulu güç ile çalışma bölgesinin de içinde bulunduğu Hatay ili takip etmektedir (TUREB, 2019a).

#### Hatay bölgesinde rüzgar enerjisi

Hatay ili kurulu rüzgar enerji santrali bakımından Türkiye’nin dördüncü büyük ilidir. Bölgede 364,5 MW’lık rüzgar enerji santrali bulunmaktadır. İnşaat aşamasındaki RES’lerin

tamamlanmasıyla bölgenin kapasitesi 410 MW'a yükselecektir. Bölgedeki en büyük RES Ziyaret RES ve Sebenoba RES'tir. Ziyaret RES toplam kapasitesi 76 MW olan General Electric ait rüzgar türbinleri vardır. Sebenobada ise toplam kapasitesi 63,7 MW olan Vestas marka rüzgar türbinine sahiptir (TUREB, 2019a; TUREB, 2019b). Çalışmanın yapılacağı Belen bölgesinde Atik Res, Belen RES, Şenbük RES gibi birçok rüzgar enerji santrali mevcuttur. Harita 1.2'de Hatay ili rüzgar enerji santrallerinin yerleşim haritası verilmiştir.



Harita 1.2. Hatay ili rüzgar enerji santrallerinin yerleşim haritası (TUREB, 2019a; TUREB, 2019b)

Bölgede üç adet RES'in inşası devam etmektedir. İnşaat aşamasındaki RES'ler Atik Res 12,5 MW (ilave türbinler), Özbek RES 24 MW ve Orhanlı Res 9 MW olmak üzere toplam 45,5 MW'tır (TUREB, 2019b) Hatay bölgesindeki rüzgar enerji santralleri Çizelge 1.4'de verilmiştir.

Çizelge 1.4. Hatay bölgesindeki rüzgar enerji santralleri

RES	KAPASİTE (MW)	FİRMA
Atik RES	18 +12,5	Güriş İnşaat Müh. A.Ş.(12,5 MW İnşaat Aşa.)
Belen RES	48	Belen El. Ür. A.Ş.
Şenbük RES	38,1	Bakras En. El. Ür. Ve Tic. Ltd. Şti.
Çerçikaya RES	57	ZT Enerji El. Ür. San. Ve Tic. A.Ş.
Şenbük RES	27,7	Yeni Belen En. El. Ür. San. Ve Tic. A.Ş.
Ziyaret RES	76	Ziyaret RES El. Ür. San. Tic. A.Ş.
Senoba RES	63,7	Deniz El. Ür. Ltd. Şti.
Şenköy RES	36	Eolos Rüz. En. Ür. A.Ş.
Özbek RES	24	GYE El. Ür. A.Ş. (İnşaat Aşamasında)
Orhanlı RES	9	Elestaş El. Ür. A.Ş. (İnşaat Aşamasında)
Toplam Kapasite	410	

### Önceki çalışmalar

#### Türkiye'deki çalışmalar

Dünyada ve Türkiye'de rüzgar enerjisi potansiyelinin bulunması ve ekonomik analizi üzerine bir çok bilimsel makale yayınlanmıştır. Türkiye'de rüzgar enerjisi potansiyeli üzerine yapılmış bazı akademik çalışmalar şu şekildedir;

Dündar, Canbaz, Akgün, ve Ural (2002), Türkiye'de bulunan 96 adet meteoroloji istasyonunun 45 adetinin rüzgar verilerini kullanarak, WAsP(rüzgar atlası analizi ve uygulama) programını yardımıyla Türkiye'nin beş farklı topografik alan için 50 m'deki rüzgar enerjisi potansiyelini çıkarmışlardır.

Bilgili, Şahin ve Kahraman (2004), Antakya ve İskenderun ilçelerinin rüzgar enerji potansiyelini araştırmıştır. 50 m yükseklik için İskenderun'da 5-7 m/s, Antakya'da ise 7,5 m/s ortalama rüzgar hızlarına ulaşıldığını tespit etmişlerdir. Bölgede 300-700 W/m<sup>2</sup> güç yoğunluğuna sahip alanların olduğunu bildirmişlerdir.

Şahin, Bilgili ve Akıllı (2005), Doğu Akdeniz bölgesinin rüzgar enerji potansiyelini araştırmışlardır. 25 m yükseklikte Samandağ, İskenderun ve Antakya bölgelerinde 500 W/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu sahip olan bölgelerin olduğunu öngörmüşlerdir.

Çelik (2007), Türkiye'nin güney sahilinde bulunan İskenderun ilçesinin rüzgar enerji potansiyelini, iki farklı rüzgar türbini yüksekliği ve beş yıllık saatlik rüzgar verilerini

kullanılarak istatistiksel olarak analiz etmiştir. Çalışmada Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonlarını kullanmıştır. Ortalama rüzgar hızları Haziran ayı için 3,38 m/s ve Temmuz ayı için 3,35 m/s olduğunu ayrıca Weibull dağılım fonksiyonunun Rayleigh dağılım fonksiyonuna göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Şahin ve Bilgili (2009), Hatay ili Belen ilçesinin rüzgar karakteristiğini WAsP programı yardımıyla analiz etmişlerdir. Çalışmanın amacı bölgede gelecekte yapılabilecek rüzgar enerjisi santralleri yatırımlarına, maliyet ve ekonomik konular hakkında gerekli bilgileri sağlamaktır. Çalışmada 2004-2005 yılları arasında saatlik rüzgar verileri kullanılmıştır. Bölgede zemin seviyesinden 10 m yükseklikte 7,0 m/s rüzgar hızına ve 378 W/m<sup>2</sup> güç potansiyeline sahip alanların olduğu tespit etmişlerdir.

Uçar ve Balo (2010), Türkiye'nin kıyı bölgelerinin rüzgar enerjisi potansiyelini hesaplamış ve fizibilite çalışmaları yapmışlardır. Kıyı bölgelerinin ortalama rüzgar hızları, hakim rüzgar yönü, rüzgar potansiyelleri ve frekans dağılımlarını bulmuşlardır. Balıkesir ve Çanakkale'nin yıllık ortalama rüzgar hızlarını yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bu bölgenin Weibull şekil parametresi k'nın ortalama değeri 1,54 ile 1,86 arasında, c ölçek parametresini ise 2,52 m/s ile 8,34 m/s arasında bulmuşlardır. 600kW, 1500 kW, 2000 kW ve 2500 kW kapasiteye sahip dört rüzgar türbini için teknik analiz yapmışlar ve yıllık enerji üretim miktarı ile kapasite faktörünü tespit etmişlerdir.

Bilgili, Şahin ve Şimşek (2010), Türkiye'nin güney, batı ve güneybatı bölgelerinde bulunan Datça, Akhisar, Belen, Bababurnu, Gelibolu, Gökçeada ve Datça bölgelerini Weibull, Rayleigh dağılım fonksiyonları ve WAsP paket programını kullanarak analiz etmişlerdir. Farklı yöntemler kullanılarak bulunan bu teorik sonuçlar ile gerçek ölçülen değerler karşılaştırılmıştır. Weibull dağılım fonksiyonu ile WAsP paket programından elde edilen sonuçlar, Rayleigh dağılım fonksiyonu sonuçlarından daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

Onat ve Ersöz (2010), Türkiye'deki rüzgar enerjisi santralleri lisans başvurularını incelemiş ve 14 farklı bölgede rüzgar enerjisinden elektrik üretim maliyetlerini analiz etmişlerdir. Araştırılan bölgelerde kapasite faktörleri %19,7 ile %56,8 arasında değerlere ulaşmışlardır. Bu bölgelerdeki elektrik enerjisi üretim maliyetini ise 1,73 cent\$/kWs ile 4,99 cent\$/kWs arasında değişen değerler bulmuşlardır.

Kaygusuz (2010), Türkiye'deki kurulu elektrik santrallerini ve elektrik enerjisi üretimini araştırmıştır. Ayrıca Türkiye'nin mevcut rüzgar enerjisi durumu incelemiştir.

Bayraç (2011), Dünyada, Avrupa Birliği'nde ve Türkiye'deki rüzgar enerji potansiyelini, kullanımını ve uygulanan politikaları karşılaştırarak analiz etmiştir. Türkiye'deki rüzgar enerjisinin gelişimini Avrupa Birliğinde olduğu gibi yatırımcıların ve ar-ge faaliyetlerinde bulunan firmaların desteklenmesi gerektiğini belirtmiştir.

Benli (2013), Türkiye'deki politikalarında göz önünde bulundurarak yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelini ve mevcut ve gelecekteki enerji üretimine katkılarının büyüklüğünü araştırmaktadır.

Yanıktepe, Köroğlu ve Savrun (2013), Türkiye'de Akdeniz'in doğusunda bulunan Osmaniye ilinin rüzgar enerjisi potansiyelini incelenmiştir. Çalışmada Weibull ve Rayleigh dağılım yöntemleri kullanılmıştır. Devlet meteoroloji istasyonu tarafından sağlanan 2008 - 2011 yılları arasındaki 10 m yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı ve rüzgar yönü verileri kullanılmıştır. Ortalama rüzgar hızı 2,23 m/s ve rüzgar potansiyelini 24.587 W/m<sup>2</sup> olarak bulmuşlardır.

Mert, Karakuş ve Peker (2014) Antakya bölgesinin rüzgar karakteristiğini Weibull ve Log-normal dağılım fonksiyonlarını kullanarak bölgenin rüzgar potansiyelini araştırmışlardır. Bölgenin yapılacak rüzgar enerjisi yatırımları açısından uygun olduğu tespit edilmiştir.

İkılıç ve Aydın (2015), Türkiye'nin kıyı bölgelerindeki rüzgar enerji potansiyeli incelemiştir. Çalışmada kıyı bölgelerinde ölçülen saatlik rüzgar hızları verileri kullanılmıştır. Marmara Akdeniz ve Ege kıyı bölgeleri yüksek rüzgar enerji potansiyeline ve rüzgar yoğunluklarına sahip olduğu görülmüştür. İzmir, İstanbul, Hatay, Çanakkale Bandırma ve Datça bölgelerinin rüzgar yoğunluğu ile rüzgar enerjisi sistemleri için umut verici alanlar olduğu tespit edilmiştir.

Özay ve Çeliktas (2016) İzmir'in Çeşme ilçesinde bulunan Alaçatı yerleşkesinin rüzgar enerji potansiyelini belirlemek için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyon modelini kullanmışlardır. Alaçatı'da bulunan bir rüzgar ölçüm istasyonunda ölçümler, 10 dakikalık periyotlarla üç farklı yükseklikte (30 m, 50 m, 70 m) gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak



bölgenin rüzgar hızı frekansı, ortalama rüzgar hızı, rüzgar yönü ve ayrıca Weibull şekil ve ölçek parametreleri (k ve c) hesaplanmıştır. Verilerin tamamı göz önünde bulundurulduğunda, ortalama rüzgar hızı 8,11 m/s olduğu tespit edilmiştir. Weibull parametreleri k ve c parametreleri 2,05 ve 9,16 m/s olarak hesaplanmıştır. Hakim rüzgar hızınının 6 - 12 m/s ve hakim rüzgar yönününün 340° – 360° arasında olduğu ortaya konulmuştur.

Kaplan ve Temiz (2017), Ankara'da 2013 ve 2014 yılları arasında ölçülen ve 10 dakika ara ile kaydedilen rüzgar hızı ve rüzgar yönü verileri kullanılarak, rüzgar enerjisi potansiyelini yeni bir model olan Weibull ve Gaussian olasılık dağılım fonksiyonları (WG) ile araştırmışlardır. Rüzgar enerjisi ile elektrik üretimini, yeni WG modeli sonuçları ile Weibull modelinden ulaşılan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve yeni bir model olan WG modelinin kısa süreli tahminlerde daha başarılı olduğu değerlendirilmiştir.

Argın, Yerci, Erdoğan, Küçüksarı, ve Çalı (2019) Türkiye'deki 55 kıyı bölgesini WAsP (Rüzgar atlası analizi ve uygulama) programını kullanarak incelemiştir. Türkiye'de deniz üstü rüzgar enerjisi santrali kurmak için en uygun bölgelerin Bozcaada, Samandağ, Bandırma, Gökçeada ve İnegöl olarak belirlemiştir. Belirlenen sahalarda tahmini açık deniz rüzgar enerjisi kapasitesinin 1629 MW olarak tespit etmişlerdir.

### Dünyadaki çalışmalar

Dünyada rüzgar enerjisi potansiyeli üzerine yapılmış bazı akademik çalışmalar şu şekildedir;

Belabes, Youcefi, Guerri Diamai ve Kaabeche (2015), Cezayir'in kuzeyindeki altı bölgede rüzgar enerjisi kullanılarak elektrik üretimi için teknik ve ekonomik analiz yapmışlardır. Altı istasyonun (Setif, Tiaret, Skikda, Tlemcen, Oran ve Miliana) 10 m yükseklikte 10 yıl boyunca kaydedilen yıllık ortalama rüzgar hızı sırasıyla 4,20 m/s, 3,46 m/s, 3,18 m/s, 2,64 m/s, 5,07 m/s ve 2,91 m/s olarak elde edilmiştir. WAsP programı kullanılarak AN Bonus 300 kW/33, AN Bonus 1,0 MW/54 ve Vestas V80/2MW olmak üzere üç ticari rüzgar türbini kullanılarak teknik analiz yapılmıştır. Ekonomik değerlendirme ise bugünkü değer maliyet yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Analiz edilen sahalardaki üç türbinin kapasite faktörleri %5.40 ile %33,16 arasında değişmektedir. Sonuç olarak kW's başına ortalama asgari maliyet, Vestas V80 / 2 MW ile Tiaret'te 0,0342 \$/kW's olarak elde edilirken, Tlemcen'de AN Bonus 1,0 MW / 54 ile en büyük ortalama maliyet 0,2105 \$/kW s olarak

bulunmuştur. Her bölgedeki en yüksek maliyet, orta Rüzgar enerjisi türbini olan AN Bonus 1,0 MW / 54 ile elde edilmiştir.

Shu, Li ve Chan (2015), Hong Kong'da farklı arazi koşullarındaki beş meteoroloji istasyonunda kaydedilen 5 yıllık rüzgar verilerini kullanarak, Weibull dağılım modeli yardımı ile tipik bölgelerin rüzgar karakteristiği ve rüzgar enerji potansiyelini istatistiksel olarak incelemiştir. Tüm sahalar göz önünde bulundurulduğunda yıllık Weibull ölçek parametresini 2,85 m/s ile 10,19 m/s aralığında bulmuşlardır. Yıllık şekil parametresini ise 1,65 ile 1,99 olarak bulmuşlardır. En büyük Weibull skalası bir tepenin üst noktasında en düşük ise bir kentin yerleşim alanında tespit edilmiştir. Yüksek tepelerin ve açık denizlerin kentsel alanlara göre daha yüksek rüzgar enerjisi yoğunluğuna sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Allouhi, Zamzoum ve Islam (2017) Fas'ın altı sahil bölgesi olan Al Hoceima, Tetouane, Assila, Essouira, Laayoune ve Dakhla'daki rüzgar enerjisi potansiyelini değerlendirmişlerdir. Bölgelerin 2011-2015 yılları arasında beş yıllık sürede saatlik rüzgar hızlarına ve yönlerine dayanarak rüzgar verilerinin istatistiksel analizi yapılmıştır. Sonuç olarak rüzgar potansiyeli en yüksek bölge Dakhla'nın olduğu, Dakhla'nın ardından en yüksek potansiyele sahip ikinci bölge Laayoune olarak bulunmuştur.

Serri, Lembo, Airoidi, Gelli, ve Beccarello (2018), İtalya'da bulunan ve 2020 yılında ekonomik ömrünü tamamlayacak olan rüzgar enerji santrallerinin rüzgar kapasitesini, coğrafi dağılımını ve ayrıca santrallerin nasıl değerlendirilebileceğini araştırmıştır. Çalışma sonucunda rüzgar santrallerinin potansiyeli kullanmaya devam etmek amacıyla üç aşamalı bir metodoloji tasarlamış ve uygulamışlardır.

Fazelpour, Markarian ve Soltani (2017), İran'ın Balouchestan eyaletindeki Abol, Zahak, Zahedan ve Mirjaveh yatırım risklerini azaltmak amacıyla bölgenin rüzgar potansiyelini ve ekonomik fizibilitesini araştırmışlardır. Enerji yoğunluğunu tahmin etmek amacıyla Weibull olasılık fonksiyonunu kullanmışlardır. Hakim rüzgar yönünü bulmak amacıyla Windographer programı kullanılmıştır. Yıllık ortalama güç yoğunluğunu 284,97 W/m<sup>2</sup>, 269,02 W/m<sup>2</sup>, 144,49 W/m<sup>2</sup> ve 138,64 W/m<sup>2</sup> olarak bulmuşlardır. Sonuç olarak Zabol ve Zahedan'ın büyük ölçekli rüzgar enerjisi santrali yatırımları için uygun alanlar olarak belirlemişlerdir.

Pishgar-Komleh ve Akram (2017), İran'ın Zabol bölgesindeki rüzgar enerjisi potansiyeli araştırmak için 2002-2011 arasında 10 yıllık rüzgar verileri ile çalışmışlardır. Bölgenin ortalama rüzgar hızını 6,5 m/s olarak bulmuşlardır. Weibull ve Rayleigh denklemlerini kullandıkları çalışmada bölgenin ortalama güç yoğunluğunu  $424 \text{ W/m}^2$  olarak tespit edilmiştir.

Santos ve Gonzalez (2018), rüzgar santrallerinin işletme ve bakım performansını etkileyen faktörlerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışmalar sonucunda santrallerin performansını etkileyen temel faktörleri potansiyel çalışmalarının güvenilirliği, yapı kalitesi, kurumsal öğrenme ve koordinasyon olarak belirtilmiştir.

Ahmed (2018), Mısır'ın Shark El-Ouinat şehrindeki meteoroloji istasyonu verileri ile çalışmış 10 m'deki rüzgar hızını 6,5 m/s olarak belirtmiştir. Çalışmada Weibull ve Rayleigh dağılımlarını kullanmıştır. Bu alanda 150 MW'lık bir rüzgar enerjisi santrali kurmayı planlamış ve bu santralin maliyetini, yeni bir maliyet analizi metodoloji kullanarak 1,3 € / kWh olarak bulmuştur.

Nie ve Li (2018), Deniz üstü rüzgar santrallerinin önümüzdeki yıllarda hızla gelişimini ön görerek Çin kıyıları boyunca 250 m den daha sığ bölgeleri incelemiştir. Kıyılar, rüzgar enerjisi potansiyeli, su derinliği, rüzgar türbini büyüklüğü ve rüzgar çiftliği yerleşimi gibi bir çok açıdan irdelenmiştir. Çalışmada Tayvan Boğazında 70 m yüksekliğinde rüzgar enerjisi yoğunluğunu  $900 \text{ W/m}^2$  olarak bulunmuştur. Ayrıca belli bir bölge irdelenerek rotor çaplarının potansiyeli nasıl etkilediği araştırılmıştır. Teknik potansiyeli 60 m rotor çaplı türbin için 613 GW, 90 m için 1264 GW olarak bulunmuştur.

Wang, Sun ve Duan (2018), Pekin'in kentsel morfolojisi ile rüzgar enerjisi potansiyelindeki değişimleri anlamak amacıyla, yedi farklı kentsel dokuyu sayısal akış simülasyonlarıyla incelemiştir. Çalışma sonucunda, daha düşük taban alanına sahip yerleşim alanlarının daha yüksek rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olduğu kanaatine ulaşılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1 . Materyal

#### 2.1.1. Rüzgar hızı ve yönü

Rüzgar enerji santrallerin kurulacağı alanda üretilecek enerji miktarını belirleyen en önemli faktör rüzgar hızı verisidir. Özellikle yüksek eğimli ve pürüzlülük yüzeyi fazla olan alanlara yapılan yatırımlarda rüzgar hızları birbirine yakın bölgelerde bile farklılık göstermektedir. Türbinin doğru konumlandırılması yatırımın geri ödeme süresi açısından hayati önem taşımaktadır. Bu yüzden rüzgar enerji santralleri kurulacak bölge yakın meteoroloji istasyonu verileri ile analiz edilmeli aynı zamanda bölge rüzgar ölçüm direği yardımı ile en az bir yıl rüzgar verileri ölçülmeli, kayıt altına alınmalı ve analiz edilmelidir.

Çalışmada 2013-2016 yılları arasında, çalışmanın yapıldığı alana yakın bir konumda bulunan “Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü Belen Meteoroloji İstasyonu” tarafından kayıt altına alınan veriler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ölçümler saatlik rüzgar hızı ve yönü verileridir. Veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü meteorolojik veri bilgi satış ve sunum sisteminden (MEVBİS) temin edilmiştir. MEVBİS rüzgar hızı ve yönü verilerini her biri için Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi yıl-gün-ay-saat olarak ayrı ayrı kaydetmektedir.

Çizelge 2.1. Meteoroloji Genel Müdürlüğü Meteorolojik veri bilgi sistemi saatlik rüzgar hızı ve rüzgar yönü verileri (MEVBİS, 2017)

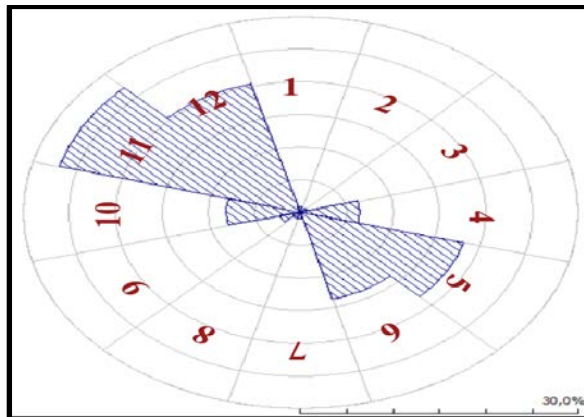
İstasyon No	İstasyon Adı	Yıl	Ay	Gün	Saat	Yön	Hız
18057	BELEN	2014	12	31	11	126	1,8
18057	BELEN	2014	12	31	12	131	1
18057	BELEN	2014	12	31	13	127	1,4
18057	BELEN	2014	12	31	14	119	1,6
18057	BELEN	2014	12	31	15	137	1,4
18057	BELEN	2014	12	31	16	139	1,9
18057	BELEN	2014	12	31	17	137	2,1
18057	BELEN	2014	12	31	18	145	2,2
18057	BELEN	2014	12	31	19	153	2
18057	BELEN	2014	12	31	20	158	2,9
18057	BELEN	2014	12	31	21	159	3,7
18057	BELEN	2014	12	31	22	158	4,1
18057	BELEN	2014	12	31	23	159	4
18057	BELEN	2015	1	1	0	154	3,7
18057	BELEN	2015	1	1	1	165	3
18057	BELEN	2015	1	1	2	142	2,3
18057	BELEN	2015	1	1	3	133	2,5
18057	BELEN	2015	1	1	4	140	3

Meteoroloji istasyonunda her yıl için saatlik 8760 adet veri kaydedilmesi gerekmektedir. Ancak bu verilerin yaklaşık %5-%10 arası istasyonda yaşanan teknik sebeplerden dolayı kaydedilememektedir. Kaydedilen hız değerleri WASP programının Climate Analyst modülüne yüklenerek rüzgarın esme yönüne göre 0° - 360° arasında 12 ayrı sektöre ayrılmaktadır. Her 30°'lik açı bir sektörü ve bu sektörlerde yönleri ifade etmektedir. Örneğin 0° Sektör-1 Kuzey yönünü, 30° Sektör-2 ve 60° Sektör-3 Kuzey Batı yönünü ifade etmektedir. Program, her bir sektörde oluşan ortalama rüzgar hızını, rüzgar esme sıklığını (frekans), Weibull - c ve Weibull - k parametrelerini hesaplar. 2016 yılında sektörlerde oluşan rüzgar hızları frekans değerleri ve Weibull parametreleri Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. 2016 yılı sektörlerde oluşan ortalama rüzgar hızları frekans değerleri ve Weibull parametreleri

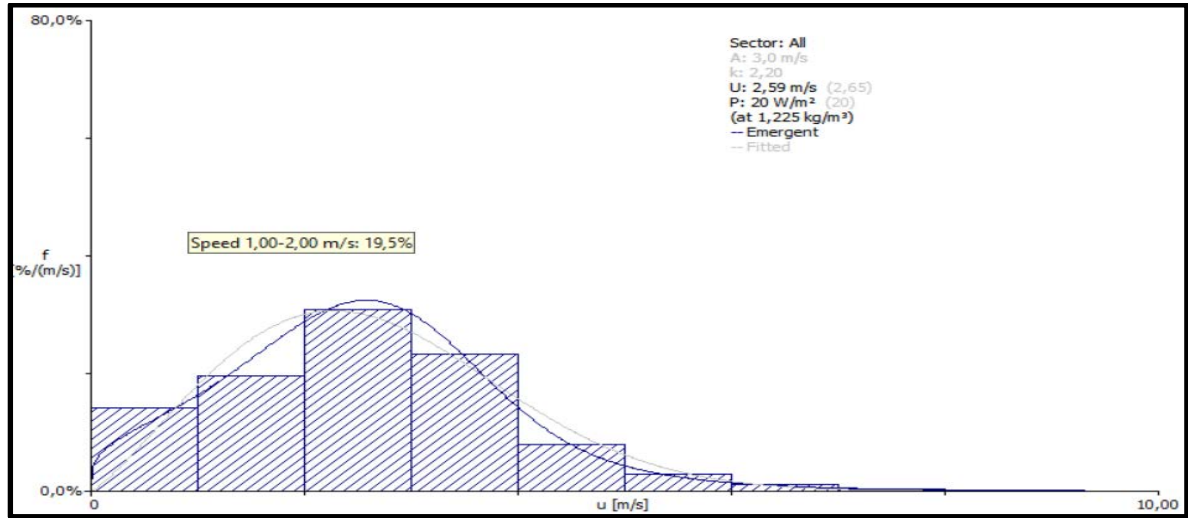
Sector	Wind climate					
	number	angle [°]	frequency [%]	Weibull-A [m/s]	Weibull-k	mean speed [m/s]
	1	0	0,8	2,2	1,87	1,97
	2	30	0,2	0,8	1,42	0,77
	3	60	0,8	1,5	0,87	1,60
	4	90	6,5	3,0	1,60	2,69
	5	120	18,2	2,3	1,25	2,12
	6	150	13,7	3,5	2,23	3,08
	7	180	1,0	1,0	1,51	0,86
	8	210	1,1	1,2	1,89	1,04
	9	240	2,2	1,7	2,39	1,55
	10	270	8,1	2,5	3,21	2,24
	11	300	27,0	3,0	3,70	2,70
	12	330	20,4	3,3	3,15	2,99
All (emergent)						2,59
Source data						2,58

WASP Climate Analyst programı Şekil 2.1'de görüldüğü gibi sektör bazında ortalama rüzgar hızlarının oluşma sıklığını (frekans) gösterir. Hâkim rüzgar yönü bu grafikler sayesinde tespit edilebilmektedir.



Şekil 2.1. Sektör bazında ortalama rüzgar hızlarının frekans grafiği

Program rüzgar hızı, yönü, oluşma sıklıklarını inceler ve rüzgar oluşma sıklığı-rüzgar hızı eğrisini bir grafik üzerinde gösterir. Tüm sektörler göz önüne alınarak rüzgar hızlarının frekansları Şekil 2.2’de verilmiştir.



