

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BURSA İLİ KIYI ŞERİDİ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ANALİZİ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Büşra YAKŞI**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**EYLÜL 2018**



**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BURSA İLİ KIYI ŞERİDİ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Büşra YAKŞI  
(152080105)**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yusuf Ali KARA**

**EYLÜL 2018**

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 152080105 numaralı Yüksek LisansÖğrencisi Büşra YAKŞI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "BURSA İLİ KIYI ŞERİDİ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ANALİZİ"başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Yusuf Ali KARA** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Yusuf Ali KARA** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ** .....  
Uludağ Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Tayfun TANBAY**  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Savunma Tarihi :** 10 Eylül 2018

**FBE Müdürü :** **Doç. Dr. Murat ERTAŞ** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi ...../...../.....

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Büşra YAKŞI

İmzası :

*(Faint, stylized signature watermark)*



*Anneme ve babama,*

## ÖNSÖZ

Çalışmada Türkiye'nin ve dünyanın enerji görünümü incelenmiş ve yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisinin önemi vurgulanmak istenmiştir. Rüzgar enerjisi potansiyel analiz programı ile Bursa ilinin kıyı şeritlerinin rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanmıştır.

Tez çalışmamda isteklerimi göz önünde bulundurup tez konumu seçmem hususunda yardımcı olan ve tezin her aşamasında desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Yusuf Ali Kara'ya teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2018

Büşra Yakşı

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
KISALTMALAR .....	viii
SEMBOLLER .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY .....	xvi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Dünya Enerji Potansiyeli.....	2
1.1.1 Kömür rezervi .....	2
1.1.2 Petrol rezervi .....	3
1.1.3 Doğal gaz Rezervi .....	4
1.1.4 Nükleer enerji potansiyeli .....	5
1.1.5 Hidroelektrik enerji potansiyeli .....	6
1.1.6 Güneş enerjisi potansiyeli .....	6
1.1.7 Rüzgâr enerjisi potansiyeli.....	8
1.1.8 Denizlerin enerji potansiyeli .....	8
1.1.8.1 Gel-git akımları .....	9
1.1.8.2 Okyanus akımları .....	9
1.1.8.3 Gel-git aralığı .....	10
1.1.8.4 Dalgalar .....	10
1.1.8.5 Okyanus termal enerjisi.....	11
1.1.8.6 Tuzluluk derecesi .....	11
1.1.9 Jeotermal enerji potansiyeli .....	12
1.1.10 Biyokütle enerji potansiyeli .....	12
1.2 Dünya Enerji Kaynaklarının Kullanımı .....	12
1.2.1 Kömür üretimi.....	13
1.2.2 Petrol üretimi.....	15
1.2.3 Doğal gaz üretimi.....	16
1.2.4 Nükleer enerji üretimi .....	18
1.2.5 Hidroelektrik enerji üretimi .....	19
1.2.6 Güneş enerjisi üretimi .....	19
1.2.7 Rüzgâr enerjisi üretimi.....	20
1.2.8 Denizlerden enerji üretimi .....	21
1.2.9 Jeotermal enerji üretimi .....	22
1.2.10 Biyokütle enerjisi üretimi.....	24
1.3 Türkiye Enerji Potansiyeli.....	25
1.3.1 Türkiye kömür rezervi .....	26
1.3.2 Türkiye ham petrol rezervi.....	27



1.3.3 Türkiye doğal gaz rezervi .....	27
1.3.4 Türkiye hidroelektrik enerji potansiyeli.....	27
1.3.5 Türkiye nükleer yakıt rezervi.....	27
1.3.6 Türkiye yenilenebilir enerji potansiyeli .....	28
1.4 Türkiye Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü .....	30
1.5 Türkiye Elektrik Enerjisi Üretimi ve Talep Gelişimi.....	33
1.6 Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinin Durumu.....	36
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI .....</b>	<b>41</b>
<b>3. MATERYAL VE METOD.....</b>	<b>47</b>
3.1 Rüzgâr Enerjisi Temel Enerji Denklemleri .....	47
3.2 Rotor Yarıçapı ve Rüzgâr Hızının Rüzgâr Enerjisi Üzerine Etkisi.....	50
3.3 Yüksekliğe Bağlı Rüzgâr Hız Değişimi .....	51
3.3.1 Logaritmik profil .....	52
3.3.2 Güç kanunu profili .....	53
3.4 Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler.....	53
3.4.1 Doğrudan veri analizi yöntemleri .....	54
3.4.1.1 Verilerin doğrudan kullanımı.....	54
3.4.1.2 Hız aralığı yöntemi.....	55
3.4.1.3 Rüzgâr hız aralığı yöntemi .....	56
3.4.2 İstatiksel analizler .....	57
3.4.2.1 Rayleigh dağılımı .....	58
3.4.2.2 Weibull dağılımı.....	59
3.5 Bursa İli Rüzgâr Enerji Potansiyeli Değerlendirmesi .....	63
3.6 WindSim Programı ile Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Analizi .....	67
3.7 Rüzgâr Tarlasında Türbinlerin Yerleşimi .....	73
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>76</b>
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>87</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>90</b>

## KISALTMALAR

<b>AWS</b>	: Automated Weather Station
<b>CFD</b>	: Computational Fluid Dynamics
<b>CORINE</b>	: Coordination of Information on the Environment
<b>ETKB</b>	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
<b>GEPA</b>	: Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
<b>HAD</b>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
<b>MTEP</b>	:Milyon Ton Eşdeğer Petrol
<b>RANS</b>	: Reynolds Average Navier Stokes
<b>REPA</b>	:Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası
<b>TEİAş</b>	:Türkiye Elektrik İletim şirketi
<b>UTM</b>	:Universal Transversal Merkator
<b>WasP</b>	:The Wind Atlas Analysis and the Application Program
<b>YEGM</b>	:Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

## SEMBOLLER

$\bar{P}/A$	: Ortalama rüzgar güç yoğunluğu
$\bar{P}_w$	: Ortalama rüzgar türbin gücü
$C_{1\varepsilon}$	: k- $\varepsilon$ türbülans model sabiti
$C_{2\varepsilon}$	: k- $\varepsilon$ türbülans model sabiti
$C_{3\varepsilon}$	: k- $\varepsilon$ türbülans model sabiti
$\dot{E}$	: Birim zamanda üretilen enerji miktarı
$E_{\text{çıkış}}$	: Türbinin ürettiği gerçek enerji miktarı
$G_b$	: Kaldırmakuvvetlerinebağlıolantürbülans
$G_k$	: Türbülans kinetik enerjisiüretimi
$h_r$	: Esmeye saati yüzdesi
$\bar{V}$	: Ortalama rüzgar hızı
$v_{ri}$	: Herhangi bir anda rüzgar hızı
$Y_M$	: Sıkıştırılabilirliğin türbülansa etkisi
$\delta_{ij}$	: Kroneckersembolü
$\mu_t$	: Eddy viskozitesi
$\sigma_k$	: TürbülansPrandatsabiti
$\sigma_v$	: Rüzgar hız ortalamalarının standart sapma değeri
$\sigma_\varepsilon$	: TürbülansPrandatsabiti
$\tau_{xz}$	: Normali z koordinatıyla çakışan x yönündeki kayma gerilimi
$\theta_z$	: Zenit açısı
$\tau_0$	: Yüzeydeki kayma gerilimi
$a$	: Güç kanunu katsayısı
$A$	: Kesit alanı
$c$	: Ölçek parametresi
$\varepsilon$	: Türbülans kinetik enerjisiyayılmahızı
$EJ$	: Exajoule
$E_w$	: Rüzgar türbininden elde edilen enerji miktarı
$F(V)$	: Kümülatif dağılım fonksiyonu
$GW$	: Gigawatt
$K$	: Karman sabiti
$k$	: Şekil parametresi
$k$	: Türbülans kinetik enerjisi
$Ke$	: Enerji model faktörü
$l$	: Karıştırma bileşeni
$MW$	: Megawatt
$N$	: Bir yıl içerisindeki saat sayısı
$p$	: Basınç
$f(V)$	: Rüzgar hızının olasılık yoğunluk fonksiyonu
$f(V)$	: Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu
$P_{pt}$	: Parts per thousand
$P_w$	: Rüzgar türbininden sağlanan güç

<b>r</b>	: Rotor yarıçapı
<b>TWh</b>	: Terawattsaat
<b>V(z)</b>	: z yüksekliğinde rüzgar hızı
<b>V(z<sub>r</sub>)</b>	: z <sub>r</sub> yüksekliğinde referans rüzgar hızı
<b>V</b>	: Rüzgar hızı
<b>V*</b>	: Sürtünme hızı
<b>Γ(x)</b>	: Gamma fonksiyonu
<b>μ</b>	: Dinamik viskozite
<b>ρ</b>	: Hava yoğunluğu



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 1.1 : Fosil yakıtların tükenme ömürleri (yıl). .....	5
Çizelge 1.2 : Bölgelere göre yıllık toplam dalga enerjisi potansiyeli.....	9
Çizelge 1.3 : Ülkelere göre kömür üretimi. ....	13
Çizelge 1.4 : Bölgelere göre petrol üretimi. ....	15
Çizelge 1.5 : Nükleer reaktör sayıları ve kapasiteleri.....	18
Çizelge 1.6 : Ülkelere göre petrol hidroelektrik enerji kurulu gücü.....	19
Çizelge 1.7 : Yıllara göre global güneş enerjisi kurulu gücü. ....	20
Çizelge 1.8 : Yıllara göre global rüzgâr enerjisi kurulu gücü.....	20
Çizelge 1.9: Rüzgâr enerjisi kurulu güç dağılımı. ....	21
Çizelge 1.10 : Deniz enerjisi global kurulu gücü. ....	22
Çizelge 1.11 : Jeotermal enerji global kurulu gücü. ....	23
Çizelge 1.12 : 2000 ve 2014 yılları arasında biyokütle elektrik enerjisi üretimi.....	25
Çizelge 1.13 : Türkiye birincil enerji kaynak rezervi. ....	26
Çizelge 1.14 : BP Türkiye kömür rezerv durumu.....	27
Çizelge 1.15 : Türkiye yenilenebilir enerji kaynak rezervi. ....	28
Çizelge 1.16 : 30 Kasım 2017 sonu itibariyle yakıt cinsine göre Türkiye kurulu gücü. .....	31
Çizelge 1.17: Düşük senaryoya göre Türkiye 2017-2026 yılları brüt elektrik tüketim tahmini (GWh). ....	34
Çizelge 1.18 : Baz senaryoya göre Türkiye 2017-2026 yılları brüt elektrik tüketim tahmini (GWh). ....	34
Çizelge 1.19 : Yüksek senaryoya göre Türkiye 2017-2026 yılları brüt elektrik tüketim tahmini (GWh). ....	35
Çizelge 1.20 : 2007-2017 yılları arası Türkiye'de rüzgâr enerjisi kurulu güç gelişimi. .....	36
Çizelge 1.21 : İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin bölgelere göre dağılımı...	37
Çizelge 1.22 : Bölgelere göre rüzgâr enerji potansiyeli. ....	39
Çizelge 3.1 : Rüzgâr hızı ve güç yoğunluğu arasındaki bağıntı. ....	49
Çizelge 3.2 : Frekans dağılım tablosu.....	62
Çizelge 3.3 : Bursa iline kurulabilecek rüzgâr enerjisi güç kapasitesi. ....	66
Çizelge 3.4 : Bursa ilinde işletme halinde olan rüzgâr enerji santralleri. ....	66
Çizelge 3.5 : Standart k-ε türbülans modeli katsayıları. ....	68
Çizelge 4.1 : Gemlik rüzgâr tarlasındaki türbinlerin coğrafi konumu. ....	78
Çizelge 4.2 : Karacabey rüzgâr tarlasındaki türbinlerin coğrafi konumu.....	78
Çizelge 4.3 : Mudanya rüzgâr tarlasındaki türbinlerin coğrafi konumu.....	78
Çizelge 4.4 : Gemlik ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği. ....	82
Çizelge 4.5 : Karacabey ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği.....	83
Çizelge 4.6 : Mudanya ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği.....	84
Çizelge 4.7 : Gemlik ilçesi yıllık enerji üretimi. ....	85
Çizelge 4.8 : Karacabey ilçesi yıllık enerji üretimi. ....	85

**Çizelge 4.9 : Mudanya ilçesi yıllık enerji üretimi. .... 85**



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Yıllara göre global kömür rezervi .....	2
Şekil 1.2 : Yıllara göre global petrol rezervi .....	3
Şekil 1.3 : Yıllara göre global doğal gaz rezervi .....	4
Şekil 1.4 : Dünya uranyum rezervi % dağılımı .....	6
Şekil 1.5 : DNI dünya haritası .....	7
Şekil 1.6 : GHI dünya haritası .....	7
Şekil 1.7 : Rüzgar enerjisi potansiyel atlası.....	8
Şekil 1.8 : Gel-git aralığından enerji potansiyeli atlası.....	10
Şekil 1.9 :Dalga enerjisi potansiyel atlası.....	10
Şekil 1.10 : Okyanus sıcaklık farkı atlası .....	11
Şekil 1.11 : Bölgelere göre kömür rezerv/üretim oranı .....	13
Şekil 1.12 : Bölgelere göre kömür üretim-tüketim miktarı .....	14
Şekil 1.13 : Bölgelere göre petrol rezerv/üretim oranı .....	15
Şekil 1.14 : Bölgelere göre petrol üretim-tüketim miktarı .....	16
Şekil 1.15 : Bölgelere göre doğal gaz rezerv/üretim oranı .....	17
Şekil 1.16 : Bölgelere göre doğal gaz üretim-tüketim miktarı .....	17
Şekil 1.17 : Nükleer enerji kurulu güç değişimi .....	18
Şekil 1.18 : 2015 yılı jeotermal enerji kapasite ekleme dağılımı.....	22
Şekil 1.19 : 2016 yılı jeotermal güç kapasite eklemeleri ve toplam güç kapasitesi ..	23
Şekil 1.20 : 2014 yılı yenilenebilir enerji toplam birincil enerji arzı.....	24
Şekil 1.21 : 2014 yılı enerji arzında biyokütlenin kaynaklara göre dağılımı .....	24
Şekil 1.22 : Rüzgar güç yoğunluğu haritası (50m) .....	29
Şekil 1.23 : Güneş enerjisi potansiyel atlası .....	29
Şekil 1.24 : Kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı.....	31
Şekil 1.25 : Türkiye kurulu güç değerinin 2010-2017 yılları arasındaki değişimi....	32
Şekil 1.26 : Türkiye kurulu gücünde yenilenebilir enerji kaynaklarının dağılımı.....	32
Şekil 1.27 : 2006-2016 Türkiye elektrik enerjisi üretimi ve talep gelişimi.....	33
Şekil 1.28 :2017-2026 yılları senaryo bazlı Türkiye talep gelişimi .....	35
Şekil 1.29 : İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin bölgelere göre dağılımı.....	37
Şekil 1.30 : İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin türbin markalarına göre dağılımı .....	38
Şekil 1.31 : 50 m yükseklikte rüzgâr hızı haritası .....	38
Şekil 1.32 : 50 m yükseklikte rüzgâr güç yoğunluğu haritası.....	39
Şekil 3.1 : Rüzgâr türbininden hava akımı .....	47
Şekil 3.2 : Rotor yarıçapının türbin gücüne etkisi .....	50
Şekil 3.3 : Rüzgâr hızının türbin gücüne etkisi.....	51
Şekil 3.4 : Rüzgar türbini güç eğrisi .....	53
Şekil 3.5 : Hız süresi eğrisi .....	56
Şekil 3.6 :Rayleigh dağılım grafiği örneği .....	59
Şekil 3.7 : Farklı k değerleri için Weibull dağılım grafiği .....	60

Şekil 3.8 : Weibull parametreleri k ve c'nin grafik yöntemi ile bulunması .....	63
Şekil 3.9 : 50 m yükseklikte Bursa rüzgâr hız dağılımı.....	64
Şekil 3.10 : 50 m yükseklikte Bursa kapasite faktörü dağılımı .....	64
Şekil 3.11 : Rüzgâr enerji santrali kurulabilir alanlar.....	65
Şekil 3.12 : Trafo merkezleri ve enerji nakil hatları.....	65
Şekil 3.13 : WindSim Terrain modülü.....	70
Şekil 3.14 : WindSim Wind Fields modülü.....	71
Şekil 3.15 : WindSim Objects modülü .....	71
Şekil 3.16 : WindSim Results modülü.....	72
Şekil 3.17 : WindSim Wind Resources modülü .....	72
Şekil 3.18 : WindSim Energy modülü.....	73
Şekil 3.19 : Rüzgâr türbinleri düzenli yerleşimi .....	74
Şekil 3.20 : Rüzgâr türbinleri düzensiz yerleşimi.....	74
Şekil 3.21 : WindSim programında türbinlerin düzensiz yerleşimi .....	75
Şekil 4.1 : Gemlik İlçesi arazi yapısı (a) ve pürüzlülük haritası (b).....	76
Şekil 4.2 : Karacabey ilçesi arazi yapısı (a) ve pürüzlülük haritası (b).....	77
Şekil 4.3 : Mudanya ilçesi arazi yapısı (a) ve pürüzlülük haritası (b).....	77
Şekil 4.4 : Gemlik ilçesi türbinler ve transfer klimatolji direği.....	79
Şekil 4.5 : Karacabey ilçesi türbinler ve transfer klimatolji direği.....	79
Şekil 4.6 : Mudanya ilçesi türbinler ve transfer klimatolji direği.....	80
Şekil 4.7 : Gemlik ilçesi 50 m ortalama rüzgâr hızı (a) ve güç yoğunluğu haritası (b).....	80
Şekil 4.8 : Karacabey ilçesi 50 m ortalama rüzgâr hızı (a) ve güç yoğunluğu haritası (b).....	81
Şekil 4.9 : Mudanya ilçesi 50 m ortalama rüzgâr hızı (a) ve güç yoğunluğu haritası (b).....	81
Şekil 4.10 : Gemlik ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları .....	82
Şekil 4.11 : Karacabey ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları.....	83
Şekil 4.12 : Mudanya ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları.....	83



## BURSA İLİ KIYI ŞERİDİRÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYEL ANALİZİ

### ÖZET

Nüfus artışı ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte enerjiye duyulan ihtiyaç hızla artmaktadır. Enerjiye duyulan ihtiyacın artmasıyla birlikte enerji kaynaklarının hızla azalması, çevre kirliliği ve sera gazı emisyonlarının artması gibi etmenler yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelime sebep olmuştur. Rüzgâr enerjisi dünyada en fazla kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Ülkemizde 2007 yılında rüzgâr enerjisi kurulu gücü 146,3 MW değerinde iken 2017 yılında bu değer 6483,9 MW'a ulaşmıştır. Rüzgâr enerjisi yatırımları sayesinde rüzgâr enerjisi kurulu gücünde sürekli bir artış söz konusudur. Yatırımların ekonomik açıdan uygun olması için, rüzgâr santralının kurulacağı bölgelerde rüzgâr enerjisi potansiyel analiz çalışması yapılmalıdır.

Bu tez çalışmasında dünya ve Türkiye'nin enerji görünümü incelenmiş, rüzgâr enerjisi ve potansiyel analizi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Rüzgâr enerjisi temel enerji denklemleri, türbin rotor yarıçaplarının rüzgâr enerjisi üzerine etkileri, rüzgâr hızının rüzgâr enerjisi üzerine etkileri, yüksekliğe bağlı rüzgâr hız değişimleri gibi konular hakkında bilgiler verilmiştir. Rüzgâr enerjisi potansiyel analiz çalışmaları için pek çok yöntem mevcuttur. Doğrudan veri analizi yöntemleri ve istatistiksel analizler rüzgâr enerji potansiyel analizi yöntemlerindedir. En çok kullanılan yöntemler, istatistiksel analiz yöntemlerinden olan Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonlarıdır. Rüzgâr enerjisi potansiyel analiz çalışmalarında istatistiksel analizlerin yanında bilgisayar programları da kullanılmaktadır. Tez kapsamında CFD tabanlı olan WindSim yazılımı yardımıyla rüzgâr enerjisi potansiyel analizi yapılmıştır. Bursa ilinin kıyı şeridi olan Gemlik, Karacabey ve Mudanya ilçeleri için ayrı ayrı analiz yapılmış, yıllık enerji üretim miktarları, ortalama rüzgâr hız haritaları, rüzgâr güç yoğunluğu haritaları, pürüzlülük haritaları oluşturulmuştur. Analizi yapılacak olan ilçeler için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan saatlik rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü bilgilerinin bulunduğu klimatoloji verileri kullanılmıştır. Alınan klimatoloji verileri WindSim programına aktarılmakta ve analizler gerçekleştirilmektedir. Analiz sonucunda Gemlik, Karacabey ve Mudanya için yıllık enerji üretimleri sırasıyla 26,5 GWh, 8,8 GWh ve 22,4 GWh'dir. Rüzgâr enerji potansiyelinin en fazla olduğu bölgeler kapasite faktörleri sırasıyla %30,8 ve %26,4 olan Gemlik ve Mudanya'dır.

**Anahtar kelimeler:**Rüzgâr Enerjisi, WindSim, Weibull, Rayleigh, CFD, Rüzgâr Hızı, Rüzgâr Enerji Potansiyeli.

# WIND ENERGY POTENTIAL ANALYSIS OF BURSA PROVINCE COASTAL REGION

## SUMMARY

Due to the population growth and technology development, the need for energy is growing rapidly. Increased energy demand, environmental pollution and increase in greenhouse gas emissions cause to growing in the use of renewable energy sources. Wind energy is one of the most used renewable energy sources in the world. In 2007, the power of wind energy in our country was 146.3 MW, while in 2017 this value reached 6483.9 MW. Thanks to wind energy investments, there has been a continuous increase in wind energy installed power. For investments to be economically suitable, wind energy potential analysis should be performed in areas where the wind power plant will be established.

In this study, Turkey and the world energy outlook was examined and information about wind energy and wind energy potential analysis are given. Additionally basic energy equations of wind energy, effects of wind turbine rotor diameters on wind energy, effects of wind speed on wind energy, wind speed changes depending on height are given. There are many methods for wind energy potential analysis studies. Direct data analysis methods and statistical analyses are methods of wind energy potential analysis. The most widely used methods are the Weibull and Rayleigh distribution functions, which are statistical analysis methods. The wind energy potential analysis was carried out with the help of WindSim software which is based on CFD. The coast line of Bursa province was analysed individually for the districts of Gemlik, Karacabey and Mudanya. Annual energy production values, average wind speed maps, wind power density maps, roughness maps were created for districts. The climatology data for the hourly wind speed and wind direction information obtained from the General Directorate of Meteorology was used for the districts to be analysed. Climatology data are transferred into the WindSim program and analysed. As a result of the analysis, annual energy productions for Gemlik, Karacabey and Mudanya are 26.5 GWh, 8.8 GWh and 22.4 GWh respectively. Capacity factors were 30.8% and 26.4% respectively, Gemlik and Mudanya are regions where wind energy potential is the highest.

**Keywords:** Wind Energy, WindSim, Weibull, Rayleigh, CFD, Wind Speed, Wind Energy Potential.

## 1. GİRİŞ

Enerji kısaca iş yapabilme kabiliyeti olup skaler bir büyüklüktür. Kinetik enerji hareket enerjisi, potansiyel enerji ise nesnenin konumu veya durumundan dolayı sahip olduğu enerji miktarıdır. Ayrıca, enerji yoktan var edilemez veya var olan enerji yok edilemez, yalnızca enerji türleri birbirine dönüştürülebilmektedir. Bu yasa Termodinamik 1.yasası olup "Enerjinin korunumu yasası" olarak bilinmektedir.

Dünya üzerinde enerji kaynakları kullanımına göre yenilenemez ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak ikiye ayrılmaktadır [1]. Yenilenemez enerji kaynakları fosil ve çekirdek kaynaklı olmak üzere;

- Kömür,
- Petrol,
- Doğalgaz,
- Nükleerdir.

Yenilenebilir enerji kaynakları ise;

- Güneş enerjisi,
- Rüzgâr enerjisi,
- Hidrolik enerjisi,
- Dalga enerjisi,
- Biyokütle
- Jeotermal
- Dalga, gel-git
- Hidrojen enerjisidir.

Yenilenemez enerji kaynakları tükenbilir enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklardan enerji üretimi sırasında doğaya zararlı atık ve gazlar salınmakta olduğundan çevreye zararlı etkileri bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji ise, sürekli devam eden doğal

süreçlerdeki var olan enerji akışından elde edilen enerjidir [2]. Fosil yakıtlar gibi çevreye zarar vermeyen enerji kaynaklarıdır.

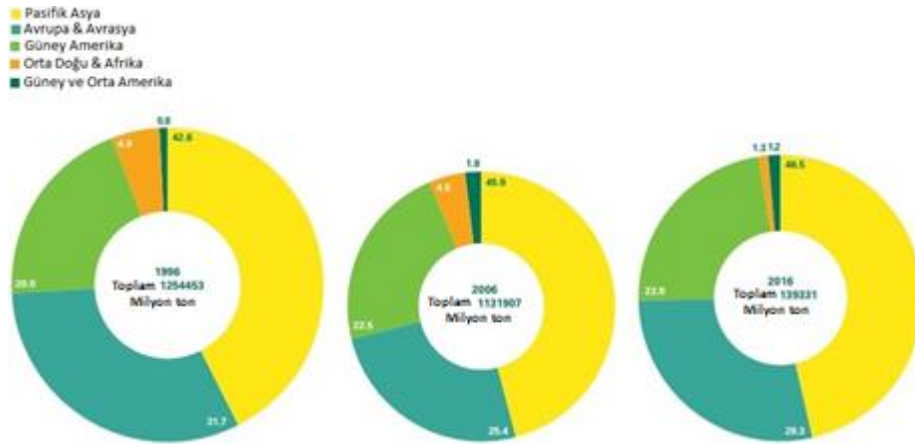
Tezin bu bölümünde günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan yakıtlardan kömür, petrol, doğalgaz, uranyum ve nükleer enerji, hidroelektrik enerji, biyoenerji, atık enerjisi, güneş, rüzgâr ve jeotermal enerji kaynaklarının rezerv durumları incelenmiş, sonrasında bu kaynakların dünya enerji üretiminde kullanım durumları incelenmiştir.

## 1.1 Dünya Enerji Potansiyeli

Kömür, petrol, doğalgaz, uranyum ve nükleer enerji, hidroelektrik enerji, biyoenerji, atık enerjisi, güneş, rüzgâr ve jeotermal enerji kaynaklarının dünya çapında rezerv durumları ve enerji potansiyelleri incelenmiştir.

### 1.1.1 Kömür rezervi

Kömür ana elementi karbon olan bir maddedir. Bitkilerin zaman içerisinde sıcaklık ve basıncın etkisiyle başkalaşım geçirmesi sonucunda oluşur. Ayrıca; hidrojen, oksijen, karbon, azot, kükürt ve mineral maddeler ihtiva etmektedir. Şekil 1.1'de 1996, 2006 ve 2016 yılları arasında kıtalara göre kömür rezerv durumları görülmektedir [3].



Şekil 1.1 : Yıllara göre global kömür rezervi

1996 yılında toplam rezerv miktarı 1.254.453,00 milyon ton, 2006 yılında 1.131.907,00 milyon ton, 2016 yılında ise 1.139.331,00 milyon ton'dur. Ayrıca 1996, 2006 ve 2016 yıllarında en fazla kömür rezervine sahip olan kıta Pasifik Asya'dır.

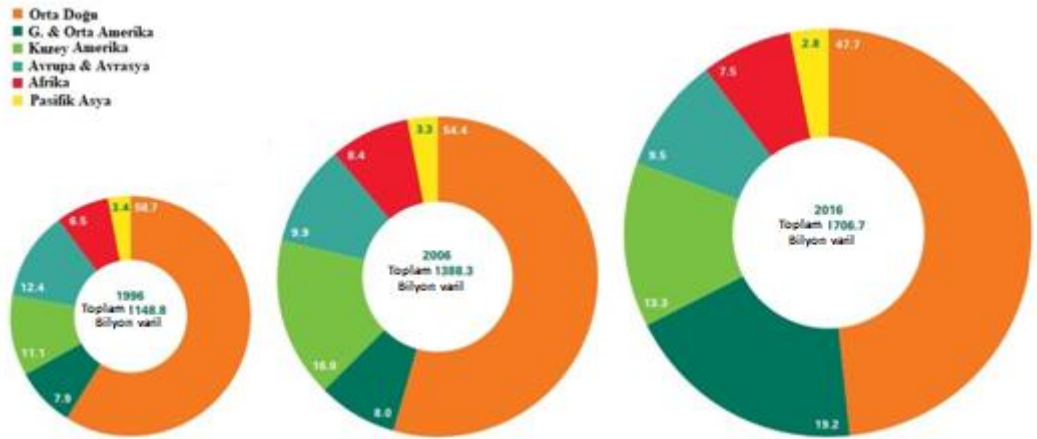
1996 yılında %42,6 oranla en fazla kömür rezervine sahip bölge Pasifik Asya'dır. Aynı yılda Avrupa ve Avrasya %31,7, Güney Amerika %20, Orta ve Doğu Afrika %4,9, Güney ve Orta Amerika %0,8 oranında kömür rezervine sahiptir.

2006 yılında %45,9 oranla en fazla kömür rezervine sahip bölge Pasifik Asya'dır. Aynı yılda Avrupa ve Avrasya %25,4, Güney Amerika %22,5, Orta ve Doğu Afrika %4,5, Güney ve Orta Amerika %1,8 oranında kömür rezervine sahiptir.

2016 yılında %46,5 oranla en fazla kömür rezervine sahip bölge Pasifik Asya'dır. Aynı yılda Avrupa ve Avrasya %28,3, Güney Amerika %22,8, Orta ve Doğu Afrika %1,3, Güney ve Orta Amerika %1,2 oranında kömür rezervine sahiptir.

### 1.1.2 Petrol rezervi

Petrol de tıpkı kömür gibi hayvan ve bitki kalıntılarının uzun yıllar boyunca sıcaklık ve basıncın etkisiyle başkalaşım geçirmesi sonucu oluşan yüksek hidrokarbonlu bir bileşimdir. Belirli bir kimyasal yapısı bulunmamakla birlikte bulunduğu bölgeye göre değişkenlik gösteren bir yapısı bulunmaktadır. Dünyada pek çok bölgede petrol bulunmakta ve işlenmektedir. 1996, 2006 ve 2016 yılları arasında dünya petrol rezervinin dağılımı Şekil 1.2'de görülmektedir [3].



Şekil 1.2 : Yıllara göre global petrol rezervi

Şekil incelendiğinde toplam petrol rezerv miktarının sürekli artış içerisinde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni petrol kuyularının keşfidir. Tüm yıllar boyunca en fazla petrol rezervine sahip bölge Orta Doğu'dur. Fakat Orta Doğu petrol rezervinin oranı her geçen yıl düşüş içerisinde.

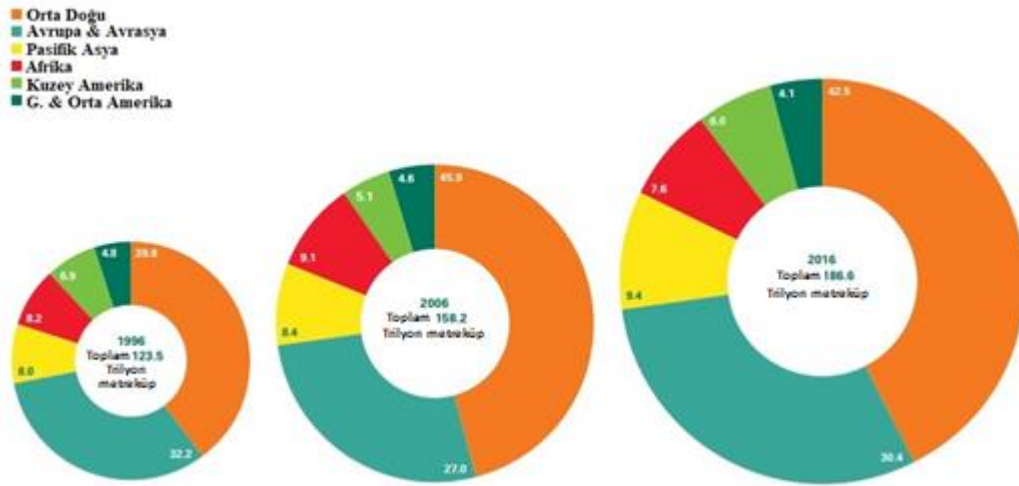
1996 yılında %58,7 oranla en fazla petrol rezervine sahip olan bölge Orta Doğu'dur. Aynı yıl içerisinde Güney ve Orta Amerika %7,9, Kuzey Amerika %11,1, Avrupa ve Avrasya %12,4, Afrika %6,5, Pasifik Asya %3,4 oranında petrol rezervine sahiptir.

2006 yılında %54,4 oranla en fazla petrol rezervine sahip olan bölge Orta Doğu'dur. Aynı yıl içerisinde Güney ve Orta Amerika %8,0, Kuzey Amerika %16,0, Avrupa ve Avrasya %9,9, Afrika %8,4, Pasifik Asya %3,3 oranında petrol rezervine sahiptir.

2016 yılında %47,7 oranla en fazla petrol rezervine sahip olan bölge Orta Doğu'dur. Aynı yıl içerisinde Güney ve Orta Amerika %19,2, Kuzey Amerika %13,3, Avrupa ve Avrasya %9,5, Afrika %7,5, Pasifik Asya %2,8 oranında petrol rezervine sahiptir.

### 1.1.3 Doğal gaz Rezervi

Doğal gaz yer kabuğu içinde bulunup, fosil kaynaklı yanıcı gazların karışımından oluşan bir petrol türevidir. Yer altında doğal gaz, tek başına bulunabileceği gibi petrol ile birlikte de bulunabilmektedir. Dünyanın pek çok bölgesinde bulunmakta ve işlenmektedir. Şekil 1.3'de 1996, 2006 ve 2016 yılları arasında bölgelere göre doğalgaz rezerv durum dağılımı verilmiştir.



Şekil 1.3 : Yıllara göre global doğal gaz rezervi

Tüm bu yıllar boyunca en fazla doğal gaz rezervine sahip olan bölge Orta Doğu'dur. Orta Doğu'nun ardından Avrupa ve Avrasya gelmektedir.

1996 yılında %39,8 oranla en fazla doğal gaz rezervine sahip bölge Orta Doğu'dur. Aynı yıl içerisinde Avrupa ve Avrasya %32,2, Pasifik Asya %8, Afrika %8,2, Kuzey Amerika %6,9, Güney ve Orta Amerika %4,8 oranında doğal gaz rezervine sahiptir.