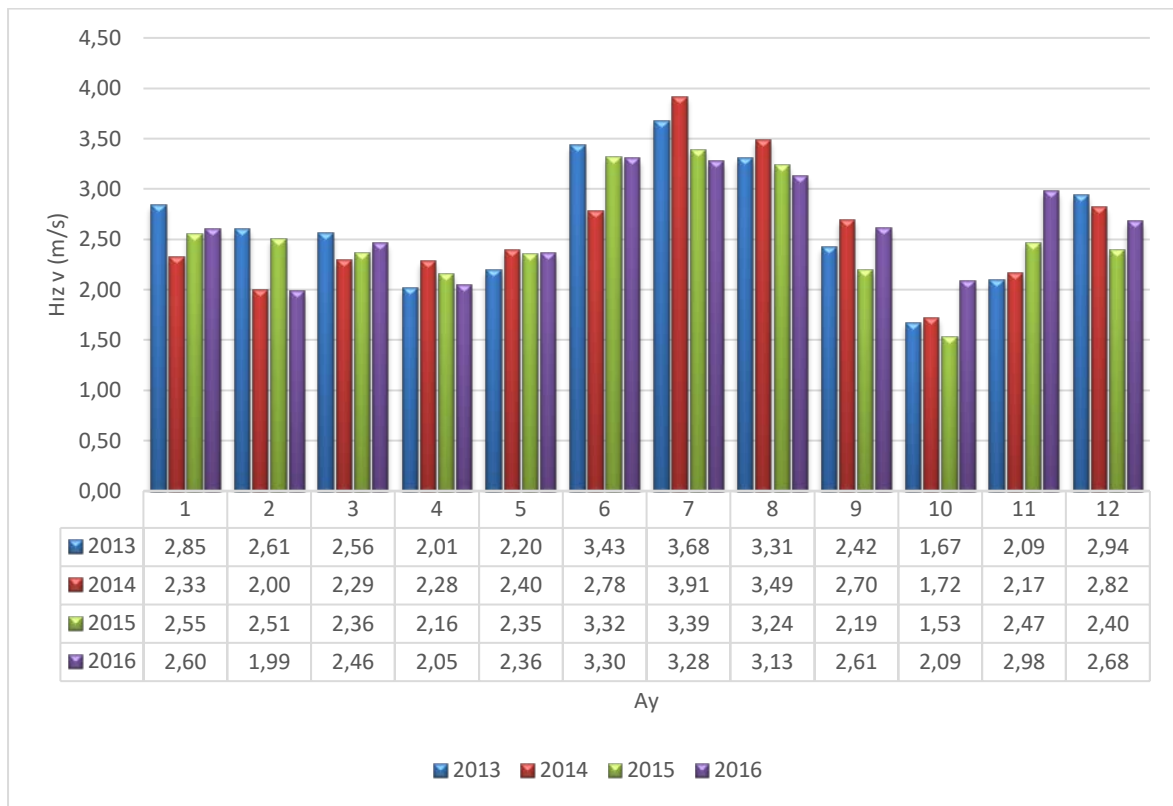
Şekil 2.2. Rüzgar hızlarının frekans değerleri (tüm sektörler)

Programın WCA modülü sayesinde saatlik, aylık, yıllık, saat-ay, saat-yıl gibi birçok ortalama rüzgar hızı istatistiklerine ulaşılabilmektedir. Çizelge 2.3’de saat bazında ortalama rüzgar hızları verilmiştir.

Çizelge 2.3. Belen ilçesi saat bazında ortalama rüzgar hızları

Mean wind speeds (hourly, by month)													
Hour	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
0	2.4	1.5	2.0	1.6	1.9	2.9	3.0	2.9	2.3	1.7	2.8	2.7	2.3
1	2.3	1.6	2.1	1.5	1.8	2.8	3.0	2.7	2.2	1.6	2.8	2.7	2.2
2	2.3	1.6	2.2	1.5	1.6	2.7	3.0	2.5	2.2	1.6	2.8	2.5	2.2
3	2.3	1.6	2.2	1.5	1.7	2.7	2.9	2.5	2.1	1.6	2.9	2.5	2.2
4	2.3	1.8	2.2	1.7	1.8	2.8	3.0	2.6	2.1	1.5	3.0	2.5	2.3
5	2.5	2.1	2.4	2.2	2.1	3.2	3.2	3.1	2.5	1.8	3.1	2.9	2.6
6	2.6	2.3	2.7	2.7	2.4	3.1	3.2	3.2	2.8	2.3	3.5	2.9	2.8
7	2.9	2.6	2.9	2.8	2.6	3.3	3.3	3.2	2.9	2.5	3.7	3.2	3.0
8	3.0	2.7	3.0	2.9	2.8	3.6	3.4	3.3	3.0	2.7	3.7	3.3	3.1
9	3.0	2.7	3.0	2.9	2.9	3.5	3.6	3.4	3.1	2.7	3.6	3.3	3.1
10	3.2	2.8	3.1	2.9	3.0	3.7	3.8	3.6	3.2	2.9	3.3	3.1	3.2
11	3.0	2.6	3.1	2.8	3.0	3.6	3.9	3.6	3.3	2.9	3.2	3.0	3.2
12	2.8	2.6	3.0	2.8	3.1	3.8	3.8	3.7	3.3	2.8	3.1	2.8	3.1
13	2.7	2.4	2.9	2.6	3.1	3.8	3.8	3.6	3.2	2.6	2.7	2.7	3.0
14	2.6	2.2	2.7	2.6	2.9	4.0	3.6	3.6	3.0	2.3	2.5	2.5	2.9
15	2.8	2.0	2.4	2.1	2.8	3.7	3.4	3.3	2.6	2.0	2.7	2.3	2.7
16	2.8	1.7	2.2	1.7	2.5	3.4	3.2	3.2	2.5	2.0	2.8	2.4	2.5
17	2.5	1.7	2.2	1.5	2.3	3.3	3.1	3.0	2.6	1.9	2.7	2.3	2.4
18	2.6	1.6	2.2	1.5	2.1	3.2	3.1	3.0	2.5	1.8	2.7	2.4	2.4
19	2.4	1.5	2.2	1.4	2.1	3.2	3.2	3.2	2.5	1.9	2.6	2.4	2.4
20	2.3	1.5	2.2	1.4	2.2	3.1	3.1	2.9	2.2	1.8	2.8	2.4	2.3
21	2.3	1.6	2.0	1.4	2.1	3.3	3.0	3.0	2.2	1.7	2.7	2.3	2.3
22	2.4	1.4	2.1	1.6	2.0	3.4	3.0	2.9	2.2	1.6	2.9	2.7	2.3
23	2.4	1.7	2.2	1.6	2.0	3.1	2.9	3.0	2.2	1.8	3.1	2.6	2.4
Average	2.6	2.0	2.5	2.1	2.4	3.3	3.3	3.1	2.6	2.1	3.0	2.7	2.6
Mean wind speeds (yearly, by month)													
Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
2016	2.6	2.0	2.5	2.0	2.4	3.3	3.3	3.1	2.6	2.1	3.0	2.7	2.6
Average	2.6	2.0	2.5	2.0	2.4	3.3	3.3	3.1	2.6	2.1	3.0	2.7	2.6

Çalışmada Belen bölgesinin 2013-2016 yılları arasında rüzgar hızı analizi her yıl için ayrı ayrı yapılmış ve her yılın aylara göre ayrı ayrı ortalama rüzgar hızları bulunmuştur. Belen bölgesi yıllara göre aylık 10 m’de ölçülen rüzgar hızı ortalamaları Şekil 2.3’de verilmiştir. En yüksek ortalama rüzgar hızları haziran, temmuz ve ağustos aylarında gerçekleşmektedir. En düşük rüzgar hızları ise ekim ayında gerçekleşmektedir. Dört yıllık ortalama rüzgar hızları incelendiğinde en yüksek rüzgar hızı 2014 yılı temmuz ayında 3,91 m/s olarak gerçekleşmiştir. En düşük rüzgar hızı ise 2015 yılı ekim ayında 1,53 m/s olarak gerçekleşmiştir.

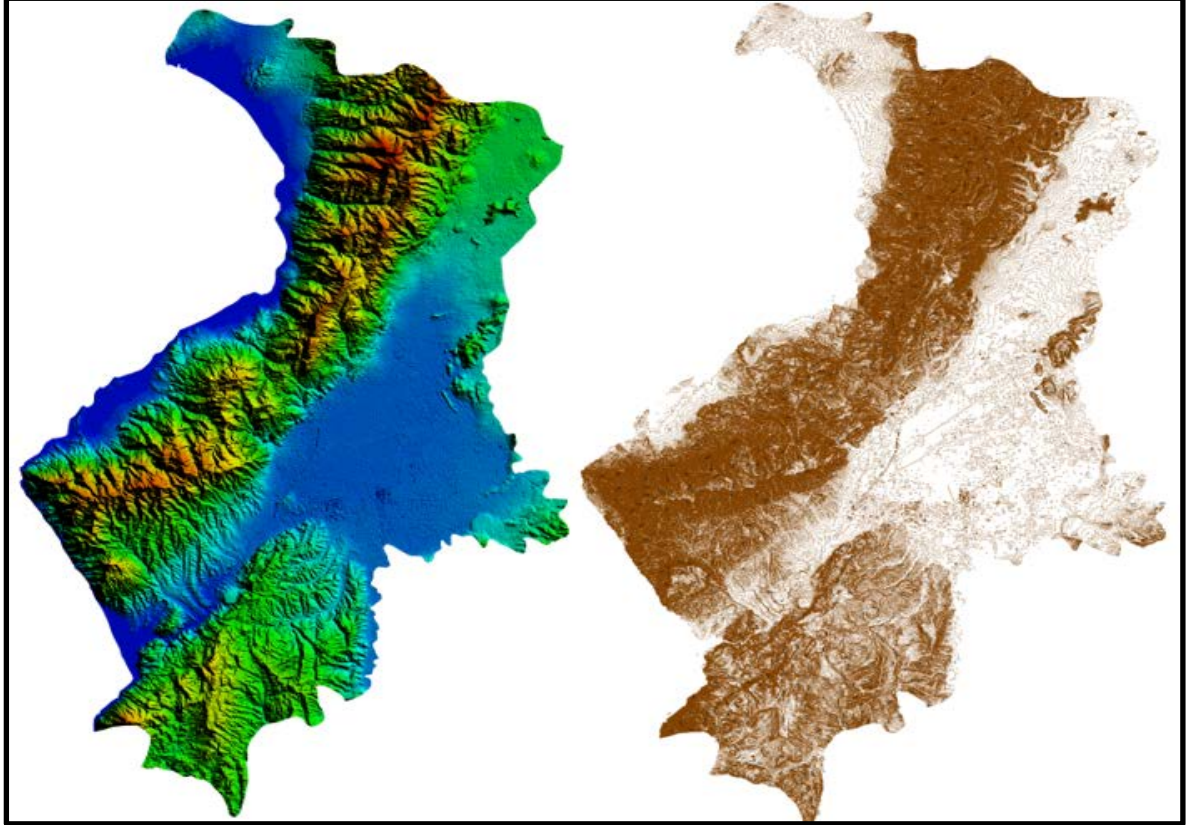


Şekil 2.3. Belen bölgesi yıllara göre aylık 10 m’de ölçülen rüzgar hızı ortalamaları

### 2.1.2. Bölge konum bilgileri

Rüzgar enerji potansiyelini etkileyen en önemli faktörlerden biri bölgenin topografik yapısıdır. Rüzgar hızı üzerinde yerden birkaç yüz metre yüksekliğe kadar yer şekillerinin etkisi devam etmektedir (Tanrıöven, 2008). WAsP programına, rüzgâr enerjisi potansiyelinin doğru şekilde belirleyebilmek amacıyla bölge topografik haritalarını, türbin veya ölçüm direkleri etrafındaki engelleri ve bölge pürüzlülük değerlerinin girilmesi gerekmektedir.

Çalışmada kullanılan Hatay haritası, NASA (National Aeronautics and Space Administration) tarafından oluşturulan SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) haritasıdır. Hatay bölgesinin haritası Global Mapper programı yardımıyla eş yükselti eğrileri oluşturulmuş ve WASP programının okuyacağı şekilde sayısallaştırılmıştır. Hatay ili haritası Harita 2.1’de verilmiştir.



Harita 2.1. Hatay ili haritası

Meteorolojik verilerin sağlandığı Belen Meteoroloji İstasyonu ölçüm direği rakımı 603 metre, ölçüm direği yer seviyesinden 10 m yükseklikindedir (MEVBİS, 2017) Belen Meteoroloji İstasyonu Konum Bilgileri Çizelge 2.4’de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Belen meteoroloji istasyonu konum bilgileri

İstasyon No	İstasyon	x (m)	y (m)	Rakım	Anemometre Yüksekliği
18057	Belen	4041954,0	250725,5	603	10 m

Belen bölgesinde yaklaşık 42 217 140,62 m<sup>2</sup> alan rüzgar potansiyeli açısından analiz edilmiştir. Analiz bölgesi (242912, 4038444) - (251856, 4043176) koordinat noktaları



arasında bulunmaktadır. Bölge yatayda 91 dikeyde 172 kısma ayrılarak 15 652 bölüm oluşturulmuştur. Bölgenin topografyası, engeller, bölgedeki rüzgar enerjisi santralleri gerçekle aynı olacak şekilde programa işlenmiştir. Bölgede halihazırda 2012 yılından beri üretime devam eden iki adet rüzgar türbinin gerçek verileri, çalışmaya referans olarak kullanılmıştır. Türbinlerin merkez yüksekliği yerden 80 m'dir. Referans rüzgar türbinlerinin konum ve rakım bilgileri Çizelge 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Referans türbin konum bilgileri

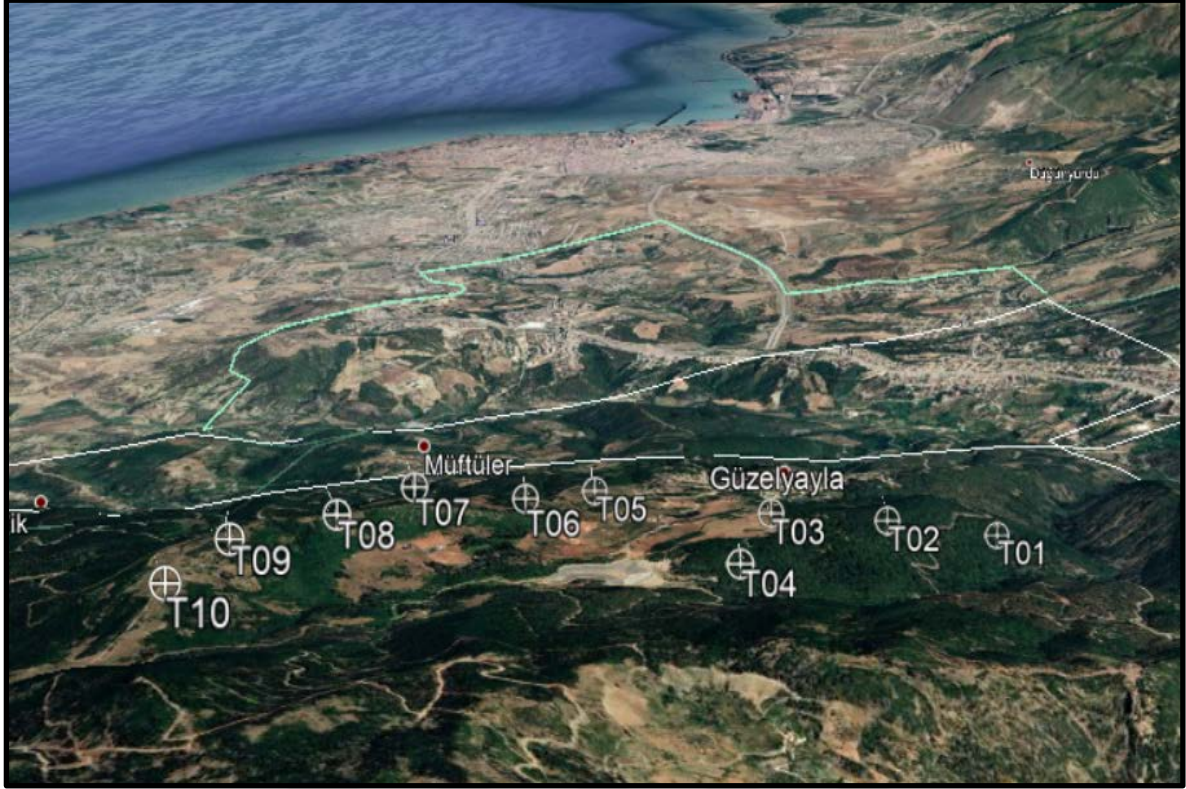
Türbin No	Türbin	x (m)	y (m)	Rakım (m)	Türbin Merkez Yüksekliği (m)	Kanat Çapı (m)
B06	Vestas V90	4040793,0	249708,0	724	80	90
B16	Vestas V90	4040816,0	250686,0	773	80	90

Ayrıca çalışmanın bir diğer ayağı olan Güzelyayla RES fizibilitesi için analiz alanında kalan bölgeye 10 adet 3 MW rüzgar türbini yerleştirilmiştir. Güzelyayla RES de bulunan 10 adet rüzgar türbinin konumu, rakım bilgileri, kanat çapı ve hub yüksekliği Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Güzelyayla RES türbin konum bilgileri.

Türbin No	Türbin	Boylam (m)	Enlem (m)	Rakım (m)	Türbin Merkez Yüksekliği (m)	Kanat Çapı (m)
T01	Vestas V90	4041334,0	246061,9	606	80	90
T02	Vestas V90	4041268,0	245638,7	768	80	90
T03	Vestas V90	4041268,0	245243,8	619	80	90
T04	Vestas V90	4040968,0	245055,8	613	80	90
T05	Vestas V90	4041729,0	244773,7	646	80	90
T06	Vestas V90	4041532,0	244519,8	716	80	90
T07	Vestas V90	4041566,0	244194,1	806	80	90
T08	Vestas V90	4041379,0	243951,6	961	80	90
T09	Vestas V90	4041203,0	243654,8	879	80	90
T10	Vestas V90	4040939,0	243485,5	620	80	90

Türbinler yerleştirildikten sonra WAsP programı ile Google Earth programının optimize çalışması sayesinde bölgeden uydu görüşleri alınabilmektedir. Google Earth programından alınan Güzelyayla RES bölgesinin haritası Harita 2.2'de verilmiştir.



Harita 2.2. Güzelyayla RES bölgesinin haritası (Google Earth, 2019)

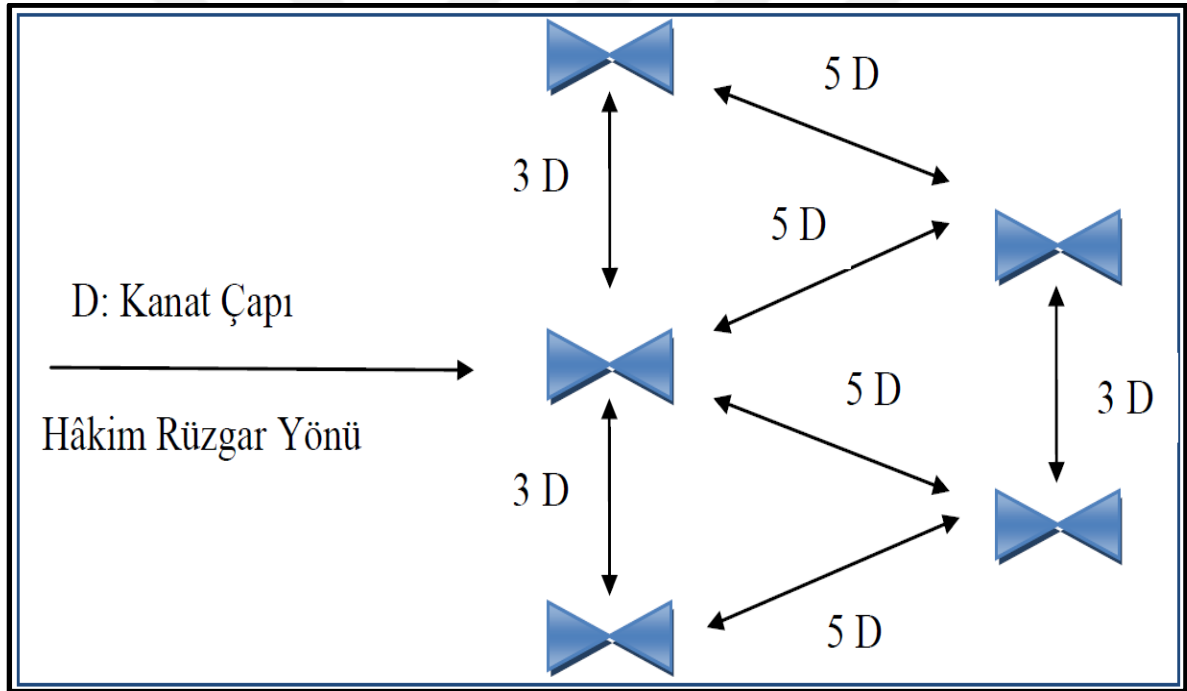
### 2.1.3. Mikro konuşlandırma (Mikro siting)

Rüzgar enerji santralleri kurulumunda rüzgar türbinin en yüksek kapasitede enerji üretmesi amacıyla bölge analizlerine en uygun türbin türünün seçilmesi ve seçilen türbinlerin en yüksek kapasitede enerji üretimini sağlayacak konumlara yerleştirilmesine konuşlandırma denir. RES'nin konuşlandırma hesapları yapılırken yer şekilleri, bitki örtüsü, santraldeki diğer rüzgar türbinleri ile türbülans, etkileşim, gürültü ve kuşların göç yolları gibi bir çok etken göz önünde bulundurulur (Tanrıöven, 2008). Mikro konuşlandırmada ilk olarak RES'nin kurulacağı alanın yerinde keşfinin yapılması, topografik ve uydu haritalarının ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir. Daha sonra bu veriler (vektörel harita, çevre engelleri, pürüzlülük sınıfları vs.) WAsP programına girilir. Programda oluşturulan dijital güç yoğunluğu haritaları sayesinde türbinler çok kısa bir zamanda enerji üretiminin en yüksek olduğu noktalara konulabilir veya taşınabilir. Mikro-konuşlandırmada dikkat edilmesi gerekenler şu şekilde sıralanabilir;

- Rüzgâr hız ve yönü verileri
- Yerleşim yerlerine uzaklık

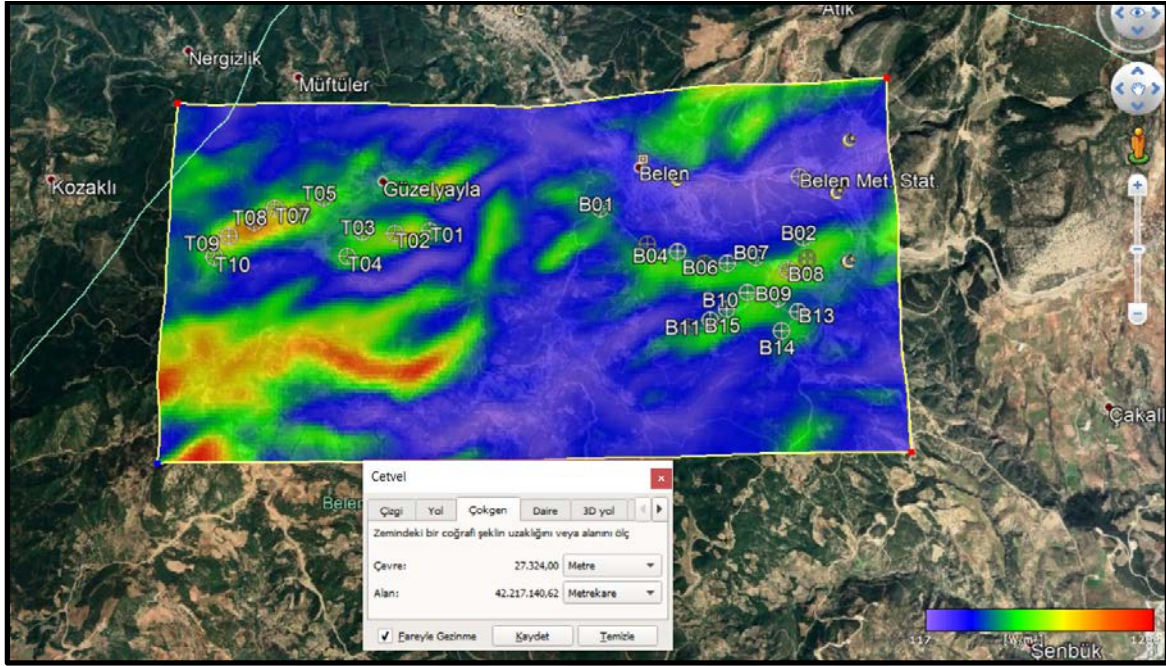
- Arazi mülkiyeti
- Karayollarına erişilebilirlik
- Rüzgâr türbinlerinin çevreye olan etkisi: şebekeye olan elektriksel etkiler ve işitilebilir gürültü (Engin, 2011).

Türbinler yerleştirirken rüzgâr türbinlerinin birbiri ile etkileşimini azaltmak ve perdeleme etkisini ortadan kaldırmak amacıyla türbinler arası mesafe kanat çapı ölçüleriyle orantılı olarak birbirleri arasındaki minimum mesafe belirlenir. Türbinler arası minimum mesafe kanat çapı ölçüsü cinsinden Şekil 2.4’de verilmiştir. Türbinlerin perdelenme faktöründen ötürü etkilenmemesi için iki türbin arasında yatay mesafe üç kanat çapı kadar, çapraz yerleşimde ise beş türbin kanat çapı ölçüsü kadar uzaklıkta olmalıdır.



Şekil 2.4. Türbinler arası olması gereken minimum mesafe (Acaroğlu, 2013)

Türbin yerleşimi, WAsP programının oluşturduğu dijital güç yoğunluğu haritası sayesinde hızlı bir şekilde yapılabilir. Yerleşim koordinat girilerek veya fare işaretçisi yardımıyla harita üzerinde türbin kaydırılarak beklenen enerji üretimi tespit edilebilir. Harita 2.3’de Belen bölgesindeki analiz bölgesinin uydu görüntüsü üzerinde dijital güç yoğunluğu haritası verilmiştir.



Harita 2.3. Belen bölgesindeki analiz bölgesinin uydu görüntüsü (Google Earth, 2019)

Harita üzerinde konum bilgileri gösterilen Güzelyayla RES alanındaki türbinlerin birbirleri arasındaki mesafe metre cinsinden Çizelge 2.7’de verilmiştir. Çizelge sayesinde her bir rüzgar türbinin diğer türbinlere olan uzaklığı görülmektedir. Program kırmızı ile gösterilen türbin arası mesafelerin, perdelenme etkisi oluşturacağını belirtmektedir.

Çizelge 2.7. Güzelyayla RES türbinler arası mesafe (m)

	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10
T01	0	428,32	820,77	1070,61	1347,40	1554,77	1882,17	2110,79	2410,67	2606,51
T02	428,32	0	394,91	655,58	980,18	1149,63	1475,03	1690,76	1984,97	2178,19
T03	820,77	394,91	0	354,04	658,41	770,63	1091,18	1296,96	1590,33	1788,81
T04	1070,61	655,58	354,04	0	811,60	778,07	1048,87	1178,21	1420,57	1570,56
T05	1347,40	980,18	658,41	811,60	0	321,37	602,09	893,51	1236,38	1511,15
T06	1554,77	1149,63	770,63	778,07	321,37	0	327,47	588,44	925,45	1192,23
T07	1882,17	1475,03	1091,18	1048,87	602,09	327,47	0	306,23	650,08	946,17
T08	2110,79	1690,76	1296,96	1178,21	893,51	588,44	306,23	0	345,06	640,97
T09	2410,67	1984,97	1590,33	1420,57	1236,38	925,45	650,08	345,06	0	313,62
T10	2606,51	2178,19	1788,81	1570,56	1511,15	1192,23	946,17	640,97	313,62	0

Ölü akış bölgesi kayıplarının oluşma ihtimali olan türbinler arası mesafe kırmızı ile gösterilmiştir. Türbinlerin kanat çapı 90 m’dir. Hakim rüzgar yönüne göre yatayda 270 m ve arka arkaya olan rüzgar türbinlerinde 450 m mesafe uzunluğu dikkate alınmıştır.