2006 yılında %45,9 oranla en fazla doğal gaz rezervine sahip bölge Orta Doğu'dur. Aynı yıl içerisinde Avrupa ve Avrasya %27, Pasifik Asya %8,4, Afrika %9,1, Kuzey Amerika %5,1, Güney ve Orta Amerika %4,6 oranında doğal gaz rezervine sahiptir.

2016 yılında %42,5 oranla en fazla doğal gaz rezervine sahip bölge Orta Doğu'dur. Aynı yıl içerisinde Avrupa ve Avrasya %30,4, Pasifik Asya %9,4, Afrika %7,6, Kuzey Amerika %6, Güney ve Orta Amerika %4,1 oranında doğal gaz rezervine sahiptir.

Aşağıdaki çizelgede dünyanın çeşitli bölgelerinde bulunan fosil yakıtların tükenme ömürleri ile ilgili bilgiler verilmiştir [4].

**Çizelge 1.1** :Fosil yakıtların tükenme ömürleri(yıl).

Bölge	Petrol	DoğalGaz	Kömür
Kuzey Amerika	33,1	13	276
O. ve G. Amerika	117	42,5	150
AvrupaveAvrasya	24,4	57,4	273
Ortadoğu	73,1	129,5	123
Afrika	42,2	66,4	
Asya&Pasifik	14	28,1	51
ToplamDünya	50,7	52,8	114
AvrupaBirliği	10,1	10,8	112
OECD	29,7	15,1	206
EskiSovyetÜlkeleri	27,8	71,3	435

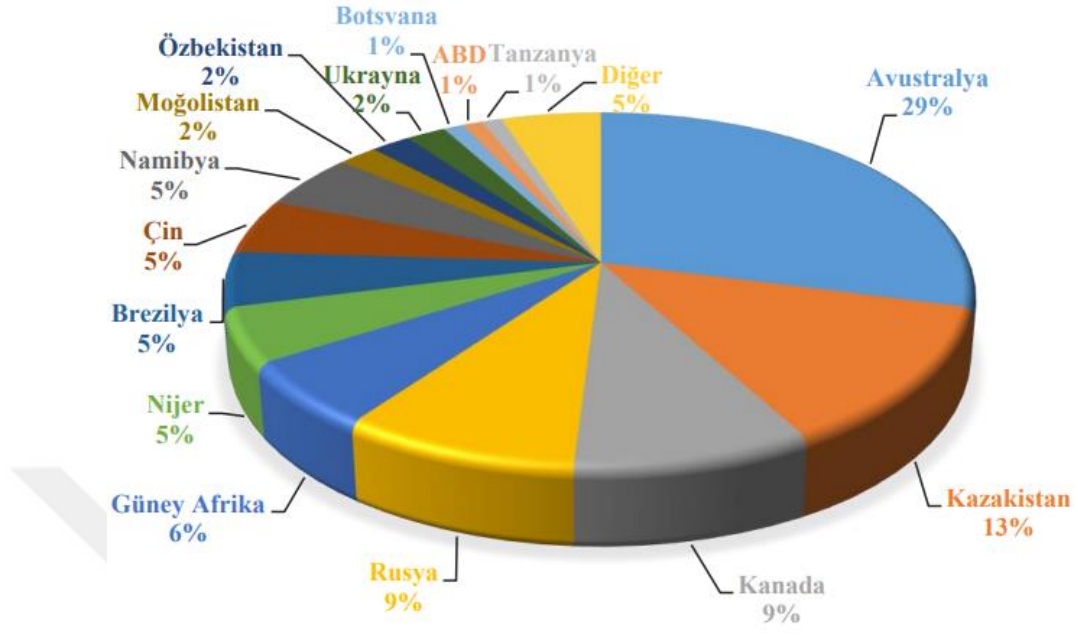
Çizelgeye göre özellikle petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların tükenme ömrününün kömüre göre çok daha az olduğu görülmektedir. Avrupa Birliği ülkelerinde petrolün tükenme ömrü 10,1 yıl, doğal gazın tükenme ömrü ise 10,9 yıldır. Asya ve Pasifik bölgesinde ise petrol ve doğal gazın tükenme ömürleri sırasıyla 14 ve 28,1 yıldır. Kuzey Amerika bölgesinde de doğal gazın tükenme ömrünün 13 yıl olduğu görülmektedir. Ayrıca çizelgede Ortadoğu ve Afrika bölgelerinde var olan kömürün tükenme ömrü toplam 123 yıl olarak belirtilmiştir. Kömürün tükenme ömrünün en az olduğu bölge Asya ve Pasifik'dir.

Fosil yakıtların hızla tükenmekte olduğu günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi her geçen yıl bu nedenle artış göstermektedir.

#### **1.1.4 Nükleer enerji potansiyeli**

Nükleer güç santrallerinde elektrik enerjisi üretmek için kullanılan yakıt uranyumdur. Bu sebeple nükleer enerji potansiyelini incelemek için dünyadaki

uranyum üretimi ve kaynakları incelenmelidir. Şekil 1.4’de uranyum rezervine sahip olan ülkelerin yüzdelerle dağılımları verilmiştir [5].



Şekil 1.4 : Dünya uranyum rezervi % dağılımı

Avustralya, Kazakistan, Kanada ve Rusya'nın diğer ülkelere göre uranyum rezerv miktarının oldukça fazla olduğu görülmektedir [6].

### 1.1.5 Hidroelektrik enerji potansiyeli

Hidroelektrik enerji bir yenilenebilir enerji kaynağıdır ve günümüzde en fazla kullanılan enerji kaynaklarından biridir. Temelde suyun akış ve düşüş hızından faydalanılarak suyun gücünden elektrik enerjisi üretme mantığına dayanmaktadır. Büyük güç sıkıntıları durumlarında veya elektrik enerjisi talebinin fazla olduğu durumlarda, pompalı depolama teknolojisi ile büyük yük gereksinimleri hidroelektrik enerji ile karşılanabilmektedir. Araştırmalara göre dünya hidroelektrik enerji potansiyeli 15000 TWh/yıl değerindedir [7].

### 1.1.6 Güneş enerjisi potansiyeli

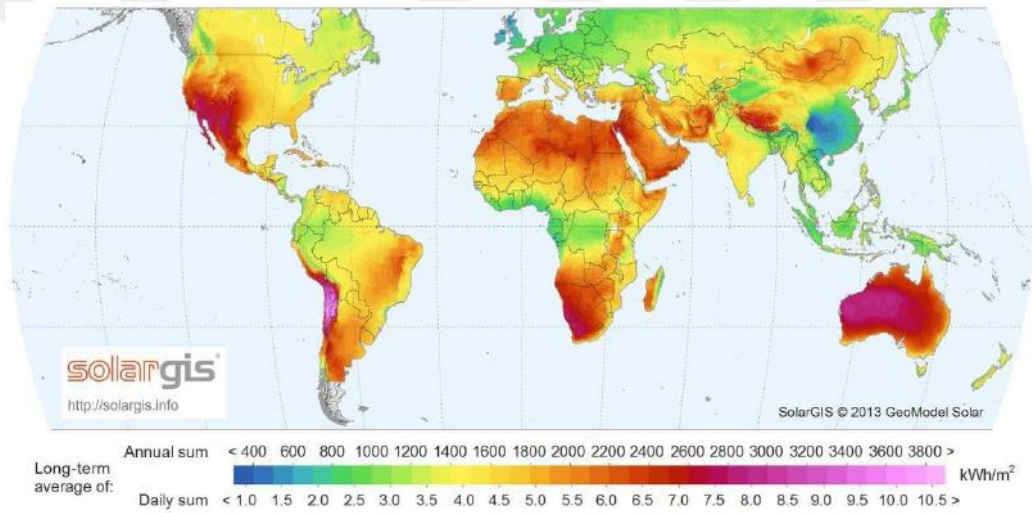
İnsanlığın kullandığı en eski enerji kaynağı olan güneş enerjisi, en temiz, en güvenilir ve ulaşılabilir enerji kaynağıdır. Temelinde Güneş'te meydana gelen hidrojen çekirdeklerinin helyuma dönüşmesinden kaynaklanan füzyon tepkimeleri yatmaktadır. Bu enerji kaynağı karbon emisyonlarının düşmesinde de önemli bir rol



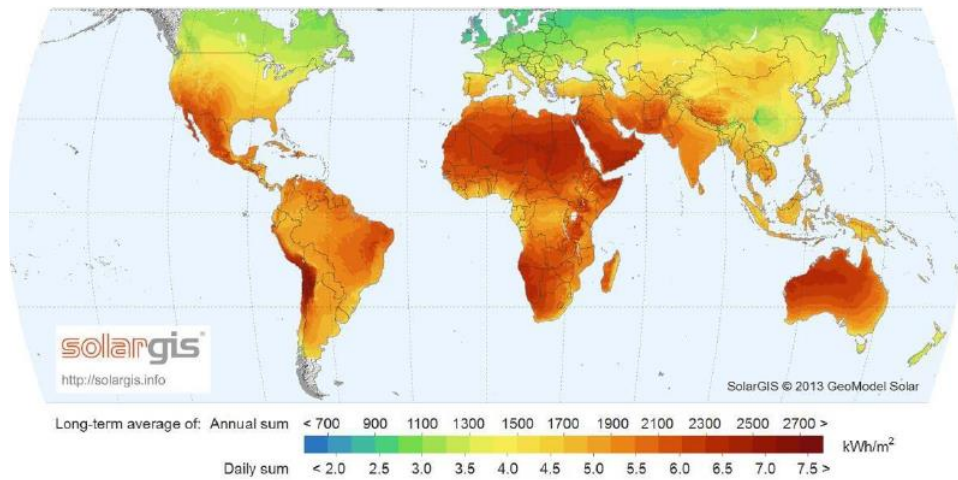
oyunmaktadır. Isınma, soğutma, ışıklandırma, elektrik enerjisi, ulaşım gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Dünya'ya ulaşan toplam güneş enerjisi hakkında yorum yapabilmek için öncelikle DNI, DHI ve GHI tanımlanmalıdır. DNI, yüzeye dik açılı gelen güneş ışınlarının toplam radyasyon miktarıdır. DHI, güneşten doğrudan gelmeyen, ancak atmosferdeki molekül veya parçacıklar tarafından birim yüzeye yansıyan güneş ışınlarının yaydığı radyasyon miktarıdır. GHI ise yatay bir yüzeye gelen toplam güneş enerjisi miktarıdır. Bu değerler arasındaki bağıntı;

$$GHI = DNI \cdot \cos(\theta_z) + DHI$$

Şeklinde olmakla birlikte formülde  $\theta_z$ , zenit açısıdır [8]. Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'da DNI ve GHI solar radyasyonlarının dünya haritası üzerinde dağılımları görülmektedir.



Şekil 1.5 : DNI dünya haritası

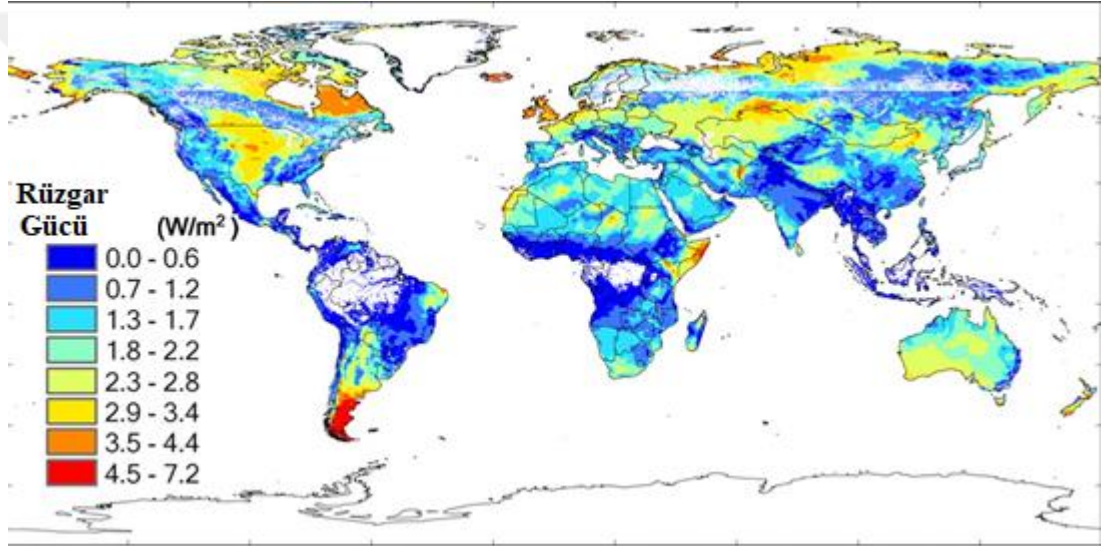


Şekil 1.6 : GHI dünya haritası

Yüzeeye gelen toplam radyasyon miktarının en fazla olduğu bölgeler Afrika, Orta Doğu, Latin Amerika, Asya'dır[9].

### 1.1.7 Rüzgâr enerjisi potansiyeli

Atmosfer yüzeyinden güneş ışınlarının farklı açı ve büyüklüklerde geçmesi sonucu yeryüzünde sıcaklık farklılıkları meydana gelmektedir. Sıcaklık farklılıklarının etkisiyle alçak basınç alanları ve yüksek basınç alanları oluşmaktadır. Hava kütlelerinin soğuk ve yüksek basınçlı alandan, sıcak ve alçak basınçlı alana doğru hareket etmesi sonucu rüzgâr denilen doğa olayı oluşmaktadır. Rüzgârın kinetik enerjisinden neredeyse dünyanın her yerinde faydalanılmaktadır. Aşağıdaki şekil dünya rüzgâr enerjisi potansiyel atlasıdır[10].



Şekil 1.7 : Rüzgâr enerjisi potansiyel atlası

Hesaplamalarda ormanlık alanlar ve şehir merkezleri gibi yerleşim yerleri dikkate alınmamıştır. Rüzgâr tarlasının kurulabileceği alanlar seçilip, buralara yerleştirilecek olan rüzgâr türbinlerinden ne kadar elektrik enerjisi üretileceği hesaplanmıştır. Dünyanın toplam rüzgâr enerjisi potansiyeli yaklaşık 2470 EJ değerinde hesaplanmıştır.

### 1.1.8 Denizlerin enerji potansiyeli

Dünya yüzeyi yaklaşık %71 oranında okyanuslar ile kaplıdır ve dünya su kütlelerinin %97 oranını okyanuslar oluşturmaktadır. Okyanus enerji kaynaklarından güç üretme, ısınma ve soğutma, içme suyu olarak kullanma gibi pek çok alanda

faaydalanılmaktadır. Denizlerden veya okyanuslardan enerji üretim teknolojileri 6 ana başlık altında toplanabilmektedir.

- Gel-git akımları
- Okyanus akımları
- Gel-git aralığı
- Dalgalar
- Okyanus termal enerjisi
- Tuzluluk derecesi

Bölgelere göre yıllık dalga enerjisi potansiyeli hakkında bilgi aşağıdaki çizelgeden edinilebilmektedir.

**Çizelge 1.2 : Bölgelere göre yıllık toplam dalga enerjisi potansiyeli.**

Bölge	Dalga Enerjisi TW/yıl
Batı ve Kuzey Avrupa	2800
Akdeniz ve Atlantik Adaları	1300
Kuzey Amerika ve Grönland	4000
Orta Amerika	1500
Güney Amerika	4600
Afrika	3500
Asya	6200
Avustralya, Yeni Zellenda ve Pasifik	5600
Toplam	29500

En fazla dalga enerjisi potansiyeline sahip olan bölge Asya'dır. Sonrasında Avustralya, Yeni Zellenda ve Pasifik, Güney Amerika gelmektedir [9].

#### **1.1.8.1 Gel-git akımları**

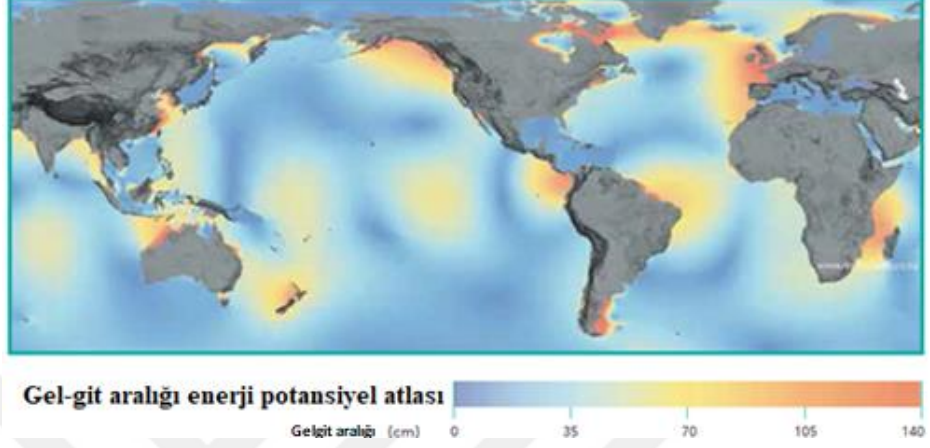
Değişken gel-git akımlarının etkisiyle okyanus suyu hacimlerinin yer değiştirmesi sonucu gel-git enerjisi meydana gelmektedir. Gel-git enerjisi, 24 saatlik olan günlük yerel düzenli gel-git akımlarından oluşabileceği gibi yarım günlük, yani 12 saatlik gel-git akımlarından da oluşabilmektedir.

#### **1.1.8.2 Okyanus akımları**

Okyanus akımları karmaşık bir şekilde akım rejimi göstermektedir. Bu akımlar rüzgârın ve güneş ışınlarının dünya yüzeyine etki şiddetine bağlı olarak değişiklik göstermektedirler.

### 1.1.8.3 Gel-git aralığı

Bu enerji kaynağı ise deniz suyu yüksekliğinin değişimi nedeniyle meydana gelen bir potansiyel enerji çeşididir. Deniz suyundaki yükseklik değişiminin nedeni, dünyanın gravitasyonel çekimleri ile meydana gelir. Şekil 1.8'de gel-git aralığından oluşan enerji potansiyel atlası görülmektedir.

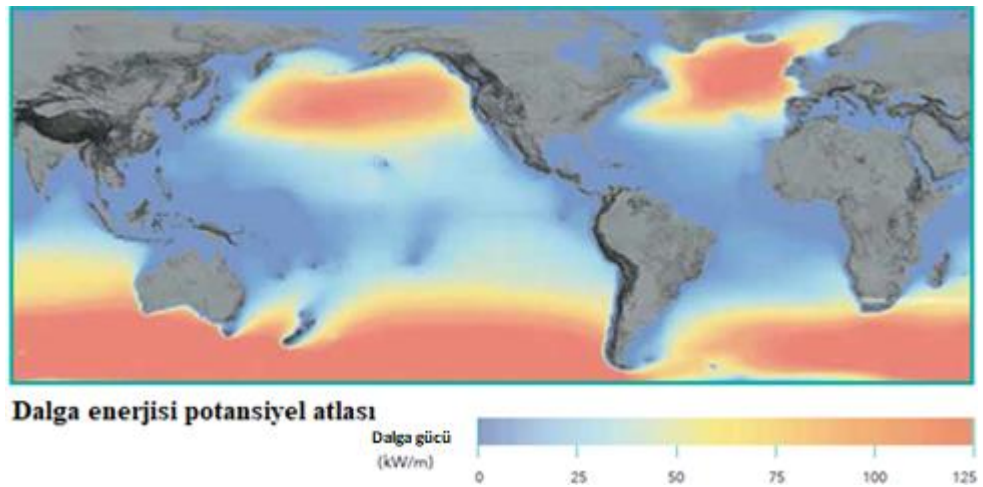


Şekil 1.8 : Gel-git aralığından enerji potansiyeli atlası

Gel-git aralığından oluşan enerji miktarı öngörülebilir ve hesaplanabilmekte olup, 1200 TWh/yıl olarak tahmin edilmektedir.

### 1.1.8.4 Dalgalar

Dalgalar okyanus üzerinden geçen rüzgâr hareketler sonucunda oluşmaktadır. Enlem dereceleri yüksek olan bölgelerde dalga yükseklikleri ve sahip oldukları enerji miktarları daha fazladır. Şekil 1.9'daki dünya haritasından da görüleceği üzere enlemin yüksek olduğu bölgelerin dalga güç miktarları daha fazladır.

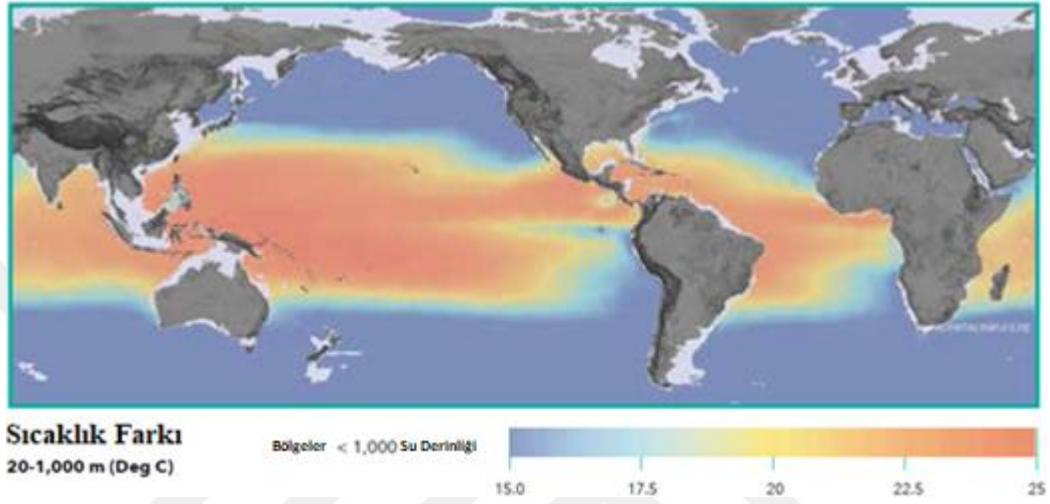


Şekil 1.9: Dalga enerjisi potansiyel atlası

Global dalga enerjisi potansiyeli 29500 TWh/yıl olarak tahmin edilmektedir.

#### 1.1.8.5 Okyanus termal enerjisi

Tropikal bölgelerde okyanus yüzeyi ve okyanusun en dip bölgelerindeki 20 dereceye kadar varan sıcaklık farklılıkları sebebiyle okyanus termal enerji potansiyeli oluşmaktadır.



Şekil 1.10 : Okyanus sıcaklık farkı atlası

Yukarıdaki şekilde okyanuslardaki sıcaklık farklılıkları haritası görülmektedir. Ekvatora yakın bölgelerde sıcaklık farklılığı daha fazladır. Araştırmalara göre okyanus termal enerji potansiyeli 44000 TWh/yıl'dır.

#### 1.1.8.6 Tuzluluk derecesi

Deniz suyu, taze nehir suyundan, yağmur suyundan, yer altı suyundan yaklaşık 200 kat daha fazla tuzluluk oranına sahiptir. Deniz suyunun tuzluluk oranı 30-50 ppt (partsperthousand) iken taze suda bu değer 0,5 ppt'dir. Global tuzluluk derecesi farklılıkları deniz altındaki ve yüzeydeki suyun akım hareketlerinden meydana gelmektedir. Taze suya göre daha fazla tuzluluk derecesine sahip olan okyanus sularından kimyasal basınç potansiyeli etkisiyle elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Hesaplamalara göre bu yoldan elde edilebilecek toplam elektrik enerjisi potansiyeli 1650 TWh/yıl'dır.

### **1.1.9 Jeotermal enerji potansiyeli**

Dünyanın sıcaklığı, doğal radyoaktif uranyum, toryum ve potasyum izotoplarının bozulmasıyla oluşmaktadır. Oluşan bu doğal sıcaklık da jeotermal enerjinin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Dünyanın iç sıcaklığından dolayı yer yüzeyindeki ortalama ısı akısı  $83 \text{ W/m}^2$  değerindedir. Buradan yola çıkarak dünyanın toplam jeotermal enerji potansiyelinin 42 milyon MW değerinde olduğu söylenebilmektedir [11].

Araştırmalara göre jeotermal enerji ile dünya elektrik ihtiyacının %8,3'lük bir kısmı karşılanabilmekte ve insan nüfusunun %17'sinin enerji ihtiyacı karşılanabilmektedir. Aralarında Afrika, Güney ve Orta Amerika ve Pasifik'in de bulunduğu 39 ülkenin elektrik ihtiyacının %100'ü jeotermal enerji kaynakları ile sağlanabilmektedir [11].

### **1.1.10 Biyokütle enerji potansiyeli**

Biyokütle enerjisi; dünyanın hızla artan nüfusu ve hızlı sanayileşmenin getirdiği enerji ihtiyacını karşılamak üzere çevreye zarar vermeden kullanılabilir olan sürdürülebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneş ışınları dünyaya ulaştığı müddetçe biyokütle kaynağı olan bitkiler yetişebileceğinden, biyokütle tükenmez bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Deniz veya karada bulunabilen bitkisel veya hayvansal biyokütle enerji kaynakları şunlardır;

- Odun
- Yağlı tohum bitkileri
- Karbonhidrat bitkileri
- Elyaf bitkileri
- Bitkisel atıklar
- Hayvansal atıklar
- Şehirsal veya endüstriyel atıklardır [12,3].

## **1.2 Dünya Enerji Kaynaklarının Kullanımı**

Dünya enerji kaynaklarının kullanımını incelemek adına öncelikle kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil enerji kaynaklarının üretim durumları incelenecektir. Diğer enerji kaynaklarından olan nükleer enerji, hidroelektrik enerji, güneş enerjisi, rüzgar

enerjisi, denizlerden üretilen enerji, jeotermal enerji ve biyoyakıt enerjisinin üretim durumları incelenecektir.

### 1.2.1 Kömür üretimi

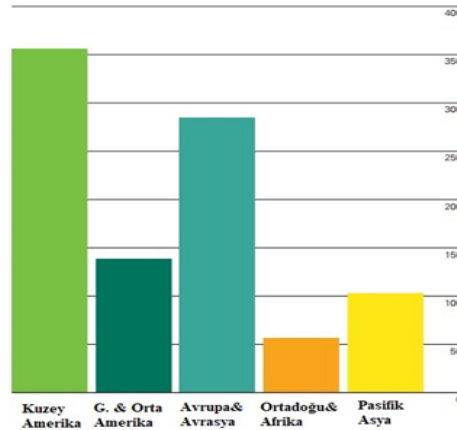
Kömür günümüzde güç üretimi, demir ve çelik üretimi, çimento imalatı gibi birçok sektörde kullanılmakta ve yaklaşık 7700 Mt kömür üretilmektedir[13]. Ayrıca temiz kömür teknolojileri nedeniyle 2000 ve 2014 yılları arasında kömür tüketimi %64 oranında artmıştır. Bu talebin yaklaşık %50 oranını Çin karşılamaktadır. Global enerji tüketiminin %30 payını kömür oluşturmakta olduğundan ikinci önemli enerji kaynağı durumundadır. Dünya elektrik üretiminde ise kömürün payı %40 civarlarındadır [9].

Çizelge 1.3'den anlaşılacağı üzere en fazla kömür üretimi gerçekleştiren ülke Çin'dir.

**Çizelge 1.3 : Ünelere göre kömür üretimi.**

Ülke	2014 üretim (milyon ton)	2015 üretim (milyon ton)
Avustralya	500,3	485
Çin	4000	3747
Almanya	186,5	184
Hindistan	659,6	677
Endonezya	470,8	392
Kazakistan	115,6	106
Polonya	136,9	136
Rusya	357	373
G.Afrika	253,2	252
ABD	906,9	813

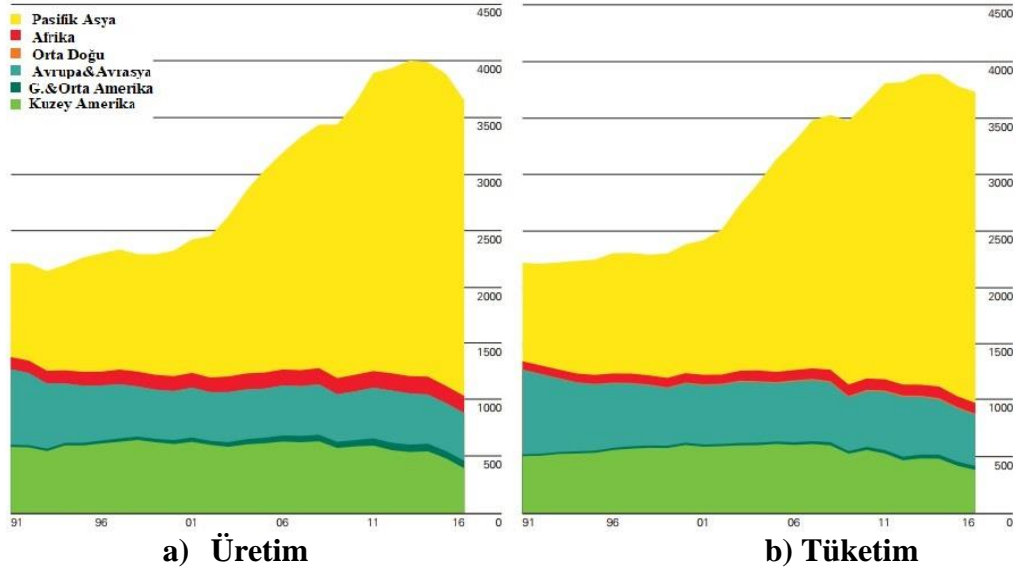
Şekil 1.11'de 2016 yılında bölgelere göre kömür rezerv/üretim oranları hakkında bilgi verilmektedir [3].



**Şekil 1.11 : Bölgelere göre kömür rezerv/üretim oranı**

Rezerv/üretim oranı bölgelerin sahip olduğu kanıtlanmış kömür rezerv miktarları ile kullanılan kömür miktarının bölümünden bulunmaktadır. Diğer fosil kaynaklardan olan petrol ve doğal gazın rezerv/üretim miktarı kömürden çok daha düşüktür. Bunun sebebi petrol ve doğal gazın hızla tükenmesi ve dünyada bulunan kanıtlanmış kömür rezervinin 153 yıl boyunca küresel tüketimi karşılayabilecek kapasitede olmasıdır. En az rezerv/üretim oranına sahip olan bölgeler, rezerv miktarının az olması nedeniyle Orta Doğu ve Afrika bölgeleridir. Rezerv/üretim oranının az olduğu bir diğer bölge ise rezerv miktarı fazla olmasına rağmen Pasifik Asya'dır. Bu durumun sebebi Pasifik Asya devletlerinden olan Çin'in bu bölgede olmasıdır. Çin'in en fazla kömür üretimi yapan ülke olması nedeniyle bu bölgenin rezerv/üretim değeri düşüktür.

Bölgelere ve yıllara göre kömür üretim ve tüketim grafikleri Şekil 1.12'de verilmiştir. Kömür üretim miktarı ve tüketim miktarının verildiği grafiklerde x eksenine 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 ve 2016 yılları ifade etmektedir. y eksenine ise MTEP (milyon ton eşdeğer petrol) biriminden üretilen veya tüketilen kömür miktarını ifade etmektedir.



Şekil 1.12 : Bölgelere göre kömür üretim-tüketim miktarı

Grafikler incelendiğinde en fazla kömür üretimi olan bölge Pasifik Asya olup bu bölgenin kömür tüketimi de en fazladır. Kömür üretim ve tüketim miktarının en az olduğu bölgenin Afrika olduğu da görülmektedir.



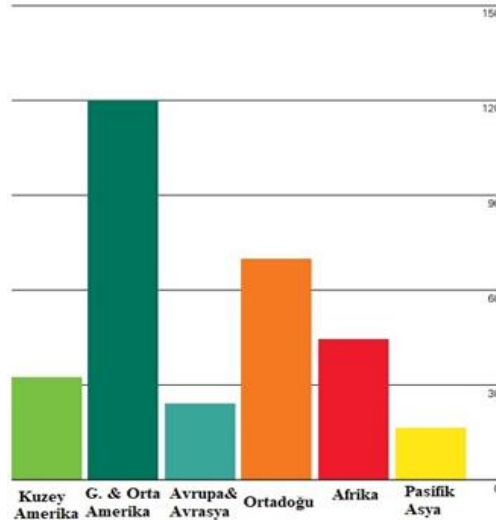
### 1.2.2 Petrol üretimi

Petrol, ulaşım ve enerji gibi pek çok alanda kullanılmakta olan bir enerji kaynağıdır. Global enerji tüketiminin yaklaşık %32,9 kısmını petrol oluşturmaktadır. Çizelge 1.4'de bölgelere göre 2016 yılı günlük petrol tüketimleri görülmektedir [3].

**Çizelge 1.4 : Bölgelere göre petrol üretimi.**

Bölge	2016 üretim (milyon ton)
K. Amerika	882,6
G.ve Orta Amerika	384,5
Avrupa ve Avrasya	860,6
Orta Doğu	1496,9
Afrika	374,8
Pasifik Asya	383
Toplam	4382,4

Çizelge incelendiğinde petrol üretiminin en fazla olduğu bölgenin Orta Doğu olduğu anlaşılmaktadır. Orta Doğu'nun ardından Avrupa ve Avrasya gelmektedir. Ayrıca, 2006 ve 2016 yılları arasında toplam petrol üretim değerinin her geçen yıl artış rejimindedir. Petrol için 2016 yılı rezerv/üretim oranları Şekil 1.13'de verilmiştir.