### Ölü akış bölgesi kayıpları (Wake loss)

Rüzgâr türbini, rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürken türbin çıkışındaki rüzgarın hızı türbin önündeki rüzgar hızına göre azalır. Dolayısıyla türbin arkasında kalan rüzgar enerjisi daha düşük ve rüzgar turbülanslı bir yapıya sahip olacaktır. Türbin arkasında bir wake etkisi (ölü akış bölgesi) meydana gelecektir ve bu nedenle arkasındaki türbinlerde wake kayıpları meydana gelecektir. Ölü akış bölgesi kayıplarını önlemek amacıyla türbin yerleşimi sırasında türbinler arası mesafe diğer iletim hatları maliyetleri ve topografik yapıda göz önünde bulundurularak türbin yerleşimi yapılmalıdır (Yılmaz, 2008). Türbin kanatlarına yerleştirilen bir duman ile Resim 2.1’de görüldüğü üzere wake izini görmek mümkündür (Yılmaz, 2008).



Resim 2.1. Türbin arkasında oluşan wake izi (Yılmaz, 2008)

#### **2.1.4. Bölge pürüzlülüğü (Roughness)**

Rüzgar hızı, yer yüzünün birkaç yüz metre yüksekliğine kadar yer yüzeyi üzerindeki yapıdan ve engellerden etkilenir. Rüzgar hızındaki ufak değişimler kurulacak santrallerin üreteceği enerjide önemli değişimlere yol açacaktır. Rüzgarın gücü, rüzgar hızının küpü ile orantılı olduğundan yer yüzünün üzerindeki pürüzlülük ile doğrudan etkilenmektedir (Tanrıöven, 2008). Bu pürüzlülük değeri pürüzlülük uzunluğu “z” ile ifade edilir ve potansiyel rüzgar türbini sahasındaki, rüzgar koşullarını değerlendirebilmek amacıyla kullanılan arazi yapısının özelliklerini ifade eder. Pürüzlülük uzunluğunun rüzgar hızı üzerindeki etkisi Eş. 2.1 ile ifade edilir.

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\ln\left[\frac{H}{z}\right]}{\ln\left[\frac{H_0}{z}\right]} \quad (2.1)$$

Burada z pürüzlülük uzunluğu, v hız ve h yüksekliği ifade etmektedir.

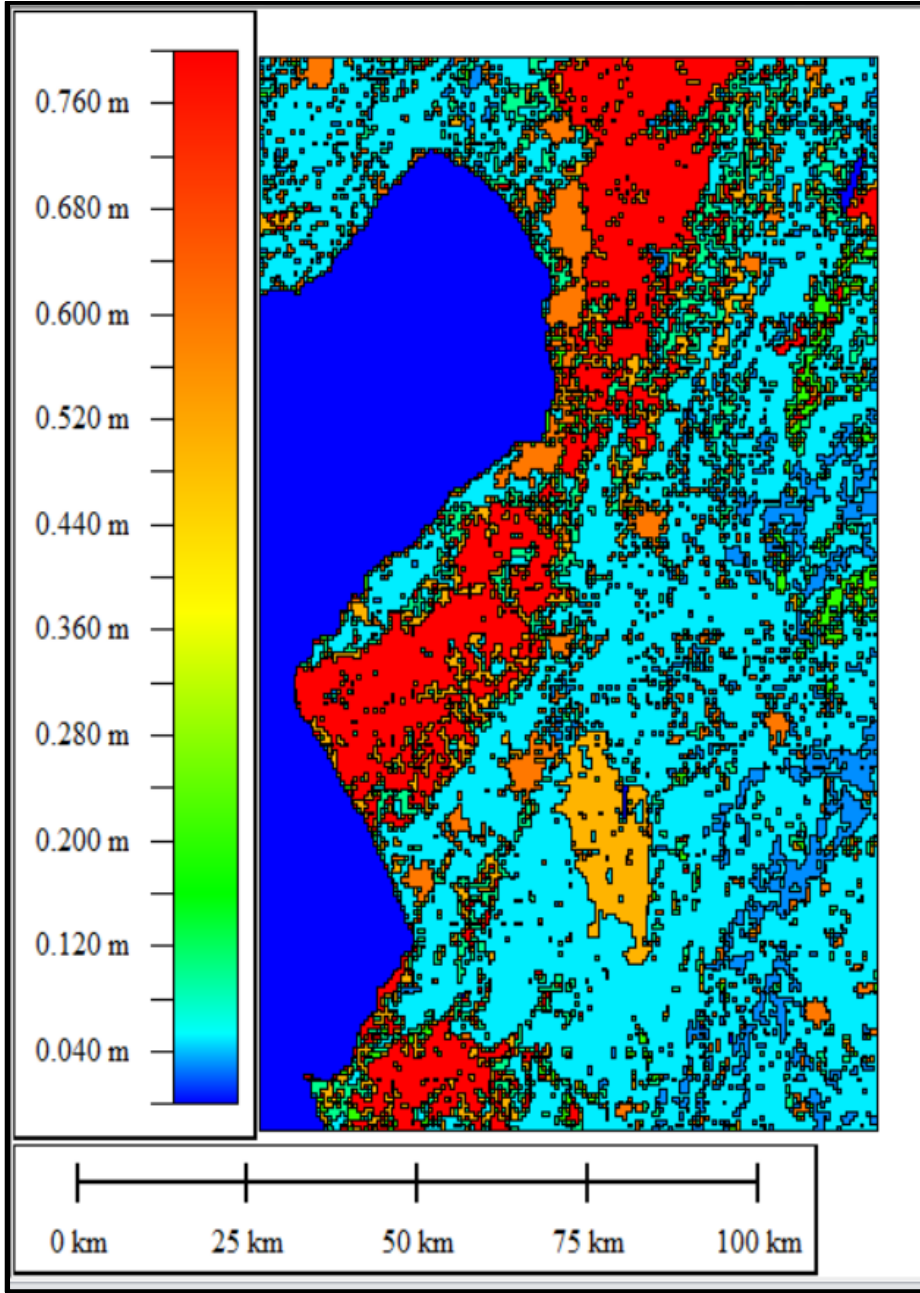
Her bölgenin sahip olduğu bir pürüzlülük değeri vardır. Pürüzlülük uzunluğu bölgenin arazi yapısı, bitki örtüsü, yapı yükseklikleri ve yerleşimleri hakkında bilgi vermektedir. Pürüzlülük değerleri metre ile ifade edilmektedir. Suyun pürüzlülük değeri 0.0002 m'dir (Tanrıöven, 2008). Pürüzlülük uzunluğunun küçük bir değer olması açık ve düz bir araziye (kar, kum, çıplak toprak, vs.) ifade etmektedir. Arazideki engeller (ağaç, bina, vs.) arttıkça pürüzlülük değerleri artmaktadır. Arazilerin pürüzlük uzunlukları genel hatlarıyla Çizelge 2.8'deki gibi ifade edilebilir.

Çizelge 2.8. Pürüzlülük sınıfları (Tanrıöven, 2008)

Pürüzlük Sınıfı	Tanımı	Pürüzlülük Uzunluğu (m)
0	Su yüzeyi	0,0002
1	Açık Geniş Araziler (Az sayıda engel var)	0,03
2	Çiftlikler [1'er km aralıklarla rüzgar engelleyiciler var)	0,1
3	Çok Fazla rüzgar engeli olan çiftlik veya kenar mahalle)	0,4
4	Yoğun yerleşim bölgeleri ve orman	1,6

Pürüzlülük değeri türbinde üretilecek enerjinin tahmini birinci derecede etkileyecek değişkendir. Yapılacak fizibilitelerde doğru sonuçlara ulaşılabilme adına, bölgenin arazi yapısı ayrıntılı şekilde irdelenip, bölgeye en uygun pürüzlük sınıfı seçilmelidir.

Yükselti haritaları oluşturulurken her yükselti bölgesine pürüzlülük değerleri de haritalar üzerine işlenmelidir. WASP programı pürüzlülük haritalarını ham halde okuyamamaktadır. Bu nedenle Global Mapper ve benzeri programlar yardımıyla haritalardaki alanlar ve pürüzlülük değerleri sayısallaştırılarak WASP programının okuyacağı şekilde yükselti haritası üzerine işlenmektedir (Mortensen, 2016). Bu pürüzlülük değerleri daha önce sayısallaştırılmış hazır haritalardan da alınabilmektedir (CORINE, ESA CCI, vs). Harita 2.4'de, Global Mapper programı kullanılarak Corine Land Cover 2006 haritalarından oluşturulan Hatay ilinin pürüzlülük haritası verilmiştir.



Harita 2.4. Hatay pürüzlülük haritası - Corine Land Cover 2006

WAsP programı, rüzgar atlasını oluştururken farklı yüksekliklerde ve farklı pürüzlülük sınıflardaki değerleri vermektedir. Varsayılan pürüzlülük sınıfları 0 m, 0,03 m, 0,10 m, 0,4 m ve 1,5 m z değerlerine karşılık gelmektedir. Program bu pürüzlülük değerlerine farklı yüksekliklerde karşılık gelen ortalama hız, Weibull şekil ve ölçek parametreleri her bir yükseklik için mevcuttur. Varsayılan yükseklikler 10 m, 25, 50 m, 100 m, 200 m'dir (Mortensen, 2016). 2016 Yılına ait rüzgar atlası Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.9. 2016 Yılı rüzgar atlası.

		Roughness length 0,000 m	Roughness length 0,030 m	Roughness length 0,100 m	Roughness length 0,400 m	Roughness length 1,500 m
Height 10,0 m	Weibull A [m/s] Weibull k Mean speed U [m/s]	6,52 1,97 5,78	4,71 1,80 4,19	4,13 1,83 3,67	3,26 1,87 2,90	2,18 1,92 1,94
Height 25,0 m	Weibull A [m/s] Weibull k Mean speed U [m/s]	7,15 2,02 6,34	5,64 1,90 5,00	5,09 1,93 4,52	4,29 1,96 3,81	3,30 2,00 2,93
Height 50,0 m	Weibull A [m/s] Weibull k Mean speed U [m/s]	7,70 2,10 6,82	6,51 2,06 5,77	5,96 2,07 5,28	5,18 2,09 4,59	4,24 2,12 3,75
Height 100,0 m	Weibull A [m/s] Weibull k Mean speed U [m/s]	8,35 2,13 7,39	7,67 2,25 6,80	7,07 2,25 6,26	6,25 2,24 5,54	5,31 2,22 4,70
Height 200,0 m	Weibull A [m/s] Weibull k Mean speed U [m/s]	9,16 2,08 8,11	9,32 2,23 8,25	8,58 2,22 7,60	7,65 2,20 6,77	6,63 2,17 5,87

### 2.1.5. Yakın çevre engelleri (Obstacle)

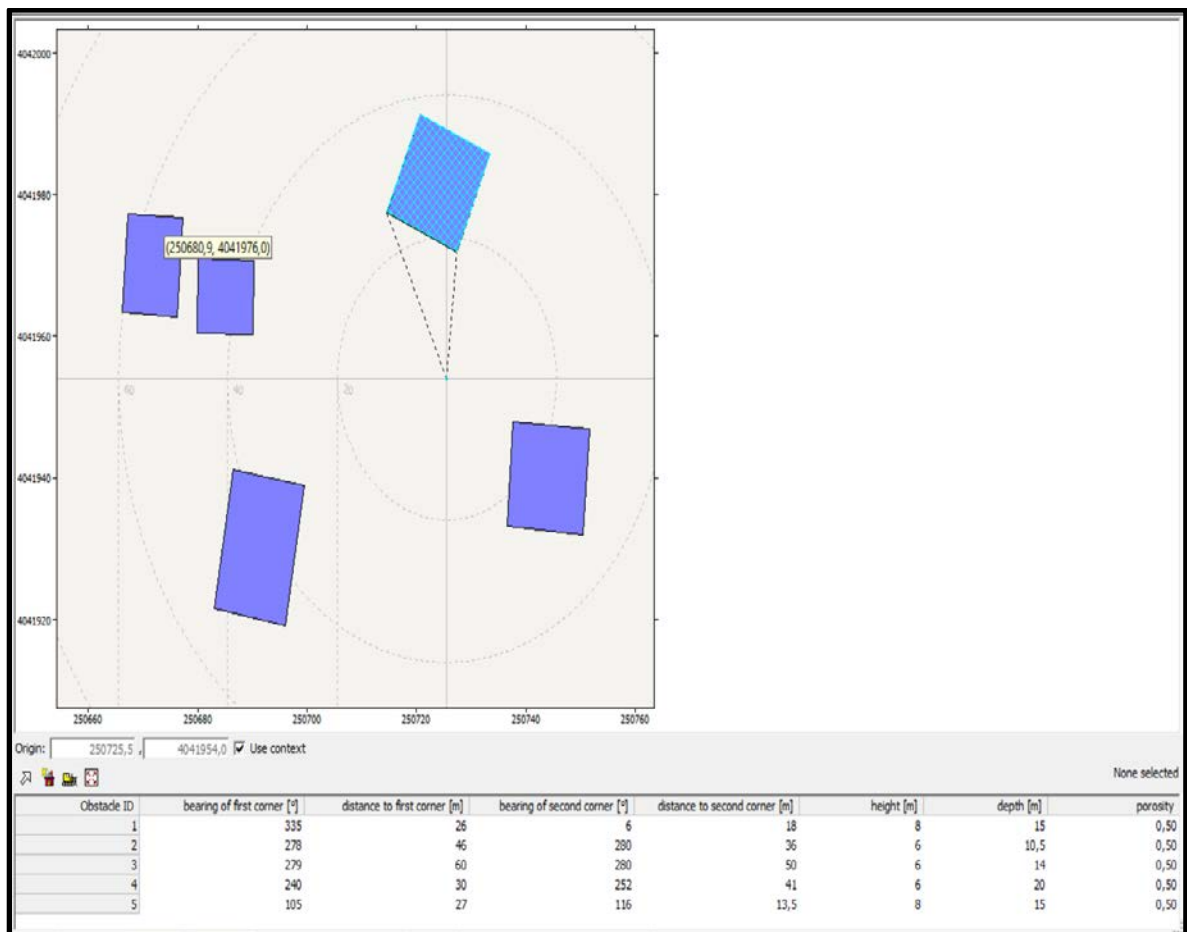
Analiz yapılacak bölge üzerindeki Anemometre, türbin veya herhangi bir ölçüm alınacak nokta çevresindeki yakın engeller rüzgar akışını değiştireceğinden, ölçümü veya üretilecek enerjinin miktarını etkilemektedir. WAsP programı bu engelleri pürüzlülük elemanı olarak tanımlar ve pürüzlük değerlerini engellere göre tekrar düzenler. Harita 2.5’de görüldüğü üzere Belen meteoroloji istasyonunu çevresindeki engeller gösterilmiştir.



Harita 2.5. Belen Meteoroloji istasyonu çevresindeki engeller (Google Earth, 2019)



Meteoroloji istasyonunun çevresindeki engellerin en - boy - yükseklik uzunlukları, istasyona uzaklığı ve konum açısı Şekil 20’de görüldüğü gibi programa girilmiştir. Şekilde görülen “bearing of first corner ve bearing of second corner(°)” ile ifade edilen değerler engelin birinci ve ikinci köşesinin meteoroloji direğine göre konum açısı, “distance of first corner ve distance of second corner[m]” ile ifade edilen ise engelin köşe noktalarının meteoroloji direğine olan uzaklığıdır. “height[m]” engelin yüksekliğini, “depth[m]” ise engelin enini göstermektedir. Veriler girilerek meteoroloji istasyonunun etrafındaki beş adet engel uydu görüntüleri yardımıyla direk çevresine gerçeğe uygun olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 2.6. Meteoroloji istasyonu çevresindeki engellerin konum bilgileri

### 2.1.6. Rüzgâr türbini özellikleri

Rüzgâr türbinleri, elektrik enerjisi üretimine başladığı ve çalışmasını durdurduğu minimum ve maksimum değerler vardır. Türbin çalışması için ihtiyaç duyduğu minimum rüzgâr hızı (cut-in) ve rüzgâr türbinin ve ekipmanlarının zarar görmeden çalışabileceği maksimum rüzgâr hızı (cut-out) değerleri mevcuttur. Bir rüzgâr türbini enerji üretimini bu aralıkta

gerçekleştirir. Farklı kapasitelerdeki modern rüzgar türbinlerinin minimum rüzgar hızları 2-4 m/s, maksimum rüzgar hızları ise 25-35 m/s arasındadır. Nominal hızları yani maksimum güce ulaştığı hız değerleri ise 10-15 m/s'dir. Türbinler, belli bir rüzgar hızında maksimum güç kapasitesine ulaşır. Ulaşılan bu en yüksek güce nominal güç ve bu değerdeki rüzgar hızına nominal hız denir. Bu hız değerinden sonra hızın artması güç değerini arttırmaz. Sistem, türbinin maksimum çalışma hızına ulaştığından sonraki rüzgar artışlarında sistemin hasar görmemesi için rüzgâr türbinine frenleme yaptırarak otomatik olarak durdurur. Bu maksimum hıza sistemin cut-out hızı adı verilmektedir (ETKB, 2019b).

Teorik çalışmaya referans olarak kullanılan türbin Vestas V90-3.0 MW VCS 50 Hz modelidir. Türbin resmi Resim 2.2'de verilmiştir.



Resim 2.2. Vestas V90-3.0 MW VCS 50 Hz türbin (Vestas, 2018)

Türbinin rotor çapı 90 m, hub yüksekliği 80 m'dir. Türbin kapasitesi 3 MW'dır. 3 adet kanata sahip olan türbinin kanat uzunluğu 44 m'dir. Türbin kanat süpürme alanı 6.362

$m^2$ 'dir. Türbin devir aralığı 8,6 - 18,4 dev/dk arasında değişmektedir. Nominal devri 16,1 dev/dk'dır. Referans türbin özellikleri Çizelge 2.10'da verilmiştir.

Çizelge 2.10. Referans Türbin Özellikleri (Vestas, 2009)

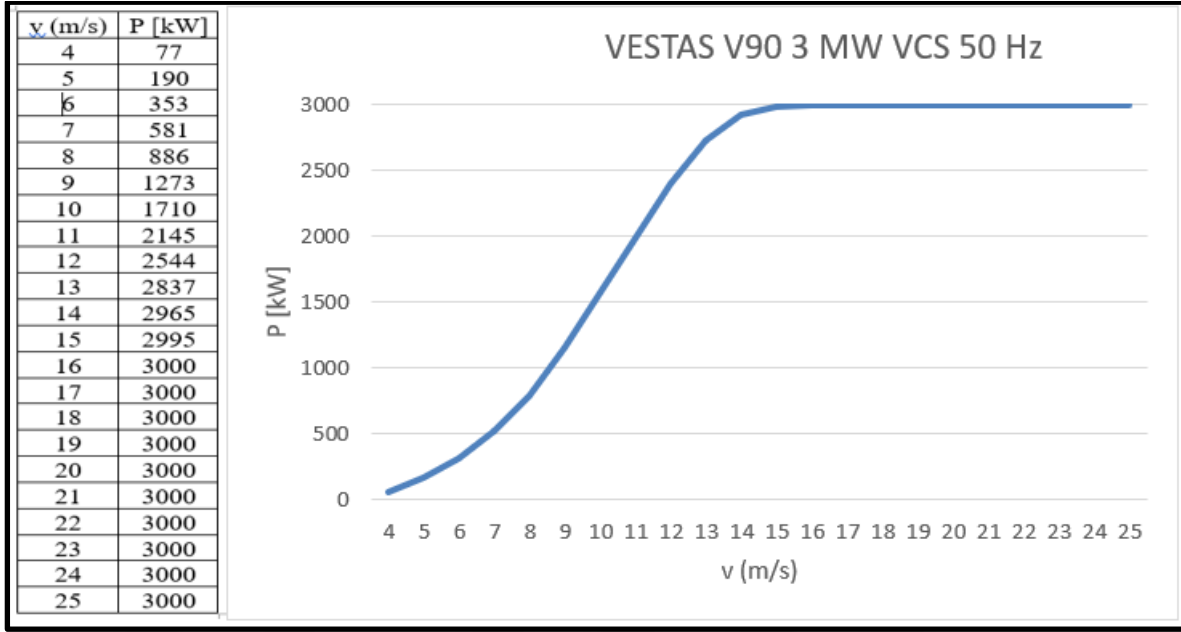
<b>Genel</b>	
Model	Vestas V90 3MW
Kapasite	3 MW
Hub Yüksekliği	80 m
<b>Çalışma Hızları</b>	
Minimum Hız	4 m/s
Maksimum Hız	25 m/s
Nominal Hız	15 m/s
<b>Rotor</b>	
Çapı	90 m
Süpürme Alanı	6362 m <sup>2</sup>
Kanat Sayısı	3
Kanat Uzunluğu	44 m
Devir Aralığı	8,6-18,4 dev/dk
Nominal Devir	16,1 dev/dk

Vestas V90 3 MW VCS 50 Hz rüzgar türbininin minimum çalışma hızı 4 m/s maksimum çalışma hızı ise 25 m/s'dir. Türbin ürettiği elektrik enerjisi, 15 m/s hıza kadar rüzgar hızı arttıkça artmaktadır. Nominal hız olan 15 m/s hızda maksimum enerji üretimine ulaşmaktadır. Bu hızdan sonra hızın artması üretilen enerjiyi artırmamaktadır. Türbin maksimum hız olan 25 m/s hıza ulaştığında frenleme yapılmakta ve türbinin zarar görmesini engellemektedir. Seçilen referans türbinin hıza bağlı güç değerleri Çizelge 2.11'de verilmiştir.

Çizelge 2.11. Referans Türbinin hıza bağımlı güç değerinin değişimi

<b>Hız Aralığı</b>	<b>Güç</b>
0-4 m/s	Güç Yok
4-15 m/s	Güç V hızı ile artar
15-25 m/s	Sabit Güç
25 m/s'den büyük	Güç Yok

Referans türbinin rüzgar hızına bağlı güç eğrisi ise Şekil 2.6'da verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Referans türbin rüzgar hızına bağlı güç eğrisi

### 2.1.7. Finansal veriler

Rüzgar enerji santrallerinde elektrik üretmenin maliyeti üç ana bileşene sahiptir.

1. Sermaye maliyeti (İlk yatırım maliyeti)
2. İşletme ve bakım maliyeti
3. Finansman maliyeti

Rüzgar enerji santralleri yatırımlarında sermayenin neredeyse tamamı ilk yatırım maliyetlerinde kullanılır. Bu nedenle rüzgar enerjisi yatırımları sermaye maliyetlerine çok duyarlıdır. Yakıt maliyetlerinin olmaması, rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının belirgin özelliğidir. Bu nedenle birim enerji üretim maliyetleri çok düşüktür. Birim başına düşen enerji maliyeti (BEÜM) kWh cinsinden şu şekilde hesaplanır (Ozerdem, Ozer ve Tosun, 2016).

$$BEÜM = YSM/YEÜ + İBM + FM \quad (2.2)$$

Burada YSM yıllık sermaye maliyetini (US\$/yıl), YEÜ yıllık enerji üretimini (kWh/yıl), İBM işletme ve bakım maliyetini (US\$/kWh) ve FM ise finansal maliyeti (US\$/kWh) belirtir.

Proje geliştirme aşamasında tasarımcılar projenin faydalarını hesaplarken nakit akışı ile ilgilenmekte ve akışın negatif ya da pozitif yönde oluşunu değerlendirmektedirler. Yatırımın değeri ile karşılaştırıldığında net faydalar ve net bugünkü değerleri (NBD) ile ilgilenmektedir. Proje geliştiricilerden farklı olarak finansörlerin bakış açısı öz kaynak ve kredi maliyetini içeren yatırımın karlılığını değerlendirirken farklı yatırım araçları ile de kıyaslamalarıdır. Farklılığa rağmen tüm taraflar için en önemli amaç uygun maliyetli en yüksek enerji üretiminin sağlanmasıdır. Uygun maliyetli çözüm teknik ve finansal açıdan en uygun çözüm anlamına gelmektedir (Özerdem ve diğerleri, 2016).

Yatırımın finansal açıdan güvenli bölgede kalabilmesi için temel kriterler, net bugünkü değer (NBD), iç karlılık oranı (İKO) ve basit geri ödeme süresi (BGÖS) incelenmeli ve uygun sonuçlar alınması durumunda yatırımın yapılabilmesi için olumlu düşünülmesi gerekmektedir.

Elektrik üretim tesisleri uzun ömürlü projelerdir. Rüzgar enerji santrallerinin ortalama ömrü 25 yıl civarındadır. Bu nedenle paranın zaman içindeki değişimi, rüzgar enerji santralleri gibi sermayenin çok büyük kısmının ilk yatırımda harcandığı projeler için oldukça önemlidir.

Bir yatırımın net bugünkü değeri, iskonto oranına indirgenmiş gelirin ve proje ömrü sonunda hurdanın bugünkü değerinin toplamı ile iskonto oranına indirgenmiş giderleri arasındaki farktır (Sarsılan, 1990). Projenin kabul edilebilmesi için bu farkın pozitif olması yani  $NBD > 0$  olması gerekmektedir. Birden fazla proje varsa en büyük NBD değeri olan proje seçilmelidir.  $NBD = 0$  ise santralden elde edilecek kazancın yalnızca işletme ve yatırım maliyetlerini karşıladığı düşünülmelidir (Gedik, Akyüz ve Akyüz, 2005). Net bugünkü değer yatırım projelerinin uygulanabilirliğinin güçlü bir göstergesidir ve aşağıdaki bağıntıyla bulunur.

$$NBD = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (2.3)$$

Bu bağıntıda  $B_t$  t yılındaki nakit girişi;  $C_t$  aynı yılda gerçekleşen nakit çıkışı, n kaçınıcı yılı olduğunu, r ise iskonto oranını ifade etmektedir. İskonto oranı değerlendirme sonucunu önemli ölçüde etkilemektedir. İskonto oranı yatırımın verimliliğini gösteren en önemli ölçüdür.

İskonto oranı belirlenirken üç önemli yaklaşım mevcuttur. İlk yaklaşım eğer yatırımın finansmanı öz kaynaklardan sağlanıyorsa kullanılan kaynakların sermaye maliyeti yani iskonto oranı, diğer yatırım araçlarından vazgeçilmesi sonucu oluşacak fırsat maliyeti. Fırsat maliyetinin en iyi ifadesi ise finansal piyasalardaki faiz oranıdır. İkinci yaklaşım yatırım finansmanının tamamının yabancı kaynaklardan sağlanmasıdır. Bu durumda iskonto oranı ise merkez bankasının uzun vadeli borçlar için uyguladığı faizdir. Üçüncü yaklaşımda ise finansmanın farklı veya aynı oranlarda yabancı ve öz kaynaklardan sağlanması durumu için iskonto oranı, iki sermaye maliyetlerinin ağırlıklı ortalamasıdır.