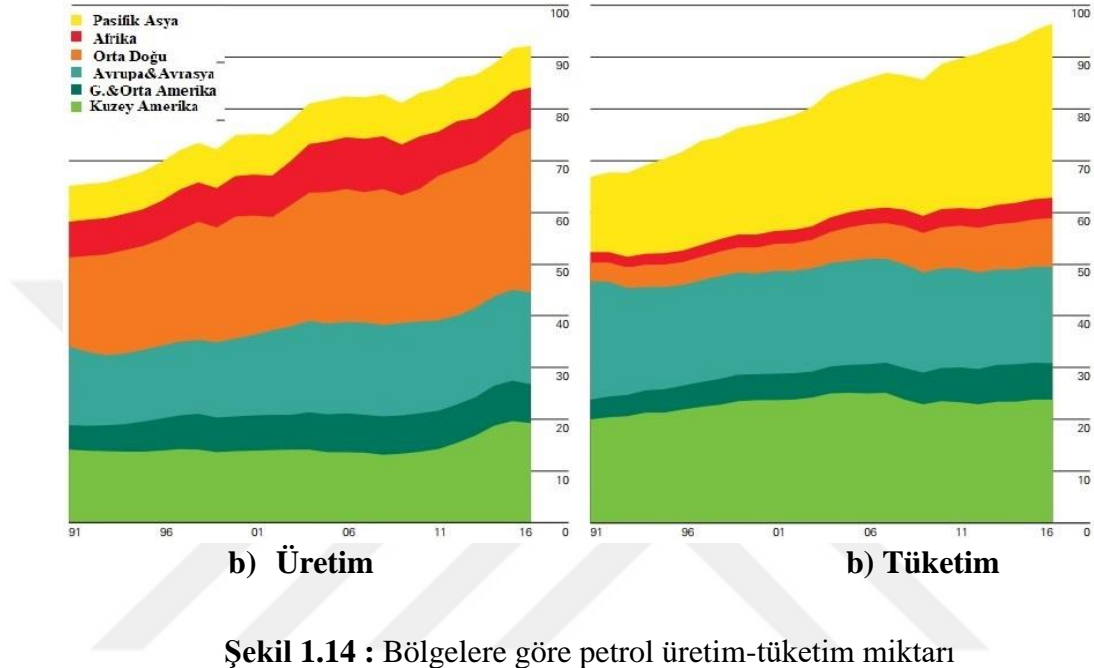


**Şekil 1.13 : Bölgelere göre petrol rezerv/üretim oranı**

Rezerv/üretim oranının en az olduğu bölge Pasifik Asya'dır. Çünkü bu bölgenin rezerv oranı düşüktür. Rezerv oranı en fazla olan bölge Orta Doğu olmasına rağmen Rezerv/üretim oranı en fazla olan bölge Orta Doğu değildir. Bunun sebebi bu bölgede keşfedilen petrol kuyularının üretime geçirilmesidir. Güney ve Orta Amerika'nın rezerv/üretim oranı en fazladır. Nedeni, Orta Doğu'dan sonra en fazla

rezerve sahip olan bölge Güney ve Orta Amerika'dır. Bu bölgede keşfedilen petrol kuyularından petrol üretimi, Orta Doğu'daki petrol üretimi kadar fazla değildir.

Ayrıca petrolün rezerv/üretim grafiği değerlerinin kömürün rezerv/üretim değerlerinden çok daha az olduğu görülmektedir. Nedeni, petrolün kömüre göre hızla tükenen bir fosil kaynak olmasıdır.



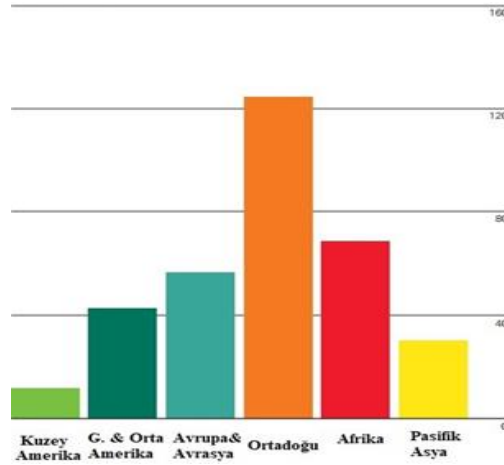
Bölgelere göre günlük petrol üretim ve tüketim miktarları Şekil 1.14'de görülmektedir. Petrol üretim miktarı ve tüketim miktarının verildiği grafiklerde x eksenini 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 ve 2016 yıllarını ifade etmektedir. y eksenini ise milyon varil/gün biriminden üretilen veya tüketilen petrol miktarını ifade etmektedir.

Petrol üretim miktarı en fazla olan bölge Orta Doğu'dur. Buna karşılık tüketim miktarının en fazla olduğu bölge Orta Doğu değildir. Çünkü Orta Doğu'da üretilen petrol dünyanın pek çok ülkesinde tüketilmektedir. Pasifik Asya'da üretim miktarı düşük olmasına rağmen tüketim miktarı oldukça yüksek değerlerdedir.

### 1.2.3 Doğal gaz üretimi

Doğal gaz da tıpkı petrol ve kömür gibi pek çok kullanım alanına sahiptir. Sanayi, elektrik üretimi, evlerde sıcak su veya ısınma gibi pek çok kullanım alanı bulunmaktadır. Global birincil enerji tüketiminin yaklaşık %24'lük kısmını doğal gazın oluşturması sebebiyle dünya genelinde en fazla kullanılan üçüncü yakittir. Ayrıca güç üretiminin %22'lik payını doğal gaz oluşturduğundan, güç üretiminde en

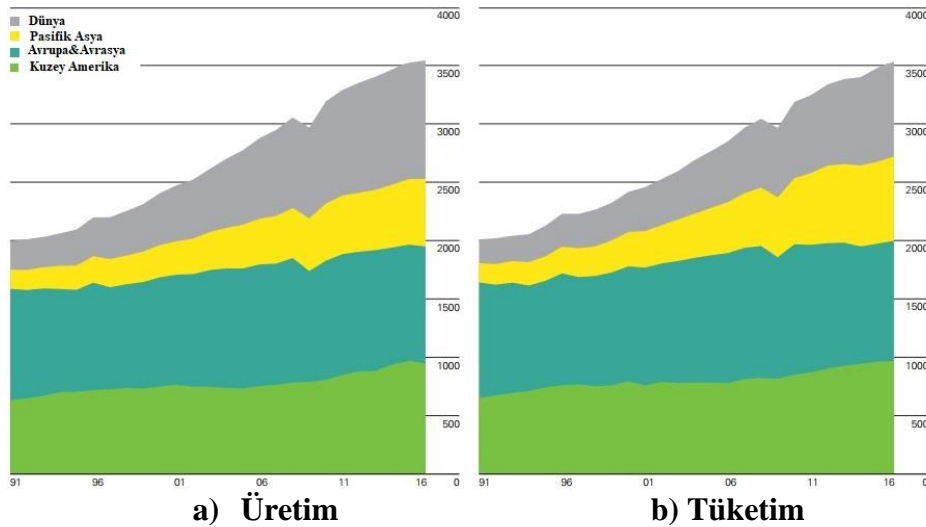
önemli ikinci kaynak doğal gazdır [8].Bölgelere göre doğal gaz rezerv/üretim oranları Şekil 1.15'de görülmektedir.



**Şekil 1.15 :** Bölgelere göre doğal gaz rezerv/üretim oranı

Rezerv/üretim oranının en fazla olduğu bölge Orta Doğu'dur. Çünkü doğal gaz rezervi en fazla olan bölge Orta Doğu'dur. Bu bölgede rezerv oranına karşılık doğal gaz üretimi az olduğundan rezerv/üretim değeri yüksektir. Rezerv/üretim oranının en düşük olduğu bölge, üretimin yüksek olduğu ve rezerv miktarının düşük olduğu bölge olan Kuzey Amerika'dır.

Bölgelere ve yıllara göre doğal gaz üretim ve tüketim grafikleri Şekil 1.16'da verilmiştir. Doğal gaz üretim miktarı ve tüketim miktarının verildiği grafiklerde x eksenini 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 ve 2016 yıllarını ifade etmektedir. y eksenini ise milyar m<sup>3</sup> biriminden üretilen veya tüketilen doğal gaz miktarını ifade etmektedir.



**Şekil 1.16 :** Bölgelere göre doğal gaz üretim-tüketim miktarı

Bölgelere göre üretim ve tüketim miktarları birbiriyle orantılıdır. Örneğin Avrupa, Avrasya ve Kuzey Amerika'da üretim miktarları yüksek, buna karşılık tüketim miktarları da yüksektir.

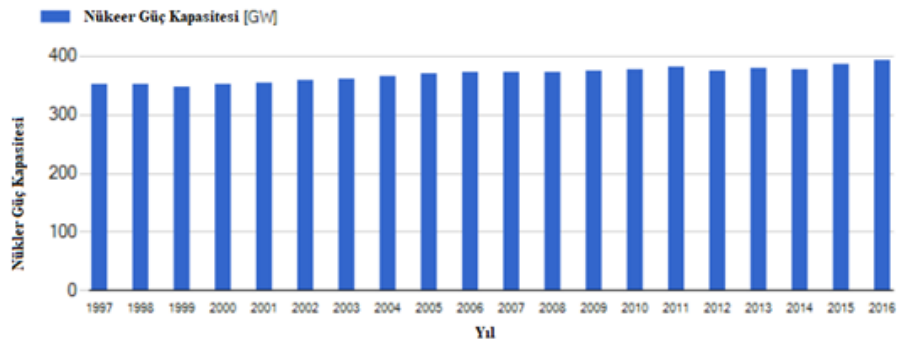
#### 1.2.4 Nükleer enerji üretimi

Verilere göre toplam 448 adet nükleer santral enerji üretmekte ve bu santrallerin toplam kurulu gücü 3.917.44,00 MWe değerindedir. 59 adet nükleer santral ise inşa aşamasındadır[14]. Çizelge 1.5'de ülkelere göre nükleer reaktör sayıları ve nükleer güç kapasiteleri verilmiştir. En fazla reaktör Amerika'da bulunmaktadır. Fransa, Japonya, Çin ve Rusya da nükleer enerjiden büyük ölçüde faydalanan ülkelerdendir.

**Çizelge 1.5 : Nükleer reaktör sayıları ve kapasiteleri.**

Ülke	Reaktör Sayısı	Kapasite(MW)
Amerika	99	99869
Fransa	58	63130
Japonya	42	39752
Çin	38	33384
Rusya	35	26111
Kore	24	22501
Hindistan	22	6240
Kanada	19	13554
Ukrayna	15	13107
İngiltere	15	8918
Diğer	75	60126
Toplam	448	391744

Şekil 1.17'de 1997 ve 2016 yılları arasında nükleer enerji kurulu güç değişimi verilmiştir. 1997 yılında 434 adet nükleer santral olup bu santrallerden elde edilen güç 347,88 GW'dır. 2016 yılına gelindiğinde, toplam nükleer reaktör sayısı 447 olup, elde edilen nükleer enerji miktarı da 390,48 GW değerindedir.



**Şekil 1.17 : Nükleer enerji kurulu güç değişimi**

Nükleer enerji üretiminde önemli bir artış olmamış, nükleer enerjiden güç üretimi yıllar içinde neredeyse bir değişim göstermemiştir.

### 1.2.5 Hidroelektrik enerji üretimi

Günümüzde dünyada, yenilenebilir enerjiden elektrik üretiminde hidroelektrik enerjinin payı yaklaşık %71'dir. Verilere göre 2016 yılı toplam hidroelektrik enerjisi kurulu gücü 1246 GW değerindedir[15]. Ayrıca dünya elektrik enerjisi üretiminde hidroelektrik enerjinin payı yaklaşık %16,4 değerindedir[16].

**Çizelge 1.6 :** Ülkelere göre petrol hidroelektrik enerji kurulu gücü.

Bölge	Kurulu güç (GW)
Çin	331,1
Amerika	102,5
Brezilya	98
Kanada	79,3
Hindistan	52

Çizelge 1.6'da hidroelektrik enerji kurulu gücü en fazla olan 5 ülke sıralanmıştır. Çin 331,1 GW ile en fazla hidroelektrik enerji kurulu gücüne sahip olan ülkedir.

### 1.2.6 Güneş enerjisi üretimi

Güneş enerjisinden ısınma, soğutma, elektrik üretimi gibi pek çok alanda faydalanılmaktadır. Güneş enerjisinden fotovoltaik hücrelerle elektrik üretilebileceği gibi yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojileri ile de elektrik üretilmektedir. Raporlara göre 2015 yılsonu itibariyle güneş enerjisinden küresel elektrik üretim değeri yaklaşık 227 GWe değerinde ve bu değer global elektrik üretiminin %1'lik kısmını oluşturmaktadır[8].

2016 yılsonu itibariyle fotovoltaik hücre ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojileri tarafından sağlanan toplam güneş enerjisi kurulu güç değeri 295664 MW'dır. Fotovoltaik hücre kurulu gücü 290791 MW, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinin kurulu gücü ise 4873 MW'dır[17].

**Çizelge 1.7 :** Yıllara göre global güneş enerjisi kurulu gücü.

Yıl	Kurulu güç (MW)
2007	9157
2008	15188
2009	23360
2010	40164
2011	71473
2012	101938
2013	139284
2014	176707
2015	224791
2016	295664

Yukarıdaki çizelgeden de anlaşılacağı üzere 2007 ve 2016 yılları arasında güneş enerjisi kurulu gücü sürekli artmıştır.

### 1.2.7 Rüzgâr enerjisi üretimi

Günümüzde rüzgârdan elektrik enerjisi üretimi karalara veya denizlere rüzgâr türbinleri yeleştirerek gerçekleştirilmektedir. Kara tipi rüzgâr enerji santralleri onshore, deniz tipli rüzgâr enerji santralleri ise offshore santraller olarak bilinmektedir. 2016 yılsonu itibariyle toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücü 466505 MW'dır. Onshorerüzgâr enerji kurulu gücü 452424 MW, offshorerüzgâr enerjisi kurulu gücü 14081 MW değerindedir [17].

Çizelge 1.8'de yıllara göre rüzgar enerjisi kurulu gücünün onshore, offshore ve kümülatif değerleri görülmektedir.

**Çizelge 1.8 :** Yıllara göre globalrüzgâr enerjisi kurulu gücü.

Yıl	Onshore(MW)	Offshore (MW)	Toplam(MW)
2007	92459	1094	93553
2008	118224	1442	119666
2009	147224	2159	150142
2010	179540	3144	182684
2011	218262	3791	222052
2012	266340	5374	271714
2013	296125	7550	303675
2014	341731	8494	350225
2015	403667	11637	415304
2016	452424	14081	466505

Offshore santrallerin yatırım maliyetleri çok fazla ve inşa aşaması zor olduğundan onshore santrallere göre daha az kurulu güce sahiptir. Ayrıca yıllar geçtikçe rüzgâr enerjisi kurulu gücünde sürekli bir artış meydana gelmiştir

Güncel verilere göre 2016 yılından sonra %11 oranında bir artış meydana gelmiş ve rüzgâr enerjisi kurulu gücü 2017 yılında yaklaşık 540000 MW değerine ulaşmıştır. Rüzgar güç kapasitesinin kıtalara göre dağılımı Çizelge 1.9'da verilmiştir[18].

**Çizelge 1.9:** Rüzgâr enerjisi kurulu güç dağılımı.

Kıta	Yüzde (%)
Asya	53
Avrupa	23,2
K. Amerika	16,2
Latin Amerika	6,5
Pasifik&Okyanusya	0,8
Afrika	0,3

Çizelgeden de anlaşılacağı üzere en fazla rüzgâr enerjisi kurulu gücüne sahip olan kıta Asya'dır. 2015 yılsonu itibariyle dünya toplam elektrik üretiminin yaklaşık %7'lik kısmı rüzgâr enerjisinden sağlanmakta olup, 2015 yılsonu itibariyle rüzgâr enerjisi kurulu gücü en fazla olan ülkeler, Çin 148.000 MW, Amerika 74.347 MW, Almanya 45.192 MW, Hindistan 24.759 MW, İspanya 22.987 MW'dır[9].

### **1.2.8 Denizlerden enerji üretimi**

Denizlerden enerji üretiminin pek çok yolu vardır ve bunlardan yukarıda bahsedilmiştir. Bu kaynağın yaklaşık 0,5 GW değerinde kurulu gücü bulunmakta, 1,7 GW inşa halinde ve bunun %99 kısmı gelgit yoluyla elektrik üretim teknolojilerinden oluşmaktadır [9].

Çizelge 1.10'da 2011 ve 2016 yılları arasında denizlerden elde edilen elektrik enerjisi kurulu gücü ile ilgili veriler verilmiştir [17].

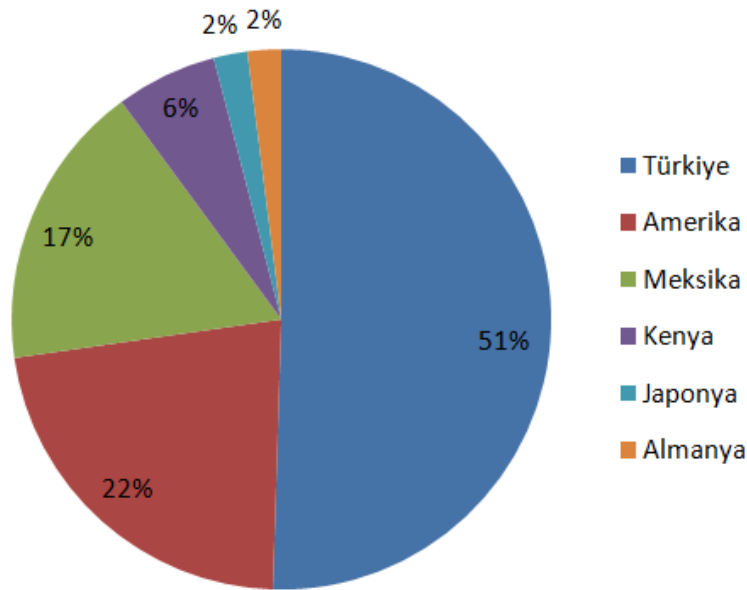
**Çizelge 1.10 : Deniz enerjisi global kurulu gücü.**

Yıl	Kurulu güç (MW)
2007	267
2008	267
2009	269
2010	271
2011	525
2012	528
2013	527
2014	527
2015	533
2016	536

Üretilen elektrik enerjisinde önemli bir değişiklik görülmemekle beraber, gelecek senaryolarına göre denizlerden elektrik enerjisi teknolojilerinin kullanımı artacak ve bu kaynağın kurulu gücünün de artacağı beklenmektedir.

### 1.2.9 Jeotermal enerji üretimi

Jeotermal enerji, dünyanın birincil enerji tüketimine çok küçük bir katkıda bulunmaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde jeotermal enerjinin payı %1 değerinden küçüktür. 2015 yılında 315 MW jeotermal enerjisi kapasitesi eklenmiş ve 2015 yılı toplam jeotermal enerji kapasitesi 13,2 GW değerine yükselmiştir [9]. 2015 yılında kapasite eklemesinin neredeyse yarısı Türkiye tarafından gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 1.18 : 2015 yılı jeotermal enerji kapasite ekleme dağılımı.**



Yukarıdaki daire dilim grafiğinden de görüleceği üzere 2015 yılında en fazla jeotermal enerji kapasite eklemesi yapan ülke %50 oranla Türkiye, ardından Amerika %22, Meksika %17, Kenya %6, Japonya %2, Almanya %2 oranla gelmektedir.

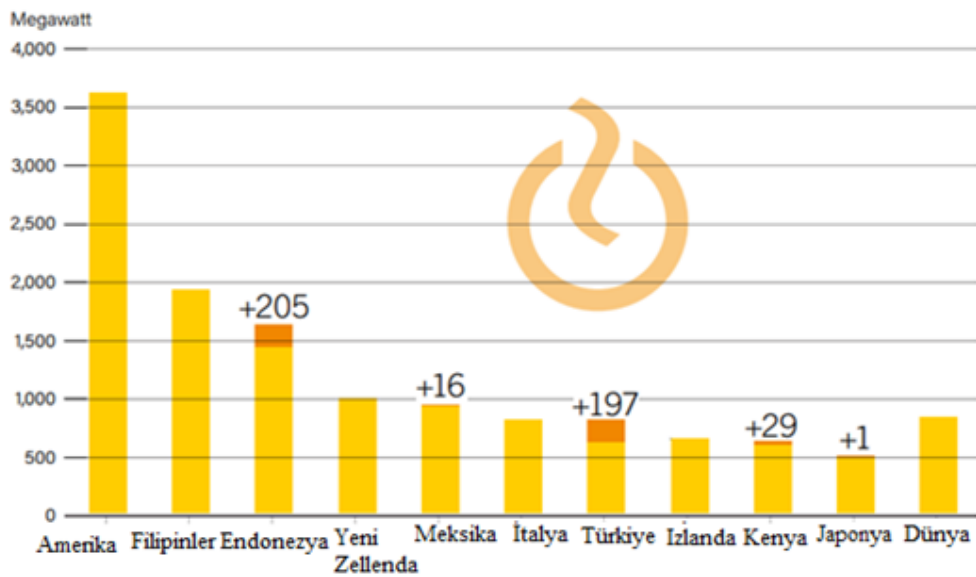
Jeotermal enerjisi kurulu gücünün 2007 ve 2016 yılları arasındaki değişimi Çizelge 1.11’de görülmektedir. Büyük miktarlarda bir artış olmasa da, jeotermal enerji kurulu gücünde bir artış gözlemlenmektedir.

**Çizelge 1.11 : Jeotermal enerji global kurulu gücü.**

Yıl	Kurulu güç (MW)
2007	9144
2008	9464
2009	9903
2010	10125
2011	10015
2012	10482
2013	10787
2014	11457
2015	11848
2016	12628

Şekil 1.19’ da en fazla jeotermal enerji güç kapasitesine sahip olan 10 ülkenin 2016 yılı kapasite değerleri ve yıl içerisinde eklenen kapasite miktarları verilmiştir.

Amerika 3500 MW değerini aşkın kapasite değeri ile en fazla jeotermal enerji güç kapasitesine sahip olan ülkedir[19].

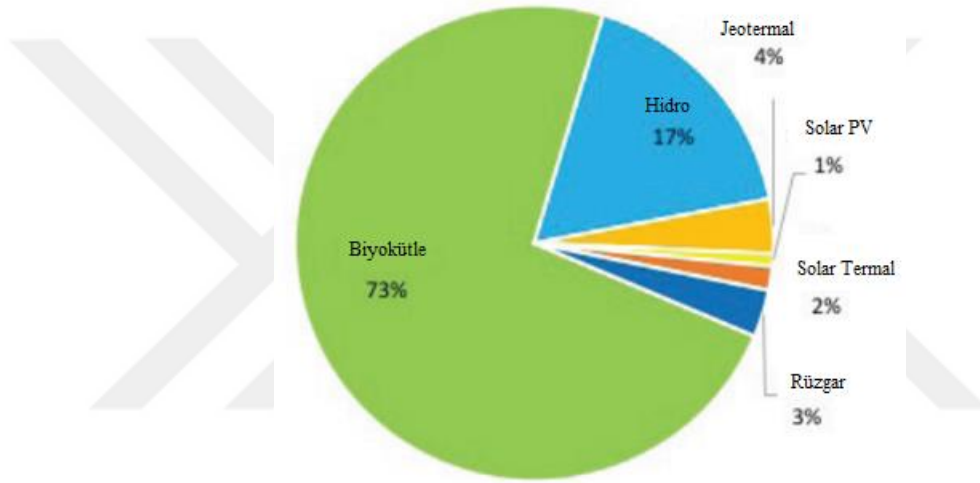


**Şekil 1.19 : 2016 yılı jeotermal güç kapasite eklemeleri ve toplam güç kapasitesi**

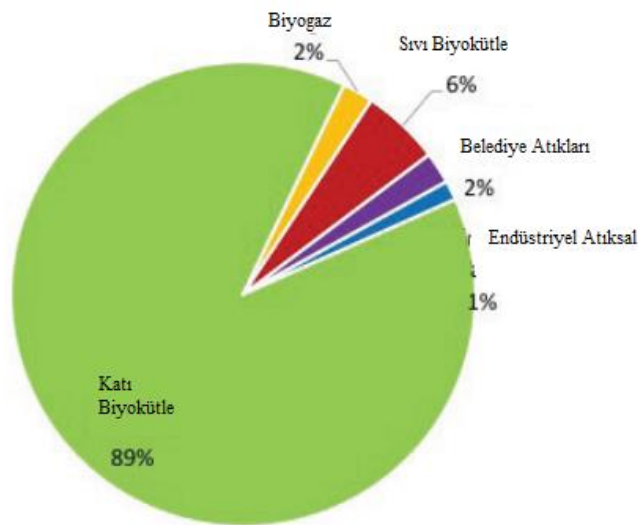
### 1.2.10 Biyokütle enerjisi üretimi

Biyokütle en büyük yenilenebilir enerji kaynağıdır ve küresel enerji arzının yaklaşık %10'luk kısmını karşılamaktadır. Yenilenebilir enerji kullanımının fazla olduğu ülkelerde biyokütle enerji kaynağının kullanımı da fazladır.

Birincil enerji arzında yenilenebilir enerji kaynaklarının dağılımı olan Şekil 1.20 incelendiğinde, biyokütle enerji kaynağının oranının yaklaşık %73 olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 1.21'de ise birincil enerji arzında biyokütle kaynaklarının çeşitlerine göre dağılımı gösterilmiştir. Birincil enerji arzında en fazla kullanılan biyokütle kaynağı, katı biyokütledir.



Şekil 1.20 : 2014 yılı yenilenebilir enerji toplam birincil enerji arzı



Şekil 1.21 : 2014 yılı enerji arzında biyokütlenin kaynaklara göre dağılımı

Biyokütle, elektrik enerjisi üretiminde hidroelektrik ve rüzgardan sonra üçüncü en büyük yenilenebilir enerji kaynağıdır. 2014 yılında biyokütle elektrik enerjisi üretimi 493 TWh değerinde olup çoğunluğu katı biyokütle kaynaklarından elde edilmiştir. Global biyokütle elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık %40 kadarını Avrupa sağlamıştır.

**Çizelge 1.12 : 2000 ve 2014 yılları arasında biyokütle elektrik enerjisi üretimi.**

Yıl	Belediye Atıkları	Endüstriyel Atıklar	Katı Biyokütle	Biyogaz	Sıvı Biyoyakıtlar	Toplam (TWh)
2000	34,3	15,3	102	13,1	0	164
2005	46,2	11,8	143	21	1,98	223
2010	60,4	20,1	235	46,5	5,07	367
2014	68,7	24,8	313	80,1	6,31	493

Yukarıdaki çizelgede 2000 ve 2014 yılları arasında biyokütleden elektrik enerjisi üretiminin biyokütle çeşitlerine göre değerleri verilmiştir. Gelişen teknoloji ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelimin artmasıyla biyokütlenin elektrik enerjisi üretim amaçlı kullanımı her geçen yıl artış göstermiştir.

### 1.3 Türkiye Enerji Potansiyeli

Tezin bu bölümünde, Türkiye'nin enerji görünümünü incelemek adına öncelikle ülkenin enerji potansiyeli incelenecek, ardından kurulu güç durumu hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca, Türkiye elektrik enerjisi üretimi ve talep gelişimi, elektrik talebi senaryoları da incelenecektir.

Türkiye coğrafi konumu sebebiyle gerek yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliği açısından, gerek birincil enerji kaynak rezervi olan linyit açısından zengin bir ülkedir. Ülkemizin enerji potansiyelini değerlendirmek adına birincil enerji kaynak rezervi ve yenilenebilir enerji kaynak potansiyelleri incelenmelidir.

Türkiye'nin sahip olduğu birincil enerji kaynakları kömür (taş kömürü, linyit, asfaltit, bitümler), hidrolik, ham petrol, doğalgaz ve nükleer kaynaklardır. Çizelge 1.13'de bu kaynakların rezerv durumları hakkında bilgi sunulmaktadır[20].

**Çizelge 1.13 : Türkiye birincil enerji kaynak rezervi.**

Kaynaklar	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
Taşkömürü (Milyon Ton)	506,5	425	368,4	1308,5
Linyit (Milyon Ton)				
Elbistan	4845,5			4845,5
Diğer	9146,0	768,9	4,5	9919,4
Toplam	13991,5	768,9	4,5	14764,9
Asfaltit (Milyon Ton)	82			82
Bitümler (Milyon Ton)	1641,4			1641,4
Hidrolik				
GWh/yıl	59245,8			59245,8
MW	22478,9			22478,9
Ham Petrol (Milyon Varil)	7167			7167
Doğalgaz (Milyar m <sup>3</sup> )	23,2			23,2
Nükleer Kaynaklar (Ton)				
Uranyum	9129			9129
Toryum	380000			380000

Taşkömürü, linyit, asfaltit ve bitümler Türkiye’de var olan kömür çeşitleridir. Rezerv miktarı en fazla olan kömür çeşidi linyittir. Ayrıca Türkiye, hidroelektrik enerji potansiyeli açısından da zengin bir ülke konumundadır.

### 1.3.1 Türkiye kömür rezervi

Ülkemizde bulunan başlıca kömür çeşitleri; taş kömürü, linyit, asfaltit ve bitümlü kömürdür. Rezerv ve üretim miktarı açısından diğer dünya ülkeleri ile karşılaştırıldığında ülkemiz linyit kömürü açısından orta düzeyde, taş kömürü açısından alt düzeyde değerlendirilmektedir. Dünya linyit, alt bitümlü kömür rezervinin yaklaşık %3,2’si ülkemizde bulunmaktadır. Türkiye’nin linyit rezervinin yaklaşık %46’sı Kahramanmaraş ilinin Afşin-Elbistan havzasında bulunmaktadır. Taş kömürü açısından en zengin ilimiz ise Zonguldak’tır. Ülkemiz dışa bağımlılığı azaltmak adına yerli kaynak arama çalışmalarına önem göstermiş ve 2005-2015 yılları arasında kömür rezervleri keşfedilmiştir. Bu yıllar arasında yaklaşık 7,38 milyar ton rezerv artışı gerçekleşmiştir [21].

**Çizelge 1.14 : BP Türkiye kömür rezerv durumu.**

	Antrasit ve bitümlü	Yarı bitümlü ve linyit	Toplam
Milyon ton	378	10975	11353

Çizelge 1.14' de ise Türkiye kömür rezervi görülmektedir [3]. Antrasit ve bitümlü kömür rezervi 378 milyon ton, yarı bitümlü ve linyit rezervi ise 10975 milyon ton'dur. Ülkemizin toplam kömür rezervi, dünya kömür rezervinin %1'ini oluşturmaktadır.

### **1.3.2 Türkiye ham petrol rezervi**

2017 yılı içerisinde Temmuz ayı sonu itibariyle ülkemizde 18 adet arama, 7 adet tespit, 17 adet üretim kuyusu olmak üzere toplamda 42 adet kuyu açılmıştır ve açılan kuyularda 73867 metre sondaj yapılmıştır [22].Günümüze kadar toplamda 4776 adet kuyu açılmış ve bu kuyulardan 144 adet ham petrol sahası keşfedilmiştir. 2015 yılsonu itibariyle Türkiye'nin sahip olduğu ham petrol rezerv miktarı 7167 milyon varildir [20].

### **1.3.3 Türkiye doğal gaz rezervi**

Petrol ve doğal gaz arama çalışmalarının başlangıcından günümüze kadar toplamda 79 doğal gaz kuyusu keşfedilmiştir. 2016 yılsonu itibariyle ülkemizde kalan doğal gaz rezervi 18,8 milyar m<sup>3</sup>tür.

### **1.3.4 Türkiye hidroelektrik enerji potansiyeli**

Türkiye hidroelektrik enerji potansiyeli açısından zengin bir ülke olup, dışa bağımlılığı azaltmak adına kullanılan bir enerji kaynağıdır. Ayrıca çevre dostu, yüksek verimli, uzun ömürlü ve büyük yük gereksinimlerine cevap verebilen bir kaynaktır. Ülkemizin teorik hidroelektrik enerji potansiyeli 433 milyar kWh olarak tespit edilmiştir ve dünyanın teorik hidroelektrik enerji potansiyelinin %1'ini oluşturduğu tahmin edilmektedir[23].

### **1.3.5 Türkiye nükleer yakıt rezervi**

Türkiye'de nükleer enerji yakıtları olan Uranyum ve Toryum rezervleri bulunmaktadır. Eskişehir ilinin Sivrihisar ilçesinde yapılan araştırmalar sonucunda 1977 yılında "Eskişehir-Sivrihisar-Kızılcacören Köyü Yakın Güneyi Bastnazit-Barit-

Florit Kompleks Cevher Yatağı" nihai etüt raporu yayımlanmış, bu raporun sonuçlarına göre bölgede toplam toryum cevherrezervinin yaklaşık 380000 ton olduğu tahmin edilmektedir [24]. Türkiye, toryum açısından dünyanın ikinci büyük rezervine sahip ülkedir. Uranyum yatakları arama çalışmaları sonucunda ise Türkiye'de 9129 ton görünür uranyum cevher rezervi keşfedilmiştir [25].

### 1.3.6 Türkiye yenilenebilir enerji potansiyeli

Türkiye'de var olan yenilenebilir enerji kaynakları; hidroelektrik, rüzgâr, güneş, biyokütle ve jeotermal enerjidir. Çizelge 1.15'de yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelleri hakkında bilgi verilmiştir.

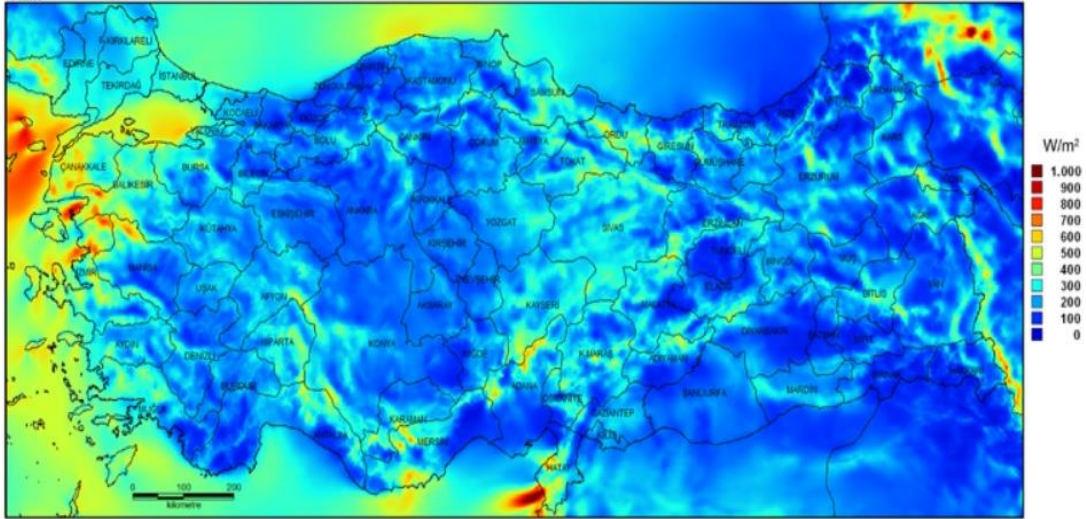
**Çizelge 1.15 : Türkiye yenilenebilir enerji kaynak rezervi.**

	Hidrolik	Rüzgar	Güneş	Biyokütle	Jeotermal
Kurulu Güç (MW)	25867,8	4503,2	248,8	362,4	623,9
Elektrik Üretimi (GWh)	671453,8	11625,5	194	1758,2	3424
Isı (Bin TEP)			795		4,99
2023 Hedefi (MW)	36000	20000	5000	1000	1000
Potansiyel	13991,5	48000 MW	15000 kWh/m <sup>2</sup> yıl	20 Milyon TEP	31500 MWt  2000 MW

Sırası ile Türkiye'nin sahip olduğu rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji potansiyelleri hakkında bilgiler verilecektir.

### Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli

Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyelini belirlemek adına Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) oluşturulmuştur. Harita oluşturulurken hesaplamalar, 50 m yükseklik ve 7,5 m/s rüzgâr hızına sahip alanlarda kilometre kare başına 5 MW gücünde bir rüzgâr santrali kurulabileceği kabülü ile yapılmıştır.

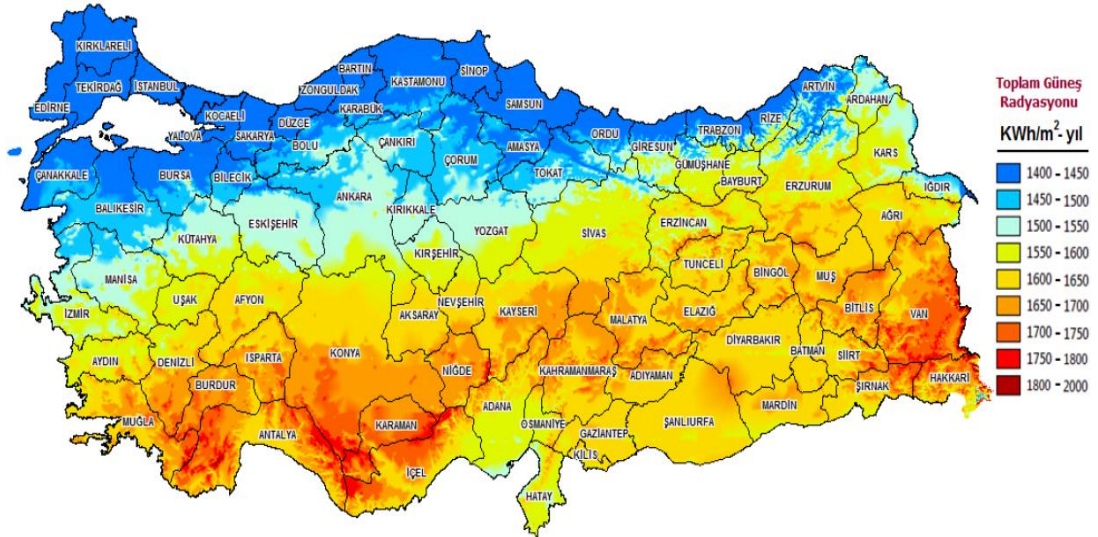


Şekil 1.22 : Rüzgar güç yoğunluğu haritası (50m)

Şekil 1.22 bu kabülller ışığında oluşturulan, 50 m yükseklikte Türkiye'nin rüzgâr enerjisi güç yoğunluğu haritasıdır. Sonuç olarak, Türkiye'nin toplam rüzgâr enerji potansiyeli 48000 MW olarak hesaplanmıştır [26].

### Türkiye güneş enerjisi potansiyeli

Türkiye, coğrafi konumu itibariyle güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan bir ülkedir. Güneş enerjisinden daha etkin ve verimli faydalanmak adına Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) oluşturulmuştur.



Şekil 1.23 : Güneş enerjisi potansiyel atlası

Türkiye'nin bir yıllık güneşlenme süresi 2737 saat olup günlük güneşlenme süresi de 7,5 saate tekabül etmektedir. Ayrıca ülkemize ulaşan güneş enerjisi miktarı 1527 kWh/m<sup>2</sup>yıl, günlük güneş enerjisi miktarı da 4,2 kWh/m<sup>2</sup>'dir [27]. Tüm bu kabüller ışığında güneş enerjisi potansiyel atlası oluşturulmuştur. Türkiye'nin yıllık 110 gün olmak üzere yüksek güneş enerji potansiyeli bulunmaktave gerekli yatırımların yapılması halinde bir yılda birim metrekare başından alınacak güneş enerjisi miktarı 1100 kWh'dır[28].

### **Türkiye biyokütle enerjisi potansiyeli**

ETKB'den alınan verilere göre Türkiye'nin biyokütle atık potansiyelinin 8,6 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP), üretilecek biyogaz miktarının da 1,5 ve 2 MTEP arasında olduğu tahmin edilmektedir. 2015 yılsonu itibariyle Türkiye'nin sahip olduğu toplam biyokütle enerjisi potansiyeli 20 MTEP'dir[20].

### **Türkiye jeotermal enerji potansiyeli**

Ülkemizin jeolojik ve coğrafi konumu itibariyle diğer ülkelere göre jeotermal enerji açısından avantajlı bir bölgededir ve çok sayıda jeotermal kaynak mevcuttur. Teknik jeotermal enerji potansiyeli 31500 MWt olarak hesaplanmıştır. Potansiyeli oluşturan alanların yaklaşık %78'i Batı Anadolu, %9'u İç Anadolu, %7'si Marmara Bölgesi, %5'i Doğu Anadolu ve kalan %1 kısım da diğer bölgelerde bulunmaktadır. Jeotermal enerjinin elektrik üretiminde kullanılabildiği gibi doğrudan kullanımı da mevcuttur. Jeotermal enerjinin doğrudan kullanım uygulamalarında Türkiye dünyada ilk beş ülkenin içerisinde yer almaktadır.

## **1.4 Türkiye Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü**

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından hazırlanan kurulu güç istatistiklerine göre Türkiye'nin kurulu güç tablosu aşağıdaki çizelgede görülmektedir.

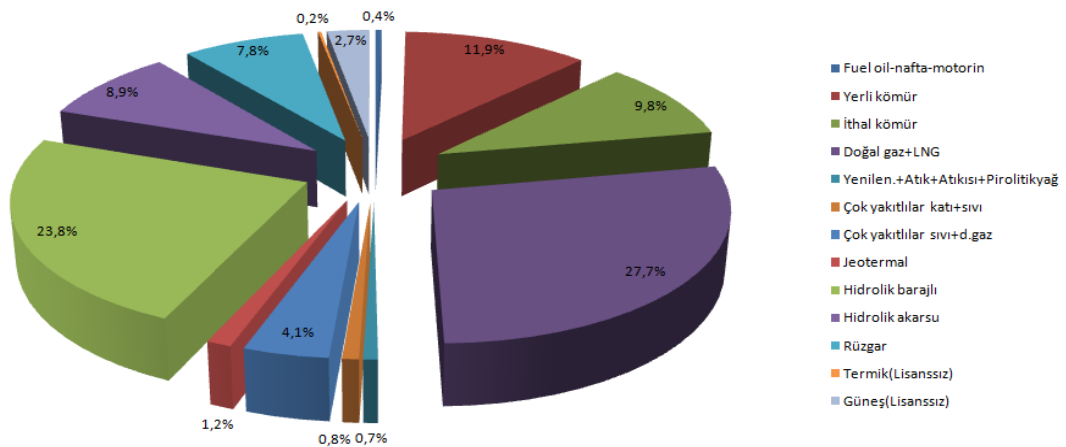
Elektrik enerjisi üretiminde kullanılmakta olan kaynaklar; fuel oil, kömür, doğal gaz, LNG, jeotermal enerji, hidroelektrik enerji, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisidir.



**Çizelge 1.16** :30 Kasım 2017 sonu itibariyle yakıt cinsine göre Türkiye kurulu gücü.

Yakıt cinsi	Kurulu güç (MW)
Fueloil-nafta-motorin	303,6
Yerli kömür	9872,6
İthal kömür	8133,9
Doğal gaz+LNG	23063,7
Yenilen.+Atık+Atıkısı+Pirolitikağ	562,7
Çok yakıtlılar katı+sıvı	682,9
Çok yakıtlılar sıvı+d.gaz	3369,6
Jeotermal	1019,7
Hidrolik barajlı	19776,0
Hidrolik akarsu	7428,7
Rüzgâr	6447,8
Güneş	13,9
Termik(Lisanssız)	193,5
Rüzgâr(Lisanssız)	31,6
Hidrolik(Lisanssız)	7
Güneş(Lisanssız)	2331,8
<b>Toplam</b>	<b>83138,9</b>

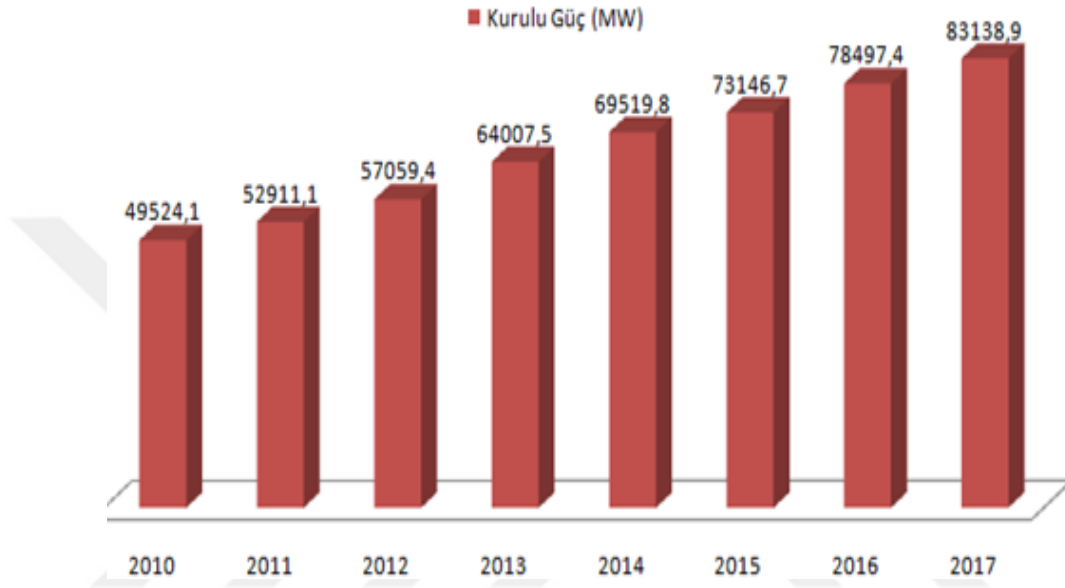
Çizelge 1.16' da da belirtildiği üzere 2017 Kasım ayı sonu itibariyle Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi kurulu güç değeri 83138,9 MW'dır. Şekil 1.24'de kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı verilmiştir.



**Şekil 1.24** : Kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı

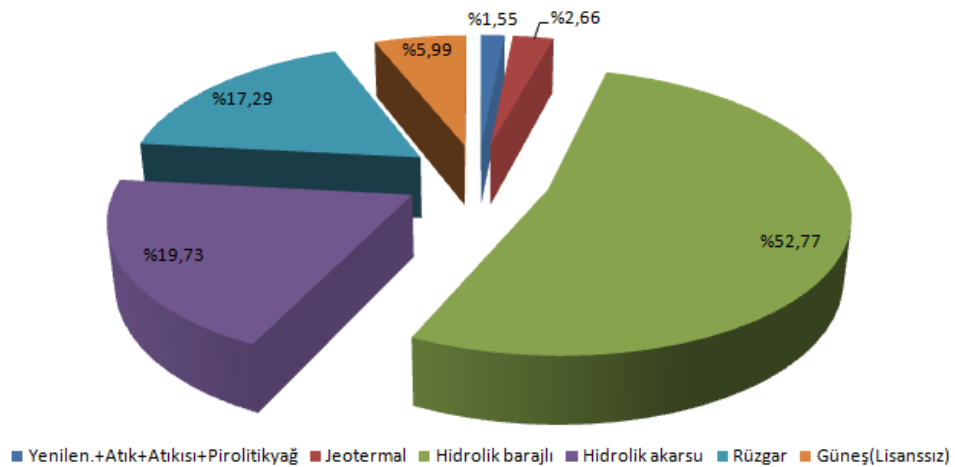
Türkiye elektrik üretiminde en fazla kullanılan kaynak %27,7'lik pay ile doğal gazdır. Doğal gazdan sonra en çok kullanılan kaynak yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağı olan hidroelektrik enerjidir. Yerli ve ithal kömürün de elektrik üretimindeki payı büyüktür.

Türkiye'nin kurulu güç değerinin zaman içerisindeki değişimi Şekil 1.25'de görülmektedir.



Şekil 1.25 : Türkiye kurulu güç değerinin 2010-2017 yılları arasındaki değişimi

2010 yılından 2017 yılına kadar kurulu güç değerinde büyük bir artış gözlemlenmektedir. Bunun sebebi teknolojinin gelişmesi ile enerjiye duyulan ihtiyacın artmasıdır.

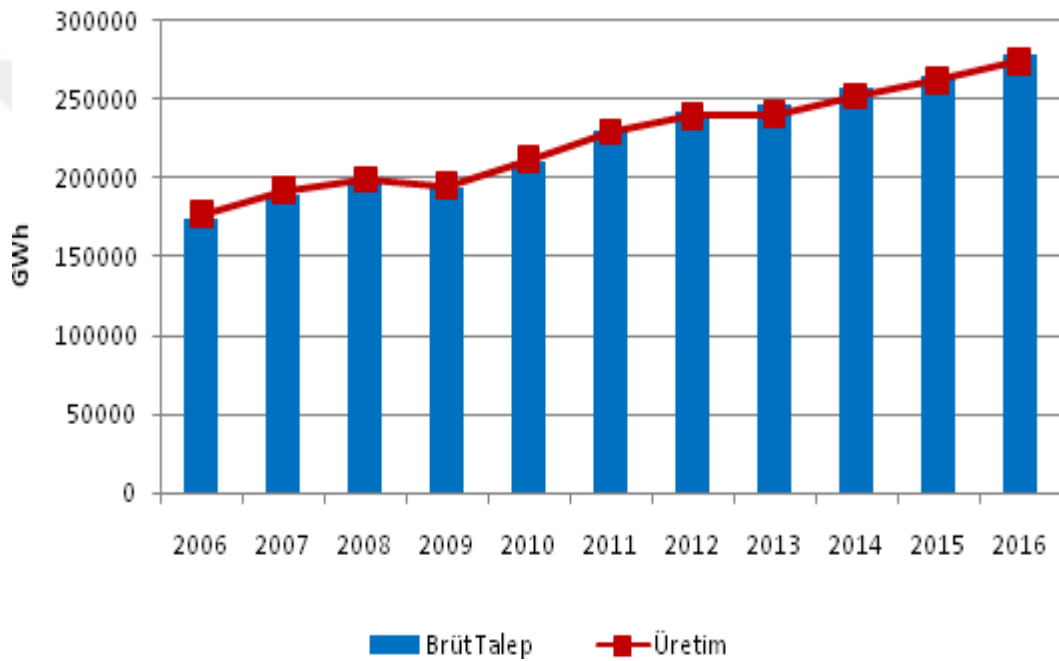


Şekil 1.26 : Türkiye kurulu gücünde yenilenebilir enerji kaynaklarının dağılımı

Şekil 1.26'da Türkiye elektrik enerjisi üretiminde kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının dağılımı görülmektedir. Kurulu güçte yenilenebilir enerji kaynaklarının yarısından fazlasını hidroelektrik enerji oluşturmaktadır. Hidroelektrik enerji kaynağından sonra en fazla kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı %17,2 oranla rüzgârdır.

### 1.5 Türkiye Elektrik Enerjisi Üretimi ve Talep Gelişimi

Şekil 1.27'de 2006 ve 2016 yılları arasında Türkiye elektrik enerjisi brüt talebi ve buna bağlı üretim grafiği verilmiştir.



Şekil 1.27 : 2006-2016 Türkiye elektrik enerjisi üretimi ve talep gelişimi

Elektrik enerjisi talebi her geçen yıl artmaktadır. Üretim de bu talebe karşılık her geçen yıl artmıştır. Talep artışının nedeni nüfus artışı ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte elektrik enerjisine duyulan ihtiyacın her geçen gün artmasıdır.

TEİAŞ Planlama ve Stratejik Yönetim Dairesi Başkanlığı tarafından hazırlanan "10 Yıllık Talep Tahmin Raporu" adlı çalışmada Türkiye'nin 2017-2026 yılları arasında elektrik talebi senaryoları hakkında bilgi verilmektedir. Bu çalışmada elektrik tüketim tahminleri düşük, referans ve yüksek elektrik enerjisi taleplerine göre ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Aşağıdaki çizelgelerde düşük, baz ve yüksek senaryoya göre 2017 ve 2026 yılları arasında brüt elektrik enerjisi tüketim değerleri verilmiştir. Burada dağıtım sistemleri tüketicileri, TEİAŞ tarafından öngörülen diğer tüketiciler, iç ihtiyaç ve iletim kayıplarının da son 10 yılın ortalamasıyla 2026 yılına kadar devam edeceği öngörülerek, brüt tüketim düşük, baz ve yüksek talep senaryosuna göre hesaplanmıştır.

**Çizelge 1.17:** Düşük senaryoya göre Türkiye 2017-2026 yılları brüt elektrik tüketim tahmini (GWh).

Yıl	Dağıtım Sistemi Tüketicileri	Diğer Tüketiciler	Toplam	İç İhtiyaç	İletim Kaybı	Brüt Tüketim
2017	192783	66572,4	259355,5	12275,9	6425,9	278057,2
2018	197189,3	69239,5	266428,8	12608,9	6596,7	285634,4
2019	202057,3	71933	273990,2	12960	6799,3	293749,5
2020	206821	74562,5	281383,5	13308,4	6978,2	301670,1
2021	211683,7	77176,3	288860	13660,9	7159,3	309680,2
2022	216544,1	79749,5	296293,6	14011,3	7339,6	317644,4
2023	221321,5	82260,2	303581,6	14354,8	7516,5	325452,9
2024	225969,1	84696,3	310665,4	14688,6	7688,7	333042,7
2025	230328,8	87001,2	317329,5	15002,5	7850,9	340182,9
2026	234583,8	89246,9	323830,8	15308,7	8009,4	347148,9

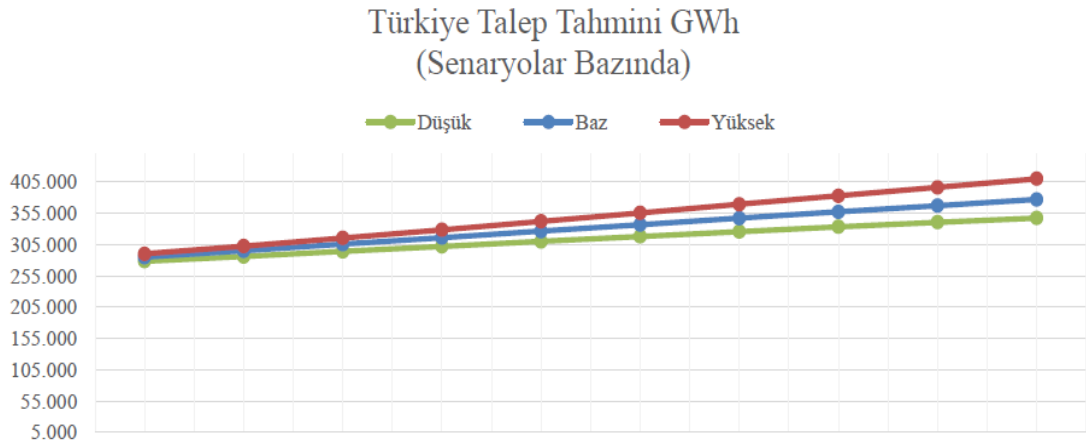
**Çizelge 1.18 :** Baz senaryoya göre Türkiye 2017-2026 yılları brüt elektrik tüketim tahmini (GWh).

Yıl	Dağıtım Sistemi Tüketicileri	Diğer Tüketiciler	Toplam	İç İhtiyaç	İletim Kaybı	Brüt Tüketim
2017	197276,9	68108,1	265385,1	12584,6	6583,1	284552,8
2018	203470,1	71430,3	274900,4	13034,4	6813,4	294748,3
2019	209981,9	74742,4	284724,3	13493,8	7071,2	305289,3
2020	216369,8	77994,9	294364,7	13949,8	7304,9	315619,3
2021	222896,3	81255,7	304151,9	14412,7	7542,3	326106,9
2022	229395	84475,2	313870,2	14872,4	7778,2	336520,8
2023	235802,2	87636,8	232439	15325	8010,6	346774,6
2024	242131,3	90750,2	332881,5	15771,5	8240,2	356893,2
2025	248360,1	93810,5	342170,6	16210,7	8466,3	366847,6
2026	254586,9	96857,6	351444,5	16649,1	8692,2	376785,8

**Çizelge 1.19 :** Yüksek senaryoya göre Türkiye 2017-2026 yılları brüt elektrik tüketim tahmini (GWh).

Yıl	Dağıtım Sistemi Tüketicileri	Diğer Tüketiciler	Toplam	İç İhtiyaç	İletim Kaybı	Brüt Tüketim
2017	200998,9	69399	270397,9	12823,1	6704,6	289925,6
2018	208653,5	73258,1	281911,6	13367,9	6983,3	302262,8
2019	216847	77198,2	294045,2	13937,1	7296,9	315279,3
2020	225060,9	81143	306203,8	14512,7	7591,6	328308,1
2021	233556,2	85160,1	318716,3	15105,1	7894,9	341716,4
2022	242163,6	89199,2	331632,8	15703,9	8201,7	355268,4
2023	250818,3	93243,2	344061,5	16305,1	8509,9	368876,5
2024	259529	97300,2	356829,3	16909,6	8819,9	382558,7
2025	268131,4	101311,6	369443,1	17506,6	9126,4	396076,1
2026	276791,3	105342,3	382133,5	18107,3	9434,9	409675,7

Şekil 1.28'den anlaşılacağı üzere elektrik enerjisi talebinin, 2026 yılında düşük senaryo için ortalama %2,6 artış ile yaklaşık 340 milyar kWh değerini aşması, baz senaryo için ortalama %3,2 artış ile yaklaşık 370 kWh değerini aşması, yüksek senaryo içinse ortalama %3,8 artışla yaklaşık 400 milyar kWh değerini aşması tahmin edilmektedir.



**Şekil 1.28 :** 2017-2026 yılları senaryo bazlı Türkiye talep gelişimi

## 1.6 Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinin Durumu

Türkiye’nin fosil yakıt ve doğal gaz rezervi az olduğundan, kullanılan petrol ve doğal gazın tamamı ithal edilmektedir[29]. Tüm gelişmekte olan ülkelerde olduğu gibi Türkiye’de de nüfus artışı ve teknolojiye duyulan gereksiniminin artması ile enerji talebi her geçen yıl yükselmektedir. İthal edilen enerji kaynakları nedeniyle enerji talebinin artması ülkemizde enerji krizine yol açmaktadır. Yerli kaynaklarının öneminin kavranması ve kullanımının artması enerji krizlerini önlemede büyük rol oynamaktadır. Rüzgâr enerjisi yerli bir kaynak olup yenilenebilir, çevre dostu ve tükenme riski taşımayan bir enerji kaynağı olduğundan Türkiye elektrik üretimindeki payı her geçen yıl daha da artmaktadır. TEİAŞ Kasım 2017 verilerine göre toplam kurulu güçte rüzgârın payı %7,8’dir. Yenilebilir enerji kaynakları arasında ise rüzgârın payı %17,29’dur.

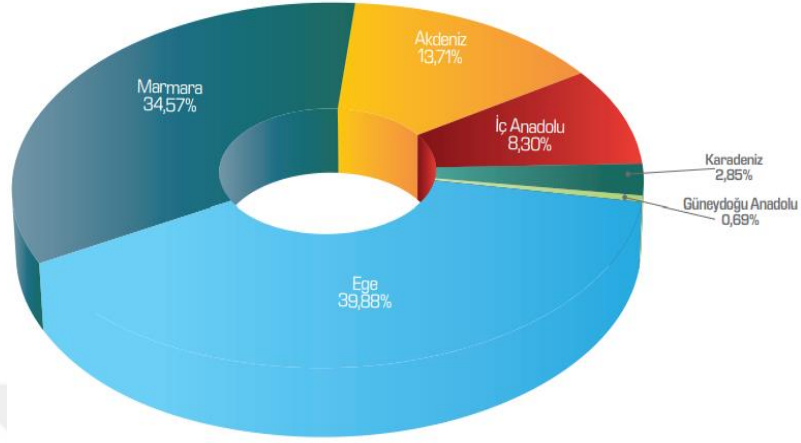
Çizelge 1.20’de 2007 ve 2017 yılları arası Türkiye rüzgar enerjisi kurulu güç gelişimi görülmektedir[30].Rüzgâr enerjisinin kurulu gücü her geçen yıl artmakta ve ülke enerji sektöründe rüzgâr önemli bir kaynak haline gelmektedir.

**Çizelge 1.20 :** 2007-2017 yılları arası Türkiye’de rüzgâr enerjisi kurulu güç gelişimi.

Yıl	Kurulu güç (MW)
2007	146,3
2008	363,7
2009	791,6
2010	1329,15
2011	1805,85
2012	2312,15
2013	2958,45
2014	3762,1
2015	4718,3
2016	6106,05
2017	6483,9

Türkiye’ nin sahip olduğu rüzgâr enerji potansiyeli 48000 MW değerindedir. 2017 yılı rüzgâr enerjisi kurulu gücü 6483,9 MW’dır. Bu verilere göre rüzgâr enerji potansiyelinin yalnızca %13,5 kadarından faydalanılmaktadır.

Ayrıca ülkemizde 158 adet işletme halinde olan rüzgâr enerji santrali ve 32 adet inşa halinde olan rüzgâr enerji santrali bulunmaktadır. Şekil 1.29’da rüzgâr enerji santrallerinin bölgelere göre dağılımı incelenmektedir[30].



**Şekil 1.29 :** İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin bölgelere göre dağılımı

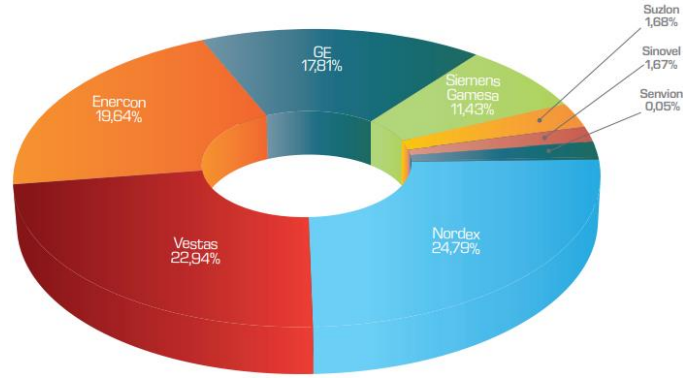
İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin %39,88’si Ege, %34,57’si Marmara, %13,71’i Akdeniz, %8,3’ü İç Anadolu kalan kısım da Karadeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgesinde yer almaktadır.

**Çizelge 1.21 :** İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin bölgelere göre dağılımı.

Bölge	Kurulu güç (MW)	%
Ege	2585,85	39,88
Marmara	2241,5	34,57
Akdeniz	888,7	13,71
İç Anadolu	538,2	8,3
Karadeniz	189,9	2,85
Güneydoğu	44,75	0,69

Çizelgede işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç değerleri bölgelere göre detaylı olarak verilmiştir. Güneydoğu ve Doğu Anadolu bölgesinin coğrafi yapısı nedeniyle rüzgâr santralleri için uygun bölgeler olmadığı bilinmektedir.

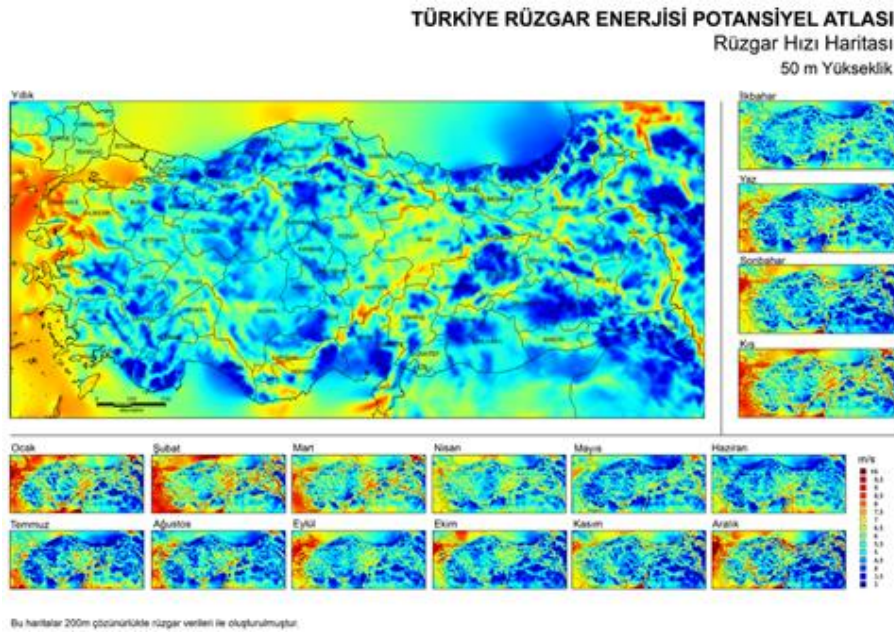
Şekil 1.30’da işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin türbin markalarına göre dağılımı verilmiştir.



**Şekil 1.30 :** İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin türbin markalarına göre dağılımı

Türkiye'de en çok kullanılan türbin markası %24,79 oran ve 1607,9 MW kurulu gücü ile Nordex'dir. Vestas %22,94 oran ve 1487,4 MW kurulu güç değeri ile ikinci sıradadır. Türkiye'de yaygın olarak kullanılan diğer türbin markaları ise Enercon, GE, Siemens Gamesa ve Suzlon'dur.

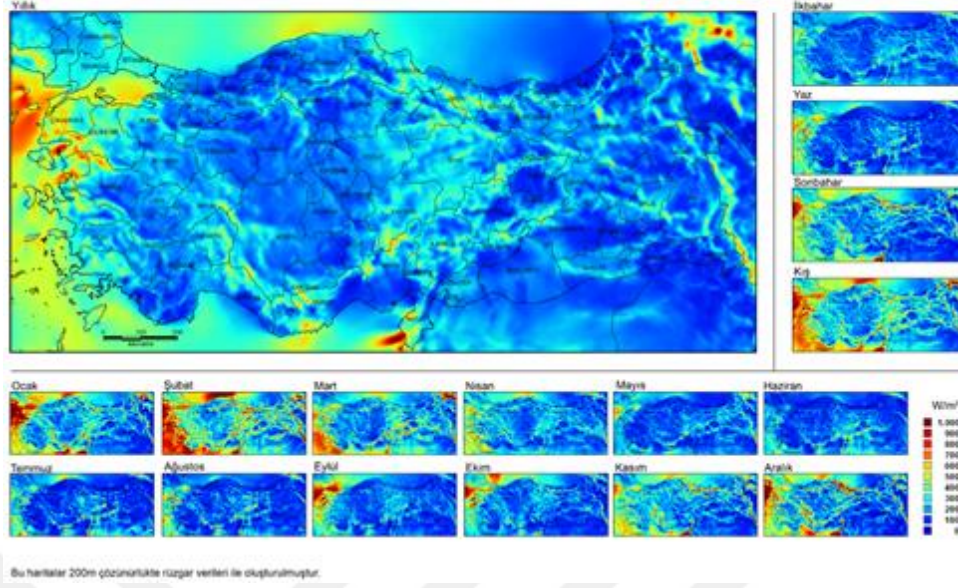
Rüzgâr enerjisinden daha etkin ve verimli faydalanmak adına Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) oluşturulmuştur. Bu atlaslar sayesinde 50 m yükseklikte rüzgâr güç yoğunluğu, 50 m yükseklikte rüzgâr hız dağılımı, 100 m yükseklikte rüzgâr güç yoğunluğu, 100 m yükseklikte rüzgâr hız dağılımı hakkında bilgiler edinilebilmektedir. Ayrıca seçilen herhangi bir ilde rüzgâr enerji potansiyelini belirlemek adına kullanılacak bilgiler bu haritalarda mevcuttur.



**Şekil 1.31 :** 50 m yükseklikte rüzgâr hızı haritası



**TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ATLASI**  
Rüzgar Güç Yoğunluğu Haritası  
50 m Yükseklik



**Şekil 1.32 :** 50 m yükseklikte rüzgâr güç yoğunluğu haritası

Şekil 1.31 ve Şekil 1.32' de Türkiye'de 50 m yükseklikte rüzgar hızı ve rüzgar güç yoğunluğu bilgileri olan enerji potansiyel atlası haritaları verilmiştir. Haritalar dikkatli bir şekilde incelendiğinde özellikle kıyı kesimlerde ve Marmara ile Ege bölgelerinde rüzgâr enerji potansiyelinin daha fazla olduğu görülmektedir.

**Çizelge 1.22 :** Bölgelere görerüzgâr enerji potansiyeli.

Bölge	Yıllık ortalama rüzgâr hızı(m/s)	Yıllık ortalama rüzgâr yoğunluğu(W/m <sup>2</sup> )
Marmara	3,29	51,91
Ege	2,65	23,47
Akdeniz	2,45	21,36
İç Anadolu	2,46	20,14
Karadeniz	2,38	21,31
Doğu Anadolu	2,12	13,19
Güneydoğu Anadolu	2,69	29,33
Ortalama	2,58	25,82

Çizelge 1.22, bölgelere göre yıllık ortalama rüzgâr hızı ve yıllık ortalama rüzgâr güç yoğunluğu hakkında sayısal bilgiler içermektedir. Türkiye'nin kıyı şeridi 8337 km olmakla beraber 1685 km'si Karadeniz'de, 2510 km'si Marmara'da, 2600 km'si Ege

ve 1542 km'si Akdeniz bölgesinde bulunmaktadır. Kıyı şeridinin sahip olduğu toplam rüzgârenerj potansiyeli 17393,2 MW'dır[31].



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Günümüzde rüzgâr enerjisi potansiyel analizinde pek çok yöntem kullanılmaktadır. En sık kullanılan yöntemler istatistiksel analizler ve bilgisayar yazılımları ile yapılan çözümlemelerdir. Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları en sık kullanılan istatistiksel analizlerdendir. Rüzgâr enerji potansiyelini belirlemek adına kullanılan başlıca bilgisayar yazılımları ise Wasp, WindPro, WindFarmer, Windographer, Homer, RETScreen ve WindSim'dir. Tezin bu bölümünde öncelikle Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları hakkında bilgi verilecek, sonrasında rüzgâr potansiyel analiz programları incelenecektir.