Bir yatırım projesinde net bugünkü değeri sıfıra eşitleyen iskonto oranını ise iç karlılık oranı (İKO) olarak tanımlanır ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir (Sarsılan, 1990; Kidwell, Peterson, 1981).

$$İKO = \left( \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \right) \quad (2.4)$$

Formülde r bağıntısı deneme yanılma ile veya bilgisayar destekli programlar yardımı ile bulunur. r değeri yerine konulduğunda çıkan sonuç negatif ise r oranı azaltılmalı, pozitif ise r değeri artırılmalıdır. Bu işlemler NBD=0 oluncaya kadar devam ettirilebilir veya çıkan negatif ve pozitif değerler arasında enterpolasyon yapılarak da sonuç bulunabilir. İKO'nun hesaplanmasında bulunan "r" iskonto oranı yatırımcının yatırımda öngördüğü karlılığından yüksek olması durumunda proje kabul edilir. Ters durumda proje reddedilir. Eğer projeler arasında İKO oranına bağlı bir seçim yapılacaksa, o zaman İKO oranı en yüksek proje seçilir (Gedik ve diğerleri, 2005).

Basit geri ödeme süresi yönteminde ise yapılan yatırımın ne kadar süre içinde geri ödeneceğinin değerlendirildiği yöntemdir. Bu hesap yönteminde elde edilen sonuç yatırımcının ön gördüğü geri ödeme süresine eşit veya beklediği süreden düşük ise yatırım yapılır, değil ise proje reddedilir. Basit geri ödeme süresi projenin karlılığından ziyade likiditesini göstermektedir (Yılmaz, 1993).

BGÖS genellikle yıl olarak ölçülür ve toplam yatırımın geri kazanılması için gereken süreyi gösterir.

$$BGÖS = (Projenin\ yatırım\ tutarı - Hurda\ değ.) / (Yıllık\ ort.\ net\ kar + Yıllık\ amort.\ payları) \quad (2.5)$$

Üretim maliyeti, enerji santralin ekonomik ömrü boyunca yapılan tüm harcamaları (ilk yatırım maliyeti, işletme/bakım maliyetleri) kapsayan, santralden enerji elde etmek amacıyla gerek duyulan tüm maliyeti ifade eden ekonomik bir değerdir. Enerji santrallerinde elektrik enerjisi üretimine etki eden en önemli iki faktör, santralin ilk yatırım maliyeti ve işletme/bakım maliyetidir (Kaya ve Koç, 2015).

#### İlk yatırım maliyetleri

İlk yatırım maliyeti, rüzgar enerji santralinin tam anlamıyla elektrik üretimine başlaması ve bu elektriği şebekeye verebilmesi için gerekli makina-teçhizat, bina, arazi vb. temel elemanlar için yapılan tüm harcamalardır. Enerji santrali yatırımlarda sermayenin tamamına yakın kısmı ilk yatırım maliyetleri için kullanılır.

#### İşletme ve bakım maliyeti

Rüzgar enerji santrallerinin verimli ve uzun ömürlü olması aynı zamanda güvenli bir şekilde çalışması amacıyla periyodik olarak bakımlarının yaptırılması gerekmektedir. İşletme ve bakım maliyetleri, türbinlerin her türlü makine teçhizat ve ekipman ile trafolar ve iletim hatlarının bakım-onarım masrafları, işletme için çalışan personel masrafları gibi maliyetleri içerir. Çeşitli mühendislik ve teknik servis hizmetlerinin yerleştirilmesi ile bu maliyetler azaltılabilir.

#### Finansman maliyeti

Rüzgar enerjisi santralleri yüksek sermaye gerektiren ve sermayenin tamamına yakın kısmının yatırım ilk aşamasında harcadığından bulunacak finansmanın maliyeti karlılığı doğrudan etkilemektedir. Çeşitli kredi ve teşviklerden yararlanılarak bu maliyetler minimuma indirilir. Finansman maliyetleri, sağlanan kredinin büyüklüğü ve geri ödeme

süresine bağılı olarak değişse de bir rüzgar türbininin toplam Maliyetinin yaklaşık % 1-3'lük kısmını oluşturmaktadır.

### Ekonomik ve finansal kabuller

Çalışmada yapılan finansal analiz kapsamında tüm maddi hesaplamalar Amerikan doları (\$) para birimi ile yapılmıştır. Günümüzdeki rüzgar türbinlerinin ekonomik ömrü 20-25 yıl arasında değişmektedir. Bu çalışmada rüzgar türbinlerinin ekonomik ömrü 25 yıl olarak hesaplanmıştır. Rüzgar enerjisi kurulum maliyetleri 1878 \$/kW, işletme ve bakım maliyetleri ise 39,7 \$/kW-yıl olarak kabul edilmiştir (USEIA, 2016).

Türkiye'de 29.12.2010 tarihli ve 6094 sayılı kanun hükmü ile yenilenebilir enerji santrallerinin elektrik ihraç bedelleri belirlenmiştir. Rüzgar enerjisinden üretilen elektrik ihraç gelirinun 29.12.2010 tarihli ve 6094 sayılı kanun hükmüne göre 0,073 \$ olarak kabul edilmiştir. Aynı kanun hükmünde belirtilen rüzgar enerji santralinde yerli ekipman kullanım teşvikinin ise alınmadığı düşünölmüştür. Ayrıca Iskonto oranının %7 enflasyon oranının %2 (\$), kredi faiz oranının %7 (\$), yeniden yatırım oranının ise %10 olduğu kabul edilmiştir.

## **2.2. Yöntem**

### **2.2.1. WAsP paket programı**

Danimarka Teknik Üniversitesi (DTU) Risø Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilen WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) programı, rüzgar türbini değerlendirmesi, rüzgar türbinleri ve RES'ler için yerleşim tespiti, bu konumlardaki enerji verimliliği gibi bir çok analize olanak sağlamaktadır. Program hem kara üstü hem de deniz üstü RES'leri için enerji verimliliği analizi yapabilmektedir. Program veri tabanında dünyanın önde gelen rüzgar türbini üreticilerinin ürettiği rüzgar türbini modelleri ve bu modellerin teknik bilgilerini barındırmaktadır. WAsP programı yaklaşık 100 ölkede 5000 lisanslı kullanıcıya sahiptir (WAsP, 2019). Avrupa Rüzgar Atlası ve Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) WAsP yazılımı ile hazırlanmıştır.

WAsP programı modelleme yaparken aşağıdaki verilere ihtiyaç duyar.

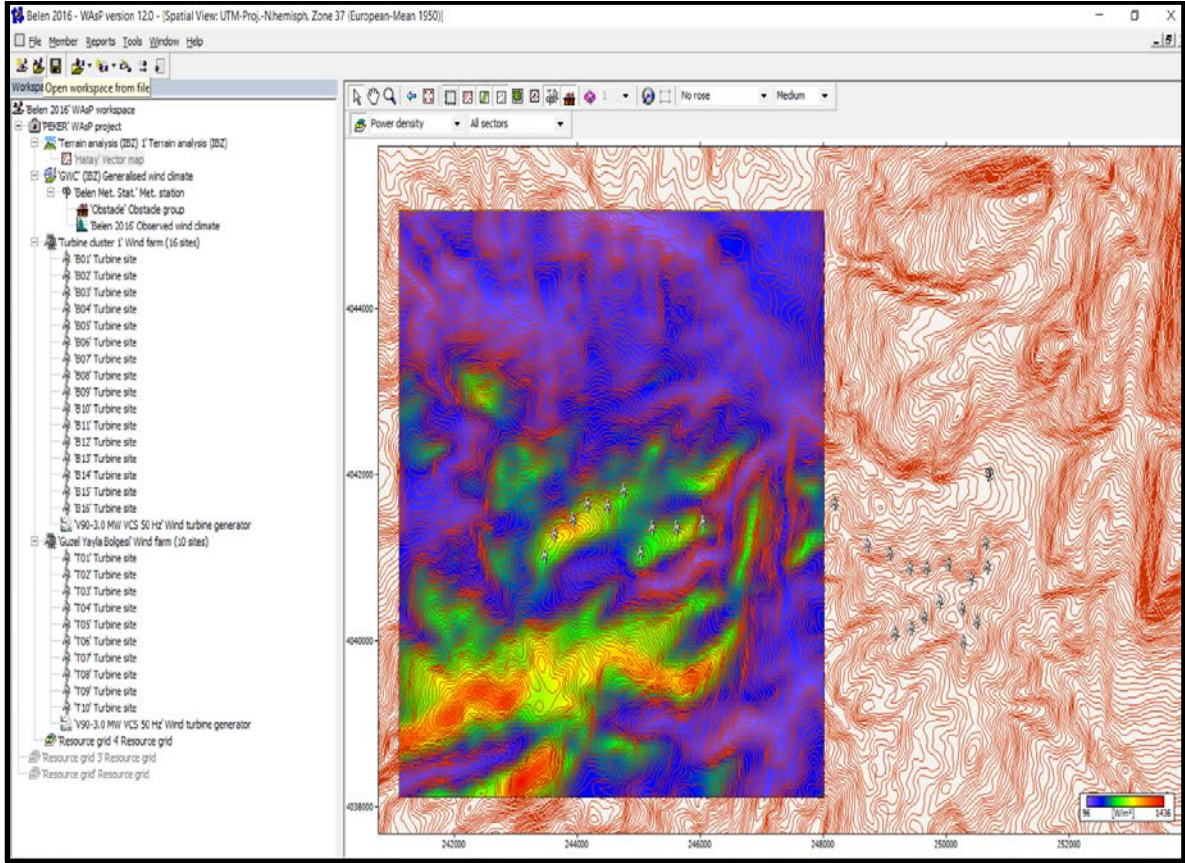


- Rüzgar hızı ve yönü
- Bölge konum bilgileri ve vektörel haritası
- Bölge pürüzlülüğü
- Yakın çevre engelleri

WAsP programında tek bir türbinin noktasal analizi yapılabileceği gibi büyük RES'leri için de analiz yapılabilir. Türbinlerin brüt ve net üreteceği elektrik enerjisi, türbinin rotor merkezindeki güç yoğunluğu, bölgenin güç yoğunluğu haritaları, farklı yüksekliklerdeki (10m - 25m - 50m - 100m - 200m) ortalama rüzgar hızı, rüzgar oluşma sıklığı (frekansı), hakim rüzgar yönleri ve rüzgarın esme yönü sektörlere ayrılarak; sektörlerde oluşan hız, enerji, güç yoğunluğu gibi birçok sonuç elde edilebilir. Bu çalışmada kullanılan WAsP programı rüzgar esme sıklığı (frekansını) modellemesini iki parametrelili Weibull dağılımına uygun olarak yapmaktadır.

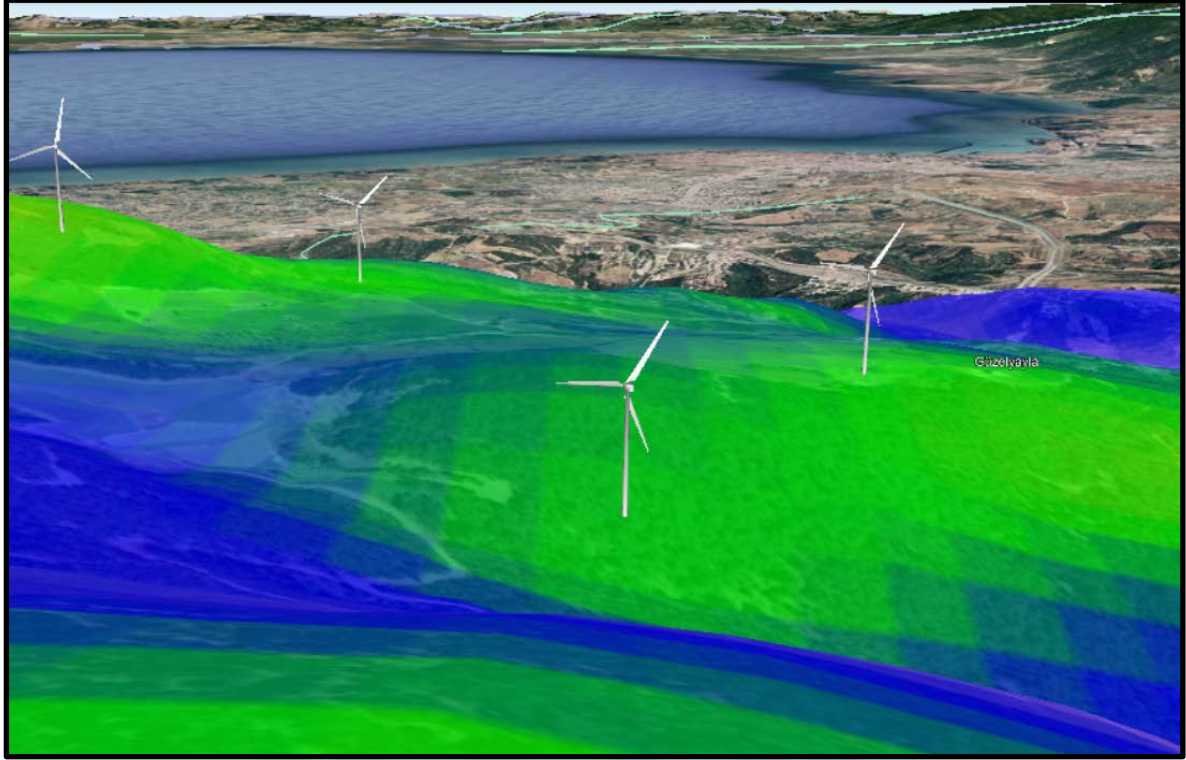
WAsP programı kendi içinde rüzgar iklimini, farklı arazilerde ve engellere yakın rüzgar akışını tanımlayacak çeşitli modüllere sahiptir. Bu modüllerden bazıları rüzgar iklimini analiz etmek için meteoroloji istasyonunda kaydedilen rüzgar hızı ve yönü verilerini tarih ve saat parametreleriyle derleyen, OWC (Observed Wind Climate) veya WCA (WAsP Climate Analyst) modülüdür (Mortensen, 2016). Bu veriler rüzgar iklim analizi modülü (WCA-OWC) sayesinde rüzgar hızları tarihlere ve yönlere göre ayrıntılı olarak irdelenir. Rüzgar hızlarının sektör (yön) bazında oluşma sıklıkları, aylara göre ortalama rüzgar hızları, Weibull parametreleri, güç yoğunluğu gibi birçok hesaplama yapılabilir. Program kendi içerisinde vektörel haritaları okuyabilen WAsP Map modülüne sahiptir. Bu modül sayesinde vektörel haritalar açılabilir, yeni haritalar oluşturulabilir, düzenlenebilir, haritaların üzerine bölgenin pürüzlülük sınıfları eklenebilir veya pürüzlülük sınıfları değiştirilebilir. Program bu modüller dışında akış simülasyonları (CFD), türbin editörü, hava yoğunluğu hesaplayıcısı ve enterpolasyon gibi birçok modülü barındırmaktadır.

Modüller sayesinde hazırlanan yükselti ve pürüzlülük haritaları, iklim verileri, çevre engelleri WAsP programına işlenir. Şekil 2.7'de WAsP programı ekran görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 2.7. WASP programı ekran görüntüsü

İlk olarak programın çalışmanın yapılacağı alanın topografyasını algılaması için yükselti ve pürüzlülük değerlerinin olduğu harita girilir. Daha doğru sonuçların alınabilmesi adına programa girilen rüzgar verileri yakın konumda bulunan bir ölçüm direğinden sağlanmalıdır. Verilerin alındığı meteoroloji direğinin konumu ve bu konum çevresindeki engeller (obstacle) WASP programına girilir. Haritanın üzerindeki rüzgar ikliminin programa tanımlanması adına meteoroloji istasyonuna daha önce OWC veya WCA modüllerinde hazırlanan bölgenin rüzgar iklimi verileri girilir. Sonuç olarak programa bölge topografyası ve rüzgar iklimi gerçek konumlarıyla birebir örtüşecek şekilde tanıtılır. WASP programı Google Earth programıyla entegre şekilde çalışır. Konum bilgilerinizi Google Earth programından doğrulayacağınız gibi yükselti haritalarını Google Earth programından da elde edebilirsiniz. Harita 2.6'da WASP ortalama hız analizinin Google Earth uydu haritalarının üzerine iz düşümünün işlenmiş görüntüsü verilmiştir.



Harita 2.6. WAsP ortalama hız analizinin Google Earth uydu haritalarının üzerine iz düşümünün işlenmiş görüntüsü (Google Earth, 2019)

Bu işlemlerden sonra artık tanımlanan bölgeye istenilen sayıda, markada, kapasitede rüzgar türbini ve/veya rüzgar çiftlikleri yerleştirebilir; istenilen alanların ortalama rüzgar hızlarını, güç yoğunluğunu, sektör bazında rüzgar oluşum sıklıkları gibi birçok analizi yapmak mümkün olmaktadır.

WAsP programı IEC 61400-1 Rüzgar enerjisi üretim sistemleri - Bölüm 1: Tasarım gereksinimleri standartları ve IEC 61400-12-1 Rüzgar enerjisi üretim sistemleri - Bölüm 12-1: Elektrik üreten rüzgar türbinlerinin güç performans ölçümleri standartları için yazılım araçları barındırır (WAsP, 2019).

### 2.2.2. Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları

Weibull dağılım fonksiyonu, 1951 yılında Waloddi Weibull tarafından makinelerin ömrünü tahmin etmek amacıyla ortaya çıkardığı bir fonksiyondur. Günümüzde ise veri analizinde, mühendislikte ve rüzgar hızı tahminleri gibi istatistiksel modellemede sıkça kullanılan bir dağılımdır.

Rüzgar hızı verilerini modellemek amacıyla çeşitli yoğunluk fonksiyonları mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılanı, özellikle geniş bir yelpazede verileri işleme kabiliyetine sahip olan Weibull olasılık fonksiyonudur. Parametrelerin aldığı değerlere göre bazı durumlarda Rayleigh ve üssel dağılımlara da sahip olan Weibull dağılımı, başarısızlık oranı gibi modellemelerde de yaygın olarak kullanılır. Weibull denklemlerinin dezavantajı düşük veya sıfıra yakın verileri modelleyememesidir. Ancak rüzgar türbinlerinin ticari kullanımında düşük rüzgar hızlarında türbinin çalışmamasından veya çok düşük enerji üretilmesinden dolayı bu dezavantaj göz ardı edilmektedir (Fazelpour, Markarian ve Soltani, 2017).

Bu çalışmada kullanılan WAsP programı, rüzgar esme sıklığı (frekansını) modellemesini, iki parametrelili Weibull dağılımına uygun olarak yapmaktadır. Weibull dağılım fonksiyonu, iki parametreye sahiptir. Bunlar boyutsuz şekil ( $k$ ) ve rüzgar hızı birimi ile aynı birimde olan ölçek ( $c$ ) parametresidir.

Rüzgar hızı için Eş. 2.6'da iki parametrelili Weibull dağılımının genel ifadesi,

$$f_w(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.6)$$

ile verilebilir. Burada “ $v$ ” ölçülen rüzgar hızıdır. Ölçülen rüzgar hızının ( $v$ ) olasılık fonksiyonu ise  $f_w(v)$ ' dir.  $k$  ve  $c$  ise Weibull parametreleridir.  $k$  boyutsuz şekil parametresi rüzgar potansiyelini,  $c$  ölçek parametresi de incelenen alanın ne kadar rüzgarlı olduğunu göstermektedir.

Rüzgar türbinin söz konusu alanda potansiyel olarak işlevsel olabileceği en uygun sürenin belirlenmesi istatistiksel analizin önemli bir parçasıdır (Islam, Saidur ve Rahim, 2011). Bu nedenle kümülatif dağılım fonksiyonu hesaplanmalıdır. Hızın kümülatif fonksiyonu, rüzgar hızının  $v$  hızından eşit veya daha düşük olduğu zamanın oranını temsil etmektedir. Weibull dağılımının birikimli (kümülatif) olasılık yoğunluk fonksiyonu ise aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$F_w(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.7)$$

Weibull parametrelerinin tahmin etmenin çeşitli yöntemleri mevcuttur. Grafik yöntem, moment yöntemi, en küçük kareler yöntemi vs (Bilgili ve diğerleri, 2010). Bu çalışmada daha basit ve anlaşılır bir yöntem olan moment yöntemi için standart sapma ve ortalama rüzgar hızı değerleri kullanılarak hesaplama yöntemi verilmiştir. Weibull  $k$  ve  $c$  parametreleri sırası ile aşağıdaki Eş. 2.8 ve Eş. 2.9 denklemleri ile hesaplanabilir.

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1.086} \quad (1 \leq k \leq 10) \quad (2.8)$$

$$c = \frac{v_m}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad (2.9)$$

Burada,  $v_m$  ortalama rüzgar hızıdır ve aşağıdaki Eş. 2.10 denklemleri kullanılarak bulunur.

$$v_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_m \quad (2.10)$$

$\sigma$  standart sapmadır ve Eş. 2.11' nolu denklem yardımı ile bulunur.

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - v_m)^2 \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

Burada,  $n$  değeri belirli bir periyottaki gözlem sayısıdır.

$\Gamma(y)$  gama fonksiyonudur ve herhangi bir  $y$  değeri için aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} \exp(-x) x^{y-1} dx \quad (2.12)$$

Weibull parametrelerinin bulunmasıyla birlikte ortalama rüzgar hızı Eş. 2.13 eşitliğinden faydalanılarak hesaplanabilir.

$$v_m = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.13)$$

Rayleigh dağılımı ve bu dağılımın birikmiş olasılık fonksiyonu sırasıyla Eş. 2.14 ve Eş. 2.15 eşitlikleri kullanılarak bulunur (Akpınar, E. ve Akpınar, S., 2004; Gökçek, Bayülken ve Bekdemir, 2007)

$$f_R(v) = \left(-\frac{\pi v}{2v_m^2}\right) \exp\left[-\left(-\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{v_m}\right)^2\right] \quad (2.14)$$

$$F_R(v) = 1 - \exp\left[-\left(-\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{v_m}\right)^2\right] \quad (2.15)$$

Kanat süpürme alanı  $A$  olan bir rüzgar türbininin  $v$  hızında meydana getireceği rüzgar gücü potansiyeli,

$$P(v) = \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir. Aşağıdaki formül ile ortalama rüzgar gücü yoğunluğu hesaplanabilir.

$$P(v) = \frac{1}{2}\rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \quad (2.17)$$

Burada,  $\rho$  havanın yoğunluğudur. ( $\text{kg/m}^3$ ). WAsP programı farklı yüksekliklerde havanın yoğunluğunun değiştiğini göz önüne alarak hesaplama yapar. Weibull dağılımı için ortalama güç yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanır (Bilgili ve diğerleri, 2010)

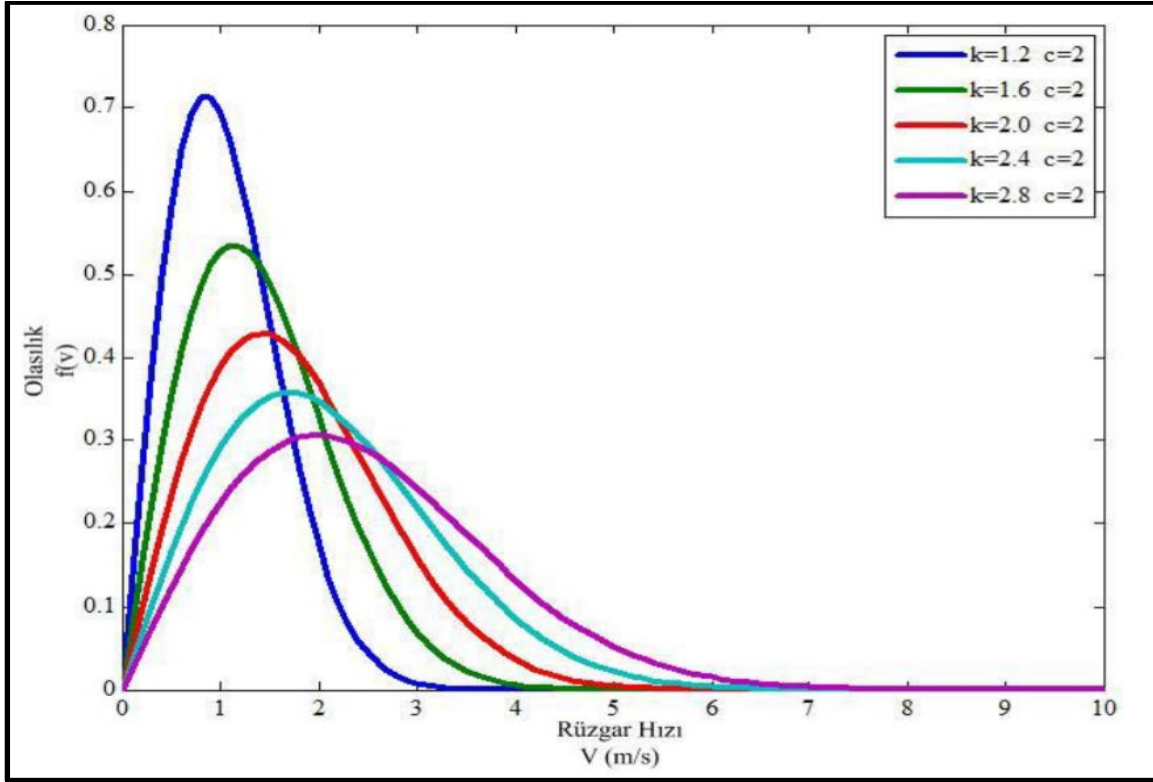
$$P(v) = \frac{1}{2}\rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (2.18)$$

Rayleigh dağılımı için ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu ise sırasıyla Eş. 2.19 ve Eş. 2.20 eşitlikleri kullanılarak elde edilebilir.

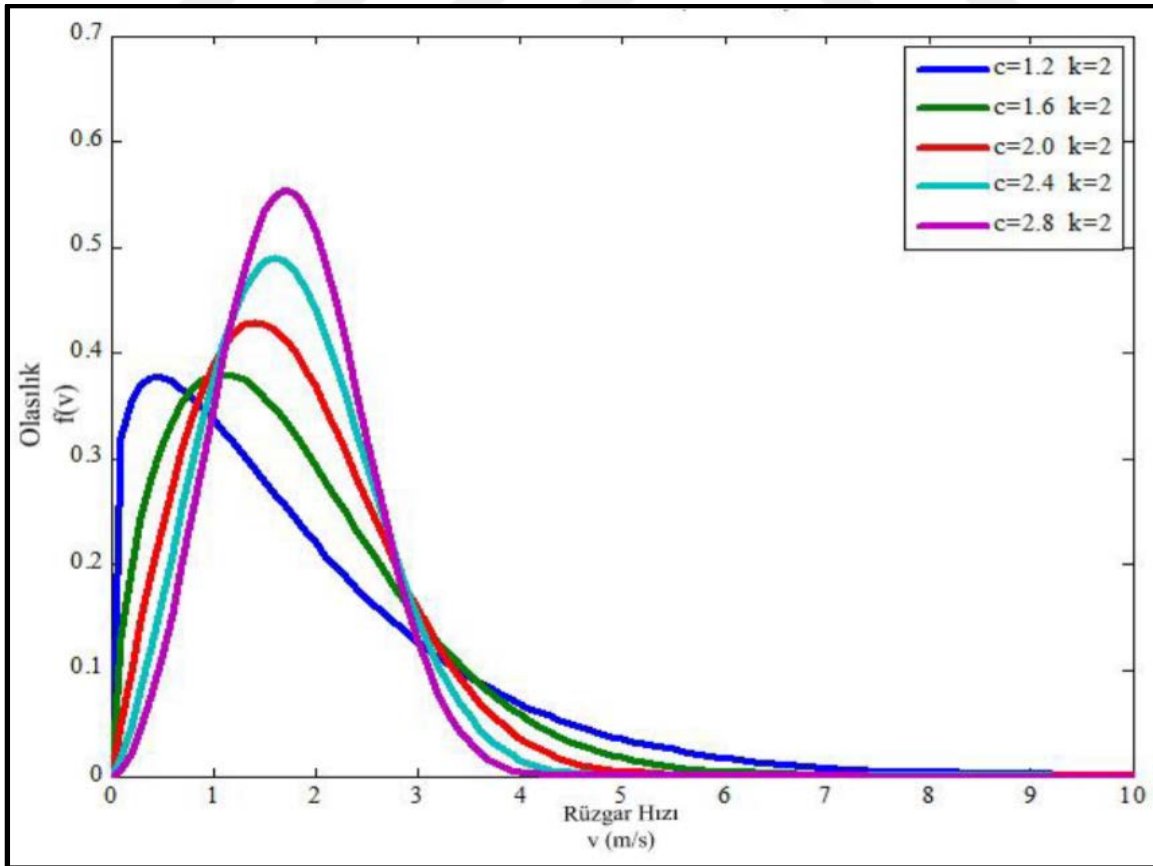
$$v_m = c\sqrt{\pi/4} \quad (2.19)$$

$$P_R = \frac{3}{\pi}\rho v_m^3 \quad (2.20)$$

Ölçek ve şekil parametrelerinin sabit olması durumunda Weibull olasılık dağılım fonksiyonlarının grafiği Şekil 2.8'de ve Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.8. Ölçek parametresi (c) sabitken, şekil parametresinin (k) değişimi (Güzel, 2014)



Şekil 2.9. Şekil parametresi (k) sabitken ölçek parametresinin (c) değişimi (Güzel, 2014)

### 2.2.3. Rüzgar türbininin ürettiği enerjinin bulunması

Belirli bir hızda rüzgarın sahip olduğu enerji Eş.2.21'de verilmiştir. Bir rüzgar türbininin belirli bir merkez (hub) yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızında üreteceği enerji ise güç kat sayısı ve türbin verimi de göz önünde bulundurularak Eş 2.22'de verilmiştir.