Weibull dağılımı iki parametrelidir olup, Rayleigh dağılımında tek parametre bulunmaktadır. Rayleigh dağılımı tek parametrelidir için Weibull dağılımına göre daha az esneklik gösterir. Fakat Rayleigh dağılımında parametreler daha kolay hesaplanabilmektedir[32].

Genel haliyle Weibull dağılım fonksiyonu;

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ - \left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (2.1)$$

şeklindedir. Bu denklemde  $f(v)$  ifadesi, rüzgâr hızının olasılık yoğunluğu,  $k$  şekil parametresi ve  $c$  ölçek parametresidir[33].

Weibull kümülâtif dağılım fonksiyonu;

$$F(v) = 1 - \exp \left[ - \left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (2.2)$$

ile ifade edilmektedir.  $k$  ve  $c$  parametreleri ise aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir.

$$c = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^k}{n} \right]^{\frac{1}{k}} \quad (2.3)$$

$$k = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (2.4)$$

Weibull dağılım fonksiyonu, kümülâtif dağılım fonksiyonu, k ve c parametreleri yukarıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir[34].Rayleigh dağılım fonksiyonu denklemlerinden olan Rayleigh yoğunluk fonksiyonu;

$$f_r(v)=\left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{v}{v_m}\right)\exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{v_m}\right)^2\right] \quad (2.6)$$

şeklinde olmakla beraber, Rayleighkümülatif dağılım fonksiyonu;

$$F_R(v)=1-\exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{v_m}\right)^2\right] \quad (2.7)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Rayleigh dağılım fonksiyonunuda hesaplanması gereken bir diğer ifade olan esme hızı saati;

$$h_r=\frac{\pi}{2}\frac{v_{ri}}{v_{ort}^2}\exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v_{ri}}{v_{ort}}\right)^2\right] \quad (2.8)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Formülde  $v_{ri}$  herhangi bir anda rüzgâr hızı,  $h_r$  esme saati yüzdesini ifade etmektedir. Rüzgâr enerji santrali yatırımlarında bölgede hakim olan rüzgârın değişim ve dağılımı hakkında bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Rayleigh dağılım fonksiyonu yardımıyla rüzgârın değişim ve dağılım oranı hakkında bilgiler edinilebilmektedir.

Literatürde Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları kullanılarak yapılan rüzgâr enerji potansiyel analiz çalışmaları mevcuttur. Rayleigh ve Weibull dağılımları kullanılarak Osmaniye bölgesinde rüzgâr enerjisi değerlendirme çalışması yapılmıştır. Bölgenin 2013 yılına ait bir yıllık rüzgâr verileri Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Osmaniye Meteoroloji istasyonundan temin edilmiştir. Alınan rüzgâr verileri kullanılarak rüzgar hızı esme saatlerinin Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonlarına uygunluğu araştırılmıştır. Dağılım fonksiyonlarının parametrelerini hesaplamak için en sık kullanılan yöntemlerden olan Grafik ve Moment metotları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda Weibull dağılım fonksiyonunda grafik metodu, gerçek değerlere moment metodundan daha çok uygunluk göstermiştir. Rayleigh dağılımında moment metodu kullanılarak gerçek verilere daha yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca Weibull dağılımı ile elde edilen veriler, Rayleigh dağılımına göre elde edilen değerlerden daha doğru sonuçlar vermiştir [32].

Bir diğerk çalışmada Menemen bölgesinde rüzgâr türbinleri için Rayleigh ve Weibull dağılımlarının kullanılması araştırılmıştır. 2008 ve 2009 yılları arasındaki rüzgâr verilerinin saatlik ölçümleri alınarak hesaplamalar yapılmıştır. İki yıl süreli saatlik rüzgâr verileri meteoroloji istasyonundan sağlanmıştır. Sonuçta Weibull ile yapılan değerlendirmelerin daha uyumlu sonuçlar verdiği anlaşılmıştır[35].

Türkiye'nin Güney, Güneybatı ve Batı bölgelerindeki rüzgâr enerji potansiyeli adlı çalışmada; Akhisar, Bababurnu, Belen, Datça, Foça, Gelendost, Gelibolu, Gökçeada ve Söke'nin rüzgâr enerji potansiyellerinin istatistiksel analizleri yapılmıştır. Rüzgârhız verileri Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nden alınmıştır. Çalışmada istatistiksel analiz yöntemlerinden olan Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları kullanılmıştır. Ayrıca WasP yazılımı da incelenmiştir. Dağılım fonksiyonları ve program tarafından elde edilen sonuçlar gerçek rüzgâr verileri ile karşılaştırılmış ve Weibull dağılım fonksiyonu ve WasP yazılımı ile alınan sonuçların Rayleigh dağılım fonksiyonlarından daha doğru olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bölgelerin rüzgâr enerji potansiyelleri, rüzgâr enerji santral yatırımları için uygun bulunmuştur[36].

Rüzgâr enerjisi potansiyelinin araştırılmasında Weibull ve Rayleigh dağılımlarının kullanılması adlı çalışmada Anadolu Üniversitesi İki Eylül Kampüsü'nün 2005 yılı Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim olmak üzere dört aylık, saatlik rüzgâr verileri alınmış ve istatistiksel yöntemlerle rüzgâr enerji potansiyeli araştırılmıştır. Bu çalışmada Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonlarının çözümünde en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Sonuçta bölgenin rüzgâr enerji potansiyelinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir[37].

Türkiye'nin Güney bölgesi rüzgâr enerji potansiyelini belirlemek için yapılan bir diğerk istatistiksel analizde de Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre; bölgenin rüzgâr karakteristiklerine Weibull dağılım fonksiyonu, Rayleigh dağılım fonksiyonundan daha uyumludur[38].

Rüzgâr enerjisi potansiyel hesaplamalarında istatistiksel analizlerin yanında WASP, WindPro, WindFarmer, WindSim, Windographer, Homer ve RetScreen gibi bilgisayar yazılımları da kullanılmaktadır.

WasP (TheWind Atlas Analysis and The Application Program) adlı program Danimarka Teknik Üniversitesi Riso Laboratuvarında geliştirilmiştir. Yazılım ilerüzgâr hız verilerinin Weibull dağılımına uygun olduğu varsayılarak, rüzgâr atlası

oluşturma, rüzgâr hız tahmini, rüzgâr enerji santrali enerji hesaplamaları gibi analizler gerçekleştirilmektedir. WasP yazılımında analizler lineer denklem özömleri ile gerçekleştirilmektedir. Lineer modellerin aksine, lineer olmayan modeller de bulunmaktadır ve bu modellerde NavierStokes denklemleri yazılımlar yardımıyla özömlenmektedir. Lineer olmayan modellerden olan WindSim ve CFD gibi yazılımlar rüzgâr enerjisi potansiyel analizi çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürde bilgisayar yazılımları kullanılarak yapılan rüzgâr enerjisi potansiyel analiz çalışmaları mevcuttur.

“Kompleks bir sahada birden fazla ölçüm direği kullanılarak yapılan saha modellemesi ve enerji analizi” adlı çalışmada, 80 m yükseklikte 2012-2015 yılları arasında ölçüm yapan iki adet ölçüm direğinden alınan rüzgâr verileri ile analizler yapılmıştır. Lineer ve lineer olmayan WasP ve WindSim gibi yazılımlarla ayrı ayrı modellemeler yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda WindSim modelinin gerçeğe en yakın sonuçlar verdiği görölmüştür. Rüzgârprofili modellemelerinde de WindSim yazılımının öne çıktığı incelenmiştir[39].

Literatürde WindPro ve WasP yazılımları da birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Her iki program da rüzgâr akışlarını lineer ReynoldsAverageNavierStokes denklemlerini kullanarak özömlenmektedir. Çalışma sonucuna göre, enerji üretimi tahminleri ve rüzgâr modelleme işlemlerinde her iki program da güvenilirdir. Ayrıca rüzgâr verilerinin alındığı yükseklik ile rüzgâr türbinlerinin yüksekliğinin aynı olduğu durumlarda, enerji üretim tahminlerinin gerçeğe daha yakın olduğu incelenmiştir[40].

“Rüzgâr enerjisi potansiyel hesaplamalarında kullanılan bilgisayar programlarının karşılaştırılması” adlı çalışmada WasP, WindPro, WindFarmer, Windographer, Homer, RETScreen ve WindSim gibi yazılımlar tanıtılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada sahada tek türbin olması durumunda 10 metreden alınan ölçümlerle elde edilen sonuçlarda kullanılan programlar arasında en fazla %20’lik farklı sonuçlar gözlemlenmiştir. Rüzgâr ölçümlerinin 30 metreden alındığı durumda yapılan analizlerde bu farklılığın %10 değerine düştüğu gözlemlenmiştir. Ölçümlerin 50 metreden alındığı durumda ise Homer ve RETScreen %10 değerinin üzerinde farklı sonuçlar verirken diğer programlar birbirleri ile %8 ve altında yakın sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak, rüzgâr verilerinin alındığı ölçüm yüksekliği arttıkça programların hesaplama değerleri birbirine yaklaşmaktadır. Tek türbin için

hesaplamalar yapıldıktan sonra 12 türbinden oluşan 24 MW gücünde bir rüzgâr tarlası için hesaplamalar yapılmıştır. Rüzgâr ölçüm direğinden alınan rüzgâr verilerinin yanında türbin göbek yüksekliğinde bulunan anemometreden alınan rüzgâr verileri de kullanılmıştır. Sonuçlar türbinlerin gerçek enerji üretim değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu durumda 10 metreden alınan rüzgâr verileri ile yapılan analizlerde kullanılan tüm programlardan elde edilen sonuçlar ile gerçek değerler arasında %15'in üzerinde farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. 30 metreden alınan rüzgâr verileri ile analiz yapıldığında WasP, WindPRO ve WindFarmer %10'un altında hata oranında iken WindSim %40 hata oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. 50 metreden alınan rüzgâr verileri ile yapılan analizlerde WindSim hata oranı %20 ve üzerindedir, diğer programların hata oranı ise %8 ve altındadır. Türbinlerin göbek yüksekliğinden alınan rüzgâr verileri ile yapılan analizlerde gerçek değerlere yakın sonuçlar elde edilmektedir[41].

Literatürde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleri kullanılarak yapılan pek çok rüzgâr enerjisi potansiyel analizi mevcuttur. Mauritius adası için yapılan bir çalışmada WindSim programı kullanılarak HAD yöntemleri ile rüzgâr enerjisi potansiyeli incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, WindSim yazılımı Mauritius adası gibi kompleks bir arazinin rüzgâr enerji potansiyel analizi için uygun görülmüştür. Mevsimsel rüzgâr hızlarının coğrafik dağılımı yerel topoğrafyadan etkilenmektedir. Mauritius adasının rüzgâr enerji potansiyelinin bölgenin güney doğusunda, merkezinde ve güney batısında yıl boyunca daha fazla olduğu gözlemlenmiştir[42].

Kore'de yapılan bir incelemede kompleks bir arazinin rüzgâr enerji potansiyel değerlendirmesi WindSim programı ile yapılmıştır. Altı farklı rüzgar ölçüm istasyonuna yakın altı adet kompleks yapıda bölge seçilmiş, bu bölgelerin rüzgar verileri AWS (AutomatedWeatherStation)'dan alınmıştır. WindSim programı yardımıyla rüzgâr hız tahminleri yapılmıştır. Yapılan bu tahminler gerçek rüzgâr verileri ile karşılaştırılmıştır. Altı bölgenin hata oranı %15 ve civarında olmakla beraber rüzgâr hızlarının gerçek değerleri ile program tarafından ölçülen tahmini değerlerin birbirine yakınlık gösterdiği incelenmiştir. Ayrıca çalışma sonuçlarına göre bölgede rüzgâr hızının daha fazla olduğu bir alanı belirlemek için AWS verileri yeterli görülmüştür. Meteoroloji direği, rüzgar hızının daha fazla olduğu belirlenen alana yerleştirilmiştir ve rüzgar hız ve yön verileri ölçülmüştür[43].

Diğer bir çalışmada kompleks yapıda bir bölge olan Massachusetts Teknoloji Enstitüsü kampüsünün rüzgâr enerji potansiyel analiz çalışması CFD metodu ile yapılmıştır. Bölgenin meteoroloji verileri ölçülmüş ve CFD simülasyonları ile karşılaştırılmıştır. CFD simülasyonları bölgenin rüzgâr hızı, rüzgar potansiyeli hakkında rüzgar hız haritaları oluşturarak bilgi vermektedir. Rüzgârın değerlendirilmesi için CFD tabanlı pek çok hesaplama tekniği kullanılmış ve kullanılan bütün tekniklerin sonucunda bölgenin batısının doğusundan daha fazla rüzgâr enerji potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir[44].

Arazi yapısının kompleks olduğu Bodrum'da CFD kullanılarak rüzgâr enerjisi potansiyel değerlendirmesi ve rüzgâr tarlası modellemesi yapılmıştır. CFD hesaplamalarında WindSim programı kullanılmış ve Onshore ve Offshorerüzgâr tarlaları için yıllık enerji üretimi ve wake loss parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Bodrum'un birçok bölgesinde rüzgâr enerji potansiyeli dikkate değerdir. WindSim transferredclimatology modülüne göre Onshorerüzgâr tarlasının enerji potansiyeli daha fazladır. Analizler farklı Wake modellerine göre gerçekleştirilmiş wake modelleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Onshore ve Offshorerüzgâr tarlalarının her ikisinde de türbinler birbirlerine yakın olacak biçimde konumlandırıldığında wake kayıpları arttığından türbinlerin verimlerinin düştüğü gözlemlenmiştir[45].

Literatürde Bursa ili için yapılan bir çalışmada Uludağ'ın rüzgâr enerji potansiyeli Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları yardımıyla hesaplanmıştır. 2000 ve 2006 yılları arasındaki rüzgâr dataları kullanılarak k ve c parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçlarına göre; k 1,78, c parametresi ise 7,97 m/s'dir. Aylık ortalama rüzgâr hızının en fazla olduğu tarih 2001 yılının Nisan ayı olmakla beraber 17,40 m/s değerinde hesaplanmıştır. Aylık ortalama rüzgâr hızının en az olduğu dönem ise 2006 yılı Kasım ayıdır ve 3,15 m/s olarak hesaplanmıştır. Weibull c parametresi en fazla olduğu dönem yaz mevsimi iken en düşük değeri sonbahar mevsimindedir[46].



### 3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde rüzgâr enerjisi ile ilgili temel enerji denklemleri, rotor yarıçapının ve rüzgâr hızının rüzgâr enerjisi üzerine etkileri, yüksekliğe bağlı rüzgâr hız değişimi, rüzgâr enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler incelenecektir.

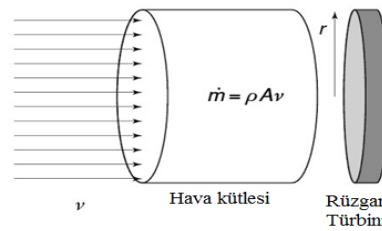
#### 3.1 Rüzgâr Enerjisi Temel Enerji Denklemleri

Atmosfere düşen güneş ışınlarının etkisiyle yeryüzünde farklı sıcaklık değerlerine sahip bölgeler oluşmaktadır. Sıcaklık değerlerinin farklı olması alçak ve yüksek basınç alanlarının oluşmasına neden olur. Havanın daha sıcak olduğu bölgelerde alçak basınç alanları oluşurken, daha soğuk olan bölgelerde yüksek basınç alanları oluşmaktadır. Isıl potansiyel farka sahip hava kütlelerinin soğuk ve yüksek basınçlı alandan, sıcak ve alçak basınçlı alana doğru hareket etmesi sonucunda rüzgâr denilen hava hareketleri meydana gelmektedir. Böylece güneşten kazanılan ısı enerjisi hareket enerjisine dönüşmektedir.

Hareket enerjisi hesaplamalarında kullanılan genel denklem kinetik enerji denklemdir,

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (3.1)$$

şeklindedir. Denklem 3.1’de  $m$  rotorun içerisinde geçen hava kütlesi,  $V$  rüzgâr hızıdır. Rüzgâr enerjisi hesaplamalarının temelinde kinetik enerji denklemi bulunmaktadır. Şekil 3.1’de yatay eksenli bir rüzgâr türbininin rotorundan geçen hava kütlesi görülmektedir.



Şekil 3.1 : Rüzgâr türbininden hava akımı

Şekilde hava akımının silindirik bir şekilde akıp rüzgâr türbin rotorundan geçtiği kabul edilmiştir. Birim zamanda geçen hava kütlesi denklemi;

$$\dot{m}=\rho AV \quad (3.2)$$

şeklinde olup, denklemde  $\dot{m}$  birim zamanda geçen hava kütlesi,  $\rho$  hava yoğunluğu,  $A$  kesit alanı ve  $V$  rüzgar hızıdır. Denklem 3.1'de yerine Denklem 3.2 yazılırsa;

$$\dot{E}=P=\frac{1}{2}(\rho AV)V^2 \quad (3.3)$$

$$\dot{E}=\frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (3.4)$$

denklemini elde edilecektir. Denklem 3.4'de  $\dot{E}$  birim zamanda üretilen enerji miktarı olup birimi J/s, Watt'dır. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri için hesaplamalarda kullanılan alan formülü,

$$A=\pi r^2 \quad (3.5)$$

olmakla beraber, denklemde  $r$  rotor yarıçapını ifade etmektedir. Alan formülü de enerji denklemi içerisine yerleştirildiğinde,

$$P=\dot{E}=\frac{1}{2}\rho\pi r^2 V^3 \quad (3.6)$$

Şeklinde rüzgâr enerjisi denklemi son halini alacaktır[47]. Rüzgâr güç yoğunluğu, birim alana düşen rüzgâr gücü olup denklemi,

$$\frac{P}{A}=\frac{1}{2}\rho V^3 \quad (3.7)$$

şeklinde olup, Rüzgâr güç yoğunluğu havanın yoğunluğu ile orantılıdır. Normal şartlarda, deniz seviyesinde ve 15 °C sıcaklıkta havanın yoğunluğu 1,225 kg/m<sup>3</sup> olarak kabul edilmektedir. Güç yoğunluğu rüzgâr hızının kübü ile orantılı olup, türbin rotorunun süpürmüş olduğu alanla da bağlantılıdır.

**Çizelge 3.1 : Rüzgâr hızı ve güç yoğunluğu arasındaki bağıntı.**

Rüzgârhızı (m/s)	P/A (W/m <sup>2</sup> )
0	0
5	80
10	610
15	2070
20	4900
25	9560
30	16550

Yukarıdaki çizelge havanın yoğunluğunun 1,225 kg/m<sup>2</sup> olduğu kabulü ile oluşturulmuştur. Rüzgâr hızındaki değişimin güç yoğunluğu üzerinde etkisi görülmektedir.

Seçilen bölgenin yıllık ortalama rüzgâr hızı ve saatlik ortalama rüzgâr hızları biliniyorsa, bölgenin güç yoğunluğu hakkında daha kesin hesaplamalar yapılabilmektedir. Bu hesaplamalarda kullanılan denklem,

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 K_e \quad (3.8)$$

şeklindedir. Denklemden yıllık ortalama rüzgâr hızı  $\bar{V}^3$ ,  $K_e$  enerji model faktörüdür.  $K_e$  parametresi hesaplamalarında kullanılan denklem,

$$K_e = \frac{1}{N \bar{V}^3} \sum_{i=1}^N V_i^3 \quad (3.9)$$

şeklindedir. N bir yıl içerisindeki saat sayısı olup değeri 8760'dır,  $V_i$  saatlik ortalama rüzgâr hızıdır. Bu hesaplamalardan sonra elde edilen güç yoğunluğu değerine göre seçilen arazinin rüzgâr enerji potansiyeli hakkında yorum yapılabilmektedir. Buna göre;

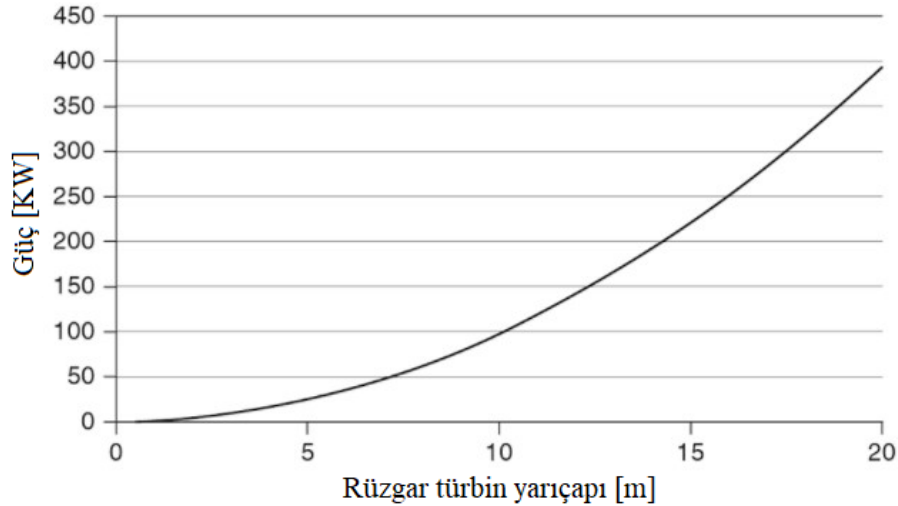
- $\bar{P}/A < 100$  W/m<sup>2</sup> ise bölgenin rüzgâr enerji potansiyeli düşüktür.
- $\bar{P}/A \approx 400$  W/m<sup>2</sup> ise bölgenin rüzgâr enerji potansiyeli ortalamadır.
- $\bar{P}/A > 700$  W/m<sup>2</sup> ise bölgenin rüzgâr enerji potansiyeli yüksektir[48].

### 3.2 Rotor Yarıçapı ve Rüzgâr Hızının Rüzgâr Enerjisi Üzerine Etkisi

Rüzgâr türbinlerini pek çok çeşidi olup, değişik rotor yarıçaplarına sahip türbinler bulunmaktadır. Rotor yarıçapına göre türbinden elde edilecek güç miktarı değişmektedir. Türbinin rotor yarıçapındaki  $\Delta r$  kadarlık değişimin rüzgârdan elde edilecek güç üzerindeki etkisi aşağıdaki denklem ile incelenebilmektedir.

$$\frac{\Delta P}{P} = 2 \frac{\Delta r}{r} \quad (3.10)$$

Denklemden P türbin gücü, r rotor yarıçapı olmak üzere, rotor yarıçapındaki %1 oranındaki artış, türbin gücünde %2 oranında bir değişime sebep olmaktadır. Eğer rotor yarıçapında büyük miktarlarda artış söz konusu ise denklem kullanılamaz. Örneğin, rotor yarıçapında %10 gibi büyük miktardaki bir değişimin türbin gücüne etkisi %21 mertebelerindedir.



Şekil 3.2 : Rotor yarıçapının türbin gücüne etkisi

Şekil 3.2'de rüzgâr hızının 8 m/s olduğu kabulüyle rüzgâr türbin rotor yarıçapının, türbinden alınacak güç miktarına etkisi görülmektedir. Rotor yarıçapı arttıkça türbin gücü de artmaktadır.

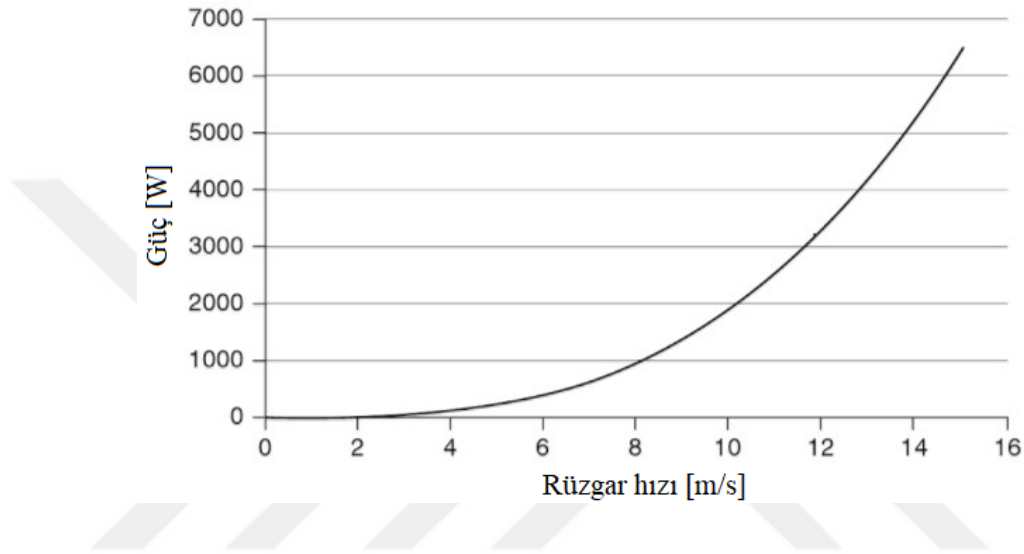
Rüzgâr hızındaki değişimin türbin gücüne etkisi, aşağıdaki denklem ile incelenebilmektedir.

$$\frac{\Delta P}{P} = 3 \frac{\Delta V}{V} \quad (3.11)$$

Denklemden rüzgâr hızıdır. Rüzgâr hızındaki %1 oranındaki artışın rüzgâr gücüne etkisinin %3 mertebelerinde olduğu görülmektedir. İstisnai bir durum olarak rüzgâr hızındaki %20 oranda artışın rüzgâr gücüne etkisi,

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_1^3}{V_2^3} = (1,2)^3 = 1,728 \quad (3.12)$$

şeklinde olacaktır. Yani rüzgâr hızında %20 oranında artış meydana geldiğinde, türbinden elde edilecek güç %72,8 oranında artacaktır.



Şekil 3.3 : Rüzgâr hızının türbin gücüne etkisi

Yatay eksenli, 1 m rotor yarıçapındaki bir rüzgâr türbini için Şekil 3.3'deki grafik oluşturulmuş ve rüzgâr hızı arttıkça türbin gücünün de arttığı gözlemlenmektedir [47].

### 3.3 Yüksekliğe Bağlı Rüzgâr Hız Değişimi

Rüzgâr hızı yüksekliğe bağlı olarak değişmektedir. Türbin dizaynı ve rüzgâr kaynağının değerlendirilmesinde yükseklik ile rüzgâr hızının değişimine dikkat edilmelidir. Rüzgâr hızının yüksekliğe bağlı olarak değişimi, türbin üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Rotor kanadında dikey yönde değişen rüzgâr hızları kanadın ömrünü etkilemektedir. Seçilen bir alanda rüzgâr hızı, rüzgâr hızı ölçüm cihazları olan anemetreler yardımıyla ölçülmektedir. Yükselti ile rüzgâr hız değişiminin kanatta oluşturduğu olumsuz etkiler nedeniyle belirli bir yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının yükseklikle değişiminin incelenmesi gereklidir. Yükseklikle rüzgâr hızının değişimini incelemek üzere iki adet matematiksel yöntem geliştirilmiş olup bunlar, logaritmik profil ve güç kanunu profilidir. Güç kanunu profili bir

çokrüzgâr enerjisi uygulamalarında kullanılmaktadır. Fakat her iki yaklaşım da kompleks, türbülanslı ve değişken akışlarda kesin sonuç vermemektedir[49].

### 3.3.1 Logaritmik profil

Yükseltisi az olan bölgelerde momentum denklemi;

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \tau_{xz} \quad (3.13)$$

şekline indirgenmiştir. x ve z sırasıyla yatay ve dikey koordinatlar, p basınç,  $\tau_{xz}$  normali z koordinatıyla çakışan x yönündeki kayma gerilimidir. Yüzeye yakın bölgelerde basınç z'den bağımsızdır ve integrasyon sonucunda;

$$\tau_{xz} = \tau_0 + z \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.14)$$

denklemi elde edilecektir.  $\tau_0$  yüzeydeki kayma gerilimidir. Yüzeye yakın bölgelerde basınç gradyeni küçük olduğundan denklemin sağ tarafı ihmal edilebilmektedir. Ayrıca, Prandtl Mixing Theory kullanılarak kayma gerilimi;

$$\tau_{xz} = \rho l^2 \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \quad (3.15)$$

haline gelecektir.  $\rho$  hava yoğunluğu, V rüzgâr hızının yatay bileşeni, l ise karıştırma bileşenidir. Denklemlerin çözümünden,

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \frac{V^*}{l} \quad (3.16)$$

elde edilir.  $V^*$  sürtünme hızıdır. Yüzeyi pürüzsüz kabul edip  $l = kz$  ve  $k = 0,4$  (Karman sabiti) kabulü ile yukarıdaki denklem pürüzsüzlük uzunluğu olan  $z_0$ 'dan z'ye integre edildiğinde,

$$V(z) = \frac{V^*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (3.17)$$

logaritmik rüzgâr profili olan denklem elde edilmektedir. Bir bölgenin pürüzlülük değeri hiç bir zaman 0 olamayacağından denklem 0 yerine  $z_0$ 'dan itibaren integre edilmiştir.

Logaritmik yasaya göre belli bir  $z_r$  yüksekliğinde rüzgâr hızı hesaplamalarında kullanılan denklem,

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) / \ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right) \quad (3.18)$$

şeklindedir [48].

### 3.3.2 Güç kanunu profili

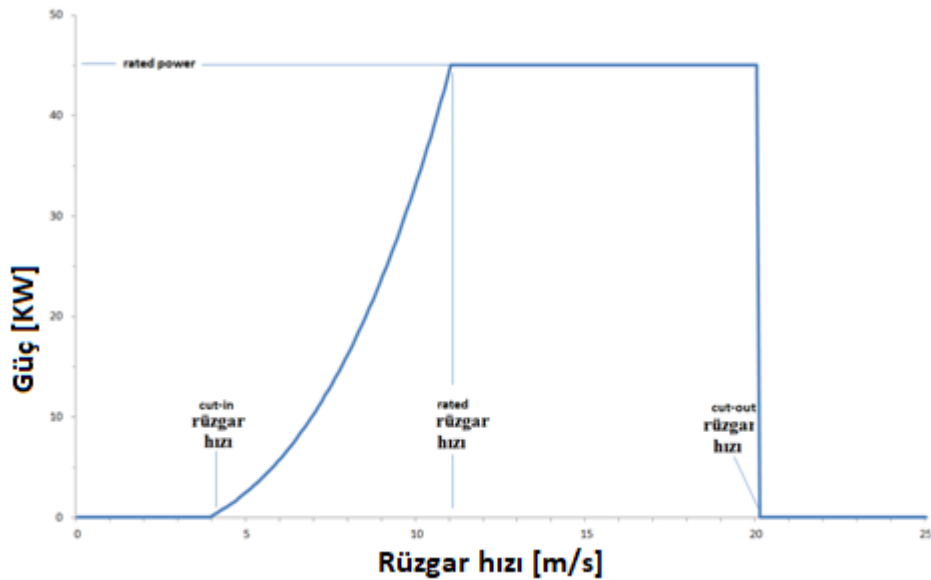
Düşey düzlemde rüzgâr hız profili hesaplamalarında kullanılan basit bir yöntem olmakla beraber, denklem;

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^a \quad (3.19)$$

şeklindedir. Burada  $V(z)$ ,  $z$  yüksekliğinde rüzgâr hızıdır.  $V(z_r)$  ise  $z_r$  yüksekliğinde referans rüzgâr hızıdır.  $a$  ise güç kanunu katsayısıdır. Güç kanunu katsayısı, yükselti, zaman, mevsim, arazi coğrafyası, rüzgâr hızı gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

### 3.4 Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Rüzgârdan elde edilebilecek enerji miktarı kinetik enerji formülü ile açıklanmıştır. Pratikte bir rüzgâr türbininden sağlanan güç  $P_w$ , makine güç eğrisi ile gösterilebilmektedir.



Şekil 3.4 : Rüzgar türbini güç eğrisi

Şekil 3.4’de gösterilen eğri, rüzgar türbini güç eğrisidir. Bu eğri yardımıyla üç önemli rüzgâr hızı karakteristiği hakkında bilgi edinilebilmektedir. Bunlar cut-in, rated ve cut-outrüzgâr hızlarıdır. Cut-in rüzgâr hızı, rüzgâr türbininin güç üretmeye başladığı rüzgâr hızıdır. Ratedrüzgâr hızı, türbinden maksimum gücün sağlandığı rüzgâr hızıdır. Cut-outrüzgâr hızı ise, rüzgâr türbininde herhangi bir tahribata yol açılmaması için güç üretiminin durdurulduğu yüksek rüzgâr hızıdır.

Rüzgâr hızı rüzgâr türbininin çalışma aralığını da belirlediğinden rüzgâr enerjisi potansiyel hesaplamalarında önemli bir rol oynamaktadır. Potansiyel hesaplamaları, doğrudan veri analizi yöntemleri ve istatistiksel analizler olarak iki sınıfta incelenmektedir.

### 3.4.1 Doğrudan veri analizi yöntemleri

Doğrudan veri analizi yöntemleri üç ayrı başlık altında incelenmektedir. Bunlar verilerindoğrudan kullanımı, hız aralığı yöntemi, rüzgâr hız eğrileri yöntemidir.

#### 3.4.1.1 Verilerindoğrudan kullanımı

$\Delta t$  zaman aralığı boyunca  $V_i$  rüzgâr hızının  $N$  kere gözlemlendiği varsayılarak bazı hesaplamalar yapılabilmektedir. Ortalama rüzgâr hızı, rüzgâr hız ortalamalarının standart sapma değeri, ortalama rüzgâr güç yoğunluğu, ortalama rüzgâr türbini gücü ve rüzgar türbininden elde edilen enerji gibi parametreler hesaplanabilmektedir.

Ortalama rüzgâr hızı  $\bar{V}$ ,

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (3.20)$$

Rüzgâr hız ortalamalarının standart sapma değeri  $\sigma_V$ ,

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{i=1}^N V_i^2 - N\bar{V}^2 \right\}} \quad (3.21)$$

Ortalama rüzgâr güç yoğunluğu  $\bar{P}/A$ ,

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^3 \quad (3.22)$$



Benzer olarak,  $N\Delta t$  süre boyunca birim alandaki rüzgâr enerji yoğunluğu formülü,

$$\frac{\bar{E}}{A} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^N V_i^3 = \left( \frac{\bar{P}}{A} \right) (N\Delta t) \quad (3.23)$$

Ortalama rüzgâr türbin gücü  $\bar{P}_w$ ,

$$\bar{P}_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_w V_i \quad (3.24)$$

şeklindedir. Burada  $P_w V_i$  ifadesi rüzgâr türbininin güç eğrisinden hesaplanan değerdir.

Rüzgâr türbininden elde edilen enerji miktarı,  $E_w$ ;

$$E_w = \sum_{i=1}^N P_w(V_i)(\Delta t) \quad (3.25)$$

şeklinde olacaktır.