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho A t v^3 \quad (2.21)$$

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho A t v^3 C_p \eta_T \quad (2.22)$$

$\rho$ : Havanın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

A: Rotorun Süpürme Alanı ( $\text{m}^2$ )

v: Türbinin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)

t: Zaman (s)

$C_p$ : Türbinin güç katsayısı

$\eta_T$ : Türbinin verimi

Rüzgar türbinin belirli bir zaman aralığında ürettiği enerjinin bulunması için Weibull fonksiyonun olasılık yoğunluk fonksiyonunun, türbin güç eğrisi ile integre edilmesi gereklidir. İntegral sınırları türbininin üretime başladığı minimum nokta (cut in) ve üretiminin son bulduğu maksimum nokta (cut out) alınarak hesaplanır ve Eş. 2.23 ile ifade edilebilir (Güzel, 2014).

$$E_{t\text{ürbin}} = T \int_{v_i}^{v_o} P_t(v) f(v) dv \quad (2.23)$$

Güç eğrileri parçalı bir fonksiyon olarak üçüncü dereceden eşitlik şeklinde Eş. 2.5'de verilmiştir.  $a_1, a_2, a_3, a_4$  regresyon sabitleridir ve her türbin gücü için farklı değerdedir.

$$P_T(v) = \begin{cases} 0 & ; v < v_i \\ (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) P_R & ; v_i \leq v \leq v_R \\ 0 & ; v_R \leq v < v_o \\ 0 & ; v < v_o \end{cases} \quad (2.24)$$



$v$ : Rüzgar hızı (m/s)

$v_i$ : Türbinin devreye giriş (cut in) hızı (m/s)

$v_R$ : Türbinin tam kapasiteye ulaştığı rüzgar hızı (m/s)

$v_o$ : Türbinin devreden çıkış (cut out) hızı (m/s)

Türbin eğrisi fonksiyonunun ( $P_T(v)$ ) parçalı bir fonksiyon olması nedeni ile integral ifadesi iki parçaya ayrılabilir. Türbinin üretebileceği enerji Eş. 2.6'daki gibi verilebilir (Akdağ, 2008).

$$E_{t\ddot{u}rbin} = T \left[ P_R \int_{v_i}^{v_R} (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} dv + P_R \int_{v_R}^{v_o} \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} dv \right] \quad (2.25)$$

#### 2.2.4. Hata analizi

##### Mutlak hata

Analitik olarak bilinen ve doğru değer olarak kabul edilen bir sonucu ile sayısal yöntemler ile elde edilmiş sonucun arasındaki farkın mutlak değeridir.

$$\epsilon_m = |y_g - y_y| \quad (2.26)$$

Denklemden  $y_g$  gerçek değer  $y_y$  yaklaşık (teorik) değerdir.

##### Bağıl hata

Gerçek değere ne kadar yaklaşıldığının oransal bir gösteren bir hata çeşididir. Çoğu problemde bağıl hata mutlak hatadan daha fazla anlam ifade etmektedir.

$$\epsilon_b = \frac{|y_g - y_y|}{|y_g|} \quad (2.27)$$

### 2.2.5. Kapasite faktörü

Kapasite faktörü, rüzgar türbininin rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilme oranına denir. Daha farklı bir ifadeyle, rüzgar türbininin belirli bir zamanda ürettiği enerji miktarının, teorik olarak türbin tarafından nominal güçte belirli zamanda üretilecek enerji miktarına oranı şeklinde ifade edilir (Yalçın, 2010) Kapasite faktörü Eş. 2.28 ile ifade edilebilir.

$$C_f = \frac{E_T}{T P_R} \times 100 \quad (2.28)$$

Eşitlikte  $C_f$  kapasite faktörünü (%),  $E_T$  (olası) belirli bir zamanda üretilen toplam enerjiyi (kW),  $P_R$  türbinin nominal güçte enerji üretim miktarını (kW),  $T$  ise zamanı (s) ifade etmektedir.

### 2.2.6. RETScreen paket programı

RETScreen, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji projelerinin fizibilite analizleri, enerji performans analizleri için temiz enerji yöntemi yazılımıdır. RETScreen Paket Programı 30.04.1998 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Programın hali hazırda kullanılan RETScreen EXpert ücretsiz okuyucu sürümü 19 Eylül 2016'da yayınlanmıştır. Program, Kanada hükümetine CanmetEnergy Varennes Doğal Kaynakları Araştırma Merkezi'nin liderliği ve finansal desteği ile yönetilmektedir (RETScreen, 2019).

RETScreen Potansiyel enerji projelerinin teknik ve finansal olarak uygulanabilirliğini analiz etmek için çeşitli modeller mevcuttur. Program ile birçok yenilenebilir enerji türleri için enerji üretimi, yaşam döngüsü maliyetleri ve sera gazı emisyonunun azaltılması gibi analizler yapılabilir. RETScreen programının iş akış şeması Şekil 2.10'da verilmektedir.



Şekil 2.10. RETScreen programının iş akış şeması (RETScreen, 2019)

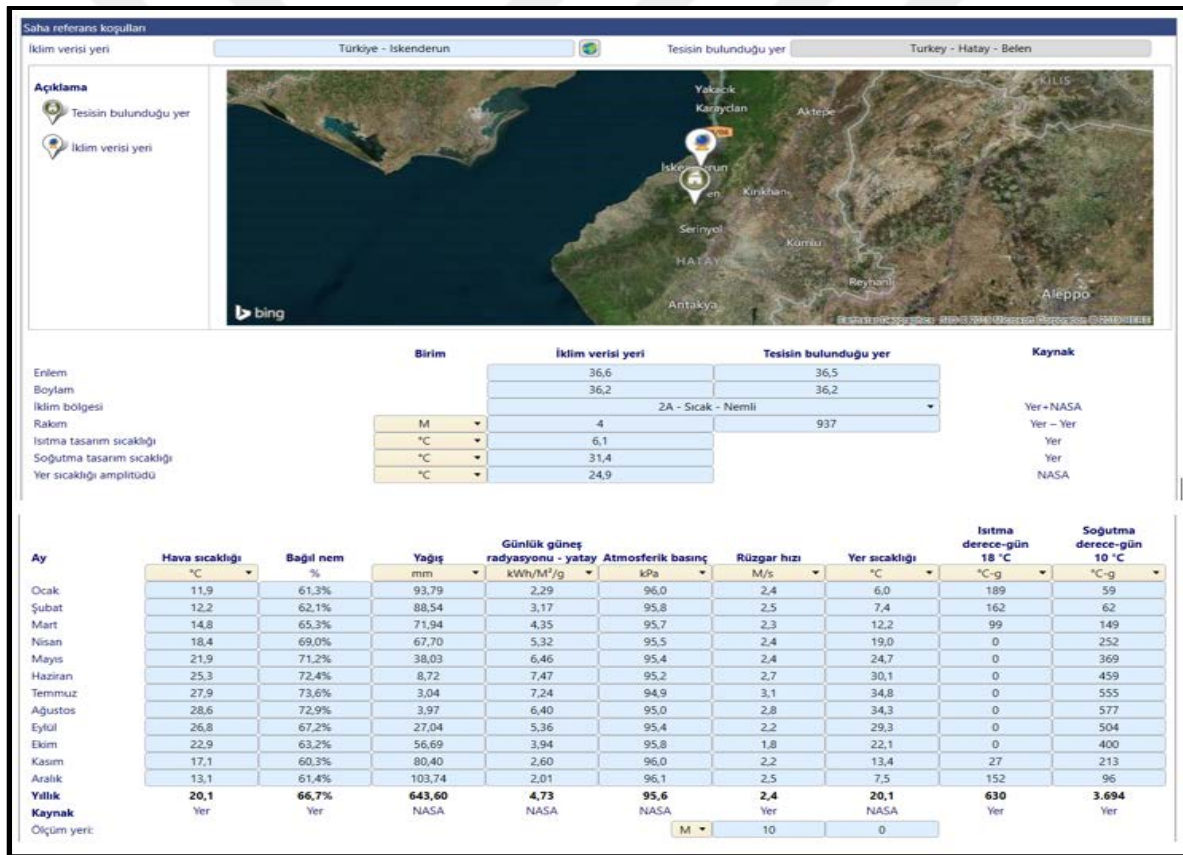
Program üç aşamada inceleme yapmaktadır.

1. Kıyaslama
2. Fizibilite
3. Performans

Kıyaslama kısmında enerji santralinin konum bilgileri ve tesis özellikleri girilmektedir. Fizibilitede üretilecek enerji miktarı, maliyet, temiz enerji sayesinde azaltılan karbon emisyon eşdeğeri, proje finansmanı ve riskler irdelenmektedir. Son kısımda ise performans analizi yapılmaktadır.

RETScreen, profesyonellere ve karar vericilere, potansiyel temiz enerji projelerini teknik ve finansal açıdan hayata geçirilebilirliğini belirleme, değerlendirme ve optimize etme olanağı vermektedir. Karar vermeye yardımcı olan bilgi yönetim yazılım platformu aynı zamanda yöneticilere tesislerinin gerçek performansını kolaylıkla ölçme ve doğrulama olanağı sağlarken ek enerji tasarrufları/üretim fırsatları sunmaktadır (RETScreen, 2019).

Yazılım, tesislerin gerçek performansının ölçülmesi ve doğrulanması ile enerji tasarrufu ve üretim fırsatlarının belirlenmesinin yanı sıra yenilenebilir enerji potansiyeli ve enerji verimliliği projelerinin teknik ve finansal açıdan uygulanabilirliğini analiz etmek için tümleşik matematiksel algoritmalara sahiptir (Akhan ve Eryener, 2017). RETScreen programı veri tabanında dünyadaki birçok bölgenin iklim verisini barındırmaktadır. Bu veriler NASA (Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi) tarafından sağlanmaktadır. RETScreen yazılımının iklim veri tabanında İskenderun bölgesi için enlem, boylam, rakım değerleri, iklim bölgesi, aylara göre hava sıcaklığı, bağıl nem, atmosferik basınç, rüzgar hızı, günlük güneş radyasyonu, yer sıcaklığı, ısıtma ve soğutma ihtiyaçları değerleri Şekil 2.11'de verilmektedir.



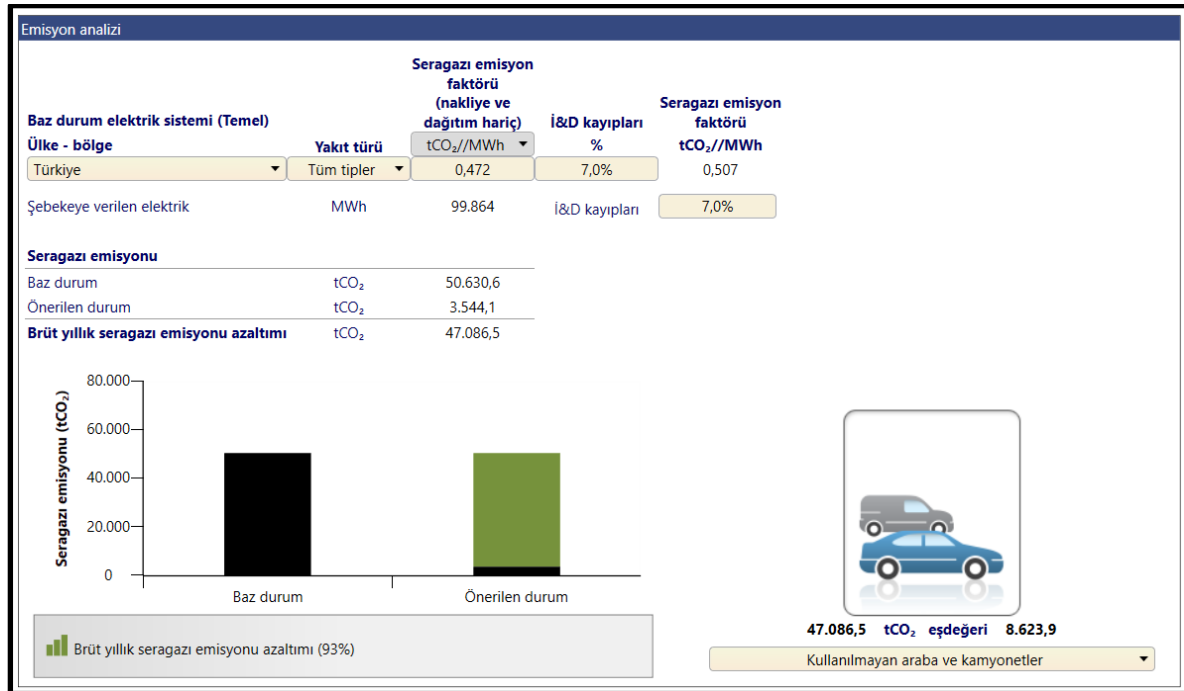
Şekil 2.11. RETScreen veri tabanı İskenderun konumu için iklim ve konum bilgileri (RETScreen, 2019)

Yapılan çalışmalarda RETScreen veri tabanından alınan veriler kullanılacağı gibi programa dışarıdan elle de rüzgar verileri girilebilmektedir. Bu çalışmada yapılan analiz bölgesine en yakın RETScreen veri seti İskenderun bölgesidir. İncelemenin doğruluğunu artırmak amacıyla aylık ortalama rüzgar hızı verileri Belen meteoroloji istasyonunda ölçülen aylık ortalama değerleri ile değiştirilmiştir.

RETSscreen Paket Programı, daha az veri ve daha basit hesaplamalarla çalışan bir programdır. RETSscreen aylık veriler kullanmaktadır ve daha derinlemesine modeller ile saatlik verileri kullanan programlar ile karşılaştırıldığında yıllık öngörülen enerji üretimi için %5'ten az bir farkla kabaca aynı sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir (RETSscreen, 2019)

Finansal analiz RETSscreen programının kilit unsurudur. RETSscreen finansal analizi üretilen elektriğin ve enerji santrallerinin maliyetini hesaplar. Bu maliyetleri hesaplarken basit geri ödeme süresi (BGÖS), net bugünkü değer (NBD) ve iç karlılık oranı (İKO) metodlarını kullanmaktadır. RETSscreen iletim ve dağıtım kayıplarını da hesaba katmaktadır (Weida, Kumar ve Madlener, 2016).

RETSscreen finansal fizibilite ve projenin sera gazı emisyonu azaltma tahminleri için, analizi yapılan enerji santralinde üretilen yıllık enerji miktarı tahminini kullanır. Temiz enerji santralinde üretilen enerji miktarını ve aynı oranda enerjinin fosil kaynaklardan üretilmesi durumunda ortaya çıkacak CO<sub>2</sub> miktarını ton(t) cinsinden hesaplar. Sonuç olarak metan ve azot oksit emisyonları eşdeğer tCO<sub>2</sub> miktarı cinsinden hesaplanır ve temiz enerji santrali sayesinde ne kadar CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltıldığı belirtilmektedir. Şekil 2.12'de RETSscreen emisyon analizi modülü verilmiştir (Weida ve Diğerleri, 2016)



Şekil 2.12. RETSscreen emisyon analizi modülü

RETSscreen programı kullanılarak yapılan bazı gerçek uygulamalar Őu Şekildedir.

- Empire State binasının enerji verimliliği tedbirlerinin iyileŐtirilmesi (NRC, 2009).
- 3M Kanada'nın üretim tesislerinde (3M Kanada, 2019)
- İrlanda rüzgar enerjisi endüstrisi tarafından potansiyel yeni projelerin analizi (RETSscreen, 2007).



### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Rüzgar enerjisi santralleri maliyetinin büyük bir kısmı kurulum aşamasında yapılmaktadır. Bu sebeple yapılan fizibilite çalışmaları karlılığın değerlendirilmesi açısından çok kritik bir yere sahiptir. Kurulacak rüzgar çiftlikleri bilgisayar programları ile bire bir simule edilerek üretilecek enerji tahmin edilmeye çalışılır. Hata oranının azaltılması amacıyla fizibilite raporları meteoroloji istasyonundan alınan veriler yapılan analizler dışında rüzgar türbinlerinin kurulacağı bölgeye rüzgar ölçüm istasyonları kurularak bölge en az bir süre ile ölçülen gerçek ortam rüzgar hızı değerleri analiz edilir.

Bu çalışmada bölgede yıllık elektrik enerjisi üretimi bilinen bir rüzgar çiftliği referans olarak kabul edilmiştir ve WAsP programı yardımı ile bire bir simule edilmiştir. Simülasyon sırasında kullanılan veriler, araştırmanın yapıldığı Belen ilçesindeki Belen Meteoroloji İstasyonunda kayıt altına alınan saatlik rüzgar hızlarıdır. Referans rüzgar çiftliğinde iki adet rüzgar çiftliği seçilip bu rüzgar türbinlerinin meteoroloji istasyonunun 2013-2016 yılları arasında kayıt altına aldığı veriler ile analiz edilmiştir. Aynı zaman aralığında bu iki türbinin gerçekte ürettiği elektrik enerjisi ile karşılaştırılmıştır. Bu sayede teorik çalışmanın gerçek saha koşullarındaki üretim ile karşılaştırma olanağı sağlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında hata oranları hesaplanan bu çalışma sayesinde bölge analiz edilerek verimli olduğuna karar verilen Güzelyayla Bölgesine 10 adet rüzgar türbini yerleştirilmiş ve bölgenin fizibilite raporu hazırlanmıştır. Üretilen enerji hata oranı göz önünde bulundurularak geri ödeme süresi tahmin edilmiştir.

#### 3.1. Belen Bölgesinin Rüzgar Enerji Potansiyelinin İncelenmesi

Bölgenin topografik yapısı ( yükselti haritası, pürüzlülük sınıfı, vs.) , türbin ve meteoroloji istasyonu konum bilgileri, meteoroloji istasyonunda yerden 10 m yüksekliğinde kayıt altına alınan veriler WAsP programına girilerek 2013 - 2016 yıllarının ayrı ayrı bölgenin rüzgar atlası oluşturulmuştur. 2016 yılı ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Rüzgar atlasında programın belirli yüksekliklerdeki rüzgar hızı ve Weibull şekil ve ölçek parametrelerinin varsayılan pürüzlülük değerleri ile değişimi gösterilmektedir. Meteoroloji istasyonunun rakımı 612 m'dir. Bu konumda sıcaklık 17,26 °C, ortalama basınç 96,409 Pa ve havanın yoğunluğu 1,129 kg/m<sup>3</sup> olarak kabul edilmiştir. Çalışmaya referans olan B6 ve B16 türbinleri için 2013-2016 yılları arasındaki veriler ayrı ayrı programa girilmiş ve bu yıllarda rüzgarın

hangi konumda ne sıklıkla estiği tespit edilmiştir. Saha ortalamasına en yakın türbin olan B6 türbinin dört yıl için ayrı ayrı sektör bazında esme sıklıklarına karşılık gelen ortalama rüzgar hızları, weibull parametreleri, ve güç yoğunluğu Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yıllara göre sektör bazında rüzgar esme sıklığı, Weibull parametreleri, ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu, a. 2013 yılı, b. 2014 yılı, c. 2015 yılı d. 2016 yılı

a) 2013 Yılı (80 m)

B6 - Sektör		Rüzgar İstatistikleri			2013	P ( $\rho=1,109$ )
No	Açı [°]	Frekans [%]	Weibull-c [m/s]	Weibull-k	Hız [m/s]	Güç Yoğ. [W/m <sup>2</sup> ]
1	0	11,50	14,80	4,11	13,39	1.629
2	30	1,50	7,90	1,24	7,33	818
3	60	4,00	9,30	2,21	8,20	532
4	90	5,50	6,90	1,96	6,09	244
5	120	8,90	5,90	1,62	5,29	200
6	150	13,60	8,40	1,96	7,42	441
7	180	8,80	11,10	2,23	9,79	899
8	210	2,40	5,40	2,15	4,74	105
9	240	4,10	6,10	3,30	5,49	123
10	270	6,50	6,30	3,86	5,69	128
11	300	13,20	7,60	4,57	6,90	215
12	330	20,00	10,20	3,93	9,24	543
Tüm Sektörler		100			8,12	544

b) 2014 Yılı (80 m)

B6 - Sektör		Rüzgar İstatistikleri			2014	P ( $\rho=1,109$ )
No	Açı [°]	Frekans [%]	Weibull-c [m/s]	Weibull-k	Hız [m/s]	Güç Yoğ. [W/m <sup>2</sup> ]
1	0	12,60	15,00	3,76	13,56	1.748
2	30	1,30	6,60	1,31	6,07	421
3	60	3,60	7,40	1,99	6,57	301
4	90	5,30	6,00	2,06	5,35	158
5	120	9,00	6,30	1,99	5,58	185
6	150	12,60	8,30	2,27	7,33	372
7	180	7,70	10,50	2,47	9,33	715
8	210	2,80	5,70	2,00	5,07	138
9	240	4,90	6,20	3,21	5,59	131
10	270	6,90	6,10	3,76	5,51	117
11	300	12,80	7,20	4,21	6,58	192
12	330	20,50	10,30	3,45	9,22	569
Tüm Sektörler		100			7,98	523



Çizelge 3.1. (Devam) Yıllara göre sektör bazında rüzgar esme sıklığı, Weibull parametreleri, ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu, a. 2013 yılı, b. 2014 yılı, c. 2015 yılı d. 2016 yılı

c) 2015 Yılı (80 m)

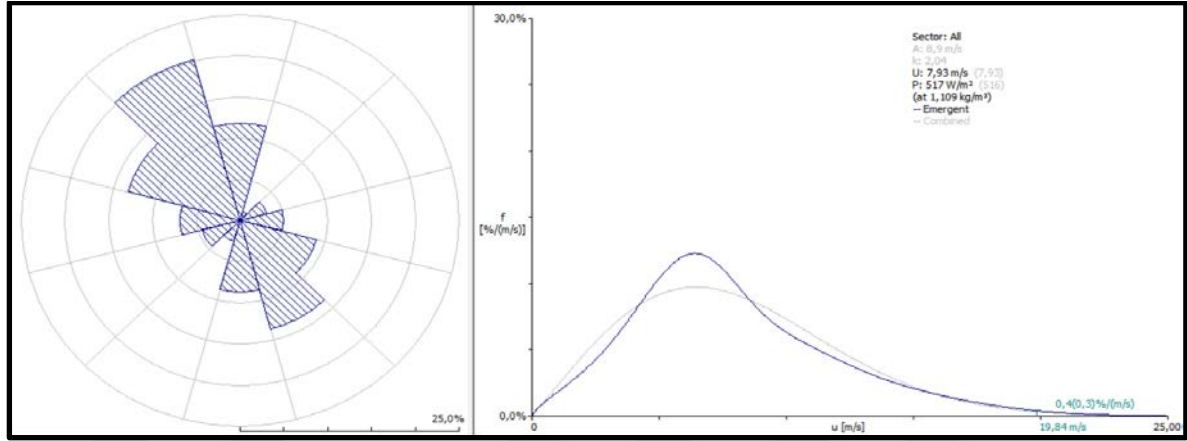
B6 - Sektör		Rüzgar İstatistikleri			2015	P ( $\rho=1,109$ )
No	Açı [°]	Frekans [%]	Weibull-c [m/s]	Weibull-k	Hız [m/s]	Güç Yoğ. [W/m <sup>2</sup> ]
1	0	13,70	14,60	3,83	13.23	1.613
2	30	1,40	6,40	1,80	5.69	218
3	60	3,60	7,20	2,12	6.35	256
4	90	5,40	5,90	1,99	5.21	151
5	120	9,40	6,00	1,71	5.36	194
6	150	13,50	8,40	2,01	7.43	431
7	180	8,50	11,00	2,27	9.72	868
8	210	2,80	5,90	2,10	5.25	146
9	240	5,00	6,60	3,59	5.96	151
10	270	6,40	6,10	4,01	5.53	115
11	300	10,80	7,00	4,10	6.37	176
12	330	19,50	10,10	3,39	9.06	545
Tüm Sektörler		100			7,99	536

d) 2016 Yılı (80 m)

B6 - Sektör		Rüzgar İstatistikleri			2016	P ( $\rho=1,109$ )
No	Açı [°]	Frekans [%]	Weibull-c [m/s]	Weibull-k	Hız [m/s]	Güç Yoğ. [W/m <sup>2</sup> ]
1	0	11,80	13,90	3,69	12.55	1.394
2	30	1,20	6,90	1,33	6.32	462
3	60	3,20	7,50	1,87	6.66	337
4	90	5,00	5,90	1,79	5.26	174
5	120	9,10	6,00	1,63	5.34	204
6	150	13,60	9,20	2,08	8.14	550
7	180	8,60	12,40	2,42	11.01	1.198
8	210	2,60	6,40	2,76	5.69	150
9	240	4,50	6,50	3,47	5.87	147
10	270	6,80	6,10	4,14	5.51	113
11	300	13,30	7,00	4,43	6.35	169
12	330	20,30	9,40	3,47	8.49	444
Tüm Sektörler		100			7,93	517

Dört yıllık rüzgar esme yönleri ve rüzgar sıklıkları incelendiğinde tüm yıllarda hakim rüzgar yönünün sektör 12 (330°) olduğu görülmektedir. Bu sektörde en yüksek frekansın 2014 yılında %20,5 olarak gerçekleştiği görülmektedir. En yüksek rüzgar hızının dolayısıyla güç yoğunluğunun olduğu yön ise Sektör 1'dir. Bu sektörde en yüksek rüzgar hızı 2014 yılında 13,56 m/s, güç yoğunluğu ise 1748 W/m<sup>2</sup> olarak gerçekleşmiştir. 2016

yılına ait hakim rüzgar yönünü ve rüzgar hızlarına göre frekans eğrisi grafiği Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. 2016 Yılı hakim rüzgar yönü ve rüzgar hızlarına göre frekans eğrisi grafiği

WASP programında her yıla ait rüzgar atlasları ayrı ayrı oluşturulmuştur. Bu rüzgar atlası sayesinde istenilen yükseklikte ve farklı yüzey pürüzlülük değerleri için hesaplamalar yapılabilmektedir. Çizelge 3.2’de analiz bölgesine ait 2016 yılı rüzgar atlası verileri gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Belen bölgesi 2013-2016 yılları rüzgar atlası, a. 2013 yılı, b. 2014 yılı, c. 2015 yılı, d. 2016 yılı

a. 2013 Yılı

<b>2013</b>	Yükseklik [m]	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m	1,50 m
10.0	Weibull-c[m/s]	6,72	4,86	4,25	3,36	2,24
	Weibull-k	1,98	1,81	1,85	1,88	1,92
	Rüzgar [m/s]	5,96	4,32	3,78	2,98	1,99
25.0	Weibull-c[m/s]	7,37	5,81	5,24	4,42	3,4
	Weibull-k	2,03	1,91	1,94	1,97	2
	Rüzgar [m/s]	6,53	5,15	4,65	3,92	3,01
50.0	Weibull-c[m/s]	7,93	6,7	6,13	5,33	4,35
	Weibull-k	2,1	2,06	2,07	2,09	2,12
	Rüzgar [m/s]	7,02	5,94	5,43	4,72	3,85
100.0	Weibull-c[m/s]	8,6	7,89	7,26	6,42	5,44
	Weibull-k	2,13	2,25	2,25	2,25	2,23
	Rüzgar [m/s]	7,61	6,99	6,43	5,69	4,82
200.0	Weibull-c[m/s]	9,43	9,57	8,81	7,85	6,79
	Weibull-k	2,09	2,24	2,23	2,22	2,18
	Rüzgar [m/s]	8,35	8,48	7,8	6,95	6,02

Çizelge 3.2. (Devam) Belen bölgesi 2013-2016 yılları rüzgar atlası, a. 2013 yılı, b. 2014 yılı, c. 2015 yılı, d. 2016 yılı

b. 2014 yılı

2014	Yükseklik [m]	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m	1,50 m
10.0	Weibull-c[m/s]	6,59	4,76	4,17	3,29	2,2
	Weibull-k	2,01	1,85	1,87	1,91	1,95
	Rüzgar [m/s]	5,84	4,23	3,7	2,92	1,95
25.0	Weibull-c[m/s]	7,23	5,69	5,14	4,33	3,33
	Weibull-k	2,05	1,95	1,97	1,99	2,03
	Rüzgar [m/s]	6,4	5,05	4,55	3,84	2,95
50.0	Weibull-c[m/s]	7,77	6,57	6,01	5,22	4,26
	Weibull-k	2,13	2,1	2,1	2,12	2,14
	Rüzgar [m/s]	6,88	5,82	5,32	4,62	3,78
100.0	Weibull-c[m/s]	8,43	7,73	7,12	6,29	5,34
	Weibull-k	2,16	2,29	2,28	2,27	2,24
	Rüzgar [m/s]	7,46	6,85	6,31	5,57	4,73
200.0	Weibull-c[m/s]	9,24	9,39	8,64	7,69	6,67
	Weibull-k	2,13	2,29	2,27	2,24	2,21
	Rüzgar [m/s]	8,18	8,31	7,65	6,81	5,9

c. 2015 yılı

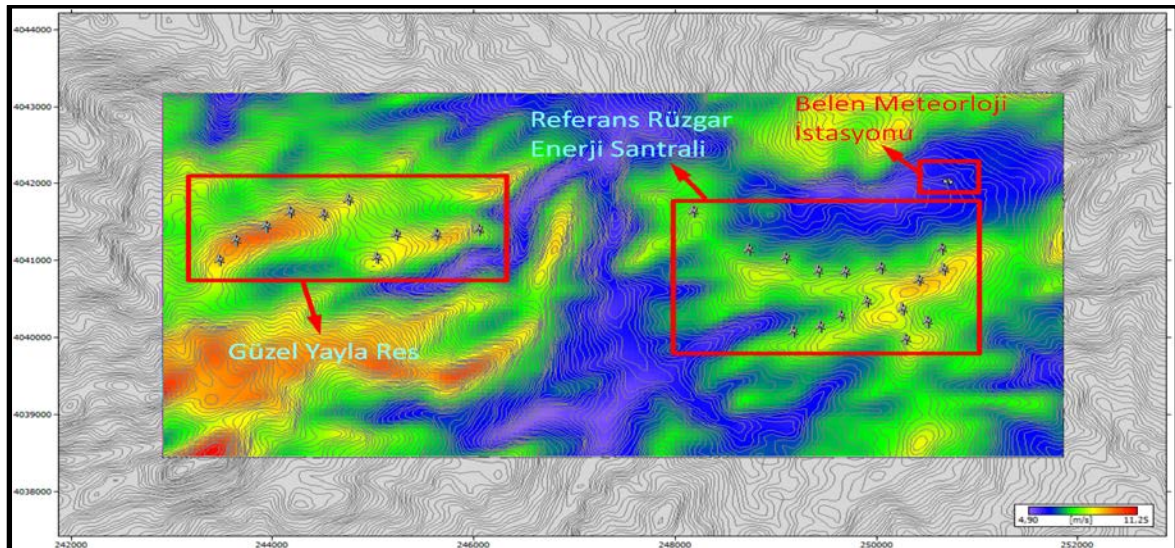
2015	Yükseklik [m]	0.00 m	0.03 m	0.10 m	0.40 m	1.50 m
10.0	Weibull-c[m/s]	6,58	4,75	4,16	3,29	2,2
	Weibull-k	1,98	1,81	1,85	1,88	1,92
	Rüzgar [m/s]	5,83	4,22	3,69	2,92	1,95
25.0	Weibull-c[m/s]	7,21	5,68	5,13	4,32	3,33
	Weibull-k	2,03	1,92	1,94	1,96	2
	Rüzgar [m/s]	6,39	5,04	4,55	3,83	2,95
50.0	Weibull-c[m/s]	7,76	6,57	6,01	5,22	4,26
	Weibull-k	2,1	2,06	2,08	2,09	2,12
	Rüzgar [m/s]	6,88	5,82	5,32	4,62	3,78
100.0	Weibull-c[m/s]	8,42	7,74	7,12	6,3	5,34
	Weibull-k	2,13	2,24	2,24	2,23	2,21
	Rüzgar [m/s]	7,46	6,85	6,31	5,58	4,73
200.0	Weibull-c[m/s]	9,24	9,4	8,66	7,71	6,68
	Weibull-k	2,08	2,22	2,21	2,19	2,16
	Rüzgar [m/s]	8,19	8,33	7,67	6,83	5,92

Çizelge 3.2. (Devam) Belen bölgesi 2013-2016 yılları rüzgar atlası, a. 2013 yılı, b. 2014 yılı, c. 2015 yılı, d. 2016 yılı

d. 2016 yılı

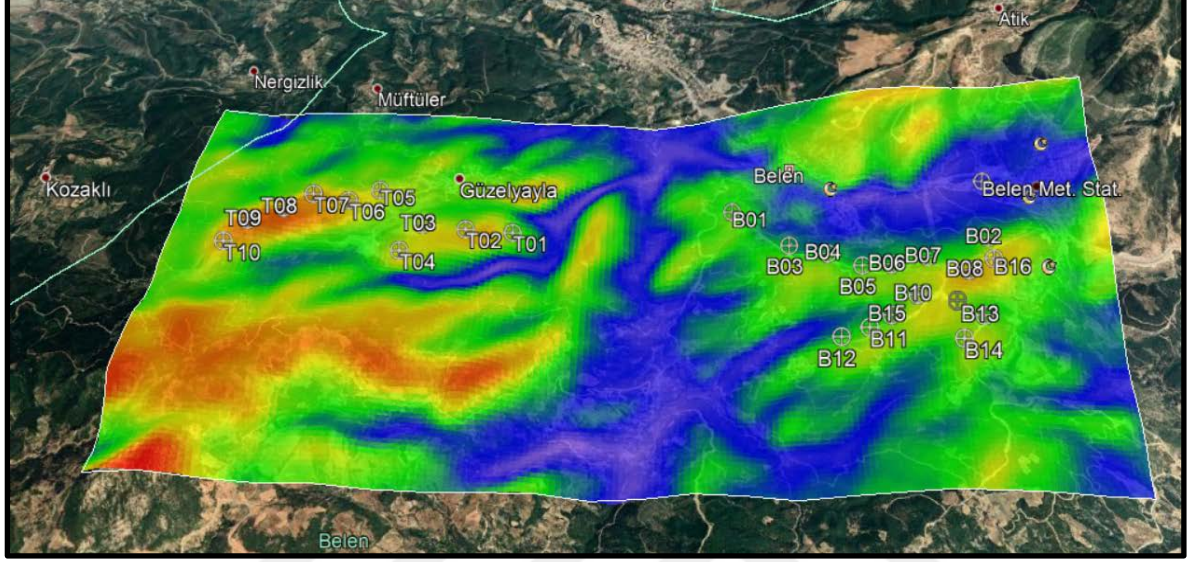
2016	Yükseklik [m]	0.00 m	0.03 m	0.10 m	0.40 m	1.50 m
10.0	Weibull-c[m/s]	6,52	4,71	4,13	3,26	2,18
	Weibull-k	1,97	1,80	1,83	1,87	1,92
	Rüzgar [m/s]	5,78	4,19	3,67	2,90	1,94
25.0	Weibull-c[m/s]	7,15	5,64	5,09	4,29	3,30
	Weibull-k	2,02	1,90	1,93	1,96	2,00
	Rüzgar [m/s]	6,34	5,00	4,52	3,81	2,93
50.0	Weibull-c[m/s]	7,70	6,51	5,96	5,18	4,24
	Weibull-k	2,10	2,06	2,07	2,09	2,12
	Rüzgar [m/s]	6,82	5,77	5,28	4,59	3,75
100.0	Weibull-c[m/s]	8,35	7,67	7,07	6,25	5,31
	Weibull-k	2,13	2,25	2,25	2,24	2,22
	Rüzgar [m/s]	7,39	6,80	6,26	5,54	4,70
200.0	Weibull-c[m/s]	9,16	9,32	8,58	7,65	6,63
	Weibull-k	2,08	2,23	2,22	2,20	2,17
	Rüzgar [m/s]	8,11	8,25	7,60	6,77	5,87

2016 yılı rüzgar atlası irdelendiğinde WASP programı meteoroloji istasyonundaki 10 metre ölçüm direğindeki rüzgar hız ölçümlerini varsayılan yüksekliklere (25 m, 50 m, 100 m, 200 m) taşımaktadır ve bu veriler rüzgar atlasında belirtilmektedir. Ortalama hız değerleri pürüzlülüğün 0,000 m olduğu alanda 10 metrede 5,78 m/s, 100 metrede 7,39 m/s ve 200 metrede 8,11 olduğu görülmektedir. Pürüzlülük değerleri arttıkça ortalama rüzgar hızları düşmektedir. Çalışmada kullanılan rüzgar türbini -Vestas V90 80m 50Hz- 80 m hub yüksekliğine sahiptir. Bölgenin rüzgar hızı değerleri bu yükseklikte ortalama 7,3 m/s'dir. Bölgenin 80 metre hub yüksekliğindeki rüzgar hızı atlası Harita 3.1'de verilmiştir.



Harita 3.1. Belen ilçesi 2016 yılı 80 m. Rüzgar hızı atlası

Analiz edilen bölgenin en düşük rüzgar hızı değeri “244613(m), 4045052 (m)” konumunda 4,90 m/s, en yüksek rüzgar hızı “243105(m), 4038292(m)” konumunda 11,25 m/s’dir. Bölgenin ortalama rüzgar hızı 7,3 m/s olarak bulunmuştur. 2016 yılı rüzgar hızı atlasının uydu görünümü ve rüzgar türbini numaraları Harita 3.2’de verilmiştir.



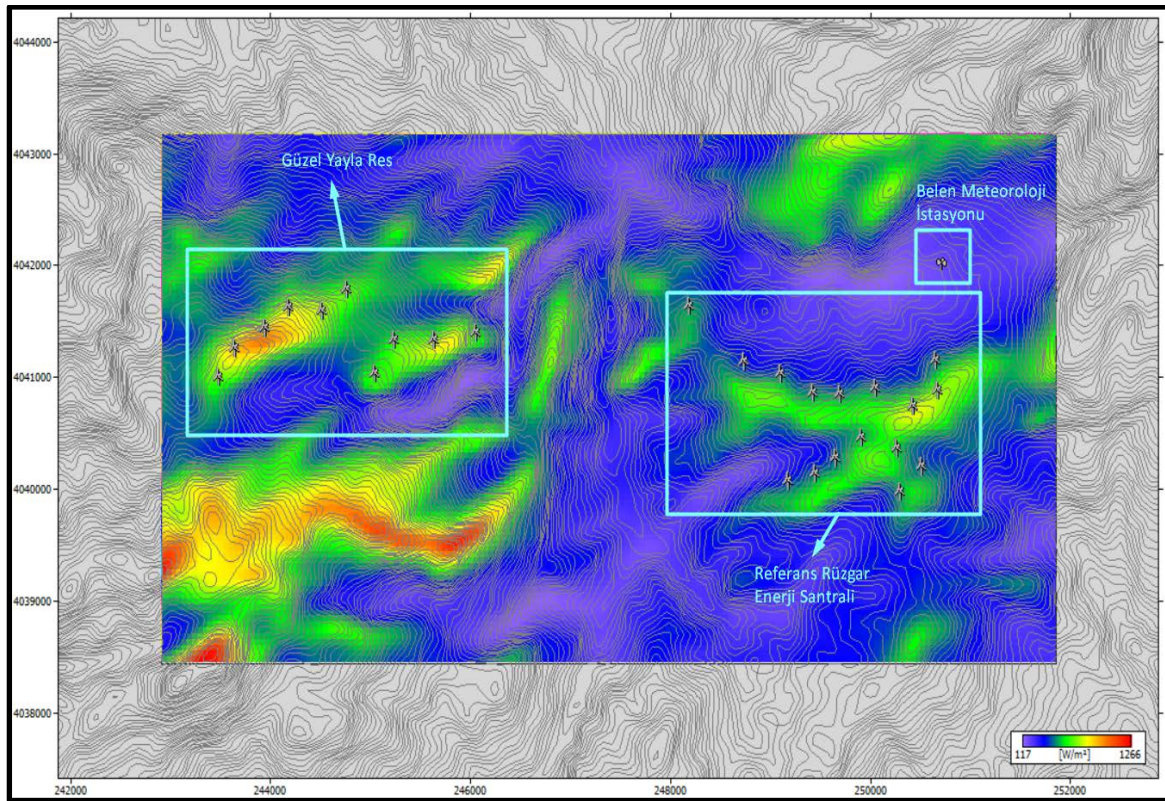
Harita 3.2. 2016 yılı rüzgar hızı atlasının uydu görünümü (Google Earth, 2019)

“T” kodlamasıyla belirtilen türbinler (T01-T10) Güzelyayla bölgesinde fizibilitesi yapılacak teorik çalışmada yerleştirilen türbinlerini ifade etmektedir. “B” harfi kodlamasıyla belirtilen türbinler (B01-B16) ise bölgede hali hazırda kurulu bulunan ve yıllık üretim değerleri bilinen türbinlerdir. Bu rüzgar türbinlerinden B6 ve B16 Güzelyayla bölgesinde yapılacak teorik çalışmaya referans olarak alınmıştır. Belen ilçesindeki referans türbinlerin teorik çalışmasıyla gerçek üretim değerleri karşılaştırılıp hata oranları Güzelyayla bölgesindeki teorik çalışmaya referans olarak alınacaktır. Bu sayede Güzelyayla bölgesinin fizibilitesi daha güvenli şekilde oluşturulmaya çalışılacaktır. Referans rüzgar türbinlerinin konumu, rakım bilgileri, hava yoğunluğu ve 2016 yılı için ortalama hız, Weibull parametreleri ve güç yoğunluğu Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Referans Türbin 2016 yılı verileri.

Türbin No	Konum (m)	Rakım (m)	H (m)	Hava Yoğ. (kg/m <sup>3</sup> )	A (m/s)	k	U (m/s)	E (W/m <sup>2</sup> )
B06	(249708, 4040793)	724,3	80	1,109	8,9	2,04	7,93	516
B16	(250686, 4040816)	773,1	80	1,104	10,3	2,19	9,09	725

Çalışmaya referans olarak seçilen türbinlerden B06 referans türbini rüzgar enerji santrali sahasındaki türbinlerin enerji üretiminin ortalamasına en yakın rüzgar türbindir. B16 ise sahadaki türbinler içinde en yüksek kapasiteye sahip türbindir. Burada “h” hub yüksekliği, c Weibull ölçek parametresi, k şekil parametresi, U ortalama rüzgar hızı “E” ise güç yoğunluğudur. B6 türbininin bulunduğu konumda ortalama hız 2016 yılı için 7,93 m/s olup güç yoğunluğu 516 W/m<sup>2</sup>’dir. B16 türbinin bulunduğu konumda ortalama hız 2016 yılında 9,09 m/s ve güç yoğunluğu 725 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Bölgenin 2016 yılı güç yoğunluğu haritası Harita 3.3.’de verilmiştir.



Harita 3.3. Belen ilçesi 2016 yılı güç yoğunluğu atlası

2016 yılında bölgenin en düşük güç yoğunluğu değeri “245954 (m), 4040966 (m)” konumunda 117 W/m<sup>2</sup>, en yüksek güç yoğunluğu “243354 (m), 4038470 (m)” konumunda 1266 W/m<sup>2</sup>’dir. Analiz alanının ortalama güç yoğunluğu ise 407 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur.

Emre amade katsayısı (EAK), türbinlerin çalışma yılı boyunca sistemden veya mekanik problemlerden kaynaklı duruşlarının eksiltilmesiyle türbinin net çalışma süresini temsil etmektedir. Çizelge 3.4’de referans türbinlerin 2013-2016 yılları arasındaki emre amade katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3.4. Referans türbinlerin 2013-2016 yıllarındaki emre amade katsayıları

EAK	EAK 2013	EAK 2014	EAK 2015	EAK 2016
B06	99,27%	99,62%	99,15%	96,57%
B16	99%	99,50%	99,41%	98,97%

WAsP programı türbin analizlerini yaparken, emre amade katsayısını ön göremediğinden, türbinlerin ön görülemeyen arızalardan dolayı duruş olmadan (%100) çalışması durumunda üreteceği enerji miktarını vermektedir. Teorik değerler ile gerçek üretim değerleri karşılaştırılmasının doğru yapılabilmesi için, gerçek değerlerinde teorik değerler gibi hiç beklenmeyen hatalardan kaynaklı duruşu olmamış gibi düşünülmüş ve gerçek değerlerin EAK'nı %100'e yükseltilmiştir. Çizelge 3.5'de B06 referans türbinin ve Çizelge 3.6'da B16 türbininin 2013-2016 yılları arasında gerçekleşen gerçek üretim değerleri ile çalışma sonucu bulunan teorik üretim değerleri karşılaştırılmış, mutlak ve bağıl hataları çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 3.5. B06 türbinin 2013-2016 yılları arasında gerçekleşen gerçek üretim değerlerinin çalışmada bulunan teorik değerler ile karşılaştırılması

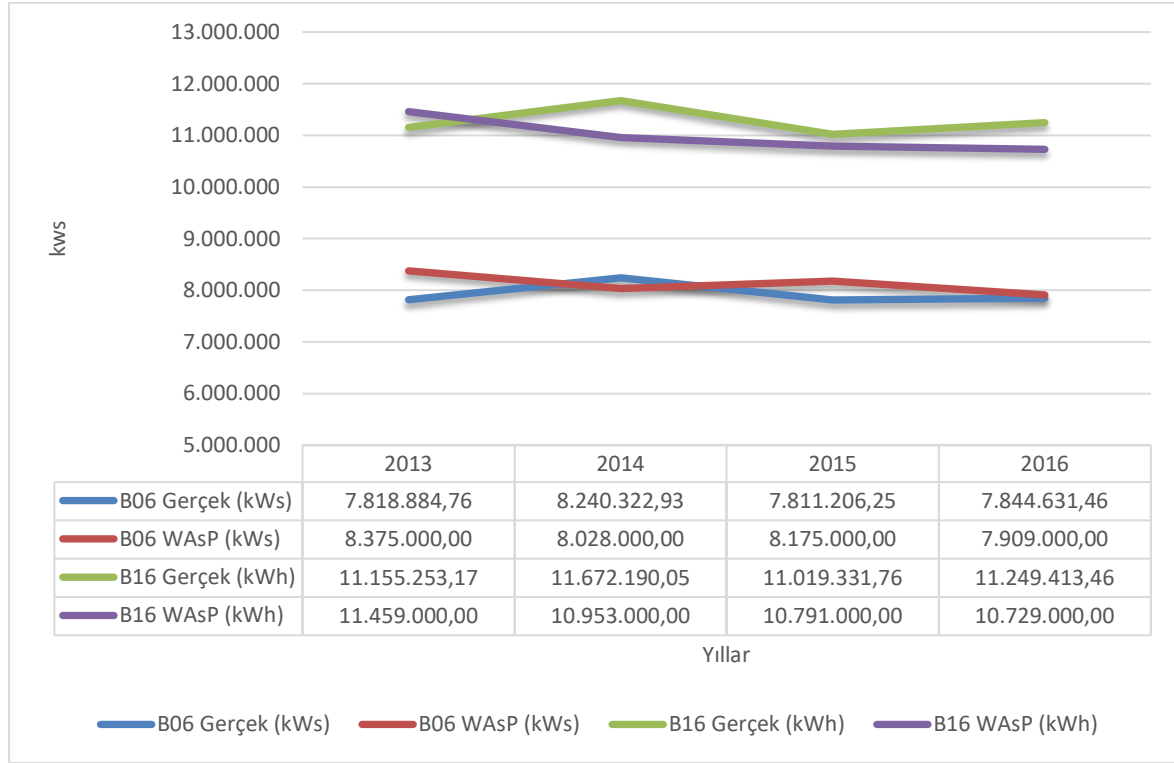
B06	2013	2014	2015	2016
Gerçek (kWs)	7 818 884,76	8 240 322,93	7 811 206,25	7 844 631,46
Teorik (kWs)	8 375 000,00	8 028 000,00	8 175 000,00	7 909 000,00
Mutlak Hata (kWs)	556 115,24	212 322,93	363 793,75	64 368,54
Bağıl Hata (%)	7,11%	2,58%	4,66%	0,82%

Çizelge 3.6. B16 türbinin 2013-2016 yılları arasında gerçekleşen gerçek üretim değerlerinin çalışmada bulunan teorik değerler ile karşılaştırılması

B16	2013	2014	2015	2016
Gerçek (kWh)	11 155 253,17	11 672 190,05	11 019 331,76	11 249 413,46
Teorik (kWh)	11 459 000,00	10 953 000,00	10 791 000,00	10 729 000,00
Mutlak Hata (kWh)	303 746,83	719 190,05	228 331,76	520 413,46
Bağıl Hata (%)	2,72%	6,16%	2,07%	4,63%

B06 türbininde gerçek üretilen enerji miktarı ile teorik çalışma sonucu türbinde üretilen enerji miktarı karşılaştırıldığında en büyük yanılmanın negatif yönde %,7,11 ile 2013 yılında gerçekleştiğini en doğru yaklaşımın ise negatif yönde %0,82 ile 2016 yılında ulaşıldığı

görülmektedir. B16 türbininde üretilen enerji miktarında ise en büyük yanılığ 2014 yılında pozitif yönde %6,16 olup, en doğru yaklaşım ise 2015 yılında pozitif yönde %2,07 olarak gerçekleşmiştir. Referans türbinlerde üretilen enerjinin teorik ve gerçek değerlerinin karşılaştırılması grafiği Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Referans türbinlerde üretilen gerçek ve teorik değerlerin karşılaştırılması

### 3.2. Güzelyayla Bölgesi Fizibilite Çalışması

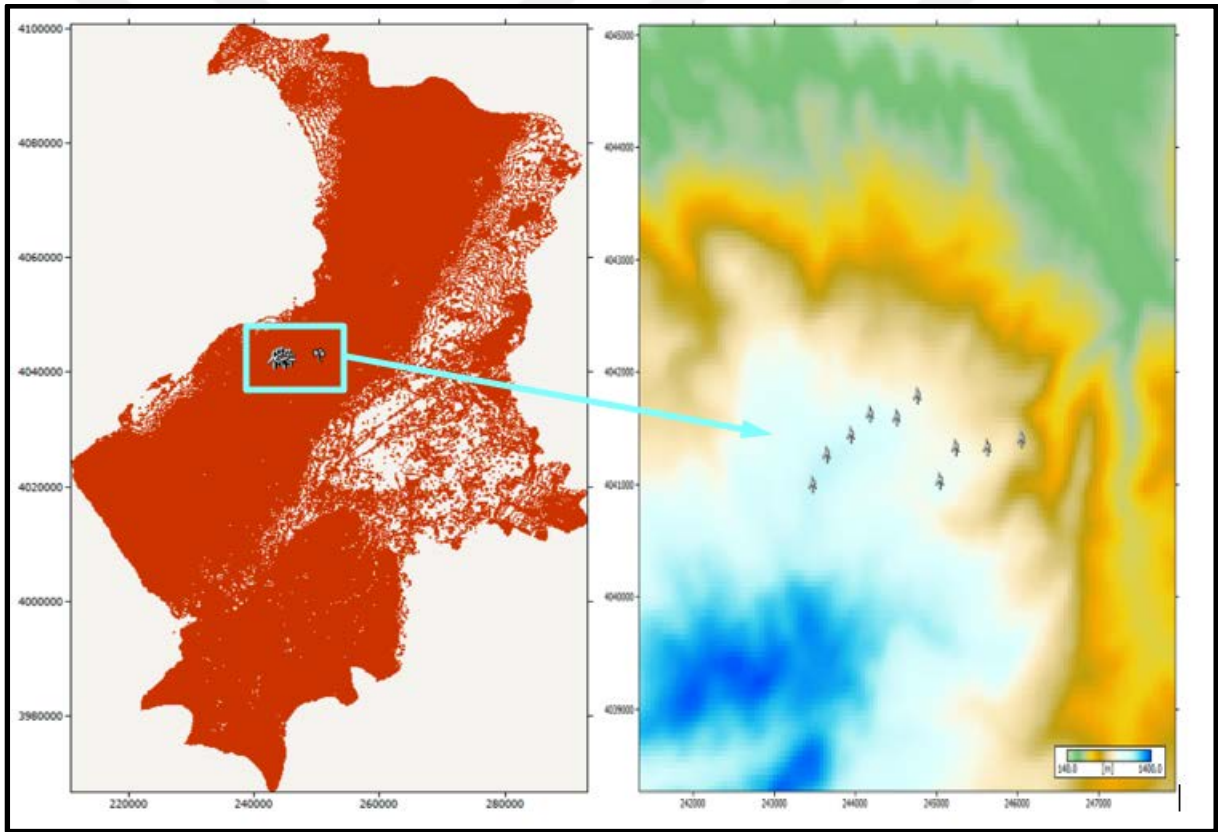
Çalışmada hazırlanan güç yoğunluğu atlası irdelendiğinde Güzelyayla yerleşiminin üst kısmında bulunan bölgenin rüzgar açısından verimli olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgeye 10 adet Vestas V90 80 m 50 hz rüzgar türbini yerleştirilerek bir fizibilite hazırlanmıştır. Yapılan çalışmada bölgeye toplam 30 MW’lık bir rüzgar çiftliği kurulacağı varsayılmıştır. Rüzgar verileri 2016 yılına ait meteoroloji istasyonundan alınan gerçek verilerdir. Kurulacak rüzgar enerji santrali yatırımının %30 luk kısmının öz sermayeden geri, kalan kısmının banka kredisi ile 15 yıl vadelenirileceği kabul edilmiştir. Çalışmanın birinci kısmında yapılan hata analizlerinin sonuçları yapılan fizibilite çalışmasına aktarılarak fizibilite çalışmasının doğruluğu artırılmaya çalışılmıştır. Fizibilite teknik ve finansal analiz olmak üzere iki aşamada değerlendirilmiştir. Teknik analiz sonucu yıllık üretim değerleri, güç yoğunluğu gibi değerler RETScreen programına işlenerek bölgenin finansal fizibilitesi çıkarılmıştır.