#### 3.4.1.2 Hız aralığı yöntemi

Bu metod yardımıyla rüzgârdatalarının bir özeti çıkarılabilmekte ve türbin verimliliği hakkında yorum yapılabilmektedir. Hesaplamalar için veriler, rüzgâr hız aralıklarına ayrılmaktadır. Aynı boyuttaki aralıkları kullanmak en uygun yöntemdir. Veirler  $w_f$  genişliğinde,  $N_B$  adet kutuya ayrılmış ve her bir kutunun orta noktasının  $m_f$ , her bir kutudaki veya frekanstaki oluşumların sayısının  $f_i$  olduğu kabulüyle,

$$N = \sum_{j=1}^{N_B} f_j \quad (3.26)$$

Daha önceki denklemlerden hareketle, ortalama rüzgâr hızı  $\bar{V}$ ,

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j f_j \quad (3.27)$$

Rüzgâr hız ortalamalarının standart sapma değeri  $\sigma_V$ ,

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{j=1}^{N_B} m_j^2 f_j - N(\bar{V})^2 \right\}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{j=1}^{N_B} m_j^2 f_j - N \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j f_j \right)^2 \right\}} \quad (3.28)$$

Ortalama rüzgâr güç yoğunluğu  $\bar{P}/A$ ,

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j^3 f_j \quad (3.29)$$

Ortalama rüzgâr türbin gücü  $\bar{P}_w$ ,

$$\bar{P}_w = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} P_w(m_j) f_j \quad (3.30)$$

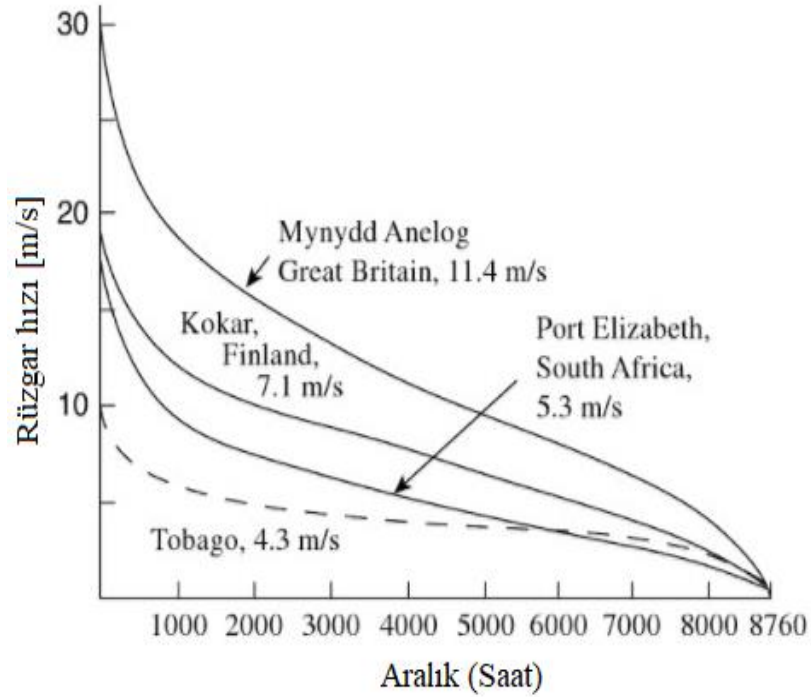
Rüzgâr türbininden elde edilen enerji miktarı,  $E_w$ ;

$$E_w = \sum_{j=1}^{N_B} P_w(m_j) f_j \Delta t \quad (3.31)$$

denklemleri ile hesaplanabilmektedir.

### 3.4.1.3 Rüzgâr hız aralığı yöntemi

Rüzgâr santral sahası için seçilen bölgelerin enerji potansiyellerini karşılaştırmak adına uygun bir yöntemdir. Şekil 3.5’de grafiğin y ekseninde rüzgâr hızı, x ekseninde ise ölçüm yapılan yıl süresince belirli bir rüzgâr hızının hâkim olduğu zaman aralığı saat cinsinden verilmiştir [48].



Şekil 3.5 :Hız süresi eğrisi

Yukarıda gösterilen grafik belirli bölgenin rüzgâr rejimi hakkında bilgi vermektedir. Bu grafikte MynyddAnelog, Port Elizabeth, Kokar ve Tobago bölgelerinin rüzgârrejimleri incelenmiştir. Eğrinin daha düz olduğu bölgelerde rüzgâr rejimleri daha düzenli olduğundan, bu tip bölgelerde rüzgâr santrali kurmak daha uygundur.

### 3.4.2 İstatiksel analizler

İstatiksel analizler ile verilen bir arazinin rüzgâr hız dağılımları belirlenerek, rüzgâr enerji potansiyelleri hesaplanabilmektedir. Günümüzde rüzgâr hız dağılımlarının belirlenmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. En çok kullanılan yöntemler Weibull ve Rayleigh dağılımlarıdır[50].

İstatiksel analizler, rüzgâr hızının olasılık yoğunluk fonksiyonu olan  $f(V)$ 'ye dayanmaktadır. Olasılık fonksiyonu,  $V_a$  ve  $V_b$  arasında bir rüzgâr hızının olasılığının belirlenmesi mantığına dayanmaktadır.

$$p(V_a \leq V \leq V_b) = \int_{V_b}^{V_a} f(V) dV \quad (3.32)$$

Olasılık yoğunluk grafiği altında kalan toplam alan;

$$\int_0^{\infty} f(V) dV = 1 \quad (3.33)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Eğer  $f(V)$  parametresi biliniyorsa, aşağıdaki parametreler de hesaplanabilmektedir. Ortalama rüzgâr hızı  $\bar{V}$ ,

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V p(V) dV \quad (3.34)$$

Rüzgâr hızı standart sapma değeri  $\sigma_V$ ,

$$\sigma_V = \sqrt{\int_0^{\infty} (V - \bar{V})^2 p(V) dV} \quad (3.35)$$

Ortalama rüzgâr enerjisi yoğunluğu  $\bar{P}/A$ ,

$$\frac{\bar{P}}{A} = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \int_0^{\infty} V^3 p(V) dV = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \bar{V}^3 \quad (3.36)$$

denklemleri ile hesaplanabilmektedir. Bir diğ er önemli parametre ise kümülâtif dağılım fonksiyonudur.  $F(V)$  rüzgâr hızının verilen bir hıza göre  $V$  daha küçük veya eşit oldu ğ u zaman fraksiyonunu veya olasılığ ını temsil etmektedir.

$$F(V) = \int_0^{\infty} p(V') dV' \quad (3.37)$$

Ayrıca kümülâtif dağılım fonksiyonun eğimi, olasılık yoğunluk fonksiyonuna eşittir,

$$f(V) = \frac{dF(V)}{dV} \quad (3.38)$$

denklemiyle ifade edilmektedir. Genel olarak rüzgâr verilerinin istatistiksel analizlerinde kullanılmakta olan iki adet olasılık yoğunluk fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlar Rayleigh ve Weibull dağılımlarıdır. Rayleigh dağılımında yalnızca bir adet parametre kullanılmakta ve bu parametre rüzgâr hızıdır. Weibull dağılımında iki adet parametre kullanılmaktadır. Bu nedenle Weibull dağılımı, Rayleigh dağılımına göre birçok rüzgâr rejimi için daha kesin ve güvenilir sonuçlar vermektedir.

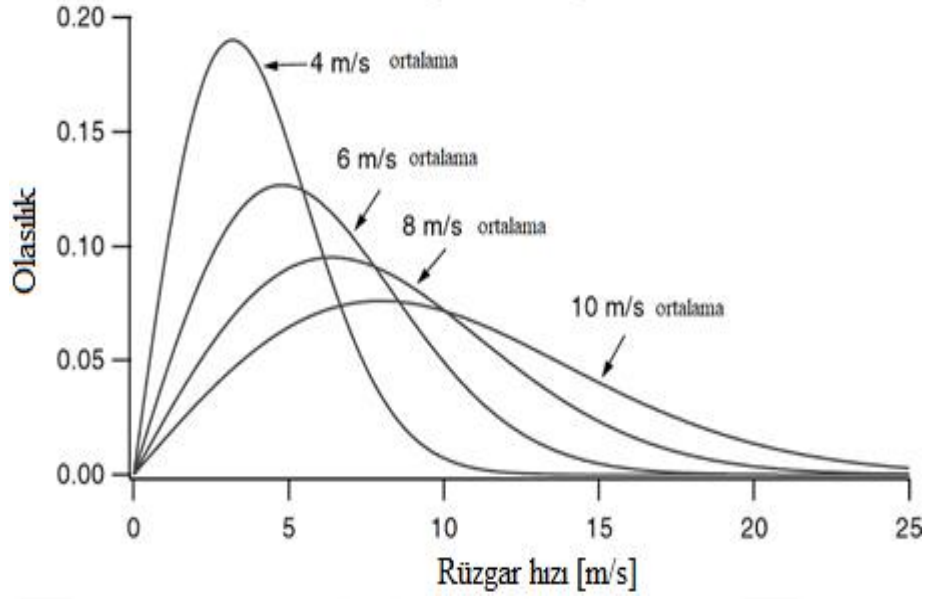
#### 3.4.2.1 Rayleigh dağılımı

Rüzgâr santrali kurulacak herhangi bir bölgenin yalnızca ortalama hızı  $\bar{V}$  biliniyorsa, Rayleigh dağılım fonksiyonları aracılığ ıyla herhangi bir rüzgâr hızının etkin oldu ğ u zaman aralığ ının yüzdesi bulunabilmektedir [33].

$$p(V) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{V}{\bar{V}^2} \right) \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right] \quad (3.39)$$

$$F(V) = 1 - \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right] \quad (3.40)$$

Farklı ortalama hız değ erleri için Rayleigh dağılım fonksiyonları hesaplanıp, ař ağıdaki grafik oluşturulmuş tur. Grafikten ortalama rüzgâr hızının fazla oldu ğ u bölgelerde herhangi bir andaki rüzgâr hız değ erinin yüksek oldu ğ u anlaşılmaktadır. Ş ekil 3.6'da Rayleigh dağılım grafiğ i örneğ i görülmektedir.



**Şekil 3.6 :**Rayleigh dağılım grafiği örneği

Şekil 3.6'dan anlaşılacağı üzere, ortalama rüzgar hızının 4 m/s olduğu bir bölgede, herhangi bir anda rüzgâr hızının 15 m/s olma olasılığı 0 ile 0,01 arasındadır. Ortalama rüzgâr hızının 10 m/s olduğu bir bölgede ise, herhangi bir anda rüzgâr hızının 15 m/s olma olasılığı ise 0,05 değerine yakındır. Sonuç olarak, ortalama rüzgâr hızının büyük olduğu bir bölgede, rüzgâr hızlarının büyük değerlerde olma olasılığı yüksektir.

### 3.4.2.2 Weibull dağılımı

Weibull dağılımında iki parametre bulunmakta ve yaygın olarak kullanılmakta olan bir dağılım fonksiyonudur. Weibull dağılım fonksiyonu rüzgâr enerji potansiyeli hesaplamalarında rüzgâr hız verisinin uygun gösterimini sağlamaktadır. Fakat çok yüksek rüzgâr hızlarında uygun gösterim sağlanamamaktadır[51].

Weibull dağılım fonksiyonu parametreleri; k şekil faktörü ve c ölçek faktörüdür. Her iki parametre de ortalama rüzgâr hızı  $\bar{V}$  ve rüzgar hızı standart sapma değeri  $\sigma_V$ 'nin fonksiyonlarıdır. Aşağıdaki denklemlerde Weibull olasılık yoğunluk ve kümülâtif dağılım fonksiyonları verilmiştir.

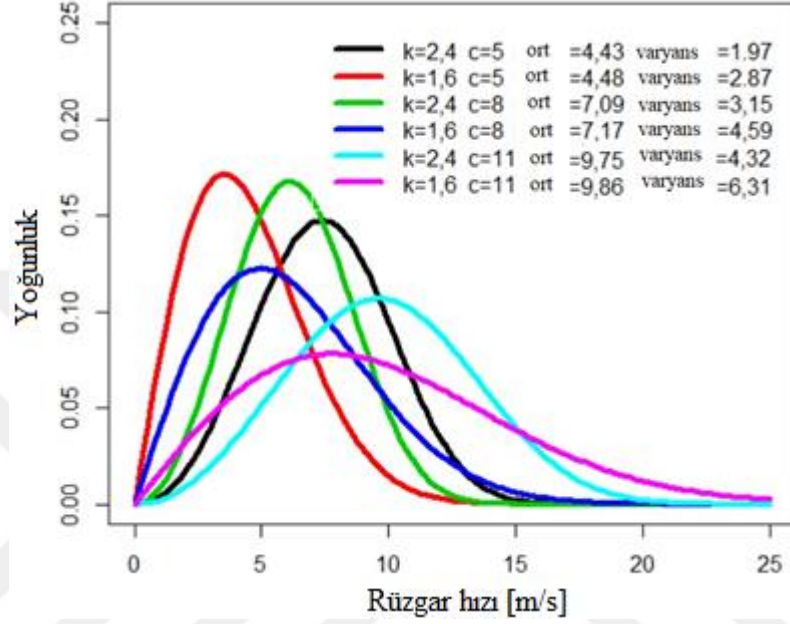
Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu,

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ -\left(\frac{V}{c}\right)^k \right] \quad (3.41)$$

Kümülatif dağılım fonksiyonu;

$$F(V)=1-\exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (3.42)$$

şeklindedir. Farklı k parametre değerleri için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak aşağıdaki grafik elde edilmiştir[52].



Şekil 3.7 :Farklı k değerleri için Weibull dağılım grafiği

Weibull dağılımını kullanarak ortalama rüzgâr hızı  $\bar{V}$ ,

$$\bar{V}=c\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right) \quad (3.43)$$

denklemlerle hesaplanabilmektedir. Denklemlerde  $\Gamma(x)$  fonksiyonu gamma fonksiyonu olup,

$$\Gamma(x)=\int_0^{\infty} e^{-t}t^{x-1} dt \quad (3.44)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Ayrıca Weibull dağılımı yardımıyla,

$$\sigma^2_V=\bar{V}^2\left[\frac{\Gamma(1+2/k)}{\Gamma^2(1+1/k)}-1\right] \quad (3.45)$$

hesaplanabilmektedir. Ortalama rüzgâr hızı  $\bar{V}$  ve rüzgâr hızı standart sapma değeri  $\sigma_V$  denklemleri yardımıyla Weibull dağılım fonksiyonu parametreleri olan k ve c'ye ulaşmak kompleks bir prosestir. Bu nedenle Weibull dağılım fonksiyonlarının çözümü için üç metod geliştirilmiştir.

## 1. Analitik yöntem

k parametresinin  $1 \leq k \leq 10$  olduğu aralık için uygun bir hesaplama yöntemidir.

$$k = \left( \frac{\sigma_V}{\bar{V}} \right)^{-1,086} \quad (3.46)$$

$$\bar{V} = c \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad (3.47)$$

buradan;

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (3.48)$$

şeklinde olacaktır. Fakat bu metod içerisinde hala gamma fonksiyonu bulunmakta olduğundan çok tercih edilmemektedir[53].

## 2. Deneysel yöntem

Denklem 3.46 yardımıyla k parametresi bulunmaktadır. Ardından aşağıdaki denklem yardımıyla,

$$\frac{c}{\bar{V}} = (0,568 + 0,433/k)^{\frac{-1}{k}} \quad (3.49)$$

c parametresi de hesaplanabilmektedir[54].

## 3. Grafik yöntemi

Kümülatif fonksiyon denklemi Denklem 3.50'deki gibi yazılırsa,

$$1-F(V) = \exp \left[ - \left( \frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (3.50)$$

Eşitliğin her iki tarafının da 2 kez logaritması alındığında Denklem 3.51 elde edilmektedir.

$$\ln\{-\ln[1-F(V)]\} = k \ln(V) - k \ln(c) \quad (3.51)$$

Denklem 3.51'de bulunan terimlerden  $\ln(V_i)$  değerleri X-eksenine yazılmakta ve  $\ln\{-\ln[1-F(V)]\}$  değerleri de Y-eksenine yazılmaktadır. Bu şekilde eksenlere değerler yerleştirilerek bir grafik oluşturulmakta ve çizilen eğrinin eğimi k şekil faktörünü vermektedir. Eğrinin Y-ekseni ile kesiştiği yer ise  $-k \ln(c)$  değerine eşittir. Grafiği

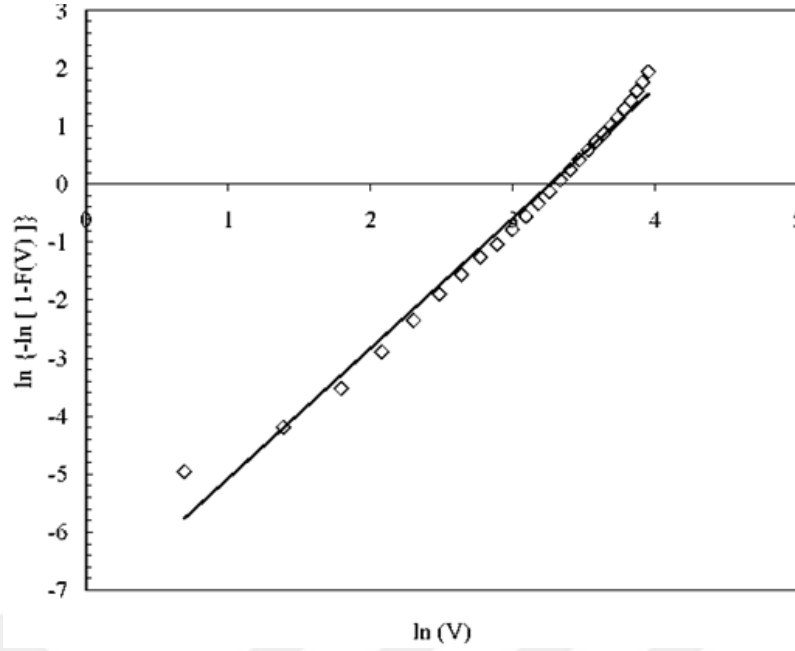
hazırlanan verilere eğri uydurularak, eğrinin denklemi elde edilirse, k ve c parametreleri kolayca bulunabilmektedir.

Çizelge 3.2 ve Şekil 3.8’de grafik yöntemi örneği görülmektedir. Çizelge 3.2’de frekans dağılım tablosu verilmiştir. Frekans dağılım tablosundan faydalınarak grafiği hazırlamak için öncelikle verilen frekans değerlerinden kümülatif dağılım değerlerini hesaplamak gereklidir. Bunun için tablonun son sütununda bulunan kümülatif değerler, frekans değerleri toplanarak elde edilmektedir. Her bir hız sınıfı, hız aralığının üst limiti ile temsil edilmektedir.  $\ln(V)$  değerleri X-eksenine ve  $\ln\{-\ln[1-F(V)]\}$  değerleri ise grafiğin Y-eksenine yerleştirilerek X-Y dağılım grafiği elde edilmektedir.

**Çizelge 3.2 : Frekans dağılım tablosu.**

Numara	V(km/h)	Frekans	F(V)
1	0	0,002	0,002
2	1-2	0,005	0,007
3	3-4	0,008	0,015
4	5-6	0,014	0,029
5	7-8	0,025	0,054
6	9-10	0,037	0,091
7	11-12	0,048	0,139
8	13-14	0,051	0,19
9	15-16	0,057	0,247
10	17-18	0,051	0,298
11	19-20	0,069	0,367
12	21-22	0,07	0,437
13	23-24	0,073	0,51
14	25-26	0,074	0,584
15	27-28	0,072	0,656
16	29-30	0,066	0,722
17	31-32	0,058	0,78
18	33-34	0,054	0,834
19	35-36	0,041	0,875
20	37-38	0,033	0,908
21	39-40	0,028	0,936
22	41-42	0,021	0,957
23	43-44	0,017	0,974
24	45-46	0,011	0,985
25	47-48	0,008	0,993
26	49-50	0,004	0,997
27	51-52	0,002	0,999
28	53-54	0,001	1
29	55-56	0	1
30	57-58	0	1
31	59-60	0	1





**Şekil 3.8 :** Weibull parametreleri k ve c'nin grafik yöntemi ile bulunması

Şekil 3.8'de verilen grafiğe ait uydurulan eğri de görülmektedir. Uydurulan eğrinin denklemi;

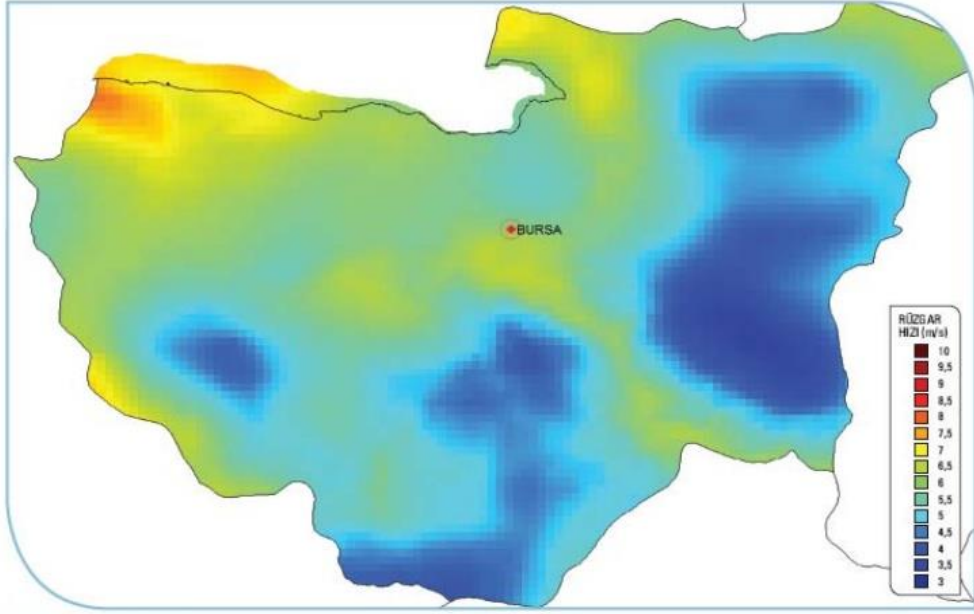
$$y=2,24x-7,32 \quad (3.52)$$

şeklindedir. Denklemde regresyon derecesi 0,98 olmakla beraber eğrinin eğimi k'yı vermektedir. Denklemde x=0 yazılırsa, y= - 7,32 bulunmaktadır. Sonuç olarak,  $-k \ln(c)=7,32$  yani  $c=26,31$  km/h yani 7,31 m/s olarak bulunmaktadır.

### 3.5 Bursa İli Rüzgâr Enerji Potansiyeli Değerlendirmesi

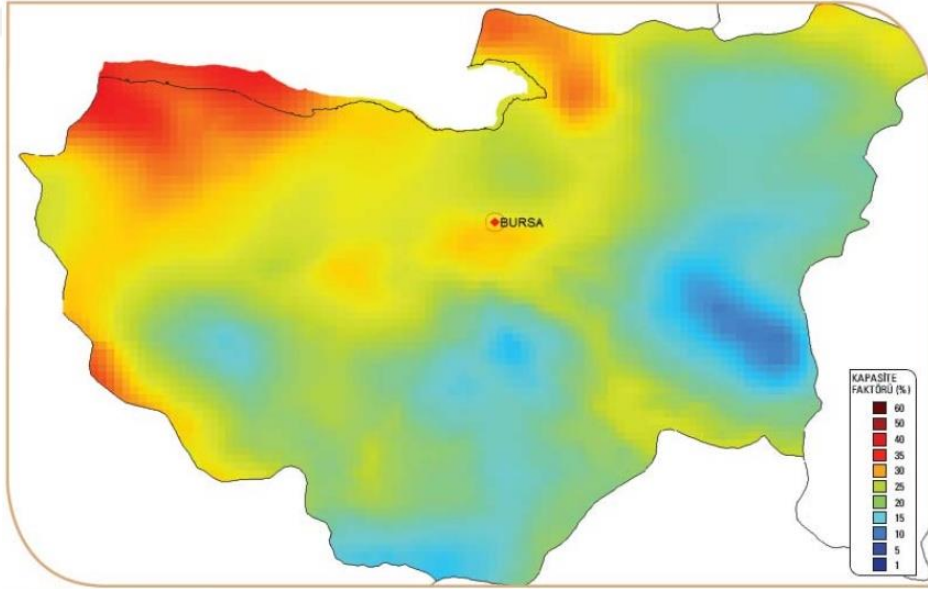
Bursa'da rüzgâr enerji potansiyel analiz çalışması yapabilmek için bölgenin coğrafi konumu, rüzgâr hız dağılımı, rüzgâr santrali kurulabilir alanların incelenmesi, trafo merkezleri ve enerji nakil hatları hakkında bilgi edinilmelidir. Bursa ili Marmara Denizi'nin güneydoğusunda, 40 derece boylam ve 28-30 derece enlem daireleri arasında yer almaktadır. Denizden yüksekliği 155 metredir ve genelde ılıman iklime sahiptir. Bursa ilinin kıyı kesimi 135 km olmakla beraber kıyı bandınının 22 km'lik kısmı kullanıma uygun olarak değerlendirilmektedir[55].

Şekil 3.9'da Bursa ilinin 50 m yükseklikte rüzgar hız dağılımı görülmektedir[56]. Şekilden de anlaşılacağı üzere, kıyı kesimlerde rüzgâr hızı ve rüzgâr enerji potansiyeli daha fazladır.



**Şekil 3.9 :** 50 m yükseklikte Bursa rüzgâr hız dağılımı

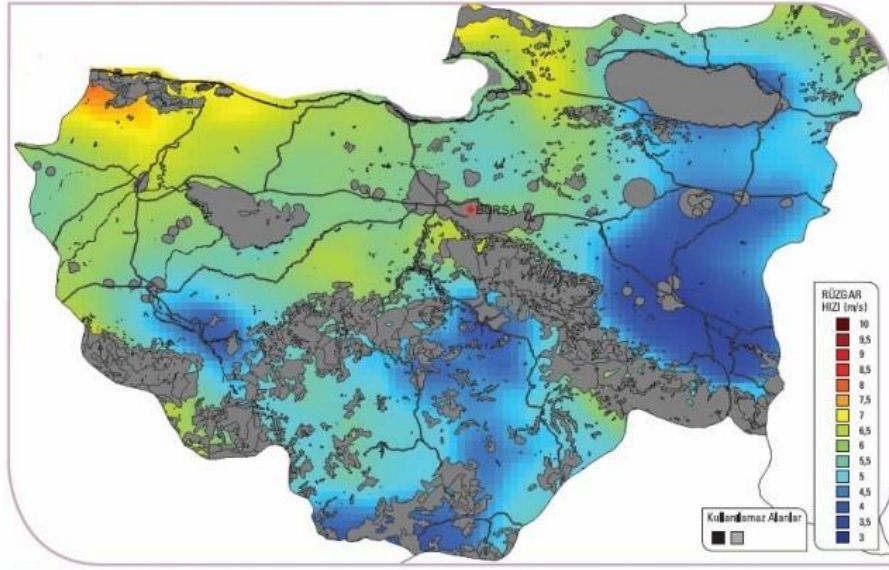
Kıyı kesimlerde 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı yaklaşık 7-7,5m/s arasında olup, rüzgar enerji potansiyeli daha fazladır. Rüzgâr santrallerinin kıyı bölgelere kurulması daha uygun olacaktır.



**Şekil 3.10 :** 50 m yükseklikte Bursa kapasite faktörü dağılımı

Şekil 3.10, 50 m yükseklikte kapasite faktörü dağılım haritasıdır. Bu haritadan da kıyı bölgelerin rüzgâr enerji potansiyelinin çok daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Ekonomik bir rüzgâr enerji santrali yatırımı için kapasite faktörü %35 veya üzerinde bir değerde olmalıdır.

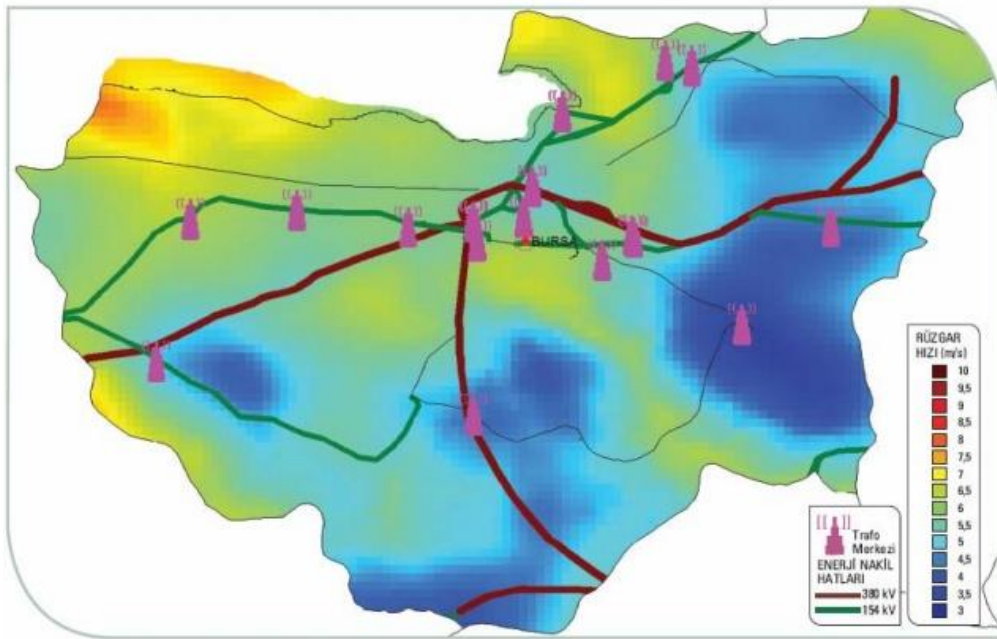
Şekil 3.11’de ise rüzgâr enerji santrali kurulamayacak olan alanlar gri renk ile belirtilmiştir.



Şekil 3.11 : Rüzgâr enerji santrali kurulabilir alanlar

Rüzgâr santrali yatırımlarında bölgenin arazi yapısı ve yerleşim yerlerine yakınlığı gibi parametreler önem teşkil etmektedir. Bu nedenle santral kurulmadan önce Şekil 3.12 incelenmelidir.

Rüzgâr santral yatırımlarında bir diğer önemli parametre ise santralin kurulacağı bölgenin trafo merkezlerine ve enerji nakil hatlarına yakınlığıdır.



Şekil 3.12 : Trafo merkezleri ve enerji nakil hatları.

Şekil 3.12 yardımıyla santralin kurulacağı bölgenin trafo merkezlerine ve enerji nakil hatlarına yakınlığı konusunda bilgi edinilebilmektedir.

Rüzgâr hız dağılımı, kapasite faktörü dağılımı, rüzgâr enerji santrali kurulabilir alanlar, trafo merkezleri ve enerji nakil hatlarına yakınlığı gibi parametreler göz önüne alınıp değerlendirildiğinde aşağıdaki tablo elde edilmiştir.

**Çizelge 3.3 :** Bursa iline kurulabilecek rüzgâr enerjisi güç kapasitesi.

50 m'de rüzgâr gücü [W/m <sup>2</sup> ]	50 m'de rüzgâr hızı [m/s]	Toplam alan [km <sup>2</sup> ]	Potansiyel rüzgar gücü [MW]
300-400	6,8-7,5	683,6	3418
400-500	7,5-8,1	85,22	426,08
500-600	8,1-8,6	5,23	26,16
600-800	8,1-8,6	5,23	26,16
>800	>9,5	0	0
		776,34	3881,68

Çizelgeden Bursa İlinde rüzgâr enerjisi kurulabilecek toplam alanın 776,34 km<sup>2</sup> olduğu anlaşılmaktadır. Bu alandan elde edilebilecek rüzgar enerjisi ise 3881,68 MW'dır. Rüzgâr hızının 6,8 m/s ve 7,5 m/s olduğu alanlar toplam rüzgar enerjisi potansiyelinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır.

Güncel verilere göre Bursa ilinde işletme halinde olan rüzgâr enerji santrallerinin gücü 128,4 MW'dır. İllere göre dağılımda ise Bursa ilinin rüzgar enerji santral gücü tüm Türkiye'nin %1,87'lik kısmını oluşturmaktadır[30].

Çizelge 3.4'de işletme halinde olan rüzgar enerji santrallerinin listesi verilmiştir. İşletme halinde olan rüzgâr enerji santralleri yaklaşık 120 MW değerinde güç üretmektedirler.

**Çizelge 3.4 :** Bursa ilinde işletme halinde olan rüzgâr enerji santralleri.

Santraladı	Güç [MW]
HarmanlıkRüzgarEnerjiSantrali	50
KürekdağıRüzgarEnerji Santali	33
Karacabey Rüzgar Enerji Santrali	28
Gündoğdu Rüzgar Santrali	9

Yapım aşamasındaki rüzgar enerji santralleri; Bal, Söğütöinar, Mesudiye ve Ekinli Rüzgar Enerji Santrali (3,2 MW), İlyas Rüzgar Enerji Santrali (0,8 MW)'dır. Ön lisans alan ve planlanan rüzgar enerji santralleri ise; Güney 1 Rüzgar Enerji Santrali (70 MW), Taşpınar Rüzgar Enerji Santrali (60 MW)'dır[57].

Rüzgâr hız dağılımı, kapasite faktörü dağılımı, rüzgâr enerji santrali kurulabilir alanlar, trafo merkezleri ve enerji nakil hatlarına yakınlığı gibi parametreler incelendiğinde, Bursa ili için rüzgâr santrali yatırımlarında en uygun alanların kıyı kesimleri olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle tez kapsamında Bursa' nın kıyı kesimleri olan Gemlik, Mudanya ve Karacabey' in rüzgâr enerji potansiyelleri incelenecektir.

Kıyı bölgelerinde yapılacak rüzgâr enerjisi potansiyel analizinde bilgisayar yazılımı kullanılacaktır. Rüzgâr enerjisi potansiyel hesaplamalarında pek çok bilgisayar yazılımı kullanılmaktadır. Bu programlar; WAsP, WindPro, WindFarmer, WindSim, Windographer, Homer ve RetScreen'dir [41].Bu çalışmada rüzgâr enerjisi potansiyel analizi için WindSim yazılımı kullanılmıştır.

### **3.6 WindSim Programı ile Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Analizi**

Rüzgâr akışı dahil olmak üzere, herhangi bir akışkanın akışı sırasında hakim olan üç temel fiziksel ilke;

- Momentum korunumu
- Kütle korunumu
- Enerji korunumdur.