Aynı zamanda üretilen temiz enerji sayesinde karbon emisyonunun ne kadar azaltılacağı belirlenmiştir. Sonuç olarak Güzelyayla bölgesinde kurulması varsayılan RES geri ödeme süresi, maliyeti, emisyon değerleri ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

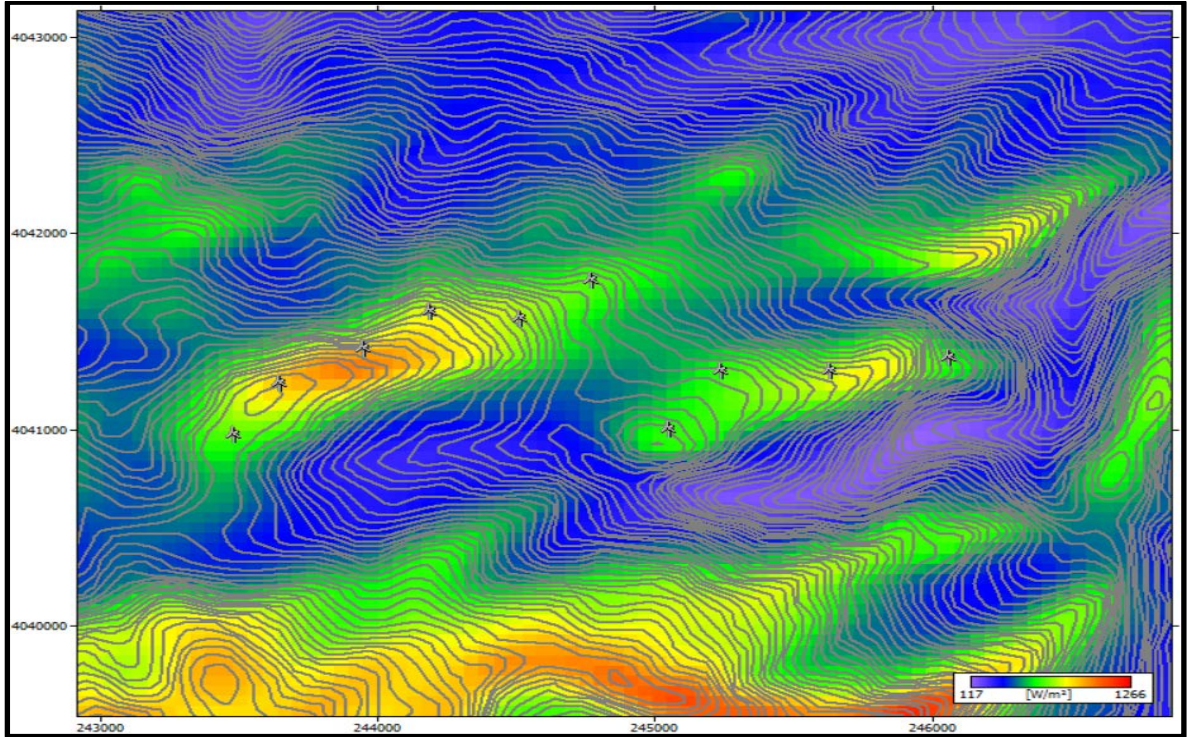
### 3.2.1. Teknik bulgular

Hatay'ın Belen ilçesine bağlı Güzelyayla yerleşkesine toplamda 30 MW'lık rüzgar enerji santrali kurulacağı varsayılmıştır. Türbinlerin yerleşimi çalışmada yapılan teknik analiz sonucu rüzgar potansiyeli yüksek bir alan seçilmiş ve bu alana türbinler yerleştirilmiştir. Türbinlerin yerleşiminin hatay haritası üzerinde gösterimi Harita 3.4'de verilmiştir.



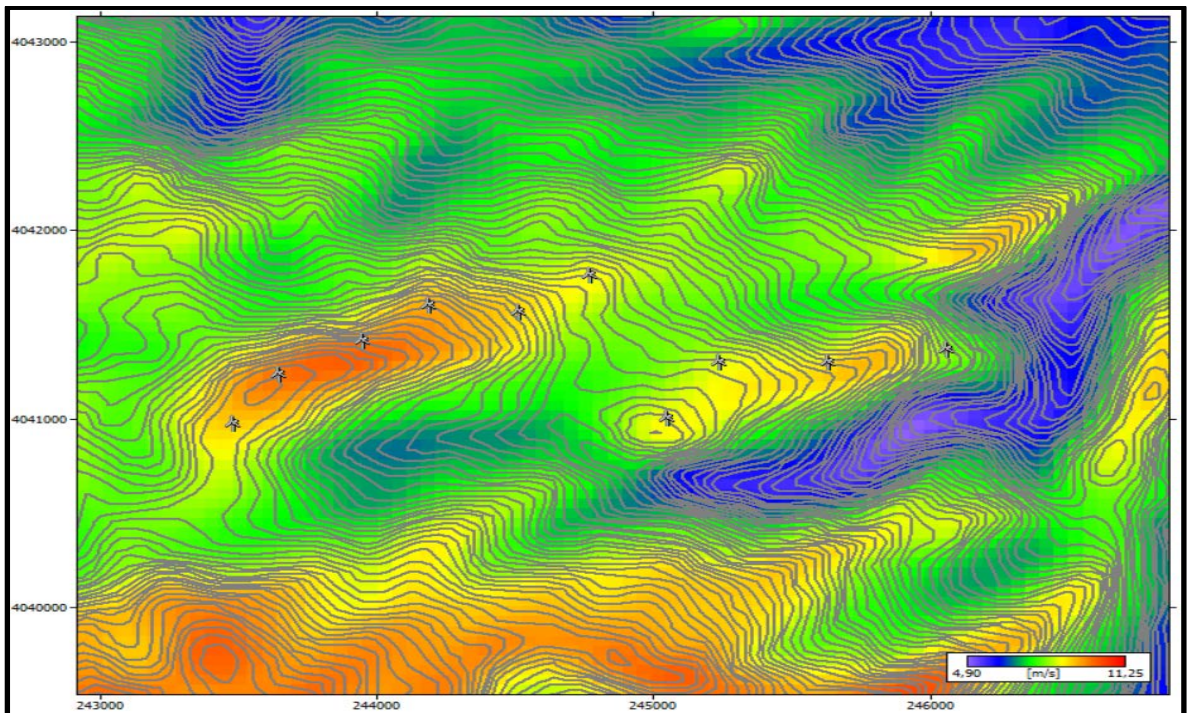
Harita 3.4 Güzelyayla RES'inin türbin yerleşiminin haritası

Türbinlerin yerleştirildiği alanı daha yakından irdelemek amacıyla bölgenin enerji potansiyeli haritası ve ortalama rüzgar hızı haritası çıkarılmaktadır. Hesaplamalar seçilen rüzgar türbini hub (merkez) yüksekliğinde yapılmaktadır. Çalışmada kullanılan türbinlerin hub yüksekliği 80 m'dir. Güzelyayla bölgesinin 80 m yüksekliğindeki rüzgar enerji potansiyeli atlası Harita 3.5'de verilmektedir. Analiz edilen bölgede en düşük güç yoğunluğu 117 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanırken en yüksek güç yoğunluğu ise 1266 W/m<sup>2</sup>'dir.



Harita 3.5. 2016 Yılı Güzelyayla bölgesi rüzgar enerjisi potansiyeli atlası (80 m)

Aynı bölgenin rüzgar hızı atlası ise Harita 3.6'da verilmiştir. 2016 yılına ait çıkarılan rüzgar hızı atlası incelendiğinde ortalama rüzgar hızları ise 4,90 m/s ile 11,25 m/s olarak değişmektedir.



Harita 3.6. 2016 Yılı Güzelyayla bölgesi ortalama rüzgar hızı atlası (80 m)

Rüzgar hızı atlası ve rüzgar enerjisi potansiyeli atlası irdelendiğinde 10 adet Vestas V90 80m türbin belli bir düzen içinde potansiyeli yüksek bölgelere yerleştirilmiştir. Çizelge 3.7’de yerleştirilen türbinlerin lokasyonu ve yerleştirildikleri konumdaki weibull parametreleri (c, k), ortalama rüzgar hızları ( $v$ ) ve güç yoğunlukları (E) verilmiştir.

Çizelge 3.7. Güzelyayla RES’de bulunan türbinlerin konum, ortalama hız ve güç yoğunluğu bulguları

Site	Lokasyon [m]	H [m]	c [m/s]	k	v [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T01	(246061,9, 4041334,0)	80	9,2	1,9	8,12	606
T02	(245638,7, 4041268,0)	80	10,2	2	9,05	768
T03	(245243,8, 4041268,0)	80	9,7	2,2	8,6	619
T04	(245055,8, 4040968,0)	80	9,8	2,3	8,71	613
T05	(244773,7, 4041729,0)	80	9,8	2,2	8,72	646
T06	(244519,8, 4041532,0)	80	10,1	2,1	8,97	716
T07	(244194,1, 4041566,0)	80	10,7	2,2	9,5	806
T08	(243951,6, 4041379,0)	80	11,2	2,1	9,95	961
T09	(243654,8, 4041203,0)	80	11,2	2,3	9,88	879
T10	(243485,5, 4040939,0)	80	10,2	2,5	9,03	620

10 adet rüzgar türbini içinde en yüksek rüzgar enerji potansiyeline sahip türbinin 961 W/m<sup>2</sup> güç yoğunluğuna sahip türbin olan T8’dir. En düşük güç yoğunluğu ise 606 W/m<sup>2</sup> ile T01 türbinidir. WAsP programı ile yapılan analiz sonucunda Çizelge 3.7’de belirtilen ortalama rüzgar hızına ve güç yoğunluğuna sahip türbinlerin net ve brüt olarak üretecekleri elektrik enerjisi hesaplanmıştır. Türbinlerin yükseklik verileri, bu yüksekliklerdeki hesaplanan hava yoğunlukları ve üretecekleri yıllık enerji miktarları Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Güzelyayla RES elektrik üretim miktarı sonuçları

No	Lokasyon [m]	Türbin	Rakım [m]	Hub Yüksekliği[m]	Hava Yoğunluğu[kg/m <sup>3</sup> ]	Net AEP [GWs]	Wake Loss [%]
T01	(246061,9, 4041334,0)	V90-3.0 MW VCS 50 Hz	739,1	80	1,108	8,799	1,24
T02	(245638,7, 4041268,0)	V90-3.0 MW VCS 50 Hz	855,3	80	1,096	10,526	2,64
T03	(245243,8, 4041268,0)	V90-3.0 MW VCS 50 Hz	905,6	80	1,09	9,485	4,82

Çizelge 3.8. (Devam) Güzelyayla RES elektrik üretim miktarı sonuçları

T04	(245055,8, 4040968,0)	V90-3.0 MW VCS 50 Hz	951,9	80	1,086	9,753	5,11
T05	(244773,7, 4041729,0)	V90-3.0 MW VCS 50 Hz	903	80	1,091	9,886	3,54
T06	(244519,8, 4041532,0)	V90-3.0 MW VCS 50 Hz	965,5	80	1,084	10,191	4,16
T07	(244194,1, 4041566,0)	V90-3.0 MW VCS 50 Hz	1023,9	80	1,078	11,375	3
T08	(243951,6, 4041379,0)	V90-3.0 MW VCS 50 Hz	1076,2	80	1,073	12,069	2,1
T09	(243654,8, 4041203,0)	V90-3.0 MW VCS 50 Hz	1119,4	80	1,068	12,314	1,37
T10	(243485,5, 4040939,0)	V90-3.0 MW VCS 50 Hz	1112,2	80	1,069	10,951	0,67

Türbinlerde üretilen yıllık elektrik enerjisi miktarları incelendiğinde en yüksek yıllık elektrik enerjinin üretildiği türbin 13,314 GWs ile T9 türbini olmuştur. T9 türbinin ölü akış bölgesi kayıpları T8 türbinine göre daha düşüktür. Bu yüzden T8 türbinin güç yoğunluğu daha yüksek olmasına rağmen üretilen enerji miktarı T9 türbininde daha fazla olmuştur. Burada türbin yerleşimi sırasında mikro konuşlandırmanın önemi açıkça görünmektedir. Çiftlikte üretilen toplam yıllık net enerji (Net AEP) 105,349 GWs olarak bulunmuştur. Ölü akış bölgesi kayıpları ise %2,82 olarak bulunmuştur. Güzelyayla RES'in de üretilen toplam yıllık net ve brüt elektrik enerjisi miktarı, türbinlerde üretilen maksimum, minimum ve ortalama enerji miktarı Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Güzelyayla RES'inde üretilen toplam enerji miktarı

Parametre	Toplam	Ortalama	Minimum	Maksimum
Net AEP [GWs]	105,349	10,535	8,799	12,314
Brüt AEP [GWs]	108,411	10,841	8,910	12,485
Ölü akış bölgesi kayıpları[%]	2,82	-	-	-

Bulunan enerji üretim miktarı ile kapasite faktörü hesaplandığında bulunan sonuç yaklaşık %40 olarak görülmektedir. Çalışmanın birinci kısmında gerçek değerler ile teorik çalışmanın

2016 yılı sonuçları karşılaştırıldığında bağıl hata %0,82 olarak bulunmuştur. Hata oranını diğer yıllarda daha yüksek olduğunu da düşünerek bağıl hatayı negatif yönde yaklaşık %5 olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla bağıl hatada göz önünde bulundurulduğunda yeni yıllık elektrik enerjisi üretim miktarı 100,082 GWs olmuştur. Dolayısıyla yeni kapasite faktörü ise %38 olarak düzeltilmiş ve RETScreen programına bu değerler girilmiştir. Teknik analiz sonucu finansal analiz için RETScreen programına işlenecek veriler Çizelge 3.10.'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Teknik analiz sonucu RETScreen programına işlenecek veriler

Parametre	Düzeltilme Katsayısı	Net AEP [GWs]	Kapasite Faktörü
Bulunan Değer	100%	105,349	%40
Düzeltilmiş Değer (%5)	95%	100,082	%38

### 3.2.2. Finansal bulgular

Finansal analiz RETScreen programı kullanılarak yapılmıştır. RETScreen programında rüzgar verilerinin alındığı bölge İskenderun ve rüzgar enerji santralinin bulunduğu bölge Güzelyayla yerleşimine yakın bir bölge seçilmiştir. Teknik analiz sonucu ulaşılan veriler programa girilmiştir. RETScreen programının da oluşturulan güç tesisinin enerji modeli Şekil 3.3'de verilmiştir.

Güç tesisi - Rüzgar türbini - Güzel Yayla RES

Yakıtlar ve çizelgeler  
Elektrik ve yakıtlar

Teknoloji  
Güç  
Rüzgar türbini

Özet  
Sistem dahil?  
Yakıtlar

Rüzgar  
Açıklama Rüzgar türbini  
Not

Seviye  
Seviye 1 Seviye 2 Seviye 3

Rüzgar - Seviye 1

Güç kapasitesi kW 30.000  
İmalatçı Vestas  
Model VESTAS V90-3.0 MW - 80M  
Türbin sayısı 10  
Kapasite faktörü % 38,083%  
İlk maliyetler \$/kW 1.877  
\$ 56.310.000  
İşletme ve Bakım maliyetleri (tasarrufları) \$/kW-yıl 40  
\$ 1.200.000  
Elektrik ihracat fiyatı Şebekeye verilen elektrik - yıllık  
\$/kWh 0,073  
Şebekeye verilen elektrik MWh 100.082  
Elektrik ihraç geliri \$ 7.305.995

Şekil 3.3 RETScreen güç tesisi enerji modeli

Programa 10 adet Vestas V90-3.0 MW - 80m marka türbin girilmiştir. Teknik analiz sonucu bulunan üretilen enerji 100 082 MW ve bu değere tekabül eden %38 kapasite faktörü değerleri girilmiştir. İlk maliyetler 1.877 \$/kW ve işletme maliyeti 40 \$/kW-yıl olarak girilmiştir (USEIA, 2016) Toplam ilk maliyetler 56 310 000 \$ hesaplanmıştır. Bu maliyetlerin %30'u öz varlıklardan %70 ise uzun vadeli döviz kredisi kullanılacağı kabul edilmiştir. Yıllık toplam işletme maliyeti ise 1 200 000 \$'dır. Elektrik ihraç geliri 29/12/2010 tarihli ve 6094 sayılı kanuna göre YEKDEM rüzgar enerjisine dayalı elektrik üretim tesislerine alım garantisi verilen 0,073 \$/kWs olan fiyat alınmıştır. Bu fiyattan alım garantisi 5946 sayılı kanun hükmüne göre 10 yıl süre ile alım garantisi verilen RES'i olduğu kabul edilmiştir. Yıllık toplam elektrik ihraç geliri 7 305 995 \$ olarak hesaplanmıştır. Programa girilen genel ekonomik veriler ve finansman bilgileri Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Genel ekonomik veriler ve finansman bilgileri

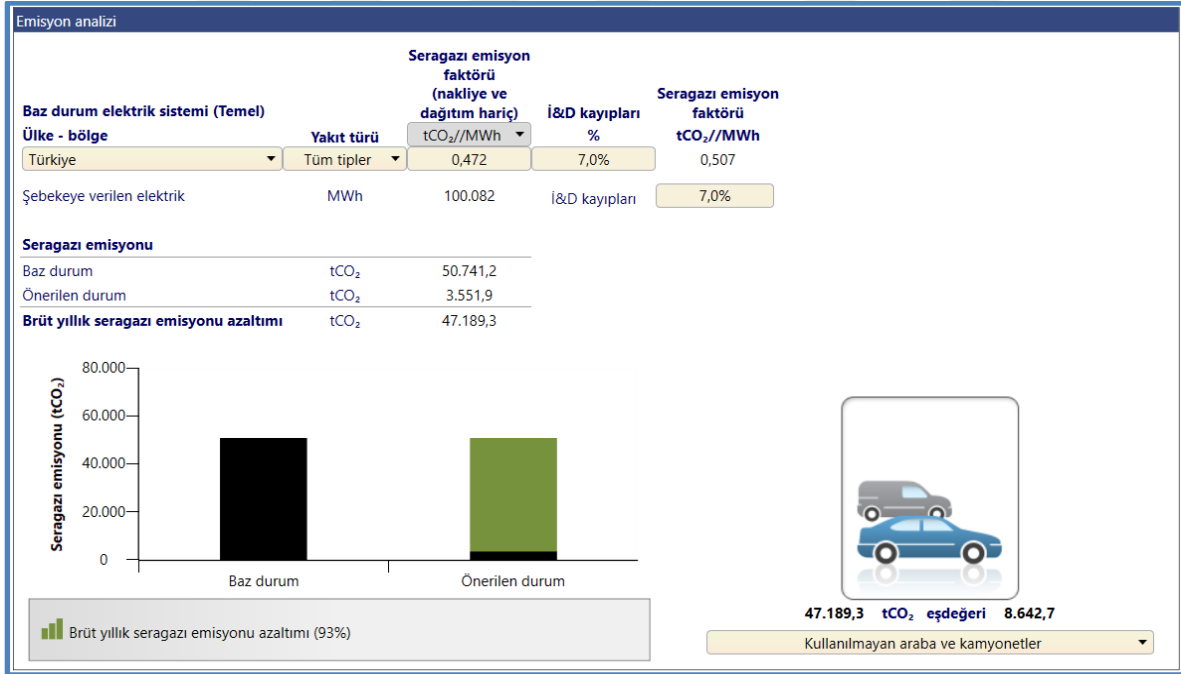
<b>Finansal Parametreler</b>	
<b>Genel</b>	
Enflasyon Oranı	%2
İskonto Oranı	%7
Yeniden Yatırım Oranı	%10
Proje Ömrü	25 yıl
<b>Finansman</b>	
Teşvikler ve Hibeler	-
Borç Oranı	70%
Borç	39 417 000,00 \$
Öz Varlık	16 893 000,00 \$
Toplam	56 310 000,00 \$
Borç Faiz Oranı	%7
Borç Vadesi	15 yıl
Borç Ödemeleri	4 058 483,00 \$/yıl

Teknik analiz sonucu bulunan yıllık elektrik üretimi 100,082 GWs'tir. Bu veri doğrultusunda elektrik ihraç geliri yıllık 7.305.995,00 \$ olarak bulunmuştur. Güzelyayla RES'inin yıllık cirosu Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Güzelyayla RES'nin yıllık cirosu

Yıllık Ciro	
<b>Elektrik İhraç Geliri</b>	
Şebekeye Verilen Elektrik	100 082 MWs
Elektrik İhraç Fiyatı	0,073 \$/kWs
Elektrik İhraç Geliri	7 305 995,00 \$

RETSscreen programı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile elektrik enerjisi üretiminin fosil kaynaklara oranla CO<sub>2</sub> emisyon oranını ne kadar azalttığını hesaplamaktadır. Güzelyayla RES bölgesinde yıllık 100,082 GWs elektrik üretilmekte ve bu elektrik üretiminde fosil yakıtlar kullanılmasıyla yaklaşık 50.741,2 tCO<sub>2</sub> emisyonu salınımı söz konusu olacaktı. RETScreen programı ile önerilen emisyon değerinin 3.551,9 tCO<sub>2</sub> olduğunu hesaplar ve aradaki farkın yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla 47.189,3 tCO<sub>2</sub> emisyonu azaltıldığı hesaplanmıştır. Şekil 3.4'de Güzelyayla RES bölgesinin RETScreen programı yardımıyla hesaplanan emisyon analizi verilmiştir.



Şekil 3.4. Güzelyayla RES bölgesinin RETScreen programı yardımıyla hesaplanan emisyon analizi

Güzelyayla RES'inde üretilen elektriğin fosil kaynaklardan üretilmesi durumunda yıllık 47.189 tCO<sub>2</sub>/yıl karbon emisyonu söz konusu olan yenilenebilir enerji tesisinden üretilen

elektrik enerjisinin kullanılması ile fosil yakıt kullanılmamış ve yıllık 8643 araç veya kamyonetin fosil yakıtlar kullanarak meydana getireceği CO<sub>2</sub> emisyonu kadar CO<sub>2</sub> emisyonu azaltılmıştır. Çizelge 3.13’de Sera gazı azaltımı analizi tablosu verilmiştir.

Çizelge 3.13. Sera gazı azaltımı tablosu

<b>Sera Gazı Azaltımı</b>	
Bürüt Sera Gazı Azaltımı	47 189 tCO <sub>2</sub> /yıl
Brüt Sera Gazı Azaltımı - 25 yıl	1 179 733 tCO <sub>2</sub>

Güzelyayla RES’nin toplam ilk yatırım maliyeti kW başına 1877\$ dolar olarak kabul edilmiştir ve 30 MW’lık tesisin toplam ilk yatırım maliyeti 56.310.000,00 \$ Amerikan doları olarak hesaplanmıştır. İşletme maliyeti 1.200.000,00 \$ olarak bulunmuştur. Sermayenin %70’i yabancı kaynaklardan döviz ödemeli krediden sağlandığı varsayılmıştır. 15 yıl vadeye bölünen kredinin toplam tutarı 39.417.000,00 \$ Amerikan dolarıdır. Çizelge 3.14’de Güzelyayla RES’inin maliyetleri, tasarrufları ve hasılatları tablosu verilmiştir. Kredi Yıllık ödeme tutarı 4.327.775,00 \$ Amerikan dolarıdır. İşletmenin kredi borçları dahil yıllık ödeme tutarı 5.527.775,00 \$’dır.

Çizelge 3.14’de Güzelyayla RES’nin maliyetleri, tasarrufları ve hasılatları tablosu

<b>Maliyetler / Tasarruflar / Hasılat</b>	
<b>İlk Maliyetler</b>	
İlk Maliyet	56 310 000,00 \$
<b>Yıllık Maliyetler ve Borç Ödemesi</b>	
İşletme ve Bakım Maliyetleri	1 200 000,00 \$/yıl
Borç Ödemeleri - 15 yıl	4 058 483,00 \$
<b>Toplam Yıllık Maliyetler</b>	<b>5 258 483,00 \$</b>
<b>Yıllık Tasarruflar</b>	
Elektrik İhraç Geliri	\$ 7 305 995,00 \$

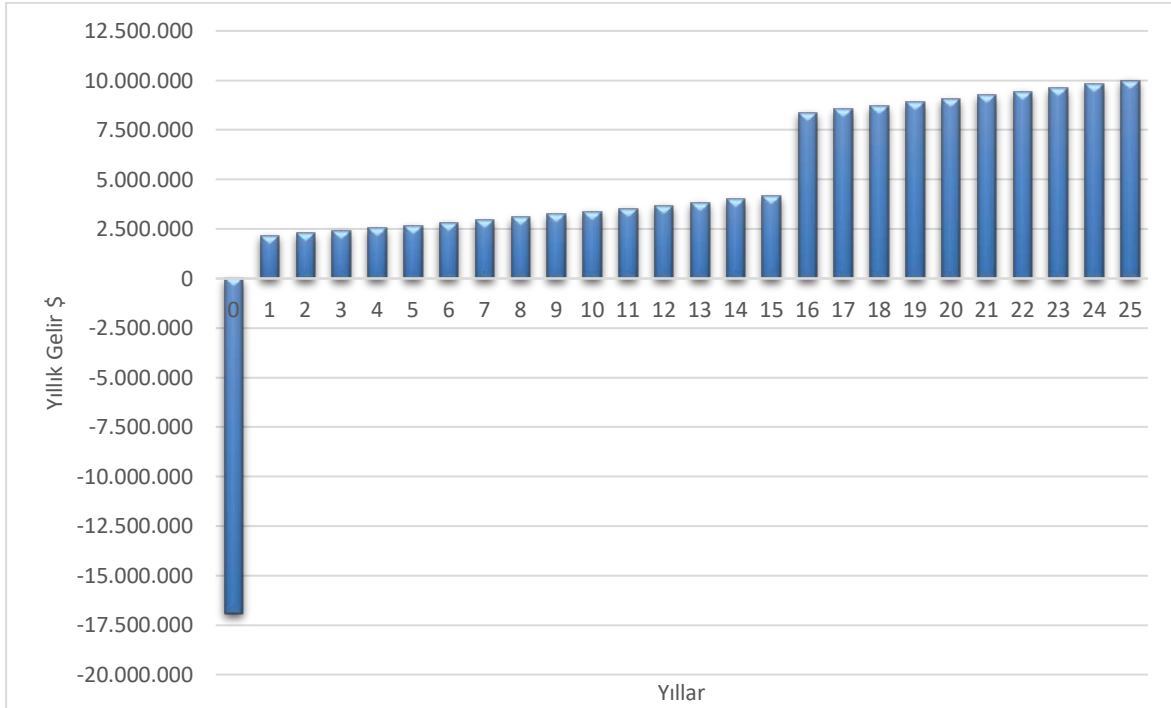
Elektrik ihraç geliri, işletme bakım maliyetleri, yıllık kredi borçlanmaları hesaplamaları doğrultusunda Güzelyayla RES’nin yatırım yıllarına göre nakit akış çizelgesi Çizelge 15’de verilmiştir.