WindSim yazılımında hesaplamalar momentum korunumundan elde edilen Navier-Stokes denklemleri ile yapılmaktadır. Navier-Stokes denklemlerinin çözümü ise Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile yapılmaktadır[58].Sonlu hacimler yöntemi kullanılarak kütle, momentum ve enerji korunumu üç boyutlu ReynoldsAverageNavierStokes (RANS) denklemleri ile hesaplanmaktadır[59]. RANS denklemlerini ayrıştırmak üzere kullanılan sonlu hacimler yönteminde akışın sıkıştırılmaz olduğu kabul edilmektedir.

WindSimsimülasyonlarında RANS denklemleri MIGAL ile çözülmektedir[60]. Akış analizlerinde PHONEICS hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılmakta ve

bu yazılımla RANS denklemleri iteratif yöntemlerle çözümlenmektedir. Çözümlenelerde akış değişkenleri olan basınç, üç hız bileşeni, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerji yayılma oranı hesaplanmaktadır. WindSim programında yapılan analizlerde standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Burada k türbülans kinetik enerjisi ε ise onun yayılma hızıdır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3.54)$$

şeklindedir. Denklemlerde k türbülans kinetik enerjisi ( $m^2/s^2$ ), ε türbülans kinetik enerji yayılma hızı ( $m^2/s^3$ ), ρ yoğunluk ( $kg/m^3$ ), μ dinamik viskozite (Pa. s), σ<sub>k</sub> ve σ<sub>ε</sub> türbülans Prandtl sabitleri, C<sub>1ε</sub> C<sub>2ε</sub> C<sub>3ε</sub> k-ε türbülans model sabitleri, G<sub>b</sub> kaldırma kuvvetlerine bağlı olan türbülans, G<sub>k</sub> türbülans kinetik enerjisi üretimi, Y<sub>M</sub> sıkıştırılabilirliğin türbülansa etkisidir. Çizelge 3.5’de katsayıların sayısal değerleri verilmiştir [59].

**Çizelge 3.5 :** Standart k-ε türbülans modeli katsayıları.

C <sub>1ε</sub>	C <sub>2ε</sub>	C <sub>μ</sub>	σ <sub>k</sub>	σ <sub>ε</sub>
1,44	1,92	0,09	1	1,3

WindSim programında rüzgâr akışının sürekli ve türbülanslı olduğu kabul edilmiştir. Rüzgâr hızı  $\vec{v}=(v_x, v_y, v_z)^T$ , basınç p, yoğunluk ρ ve dinamik viskozite μ ile gösterilmektedir. Türbülanslı akışlar  $v_i=\bar{v}_i+v'_i$  ve i=x,y,z ile tanımlanmaktadır. Reynolds Averaged Navier Stokes denklemleri;

$$\rho \frac{\partial(\bar{v}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (3.55)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{v}_i \bar{v}_j) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \mu_t \right) \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \right] \quad (3.56)$$

Denklemdede $\delta_{ij}$  ifadesi Kronecker sembolüdür (eğer  $i = j$  ise  $\delta_{ij} = 1$  alınır, değilse  $\delta_{ij} = 0$  olacaktır). Türbülans efekti standart k- $\epsilon$  transport denklemleri ile formüle edilecektir.

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (k \bar{v}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (3.57)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\epsilon \bar{v}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} P_k \frac{\epsilon}{k} - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.58)$$

$k$  türbülans kinetik enerjisi,  $\epsilon$  kinetik enerji yayma oranı,  $\mu_t$  eddy viskozitesidir.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.59)$$

$\mu_t$  kayma gerilmesi yukarıdaki denklem ile ifade edilmektedir.  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $C_{\epsilon 1}$  ve  $C_{\epsilon 2}$  sabit katsayılar Çizelge 4.3’de verilmişlerdir. Türbülans kinetik enerji üretimi  $P_k$  şu şekilde ifade edilmektedir;

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \quad (3.60)$$

Akış değişkenlerinden olan basınç ve hız bileşenleri, turbulent kinetik enerji ve türbülans dağılım oranı standart k- $\epsilon$  yöntemi ile çözülmektedir [42].

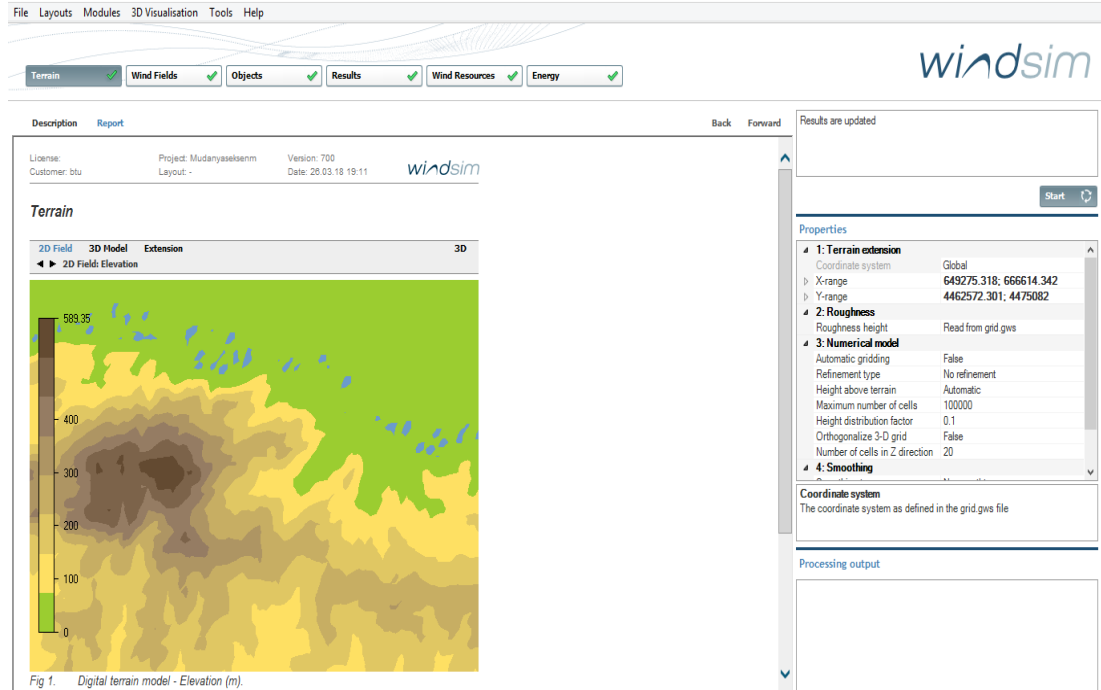
Windsim programında analize başlamadan önce, 50 m yükseklikte rüzgâr hız haritasından Bursa ilinin kıyı şeritlerinin rüzgâr enerji potansiyelinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nden rüzgâr enerji potansiyelinin daha fazla olduğu kıyı şeritleri olan Mudanya, Karacabey ve Gemlik ilçelerinin klimatoloji verileri temin edilmiştir. Klimatoloji verileri 10 m yükseklikten iki yıl süreyle saatlik olarak ölçülen rüzgâr hızı ve rüzgâr yönüdür. Alınan klimatoloji verileri ve rüzgâr tarlasının kurulacağı arazinin coğrafi konum bilgileri kullanılarak WindSim program ile rüzgâr enerji potansiyel analizi yapılmıştır. WindSim program içerisinde;

- Terrain (Arazi)
- WindFields (Rüzgâr Alanları)
- Objects (Objeler)
- Results (Sonuçlar)

- WindResources (Rüzgâr Kaynakları)
- Energy (Enerji)

olmak üzere toplam 6 adet modül bulunmaktadır. Arazi modülünde rüzgâr tarlası kurulacak olan alanın coğrafi konum bilgileri kullanılarak arazi modellenmektedir. WindFields modülünde modellenen arazide hava akışı RANS denklemlerinin çözümüyle gerçekleştirilmektedir. Objects modülünde elde edilen arazi modülü üzerine türbinler ve rüzgâr ölçüm direkleri yerleştirilmektedir. Result ve WindResources bölümlerinde rüzgâr güç yoğunluğu ve rüzgâr hız haritaları oluşmaktadır. Energymodülünde ise modellenen rüzgâr tarlasının yıllık enerji üretimi hesaplanmaktadır.

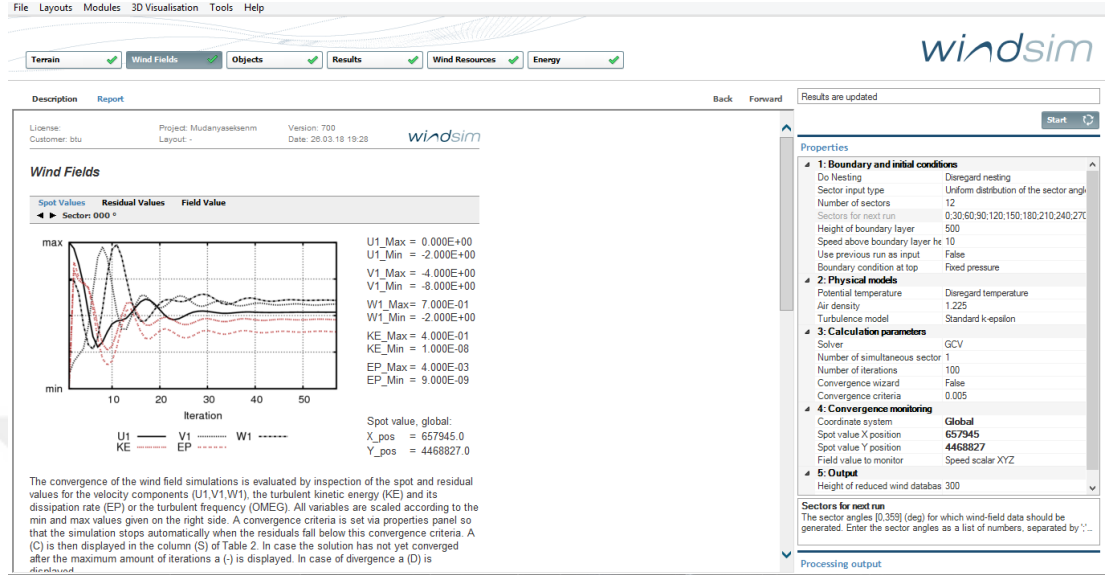
WindSim program ile Gemlik, Karacabey ve Mudanya ilçelerinin rüzgâr enerji potansiyelleri tek tek incelenmiştir. Tezin bu kısmında Mudanya için yapılan çalışmanın basamakları hakkında bilgi verilecektir. İlk olarak WindSim Express programı aracılığıyla gwsuzantılı dosya oluşturulmaktadır. İlgili dosyayı oluşturmak için seçilen bölgenin coğrafi konumu UTM koordinat biriminde girilmekte ve arazi modellenmektedir. Arazi modeli WindSim Terrain modülünde programa aktarılmaktadır. Aşağıdaki şekilde Mudanya için yapılan çalışmanın Terrain modülü görülmektedir.



Şekil 3.13 : WindSim Terrain modülü

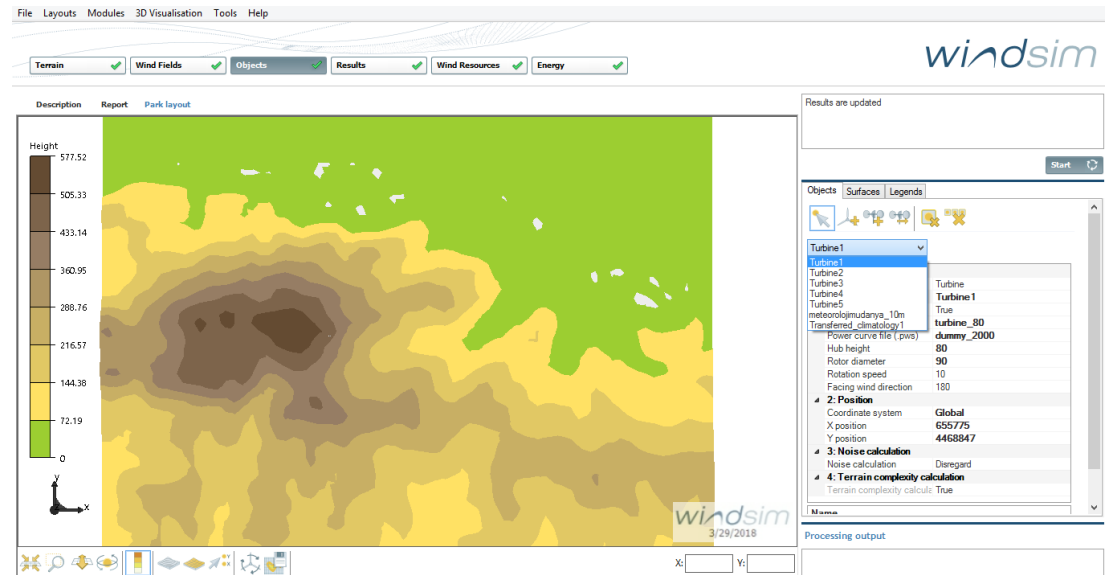


Mudanya UTM koordinatları; X düzleminde 649275.318; 666614.342, Y düzleminde 4462572.301; 4475082 şeklindedir. Terrain modülünün ardından WindFields modülü gelmektedir ve Şekil 3.14’de WindFields modülü görülmektedir.



Şekil 3.14 :WindSim WindFields modülü

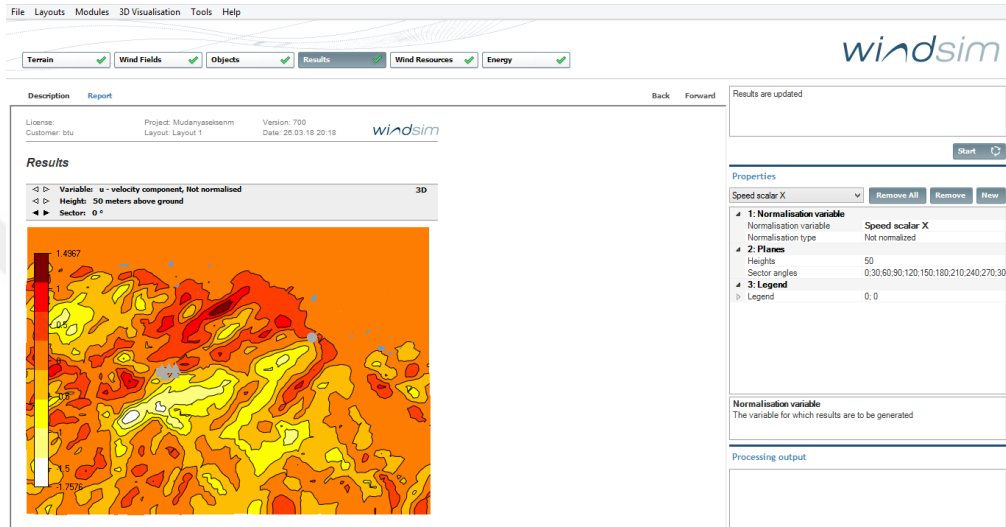
WindFields modülünde türbülans modeli seçilerek arazinin rüzgâr akışı modellenmektedir. Bu modül sonrasında Objects modülüne geçilmektedir.



Şekil 3.15 :WindSim Objects modülü

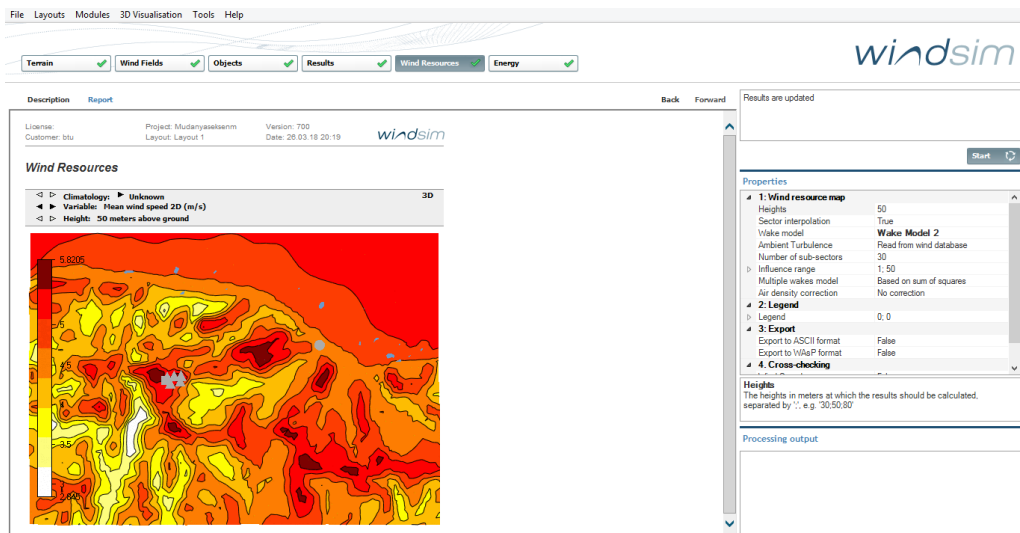
Şekil 3.15’de Objects modülü incelenmektedir. Mudanya için yapılan çalışmanın bu bölümünde 5 adet, kule yüksekliği 80 m ve rotor yarıçapı 90 m olan Vestas V90

türbinleri yerleştirilmiştir. Türbinlere ek olarak Meteoroloji Genel Müdürlüğü rüzgâr ölçüm direği yerleştirilmiş ve program tarafından oluşturulan klimatoloji direği yerleştirilmiştir. Program tarafından oluşturulan klimatoloji direkleri Meteoroloji Genel müdürlüğü klimatoloji ölçüm direğinin aksine, türbinlere daha yakın bir konumda ve türbinlerle eş yükseltide yerleştirilmiştir. Bu sayede program ile yapılan analiz ile rüzgar enerjisi potansiyeli daha doğru hesaplanabilmektedir. Objects modülünden sonra Results bölümüne geçilmektedir.



Şekil 3.16 :WindSimResultsmodülü

Resultsmodülü Şekil 3.16’da görülmektedir. Rüzgâr50 m yükseklikte 12 sektöre ayrılmış ve her bir sektör için ayrı ayrı rüzgâr hız haritaları oluşturulmuştur.



Şekil 3.17 :WindSimWindResourcesmodülü

Şekil 3.17’de WindResourcesmodülü görülmektedir. Bu modülde 50, 60 veya 70 m yükseklik için, seçilen Wake modeline göre ortalama rüzgâr hızı haritası oluşturulmaktadır. Mudanya için 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı haritası oluşturulmuştur.

The screenshot displays the WindSim Energy module interface. The top menu bar includes 'File', 'Layouts', 'Modules', '3D Visualisation', 'Tools', and 'Help'. Below the menu, there are several status indicators: 'Terrain', 'Wind Fields', 'Objects', 'Results', 'Wind Resources', and 'Energy', each with a green checkmark. The 'Results' tab is active, showing a 'Description' and 'Report' section. The main content area displays the 'Annual Energy Production AEP' results for two climatologies: 'meteorolojimd..' and 'meteorolojimd..'. The results are summarized in Table 1, which shows Gross AEP and Wake loss % for each. Below Table 1, there is a table for 'Site and wake characteristics' (Table 2) with columns for Air density, Wake model, Multi-wakes model, Roughness, Amb. Turb. Int., Sub-sectors, and Influence range. The right sidebar contains 'Properties' for '1. Calculations' and '2. Export', with various settings like 'Air density correction', 'Method for density correction', 'Sector interpolation', 'Wake model', 'Ambient Turbulence', 'Number of sub-sectors', 'Influence range', 'Multiple wakes model', 'Heights of reference production', 'Export power history', 'Export rotor profiles', 'Export turbine assessment', 'Export vertical profiles', and 'IEC classification'. A 'Start' button is visible in the top right corner of the main content area.

Climatology	Distribution	Gross AEP	Wake loss %
meteorolojimd..	Frequency table	22.4144	5.08
meteorolojimd..	Weibull distribution	22.8409	5.18

Air density (kg/m <sup>3</sup> )	Wake model	Multi-wakes model	Roughness (m)	Amb. Turb. Int. (%)	Sub-sectors	Influence range (Rotor diameter)
No correction	2	2	-	Variable	30	1.0 - 50.0

Şekil 3.18 :WindSim Energy modülü.

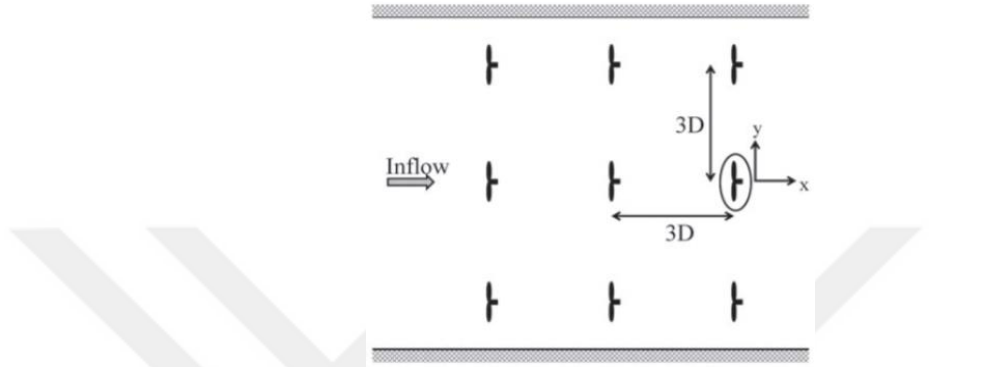
Programın son modülü olan Energy modülü Şekil 3.18’de görülmektedir. Bu bölümde yıllık enerji üretimi hesaplanmaktadır.

### 3.7 Rüzgâr Tarlasında Türbinlerin Yerleşimi

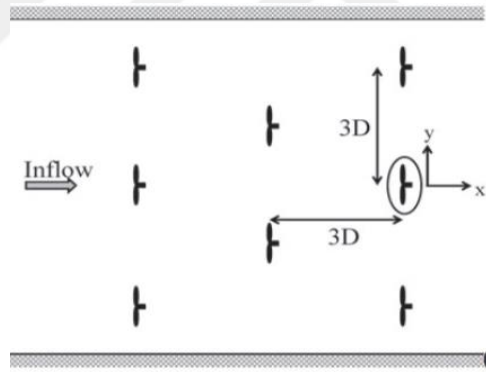
Enerji korunum yasalarına göre, türbine gelen rüzgârın enerjisi türbinden çıkan rüzgârın enerjisinden daha yüksektir. Türbin arkasında meydana gelen enerji düşüşü ‘wakeeffect’ olarak adlandırılmaktadır. Büyük rüzgâr enerji santrallerinde türbin yerleşimleri yapılırken bu tanım dikkate alınmaktadır. Türbinlerin yerleşimi doğru bir şekilde olmazsa, bölgede hâkim olan rüzgârın doğal akışı değişecek ve türbinler birbirlerinden olumsuz bir biçimde etkileneceklerdir. Rüzgâr türbinlerine gelen

rüzgârın doğal akışını değiştirmeyecek biçimde türbinleri konumlandırmak enerji kayıplarını azaltacaktır.

Rüzgâr tarlalarında türbinlerin yerleşiminin rüzgâr enerjisi üzerine etkisini incelemek adına onshore ve offshorerüzgar tarlalarında bir araştırma yapılmıştır. Türbinler aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi düzenli ve düzensiz olmak üzere yerleştirilmiştir[61].



**Şekil 3.19 :**Rüzgâr türbinleri düzenli yerleşimi



**Şekil 3.20 :**Rüzgâr türbinleri düzensiz yerleşimi

Offshorerüzgâr tarlalarında, türbinlerin aerodinamik performansının düzenli veya düzensiz türbin yerleşimlerinden etkilenmediği incelenmiştir. Onshorerüzgârtarlalarında ise, türbinler Şekil 3.20'deki gibi yerleştirildiğinde daha fazla enerji elde edildiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada Bursa ili kıyı kesimlerinden olan Karacabey, Gemlik ve Mudanya için yapılacak olan rüzgâr enerji potansiyel analizinde türbinlerin yerleşimi de araştırma sonuçlarından faydalanılarak düzensiz bir biçimde yerleştirilmiş ve iki türbin arası mesafe de türbin çapının 3 katı kadar alınmıştır.



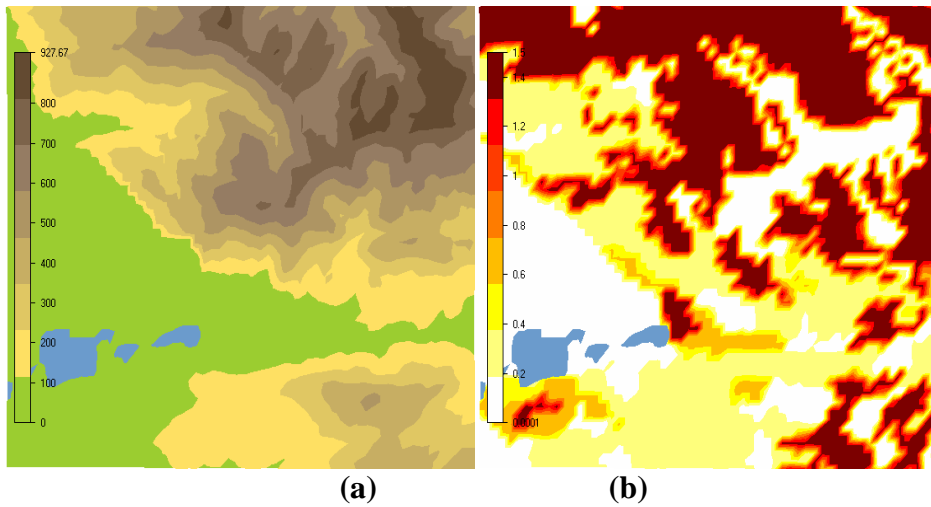
**Şekil 3.21** :WindSim programında türbinlerin düzensiz yerleşimi

Şekil 3.21’de Gemlik ilçesinde analizi yapılacak olan alana yerleştirilen türbinler görülmektedir. Türbinler Vestas V90 olup, kule yüksekliği 80 m ve türbin çapı 90m’dir. Türbinlerin birbirlerinden uzaklığı da 270 m olarak hesaplanmıştır. Türbin yerleşimi diğer ilçelerde de benzer şekilde yapılmıştır.

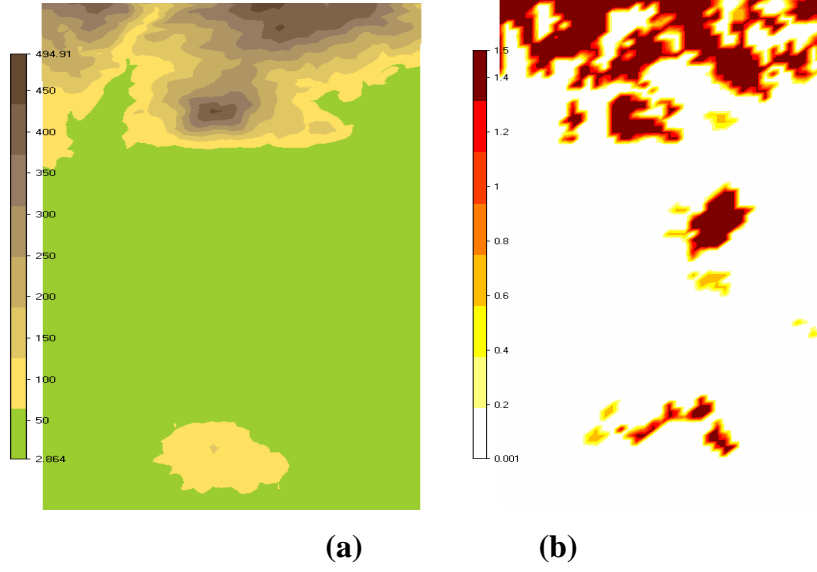
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Türkiye Rüzgâr Enerji Potansiyel Atlası haritalarından faydalanılarak Bursa ilinin rüzgâr enerji potansiyelinin en fazla olduğu alanların kıyı bölgeleri olduğu tespit edilmiştir. Bursa'nın kıyı bölgelerini Gemlik, Karacabey ve Mudanya ilçeleri oluşturmaktadır. İlgili ilçelerin klimatolojik verileri olan rüzgâr hız ve yönleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Klimatoloji verileri 10 m yükseklikte ölçülen değerler olup saatlik rüzgâr hız ve yönlerini kapsamaktadır. WindSim programı ile yapılacak olan analizlerde klimatoloji verilerinden faydalanılacaktır.

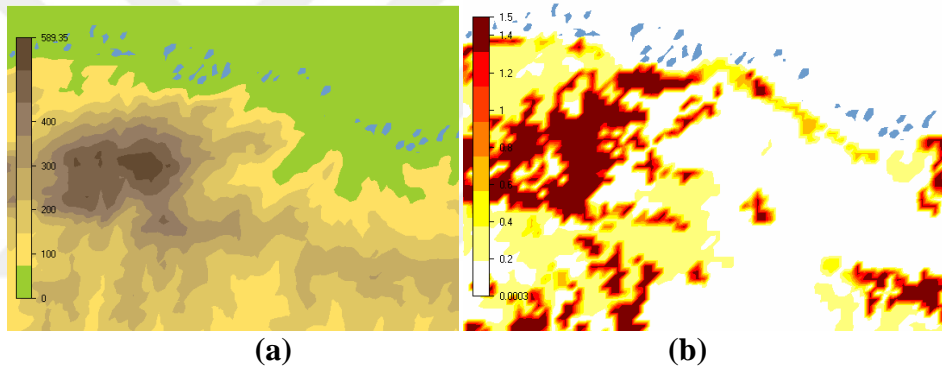
WindSim analizlerinde ilk adım arazi yapısının modellenmesidir. Arazi yapısı Terrainmodülü ile oluşturulmaktadır. Analizin bu aşamasında pürüzlülük haritası CORINE (Coordination of Information on the Environment) veritabanı, yükseklik haritası ise SRTM Worldwide Elevation Data veritabanı kullanılarak oluşturulmuştur. Koordinat sistemi UTM, zone:35 ve datum:WGS84'dir. Aşağıdaki şekillerde her ilçe için ayrı ayrı yapılan analizlerde oluşturulan arazi modelleri ve pürüzlülük haritaları görülmektedir.



Şekil 4.1 :Gemlik İlçesi arazi yapısı (a) ve pürüzlülük haritası (b)



**Şekil 4.2 :**Karacabey ilçesi arazi yapısı (a) ve pürüzlülük haritası (b)



**Şekil 4.3 :**Mudanya ilçesi arazi yapısı (a) ve pürüzlülük haritası (b)

Şekillerde arazi yapısının yanında pürüzlülük haritası da verilmiştir. Arazinin pürüzlülük katsayısı elde edilebilecek rüzgâr enerjisi miktarında önemli bir parametredir. Rüzgâr türbinlerinin yerleşirileceği alanlar seçilmeden önce arazinin pürüzlülük yapısını incelemek adına şekillerde görülen pürüzlülük haritalarından faydalanılmaktadır.

Pürüzlülük ve yükselti haritaları oluşturulduktan sonra programın ikinci aşaması olan WindFieldsmodülünden bölgenin rüzgâr akışı modellenmektedir. Rüzgâr akışı, standart  $k-\epsilon$  modeli uygulanarak ReynoldsAveragedNavierStokes (RANS) denklemlerinin çözümü ile modellenmektedir.

Programda rüzgâr akışı modellendikten sonra üçüncü aşama olan Objects modülünde rüzgar türbinleri ve klimatoloji direkleri yerleştirilmektedir. Mudanya, Gemlik ve

Karacabey ilçelerinde yapılan analizlerde türbinler pürüzlülük haritaları ve wakeeffect dikkate alınacak biçimde yerleştirilmiştir. Wake effect nedeniyle oluşan rüzgâr enerjisi kayıplarını azaltmak adına ‘‘Rüzgâr Tarlalarında Türbinlerin Yerleşimi’’ bölümünde belirtildiği gibi iki türbin arası mesafe türbin çapının 3 katı olacak biçimde yerleştirilmiştir. Yani iki türbin arası 270 m ve Şekil 3.19’daki gibi yerleştirilmiştir. Aşağıdaki çizelgelerde türbinlerin UTM koordinat sisteminde konumları verilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Gemlik rüzgâr tarlasındaki türbinlerin coğrafi konumu.