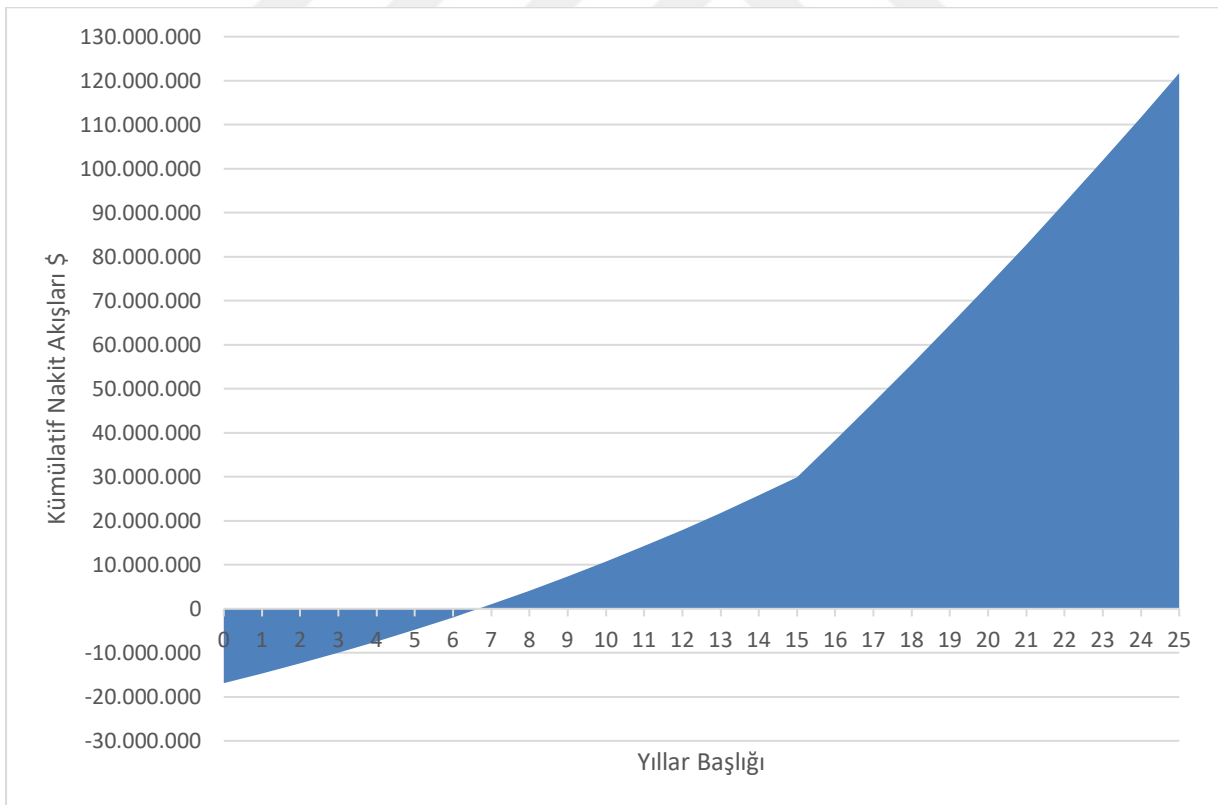
Çizelge 3.15. Güzelyayla RES'nin yıllara göre nakit akış çizelgesi

Yıllık Nakit Akışları		
Yıl	Yıllık Nakit Akışı (\$)	Kümülatif (\$)
0	-16 893 000	-16 893 000
1	2 169 632	-14 723 368
2	2 294 194	-12 429 174
3	2 421 248	-10 007 926
4	2 550 842	-7 457 084
5	2 683 029	-4 774 055
6	2 817 859	-1 956 196
7	2 955 386	999 190
8	3 095 663	4 094 853
9	3 238 746	7 333 599
10	3 384 691	10 718 290
11	3 533 554	14 251 844
12	3 685 395	17 937 239
13	3 840 272	21 777 511
14	3 998 248	25 775 759
15	4 159 382	29 935 141
16	8 382 223	38 317 364
17	8 549 867	46 867 231
18	8 720 865	55 588 096
19	8 895 282	64 483 378
20	9 073 187	73 556 565
21	9 254 651	82 811 216
22	9 439 744	92 250 960
23	9 628 539	101 879 499
24	9 821 110	111 700 609
25	10 017 532	121 718 141

Yıllık nakit akışları, yıllık nakit akışı ve kümülatif nakit akışı olarak iki ayrı sütunda belirtilmiştir. Güzelyayla RES'nin vergi öncesi nakit akış grafiği Şekil 3.5'de verilmiştir. Ayrıca kümülatif nakit akış grafiği ise Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5. Güzelyayla RES nakit akışı



Şekil 3.6. Güzelyayla RES kümülatif nakit akışı

Bu şartlar altında RETScreen programı yardımıyla hesaplanan finansal sürdürülebilirlik değerleri şu şekilde gerçekleşmiştir. Basit geri ödeme süresi 9,2 yıldır. Öz sermayenin geri ödeme süresi ise 6,7 yıl olarak bulunmuştur. Net şimdiki değer 33 052 253,00 \$, yıllık yaşam döngüsü tasarrufları ise 2 836 231,00 \$'dır. Yatırımın maliyet -fayda oranı 3, borç çevrilebilirliği ise 1,5 olarak bulunmuştur. Çizelge 3.16'da finansal sürdürülebilirlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.16. Finansal sürdürülebilirlik değerleri

<b>Finansal Sürdürülebilirlik</b>	
Basit Geri Ödeme Süresi	9,2 yıl
Öz Sermaye Geri Ödeme Süresi	6,7 yıl
Net Şimdiki Değer	33 052 253,00 \$
Yıllık Yaşam Döngüsü Tasarrufları	2 836,231,00 \$/yıl
Maliyet - Fayda Oranı	3
Borç çevirebilirliği	1,5

## 4 . SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Hatay ili Belen ilçesinin 2013-2016 yılları arasında rüzgar enerjisi potansiyeli araştırılmış ve 42 217 140,62 m<sup>2</sup> alan analiz edilmiş olup teknik analizler için WASP programı kullanılmıştır.

- ✓ Bölge için hazırlanan rüzgar hızı haritaları incelendiğinde yerden 80 m yükseklikte rüzgar hızının 4,9 m/s - 11,25 m/s arasında değiştiği sonucuna ulaşılmıştır. Ortalama rüzgar hızı 80 metrede 7,3 m/s olarak bulunmuştur. Bölgenin güç yoğunluğu ise 117 W/m<sup>2</sup> ile 1266 W/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Analiz bölgesinin ortalama güç yoğunluğu ise 407 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğinin yaptığı sınıflandırma koşullarına göre Belen bölgesinin iyi ve çok iyi olarak derecelendirilen rüzgar potansiyeli yüksek alanlara sahip olduğu değerlendirilmektedir.
- ✓ Belen ilçesinde mevcutta kurulu birçok RES bulunmaktadır. Bu santrallerde hali hazırda kurulu iki referans türbinin 2013-2016 yılları arasındaki gerçek üretim değerleri, WASP programı yardımıyla hazırlanan teorik üretim değerleri ile karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar neticesinde referans türbin ile teorik çalışmada çıkan farklar incelendiğinde en yüksek sapmanın yaklaşık %7,11 ile 2013 yılında olmuştur. Gerçek üretime en yakın sonuç ise %0,82 sapma ile 2016 yılı için elde edilmiştir.
- ✓ Rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olduğu öngörülen Güzelyayla Bölgesindeki 30 MW'lık rüzgar çiftliği fizibilitesi yapılmıştır. Yapılacak yatırımın toplam maliyetinin 56 300 000 \$ dolar olduğu yaklaşık 1 200 000 \$/yıl işletme ve bakım maliyetinin olacağı tespit edilmiştir. Yıllık elektrik ihraç gelirin ise 7 305 995 \$ olacaktır. Yapılacak yatırımın %30'unun öz kaynaklardan kalan kısmının dış kaynaklardan sağlandığında, yatırımın öz sarmeye geri ödeme süresinin 6,7 yıl olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Net şimdiki değer 33 052 253 \$, yıllık yaşam döngüsü tasarruflarının ise 2 836 231,00 \$ olduğu belirlenmiştir.
- ✓ Kurulacak RES sayesinde doğaya yıllık 4789 tCO<sub>2</sub> daha az salınım yapılacağı, bu miktarın yaklaşık 8642 aracın karbon emisyonuna eşdeğer olduğu tespit edilmiştir.

Bu santralin 25 yıl ekonomik ömrü olduğunu düşünürsek santral sayesinde yaklaşık 1 179 733 tCO<sub>2</sub> salınımını azaltacaktır. Çalışmada yapılan fizibilite sonucunda Güzelyaylaya kurulacak RES'ne yatırım yapılması durumunda ekonomik ve çevre açısından olumlu sonuçlar alınacağı kanaatine varılmıştır.

Çalışma sonucunda Hatay ili Belen ilçesinin yüksek rüzgar enerji potansiyeline sahip alanlar mevcuttur. Bu alanlarda hali hazırda üretim yapan RES'ler bulunmaktadır. Belen ilçesinde kurulu RES'lerin bulunduğu bölgeler dışında, rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek ve ekonomiye kazandırılmayı bekleyen birçok alan bulunmaktadır.



## KAYNAKLAR

- Acaroğlu, M. (2013). Alternatif enerji kaynakları, isbn: 975-6574-25-
- Ahmed, A. S. (2018). Wind energy characteristics and wind park installation in shark el-ouinat, egypt. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 82, 734–742.
- Akdağ, S. A., ve Güler, Ö. (2010). Evaluation of wind energy investment interest and electricity generation cost analysis for Turkey. *Applied Energy*, 87(8), 2574–2580.
- Akdağ, S. A. (2008). Rüzgar enerjisi potansiyeli ve ekonomik analizinde weibull dağılımının kullanımı, yüksek lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul*,43,50,51,62.
- Akhan, H. ve Eryener, D. (2017). Endüstriyel tesisler için güneş duvarı performansının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32 (2), 215-230. DOI: 10.21605/cukurovaummfd.358426
- Akpınar, E. K. and Akpınar, S. (2004). Determination of the wind energy potential for Maden-Elazığ, Turkey, *Energy Conversion and Management*, 45, 2901-2914.
- Allouhi, A., Zamzoum, O., Islam, M. R., Saidur, R., Kousksou, T., Jamil, A., and Derouich, A. (2017). Evaluation of wind energy potential in Morocco's coastal regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 311–324.
- Apaydın M., Üstün A.K., Kurban M. ve Filik Ü.B. (2009). Rüzgâr enerjisinde kullanılan jeneratörlerin karşılaştırmalı analizi, *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu 2009- Diyarbakır*
- Argin, M., Yerci, V., Erdogan, N., Kucuksari, S. and Cali, U. (2019). Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multi-criteria site selection. *Energy Strategy Reviews*, 23, 33–46.
- Bayraç, N. (2011). Küresel rüzgar enerjisi politikaları ve uygulamaları. *Uludağ Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*, Xxx(1), 50.
- Belabes, B., Youcefi, A., Guerri, O., Djamai, M. and Kaabeche, A. (2015). Evaluation of wind energy potential and estimation of cost using wind energy turbines for electricity generation in north of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1245–1255.
- Benli, H. (2013). Potential of renewable energy in electrical energy production and sustainable energy development of Turkey: Performance and policies. *Renewable Energy*, 50, 33–46.
- Bilgili, M., Şahin, B. and Kahraman, A. (2004). Wind energy potential in Antakya and İskenderun regions, *Turkey. Renewable Energy*, 29(10), 1733-1745.

- Bilgili, M., Şahin, B. ve Şimşek, E. (2010). Türkiye'nin güney, güneybatı ve batı bölgelerindeki rüzgar enerjisi potansiyeli. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 30 (1), 1-12.
- Celik, A.N. (2007). A techno-economic analysis of wind energy in southern Turkey. *Internationa Journal of Green Energy*, 4, 233-247.
- Dündar, C., Canbaz, M., Akgün, N. ve Ural, G. (2002). Türkiye rüzgar atlası, *EIEI and DMI*.
- Engin, Ş.N. (2011). Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Eneji Enstitüsü rüzgar enerjisi çalışma alanları ve MİLRRES projesi, *İzmir Rüzgar Sempozyumu Ve Sergisi*.
- Fazelpour, F., Markarian, E. and Soltani, N. (2017). Wind energy potential and economic assessment of four locations in Sistan and Baluchestan province in Iran. *Renewable Energy*, 109:646-67.
- Fazelpour, F., Markarian, E. and Soltani, N. (2017). Wind energy potential and economic assessment of four locations in Sistan and Balouchestan province in Iran. *Renewable Energy*, 109, 646–667.
- Gedik, T., Akyüz, K.C. ve Akyüz, D. (2005). “Yatırım projelerinin hazırlanması ve değerlendirilmesi”, *ZKÜ Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, Sayı:7
- Gökçek, M., Bayülken, A. and Bekdemir, Ş. (2017). Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey, *Renewable Energy*, 32, 1739-1752.
- Güzel, S. (2014). Rüzgar enerjisi potansiyel hesaplamasında kullanılan bilgisayar programlarının karşılaştırılması, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul*, 20,23-24,31,34,40.
- İlkiliç, C. and Aydın, H. (2015). Wind power potential and usage in the coastal regions of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 78–86.
- İnternet: 3M Canada Deploys RETScreen Software. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/3m-canada-deploys-RETSscreen-software-gregory-j-leng/> Son Erişim Tarihi: 07.05.2019
- İnternet: Global Wind Energy Association, global wind report, April 2019. URL: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf> Son Erişim Tarihi: 1.05.2019
- İnternet: Natural Resources Canada, RETScreen. URL: <https://web.archive.org/web/20160303230715/http://www.RETSscreen.net/fichier.php/2009/Energy%20Performance%20Contracting.pdf> Son Erişim Tarihi: 07.05.2019
- İnternet: RETScreen, RETScreen Paket Programı. URL: <https://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465> Aon Erişim Tarihi: 7.05.2019
- İnternet: RETScreen, Wind Energy Project Analysis. URL: <http://www.RETSscreen.net> Son Erişim Tarihi: 07.05.2019

- İnternet: RETScreen, RETScreen.net. URL: <https://web.archive.org/web/20150924090354/http://www.RETScreen.net/fichier.php/2007/Wind%20Power%20&%20Biomass%20District%20Heating%20Projects.pdf> Son Erişim Tarihi: 07.05.2019
- İnternet: T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2017 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu. URL: <http://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-0-24-3/elektrikyillik-sektor-raporu> Son Erişim Tarihi: 02.05.2019
- İnternet: TC Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Elektrik. URL: <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik> Son Erişim Tarihi : 1.05.2019
- İnternet: TC Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Rüzgar. URL: <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar> Son Erişim Tarihi : 3.05.2019
- İnternet: The European Wind Energy Association, Wind Energy in Europe in 2018. URL: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf> Son Erişim Tarihi: 1.05.2019
- İnternet: The European Wind Energy Association, Wind Energy in Europe in 2017. URL: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2017.pdf> Son Erişim Tarihi: 02.05.2019
- İnternet: The European Wind Energy Association, Wind Energy: Europe Scenarios for 2030. URL: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/Wind-energy-in-Europe-Scenarios-for-2030.pdf> Son Erişim Tarihi: 1.05.2019
- İnternet: The European Wind Energy Association, Wind energy in Europe: Outlook to 2022. URL: <http://greenagenda.gr/wp-content/uploads/2018/09/Wind-energy-in-Europe-Outlook-to-2022.pdf> Son Erişim Tarihi: 1.05.2019
- İnternet: Türkiye Elektrik İletim A.Ş., 2017 Yılı Türkiye Elektrik Enerjisi Üretimine Kaynaklara Göre Dağılımı. URL: <https://www.teias.gov.tr/tr/iii-elektrik-enerjisi-uretimi-tuketimi-kayıplar-0> Son Erişim Tarihi : 3.05.2019
- İnternet: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği Rüzgar Enerjisi ve Etkileşim Raporu. URL: [https://www.tureb.com.tr/files/yayinlar/tureb\\_ruzgar\\_enerjisi\\_ve\\_etkilesim\\_raporu.pdf](https://www.tureb.com.tr/files/yayinlar/tureb_ruzgar_enerjisi_ve_etkilesim_raporu.pdf) Son Erişim Tarihi: 1.05.2019
- İnternet: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, Ocak 2019. URL: [https://www.tureb.com.tr/files/bilgi\\_bankasi/turkiye\\_res\\_durumu/istatistik\\_raporu\\_ocak\\_2019.pdf](https://www.tureb.com.tr/files/bilgi_bankasi/turkiye_res_durumu/istatistik_raporu_ocak_2019.pdf) Son Erişim Tarihi: 1.05.2019
- İnternet: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Türkiye Rüzgar Enerjisi Santralleri Atlası, TÜRSAT 2019. URL: [https://www.tureb.com.tr/files/bilgi\\_bankasi/turkiye\\_res\\_durumu/istatistik\\_raporu\\_ocak\\_2019.pdf](https://www.tureb.com.tr/files/bilgi_bankasi/turkiye_res_durumu/istatistik_raporu_ocak_2019.pdf) Son Erişim Tarihi: 3.05.2019



- İnternet: U.S. Energy Information Administration, Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generation Plants, 2016. URL: [https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capcost\\_assumption.pdf](https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capcost_assumption.pdf) Son Erişim Tarihi: 06.05.2019
- İnternet: Vestas, General Specification Vestas V90 3.0 MW. URL: [http://www.gov.pe.ca/photos/sites/envengfor/file/950010R1\\_V90-generalSpecification.pdf](http://www.gov.pe.ca/photos/sites/envengfor/file/950010R1_V90-generalSpecification.pdf) Son Erişim Tarihi: 2.05.2019
- İnternet: Vestas; Türbin Resimleri. URL: <https://www.vestas.com/en/media/images#!turbines> Son Erişim Tarihi 05.03.2019
- İnternet: Vestas, Vestas V90 3MW 50hz ürün kataloğu. URL: [http://arquivo.pt/wayback/20090706121351/http://www.vestas.com/Admin/Public/DWSDownload.aspx?File=%2fFiles%2fFiler%2fEN%2fBrochures%2fProductbrochureV90\\_3\\_0\\_UK.pdf](http://arquivo.pt/wayback/20090706121351/http://www.vestas.com/Admin/Public/DWSDownload.aspx?File=%2fFiles%2fFiler%2fEN%2fBrochures%2fProductbrochureV90_3_0_UK.pdf) Son Erişim Tarihi: 1.05.2015
- İnternet: WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program). URL: <http://www.WAsP.dk/WAsP> Son Erişim Tarihi: 06.05.2019
- İnternet: World Wind Energy Association, Global Statistic 2017. URL: <https://wwindea.org/blog/2018/02/12/2017-statistics/> Son Erişim Tarihi: 2.05.2019
- İnternet: World Wind Energy Association, Global Statistic 2018. URL: <https://library.wwindea.org/2019/02/18/global-statistics-2018-preliminary/> Son Erişim Tarihi: 2.05.2019
- İnternet: World Wind Energy Association, Wind Power Capacity Worldwide Reaches 600 GW, 53,9 GW added in 2018. URL: <https://wwindea.org/blog/2019/02/25/wind-power-capacity-worldwide-reaches-600-gw-539-gw-added-in-2018/> Son Erişim Tarihi: 1.05.2019
- Kaplan, O. and Temiz, M. (2017). A novel method based on Weibull distribution for shortterm wind speed prediction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 17793-17800.
- Kaya, K. ve Koç, E., (2015), Enerji üretim santralleri maliyet analizi, *Mühendis ve Makina*, Vol. 56(660),pp. 61-68.
- Kaygusuz, K. (2010). Wind energy status in renewable electrical energy production in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2104–2112.
- Kidwell, S.D. and Peterson, L.R., (1981), Financial institutions, markets and money, *The Dreydan Press, Illinois*
- İslam, M., Saidur, R. and Rahim, N. (2011). Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull distribution function, *Energy*, 36. 985e992.

- Mert, İ., Karakuş, C. ve Peker, F. (2014). Antakya bölgesi rüzgar karakteristiğinin incelenmesi. *DÜ Mühendislik Dergisi*, 5(1), 13-22.
- MEVBİS, (2018). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Meteorolojik Veri Bilgi Satış Ve Sunum Sistem; 201710025E41 Numaralı Veri Siparişi Bilgileri.
- Mortensen, N. G. (2016). Wind resource assessment using the WAsP software (DTU Wind Energy E-0135). *Technical University of Denmark (DTU). DTU Wind Energy E*, No. 0135.
- Nie, B. and Li, J. (2018). Technical potential assessment of offshore wind energy over shallow continent shelf along China coast. *Renewable Energy*, 128, 391–399.
- Ozay, C. and Celiktas, M.S. (2016). Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alaçatı region. *Energy Conversion and Management*, 121, 49-54.
- Özdamar A. (2000). Dünya ve Türkiye’de rüzgar enerjisinden yararlanılması üzerine bir araştırma, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6. Cilt, 2.-3. Sayı, s.133.145.
- Ozerdem, B. Ozer, S. and Tosun, M. (2006). Feasibility study of wind farms: a case study for Izmir, Turkey. *J Wind Eng Ind Aerod*, 94:725–43.
- Özgener Ö. (2002). Türkiye’de ve dünya’da rüzgar enerjisi kullanımı, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, Cilt: 4 Sayı: 3 Sh. 159-173.
- Pishgar-Komleh, S. H. and Akram, A. (2017). Evaluation of wind energy potential for different turbine models based on the wind speed data of Zabol region, Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 34–40.
- Sahin, B. and Bilgili, M. (2009). Wind characteristics and energy potential in Belen-Hatay, Turkey. *International Journal of Green Energy*, 6(2), 157-172.
- Sahin, B., Bilgili, M. and Akilli, H. (2005). The wind power potential of the eastern Mediterranean region of Turkey. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(2), 171-183.
- Santos, M. and González, M. (2018). Factors that influence the performance of wind farms. *Renewable Energy*.
- Sariaslan, H., (1990). Yatırım projelerinin hazırlanması ve değerlendirilmesi, planlama-analiz-fizibilite, *Turhan Kitapevi, Ankara*, 240 s.
- Serri, L., Lembo, E., Airoidi, D., Gelli, C. and Beccarello, M. (2018). Wind energy plants repowering potential in Italy: technical-economic assessment. *Renewable Energy*, 115, 382–390.

- Shu, Z. R., Li, Q. S. and Chan, P. W. (2015). Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong. *Energy Conversion and Management*, 101, 644–657.
- Tanrıöven, M. (2008). Rüzgar ve güneş enerjili güç sistemleri ders notu, *Yıldız Teknik Üniversitesi*.
- Ucar, A. and Balo, F. (2010). Assessment of wind power potential for turbine installation in coastal areas of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1901–1912.
- Wang, B., Sun, S. and Duan, M. (2018). Wind potential evaluation with urban morphology - A case study in Beijing. *Energy Procedia*, 153, 62–67.
- Weida, S., Kumar, S. and Madlener, R. (2016). Financial viability of grid-connected solar PV and wind power systems in Germany. *Energy Procedia*. 106:35–45.
- Yalçın, Y. (2010). İstanbul Terkos Bölgesi'nde kurulması planlanan bir rüzgar enerjisi santrali için enerji üretim potansiyeli, kurulum maliyeti ve geri ödeme süresinin belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul*.
- Yaniktepe, B., Koroglu, T. and Savrun, M. M. (2013). Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Osmaniye, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 703–711.
- Yılmaz, U. (2008). Gökçeada'da yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretimi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul*, 27-28.
- Yılmaz, Z. (1993). Yatırım projeleri analizi ve yönetimi, *Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Yayınları* No: 35, 2. Baskı, Bursa.

## DİZİN

**A**

Abstract · v  
Avrupa rüzgar enerjisi, 10  
Avrupa ülkeleri arasında en büyük kurulu güç, 11

**B**

Basit geri ödeme süresi, 44, 60  
Belen ilçesi, 29, 67, 69  
Belen meteoroloji istasyonu, 31

**C**

CO<sub>2</sub> emisyonu, 79  
cut-in, 40  
cut-out, 40

**D**

Dünyada rüzgar enerjisi, 7, 24  
Dünyadaki en büyük rüzgar enerjisi kurulu gücüne sahip olan ülke, 9

**E**

EAK, 69, 70  
Elektrik İhraç Geliri, 78, 79  
EPDK, 14, 18

**F**

fizibilite, 3, 22, 57, 60, 62, 71, 83, 88  
frekans · 22, 28, 29, 65

**G**

Güzelyayla RES, 32, 33, 35, 72, 74, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 82  
GWEC, 1, 85

**H**

Hata analizi, 56  
Hatay ili, 2, 19, 20, 22, 31, 83

**İ**

*iç karlılık oranı, 44, 45, 60*

**K**

Kanat göbeği, 6  
Kanat süpürme alanı, 41  
Kapasite Faktörü, 57, 76  
Konuşlandırma, 33

**N**

Nakit Akışları, 80  
Net bugünkü değer, 44, 60  
Nominal hız, 42

**O**

Observed Wind Climate, 48  
Obstacle, 49  
Off-shore, 5, 17, 24, 47  
On-shore, 1, 5, 6, 17, 47

**Ö**

Özet · iv  
Özgeçmiş · 92

**P**

Pürüzlülük değerleri, 37, 62, 65  
Pürüzlülük uzunluğu, 37

**R**

Referans türbin, 32, 42, 43  
RETScreen programı, 59, 61, 76, 78  
Roughness, 36  
rüzgar enerjisi potansiyeli atlası, 73, 74  
Rüzgar hızı atlası, 67, 74  
rüzgar potansiyeli, 25, 31, 72, 83

**S**

Sera Gazı Azaltımı, 79

**T**

Türbinin rotor çapı, 41

**U**

Ultrasonik rüzgar sensörleri, 6  
Ölü akış bölgesi kayıpları, 36, 75

**V**

Vestas V90 3 MW, 6, 7, 35, 42

**W**

WAsP Climate Analyst, 28, 48  
WAsP programı, 2, 17, 22, 24, 32, 37, 38, 39, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 62, 67, 70, 74, 83  
Weibull dağılımı, 51, 53

**Y**

Yakın çevre engelleri, 39, 48  
Yaw sistemi, 7  
Yöntem,

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Fatih, PEKER  
 Uyuşu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 24.04.1985, İskenderun  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (532) 667 50 36  
 e-mail : [peker.fatih@hotmail.com](mailto:peker.fatih@hotmail.com)

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2019
Lisans	Pamukkale Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2010
Özel	GSL-SLV / Uluslararası Kaynak Mühendisliği	2018
Lisans	Anadolu Üniversitesi / İşletme	2009
Ön Lisans	Anadolu Üniversitesi / Dış Ticaret	2007

### İş Deneyimi

Firma	Görev	Başlangıç	Ayrılış
Bilgin Steel Global A.Ş.	Fabrika Müdürü	Temmuz 16	Devam Ediyor
Erkiz Mühendislik A.Ş.	İşletme Şefi	Şubat 16	Temmuz 16
Doğanlar İnşaat Ltd. Şti	İmalat Şefi	Ağustos 14	Şubat 16
Mab Makine Ltd. Şti.	İmalat Şefi	Eylül 10	Eylül 13

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

- 1- Peker, F., Karakuş, C., Mert İ. The Investigation of the Wind Energy Potential of the Belen Region and the Comparison of the Wind Turbine With the Production Values, Naturel and Engineering Sciences, 2018, 3(3):65-78.
- 2- Mert İlker, Karakuş Cuma, Peker Fatih; Antakya Bölgesi Rüzgar Karakteristiğinin İncelenmesi; Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 5(1), 13-22.



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