Türbin adı	Kule yüksekliği [m]	Easting	Northing
Türbin 1	80	685547,0	4481134,0
Türbin 2	80	685364,0	4480931,0
Türbin 3	80	685181,0	4480729,0
Türbin 4	80	685282,0	4481247,0
Türbin 5	80	685105,0	4481051,0

**Çizelge 4.2 :** Karacabey rüzgâr tarlasındaki türbinlerin coğrafi konumu.

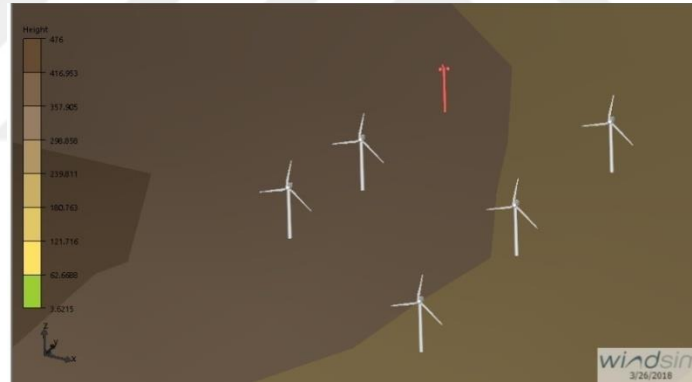
Türbin adı	Kule yüksekliği [m]	Easting	Northing
Türbin 1	80	614540,0	4458560,0
Türbin 2	80	614526,0	4458281,0
Türbin 3	80	614510,0	4458007,0
Türbin 4	80	614252,0	4458141,0
Türbin 5	80	614283,0	4458308,0

**Çizelge 4.3 :** Mudanya rüzgâr tarlasındaki türbinlerin coğrafi konumu.

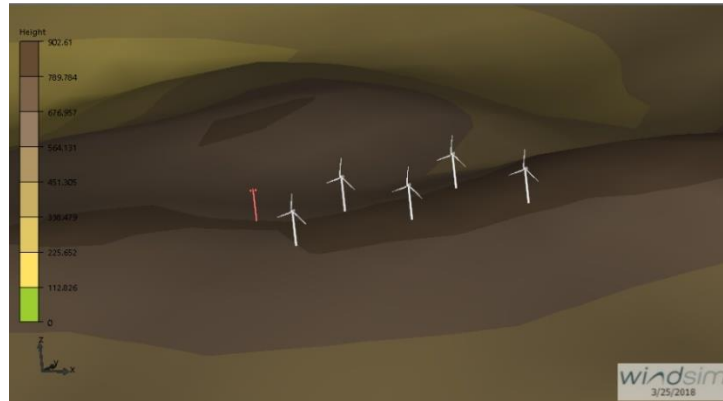
Türbin adı	Kule yüksekliği [m]	Easting	Northing
Türbin 1	80	655775,0	4468847,0
Türbin 2	80	655507,0	4468830,0
Türbin 3	80	655236,0	4468792,0
Türbin 4	80	655358,0	4468540,0
Türbin 5	80	655747,0	4468622,0



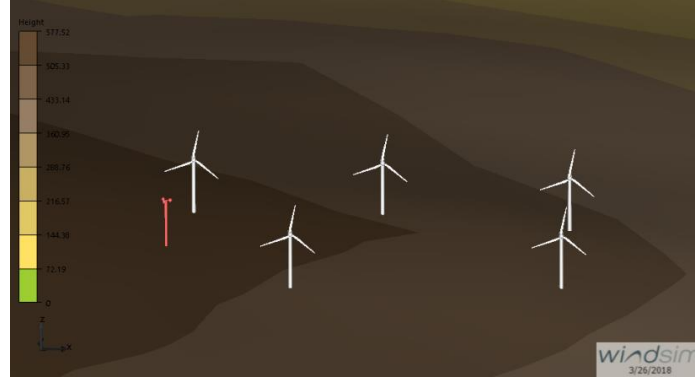
Programın Objects bölümünde türbinlerin yanında klimatoloji direkleri de konumlandırılmaktadır. Gemlik, Karacabey ve Mudanya ilçelerinin Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yerleştirilmiş olan klimatoloji direklerinin konumları ve klimatoloji verileri programa girilmektedir. Buna ek olarak programın “TransferredClimatology Data” modülünden faydalanılmıştır. Modül sayesinde programda türbinlerin yerleştirildiği alana bir adet “Transfer Climatology” ölçüm direği yerleştirilmektedir. Bu sayede, 10 m yükseklikte ve türbinlerden daha uzakta olan Meteoroloji Genel Müdürlüğü klimatoloji direklerinin verileri, 80 m kule yüksekliğinde ve türbinlerin olduğu konumda olan “Transfer Climatology” ölçüm direğine aktarılmaktadır. Aktarımın temelinde ReynoldsAveragedNavierStokesdenklemine çözümlerinin çözümü bulunmaktadır. WindSim yazılımında sonuçlar “Transfer Climatology” modülü sayesinde daha güvenilir hale gelmektedir. Aşağıdaki şekilde türbinler ve transfer klimatoloji direklerinin yerleşiminin, WindSim programı tarafından oluşturulan simülasyonları görülmektedir.



**Şekil 4.4 :**Gemlik ilçesi türbinler ve transfer klimatoloji direği



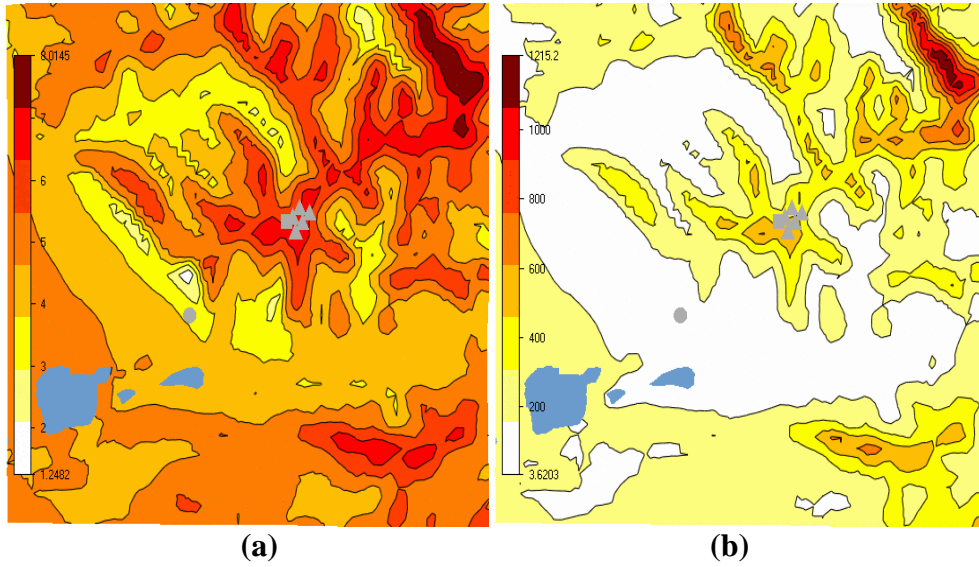
**Şekil 4.5 :** Karacabey ilçesi türbinler ve transfer klimatoloji direği



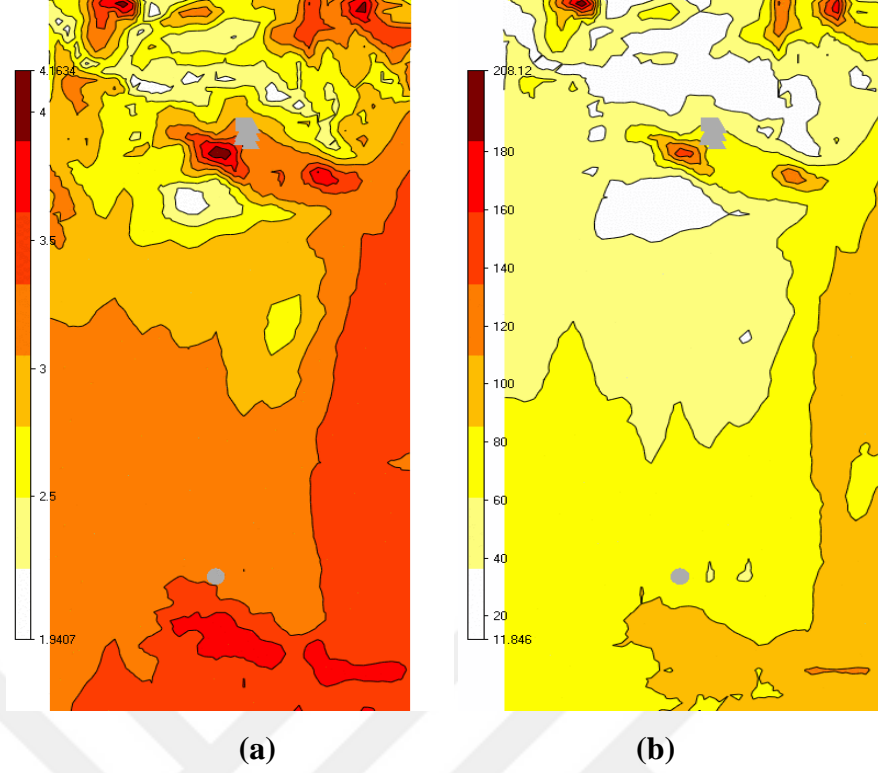
**Şekil 4.6 :** Mudanya ilçesi türbinler ve transfer klimatolji direği

Programın Objects bölümünde gerekli işlemler yapıldığında dördüncü aşama olan Result bölümüne geçilmektedir. Result bölümü, oluşturulan rüzgâr tarlası ve klimatoloji verisimülasyonlarının oluşturulduğu bölümdür. Rüzgâr akışının arazi yapısından nasıl etkilendiği gözlemlenmektedir.

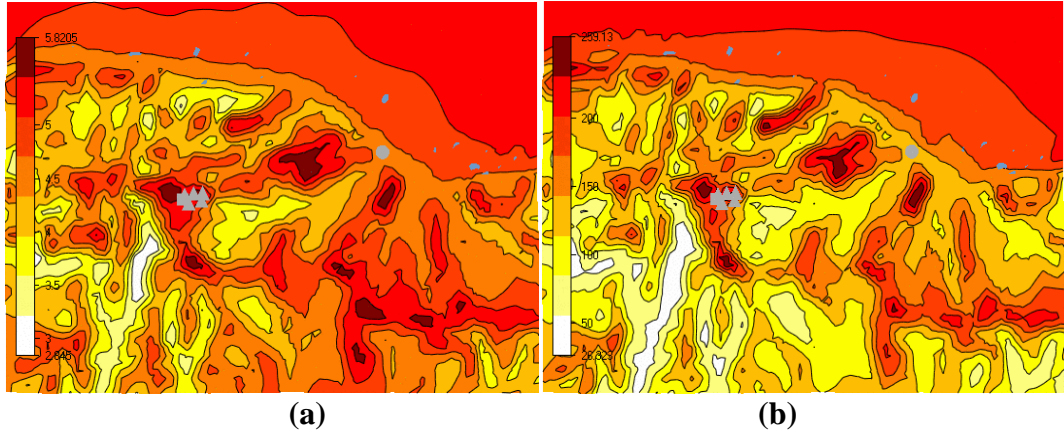
Sonrasında beşinci aşama olan WindResources bölümünde istenilen yükseklikte rüzgâr hızı haritaları oluşturulmaktadır. Ayrıca sonuçlarda ‘wakeeffect’ de gözlemlenmek isteniyorsa programın bu kısmında Wake Model seçilmektedir. Bursa'nın kıyı bölgeleri için yapılan analizlerde Wake Model seçilip, 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı haritaları ve güç yoğunluğu haritaları oluşturulmuştur. Oluşturulan rüzgar hızı ve güç yoğunluğu haritaları Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'da görülmektedir.



**Şekil 4.7 :** Gemlik ilçesi 50 m ortalama rüzgâr hızı (a) ve güç yoğunluğu haritası (b)



**Şekil 4.8 :**Karacabey ilçesi 50 m ortalama rüzgâr hızı (a) ve güç yoğunluğu haritası (b)



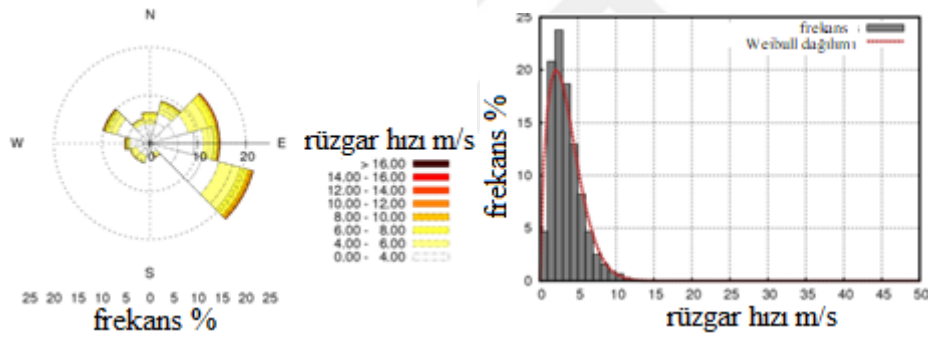
**Şekil 4.9 :**Mudanya ilçesi 50 m ortalama rüzgâr hızı (a) ve güç yoğunluğu haritası (b)

Rüzgâr hızı haritaları yardımıyla ortalama rüzgâr hızının en yüksek olduğu bölgeler gözlemlenip, rüzgar tarlası kurmak için uygun bölge seçilebilmektedir. Haritalar CFD sonuçlarına göre ve bölgenin klimatoloji verilerine göre oluşturulmaktadır. Rüzgâr tarlası kurulacak olan alanların 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızları Gemlik, Karacabey ve Mudanya için sırasıyla; 6,2 m/s, 3,1 m/s ve 5,5 m/s'dir.

Ortalama rüzgâr hız haritalarının yanında Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonları da rüzgâr enerjisi potansiyel analizi hesaplamalarında en çok kullanılan istatistiksel dağılımlardandır. WindSim programında Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonları çözümlenmektedir. Aşağıdaki şekillerde analizi yapılan bölgelerin Weibull dağılım grafikleri hakkında bilgiler verilmektedir.

c ölçek (scale) parametresinin birimi m/s; k, şekil parametresi ise birimsizdir. Bu parametreler uzun vadede ölçülen rüzgâr verilerinden faydalanılarak hesaplanmaktadır. Araştırmalara göre k şekil parametresi, genellikle 1,5 ile 3 değerleri arasındadır [62].

Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12’de sırasıyla Gemlik, Karacabey ve Mudanya ilçeleri için Weibull dağılım grafikleri verilmiştir. Grafiklerde ortalama rüzgar hızı (m/s), frekans (%), şekil parametresi (k) ve ölçek parametresi (c), araziler 12 sektöre ayrılarak 12 sektör için ayrı ayrı belirtilmiştir.

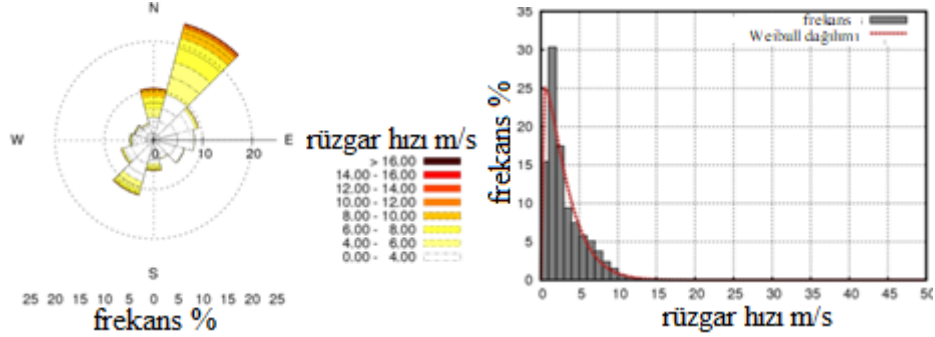


Şekil 4.10 : Gemlik ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları

Çizelge 4.4 : Gemlik ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ortalama rüzgar hızı (m/s)	3,53	3,34	3,96	2,97	3,50	3,45	2,40	3,58	3,60	3,32	3,49	2,75
Frekans (%)	6,42	9,06	14,68	14,61	22,31	3,10	0,63	4,23	4,31	5,26	10,07	5,31
Şekil parametresi (k)	1,73	1,87	1,80	1,27	1,53	1,87	2,84	3,08	2,48	1,24	1,61	1,66
Ölçek parametresi (c)	4,00	3,76	4,48	3,05	3,84	4,03	2,78	4,09	4,10	3,36	3,83	3,13

Gemlik ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyon yönteminin sonuçlarına göre 10 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı 3,43 m/s; ortalama k şekil parametresi 1,63; ortalama c ölçek parametresi ise 3,84 m/s olarak hesaplanmıştır.

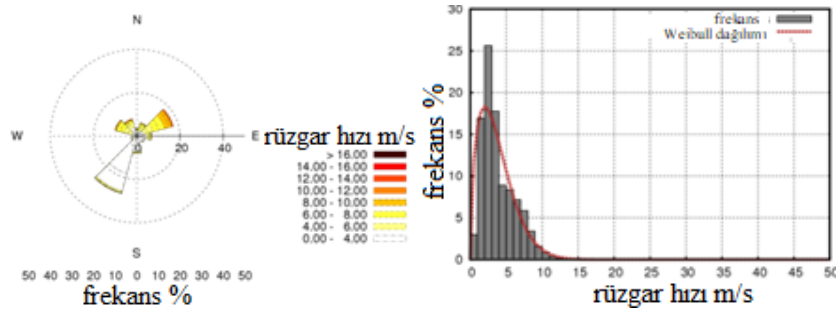


**Şekil 4.11 :** Karacabey ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları

**Çizelge 4.5 :** Karacabey ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ortalama rüzgar hızı (m/s)	4,66	4,87	2,20	1,82	1,63	1,63	2,76	2,83	1,85	1,76	1,58	1,46
Frekans (%)	10,48	24,38	9,43	8,29	6,51	4,03	6,17	11,49	6,77	4,79	4,15	3,50
Şekil parametresi (k)	2,03	2,09	1,75	2,54	2,46	1,83	1,28	1,43	1,21	1,17	1,29	1,20
Ölçek parametresi (c)	5,70	5,71	2,55	2,14	1,92	1,93	2,94	3,10	1,94	1,83	1,74	1,58

Karacabey ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyon yönteminin sonuçlarına göre 10 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı 3,03 m/s; ortalama k şekil parametresi 1,16; ortalama c ölçek parametresi ise 3,05 m/s olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.12 :** Mudanya ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları

**Çizelge 4.6 :**Mudanya ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ortalama rüzgar hızı (m/s)	3,46	4,53	6,12	3,26	2,08	2,22	2,55	2,68	2,65	3,17	5,44	4,33
Frekans (%)	3,61	6,31	17,43	6,82	3,85	3,18	8,02	27,31	2,79	2,14	10,40	8,14
Şekil parametresi (k)	1,53	2,77	3,27	1,86	2,36	2,71	2,00	3,26	1,76	1,97	3,57	1,72
Ölçek parametresi (c)	3,93	5,44	7,12	3,76	2,39	2,55	2,92	3,07	2,96	3,68	6,22	4,83

Mudanya ilçesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyon yönteminin sonuçlarına göre 10 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı 3,85 m/s; ortalama k şekil parametresi 1,52; ortalama c ölçek parametresi ise 4,09 m/s olarak hesaplanmıştır.

Rüzgâr hızı ve frekans grafiklerine göre 10 m yükseklikte Gemlik için frekans aralığının en fazla olduğu rüzgâr hızı yaklaşık 3 m/s'dir. Karacabey ve Mudanya için bu değer sırasıyla 2,5 m/s ve 3,1 m/s'dir. Uygun rüzgâr tarlası seçimlerinde rüzgâr hızı ve frekans dağılımı grafiklerinden bölgenin rüzgâr rejimi hakkında bilgi edinilebilmektedir. Rüzgâr rejimlerinin çok değişken olduğu bölgeler rüzgâr tarlası için elverişli değildir. Rüzgâr tarlası kurulacak olan bölgede hakim olan rüzgâr rejimlerinin sürekli ve az değişken olması beklenmektedir. Buna göre rüzgâr rejimlerinin en uygun olduğu bölge en az değişkenlik gösteren bölge olan Gemlik'dir. Karacabey ve Mudanya ilçelerinde rüzgâr rejimlerinde ani değişiklikler olduğu grafik yardımıyla gözlemlenebilmektedir.

WindSim programı yardımıyla yıllık enerji üretimi de hesaplanabilmektedir. Bu hesaplamalar programın son kısmı olan Energymodülünde yapılmaktadır. Yıllık enerji üretimi, sahanın uzun vadede klimatolojik verileri kullanılarak CFD sonuçlarına göre hesaplanmaktadır. Aşağıdaki şekilde programın Energymodülünde elde edilen sonuçlar her ilçe için verilmiştir.

Programda kule yüksekliği 80 m olan türbinler seçildiğinden 80 m yükseklikteki ortalama rüzgâr hızları hesaplanmıştır. Şekillerden görüleceği üzere, Gemlik, Karacabey ve Mudanya için belirtilen yükseklikte ortalama rüzgâr hızları sırasıyla

6,7 m/s, 3,6 m/s ve 5,9 m/s'dir. Wake loss değerleri ise sırasıyla %4,7, %9,3 ve %5,1 olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.7 : Gemlik ilçesi yıllık enerji üretimi.**

Türbin tipi	Kule yüksekliği (m)	Türbin sayısı	Kapasite (MW)	Brüt AEP (GWh /y)	Ortalama rüzgar hızı (m/s)	Wake kaybı (%)	Net AEP (GWh /y)	Tam yükte çalışma (saat)	Kapasite faktörü (%)
ws2000	80,0	5	10,0	27,8	6,7	4,7	26,5	2649,3	30,2

Gemlik ilçesinde türbinler bir yılda tam yükte 2694,3 saat çalışmakta, yıllık enerji üretimi 27,8 GWh ve kapasite faktörü %30,2'dir. Wake loss parametresi dikkate alınarak yıllık enerji üretimi hesaplandığında bu değer 26,5 GWh olmaktadır.

**Çizelge 4.8 : Karacabey ilçesi yıllık enerji üretimi.**

Türbin tipi	Kule yüksekliği (m)	Türbin sayısı	Kapasite (MW)	Brüt AEP (GWh /y)	Ortalama rüzgar hızı (m/s)	Wake kaybı (%)	Net AEP (GWh /y)	Tam yükte çalışma (saat)	Kapasite faktörü (%)
ws2000	80,0	5	10,0	9,7	3,6	9,3	8,8	879,8	10,0

Karacabey ilçesinde türbinler bir yılda tam yükte 879,8 saat çalışmakta, yıllık enerji üretimi 10 GWh ve kapasite faktörü %10'dır. Wake loss parametresi dikkate alınarak yıllık enerji üretimi hesaplandığında bu değer 8,8 GWh olmaktadır.

**Çizelge 4.9 : Mudanya ilçesi yıllık enerji üretimi.**

Türbin tipi	Kule yüksekliği (m)	Türbin sayısı	Kapasite (MW)	Brüt AEP (GWh /y)	Ortalama rüzgar hızı (m/s)	Wake kaybı (%)	Net AEP (GWh /y)	Tam yükte çalışma (saat)	Kapasite faktörü (%)
ws2000	80,0	5	10,0	23,6	5,9	5,1	22,4	2241,4	25,6

Mudanya ilçesinde türbinler bir yılda tam yükte 2241,4 saat çalışmakta, yıllık enerji üretimi 23,6 GWh ve kapasite faktörü %25,6'dir. Wake loss parametresi dikkate alınarak yıllık enerji üretimi hesaplandığında bu değer 22,4 GWh olmaktadır.

Kapasite faktörü; herhangi bir zaman diliminde rüzgâr türbini ortalama güç çıkışının aynı zaman diliminde nominal elektrik gücüne oranıdır[63].

$$\text{Kapasite faktörü} = \frac{E_{\text{çıkış}}}{E_r} \quad (4.1)$$

$P_T$  türbin çıkış gücü olmak üzere, türbinin üretebileceği maksimum enerji  $E_r = 8760 \times P_T$  formülünden hesaplanmaktadır.  $E_{\text{çıkış}}$  ise türbinin ürettiği gerçek enerji miktarını ifade etmektedir[64].

Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı kapasite faktörünün %25 ve üzeri olduğu bölgelerde rüzgâr tarlası kurulumuna izin vermektedir [32]. WindSim programı tarafından elde edilen sonuçlara göre rüzgâr tarlası yatırımı için uygun olan ilçeler kapasite faktörleri sırasıyla %30,8 ve %26,4 olan Gemlik ve Mudanya'dır.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerjiye duyulan ihtiyacın artması ve çevre kirliliği gibi etmenler nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında büyük bir artış meydana gelmiştir. Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgârenerjisi ile ilgili çalışmalara ağırlık verilmiştir. Tezde öncelikle dünyanın enerji durumunu değerlendirmek adına enerji kaynaklarının potansiyeli ve kullanım oranları incelenmiştir. Türkiye'nin enerji görünümü değerlendirmek adına da öncelikle Türkiye enerji potansiyeli incelenmiş, sonrasında Türkiye'nin enerji kaynaklarının kullanım oranları incelenmiştir.

Bu incelemeler sonrasında Türkiye için, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisinin durumu değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler doğrultusunda, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi kurulu güç gelişimi, işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin bölgesel dağılımları, santrallerde kullanılmakta rüzgar türbinlerinin markalara göre dağılımı, 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hız haritası ve 50 m yükseklikte rüzgar güç yoğunluğu haritası incelenmiştir.

İncelemeler sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki maddeler halinde sıralanabilmektedir;

- Coğrafi konumu sebebiyle, yenilenebilir enerji kaynakları açısından zengin bir ülke olmakla beraber, Türkiye'nin potansiyel rüzgâr enerji gücü 48000 MW olarak hesaplanmıştır [26].
- Türkiye'nin 2017 yılı rüzgâr enerjisi kurulu gücü 6483,9 MW olmakla beraber, toplam rüzgâr enerji potansiyelinin yalnızca %13,5'lik kısmından faydalanılmaktadır.
- REPA tarafından hazırlanan 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı ve rüzgar güç yoğunluğu haritaları incelendiğinde Marmara ve Ege Bölgeleri'nin rüzgar enerji potansiyelinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Rüzgâr enerji potansiyelini belirlemek adına birçok yöntem bulunmaktadır. En sık kullanılan yöntemlerden olan Rayleigh ve Weibull dağılım

fonksiyonları istatistiksel analiz yöntemlerindedir. Literatürde istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak rüzgâr enerji potansiyel analizinin gerçekleştirildiği pek çok çalışma mevcuttur. Fakat Weibull dağılım fonksiyonundan elde edilen sonuçların daha güvenilir ve kesin sonuçlar olduğu gözlemlenmiştir.

- Bölgelerin rüzgâr enerji potansiyellerini belirlemek adına, istatistiksel analiz yöntemlerinin yanında sık kullanılmakta olan diğer bir yöntem ise bilgisayar yazılımlarıdır. Lineer denklem çözümleri gerçekleştiren yazılımların yanında lineer olmayan denklemlerin çözümlerini gerçekleştiren yazılımlar da bulunmaktadır. Lineer denklem çözümü gerçekleştiren ve sık kullanılan bilgisayar yazılımı WasP'dır. Lineer olmayan denklem çözümlerinin gerçekleştirildiği ve CFD yöntemlerinin kullanıldığı yazılımlardan biri WindSim'dir.
- Çalışmada rüzgâr enerji potansiyelini belirlemek adına güvenilir bir yöntem olan WindSim yazılımı kullanılmıştır. Bursa ilinin ortalama rüzgar hız haritaları incelenmiştir ve rüzgar santral yatırımları için en uygun olan bölgelerin kıyı bölgeler olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kıyı bölgelerden olan Gemlik, Karacabey ve Mudanya'nın rüzgâr enerji potansiyel analizi WindSim yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.
- Bahsi geçen ilçelerin saatlik rüzgâr hız ve rüzgâr yön verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Analizler her ilçe için ayrı ayrı yapılmıştır. WindSim Express yazılımı arazi topoğrafyasının oluşturulduğu bir .tws dosyası ve klimatoloji dosyası olan .gws dosyaları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu dosyalar rüzgâr enerji potansiyel analizini belirlemek adına WindSim yazılımına aktarılmıştır.
- Gemlik, Karacabey ve Mudanya ilçelerine kule yüksekliği 80 m olan ve 90 m rotor çapında 5 adet Vestas V90 türbini yerleştirilmiştir. Türbin yerleşimi, literatürde yapılan çalışmalar incelenerek wakeeffect minimum olacak biçimde yapılmıştır. Türbinler arasındaki mesafe, rotor çapının 3 katı olan 270 m olacak şekilde ayarlanmıştır.
- Çalışmada rüzgâr enerji potansiyel analizinin tüm aşamaları anlatılmış ve program ara yüzünde bulunan modüllerin ekran görüntüleri de aşamalar halinde verilmiştir. Öncelikle arazilerin pürüzlülük haritaları oluşturulmuş, pürüzlülüğün en az olduğu bölgelere rüzgâr türbin yerleşimi yapılmıştır. 50 m

yükseklikte ortalama rüzgâr hızı haritaları da oluşturulmuştur. Bu haritalara göre Gemlik, Karacabey ve Mudanya için 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızları sırasıyla; 6,2 m/s, 3,1 m/s ve 5,5 m/s'dir.

- Program aracılığıyla Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun parametreleri olan c ölçek parametresi ve k şekil parametresi 10 m yükseklik için hesaplanmıştır. Gemlik için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu k şekil parametresi 1,63; c ölçek parametresi 3,84 m/s'dir. Karacabey için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu k şekil parametresi 1,16; c ölçek parametresi 3,05 m/s'dir. Mudanya için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu k şekil parametresi 1,52; c ölçek parametresi 4,09 m/s'dir.
- Türbin kule yüksekliği olan 80 m yükseklikte Gemlik, Karacabey ve Mudanya için ortalama rüzgâr hızı sırasıyla 6,7 m/s, 3,6 m/s ve 5,9 m/s'dir. Kapasite faktörleri sırasıyla; %30,2, %10 ve %25,6'dır. ETKB kapasite faktörünün %25 ve üzeri olduğu bölgelerde rüzgâr santral kurulumuna izin vermektedir. Buna göre ilgili ilçelerde seçilen bölgelerin kapasite faktörleri incelendiğinde, Gemlik ve Mudanya ilçelerinde program aracılığıyla oluşturulan rüzgâr tarlasının yatırıma uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Gemlik ve Mudanya'nın yıllık rüzgâr enerjisi üretimleri sırasıyla 26,5 GWh ve 22,4 GWh olarak hesaplanmıştır.

WindSim yazılımı aracılığıyla Bursa ilinin kıyı şeridi için yapılan rüzgar enerjisi potansiyel analizi çalışması, REPA tarafından hazırlanan rüzgar hız haritaları yardımıyla belirlenen rüzgar enerji potansiyelinin fazla olduğu diğer bölgeler için de yapılabilmektedir. Bu sayede diğer rüzgar enerji potansiyelinin fazla olduğu diğer bölgelerin de pürüzlülük değerleri, Weibull dağılım fonksiyon parametreleri olan k ve c değerleri, kapasite faktörleri ve yıllık enerji üretimleri hesaplanabilmektedir. WindSim yazılımı potansiyel değerlendirmesi adına kullanılacak olan güvenli bir yazılımdır.

Ayrıca WindSim yazılımı ile yapılan analizler sırasında gerekli görüldüğü takdirde iterasyon miktarı artırılabilir olup sonuçlar daha da güvenilir hale getirilebilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Koç, E.&Şenel, M.C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu-genel değerlendirme, *Mühendis ve Makina*, 54 (639), 32-44.
- [2] Twidell, J., Weir, T.(1986). *Renewable energy resources*. London, UK: E&FN Spon.
- [3] BP Global,2017. BP Statistical Review of World Energy June 2017. United Kingdom, London. <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
- [4] ETKB 2016 Yılı Taşkömürü Sektör Raporu.(t.y.). Erişim: 12 Ocak 2018, [http://www.taskomuru.gov.tr/file/duyuru/TTKGM\\_Sektor\\_Raporu\\_2016.PDF](http://www.taskomuru.gov.tr/file/duyuru/TTKGM_Sektor_Raporu_2016.PDF)
- [5] Dünyada ve Türkiye’de Uranyum ve Toryum.(t.y.). Erişim: 17 Ocak 2018, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/Uranyum-Toryum.pdf>
- [6] Nuclear Energy Agency, 2016. Uranium 2016: Resources, Production and Demand. <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>
- [7] Bartle, A. (2002). Hydropower potential and development activities, *Energy Policy*,30, 1231-1239.
- [8] Gostein, M., Stueve, B., Passow, K., Panchula, A. (2016). Evaluating a Model to Estimate GHI, DNI & DHI from POA Irradiance, *43rd IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, (ss.943-946). Portland: Haziran 5-10.
- [9] World Energy Council, 2016. World Energy Resources 2016. World Energy Council, London. <https://www.worldenergy.org/publications/2016/world-energy-resources-2016/>
- [10] Lu, X., McElroy, M.B., Kiviluoma, J., (2009). Global potential for wind-generated electricity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(27),10933- 10938,. doi:10.1073/pnas.0904101106.
- [11] World Energy Council, 2013. World Energy Resources 2013. World Energy Council, London. <https://www.worldenergy.org/publications/2016/world-energy-resources-2016/>
- [12] Karaosmanoğlu, F. (2006). Biyoyakıt Teknolojisi ve İTÜ Araştırmaları, *ENKÜS 2006-İTÜ Enerji Çalıştayı ve Sergisi*, (ss.110-125). İstanbul: Haziran 22-23.
- [13] IEA, 2016. Coal Information 2016. IEA, Paris. <https://doi.org/10.1787/coal-2016-en>.
- [14] IAEA.(t.y.). Erişim: 7 Ocak 2018, <https://www.iaea.org/pris/>
- [15] International Hydropower Association (IHA), 2017. Hydropower Status Report. IHA, London. <https://www.hydroworld.com/content/dam/hydroworld/online-articles/2017/08/2017%20Hydropower%20Status%20Report-1.pdf>
- [16] World Energy Council.(t.y.). Erişim: 7 Ocak 2018, <https://www.worldenergy.org/data/resources/resource/hydropower/>
- [17] IRENA, 2017. Renewable Energy Statistics 2017. IRENA, Abu Dhabi. <http://www.irena.org/>

/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Jul/IRENA\_Renewable\_Energy\_Statistics\_2017.pdf

[18] **World Wind Energy Association.**(t.y.). Erişim: 7 Ocak 2018, <http://www.wwindea.org/>

[19] REN21, 2017. Renewables 2017 Global Status Report. REN21, Paris. [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399\\_GSR\\_2017\\_Full\\_Report\\_0621\\_Opt.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf)

[20] **Mavi Kitap 2016.**(t.y.). Erişim: [http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FMavi%20Kitap%2FMavi\\_kitap\\_2016.pdf](http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FMavi%20Kitap%2FMavi_kitap_2016.pdf)

[21] **ETKB.**(t.y.). Erişim: 7 Ocak 2018, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Komur>

[22] **ETKB.**(t.y.). Erişim: 7 Ocak 2018, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Petrol>

[23] **ETKB.**(t.y.). Erişim: 7 Ocak 2018, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Hidrolik>

[24] **TAEK.**(t.y.). Erişim: 7 Ocak 2018, <http://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-55/162-nukleer-yakit-cevrimi/1071-toryum.html>

[25] **Atılğan, İ.** (2012). Nükleer enerji, toryum elementi ve Türkiye için önemi, *Mühendis ve Makine*, 45 (529), 29-34.

[26] **ETKB.**(t.y.). Erişim: 10 Ocak 2018, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>

[27] **ETKB.**(t.y.). Erişim: 7 Ocak 2018, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes>

[28] **Kılıç, F.Ç.** (2010). Güneş enerjisi, Türkiye'deki son durumu ve üretim teknolojileri, *Mühendis ve Makina*, 56 (671), 28-40.

[29] **İlkılıç, C., Türkbay, İ.**, (2010). Determination and utilization of wind energy potential for Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2202-2207., doi:10.1016/j.rser.2010.03.033.

[30] TÜREB, 2018. Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu. TÜREB, Ankara. [https://www.tureb.com.tr/files/tureb\\_sayfa/duyurular/2018/03/turkiye\\_ruzgar\\_enerjisi\\_istatistik\\_raporu\\_ocak\\_2018.pdf](https://www.tureb.com.tr/files/tureb_sayfa/duyurular/2018/03/turkiye_ruzgar_enerjisi_istatistik_raporu_ocak_2018.pdf)

[31] **İlkılıç, C., Aydın, H.**, (2015). Wind power potential and usage in the coastal regions of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 78-86., doi:10.1016/j.rser.2014.12.010.

[32] **Köse, F.&Özgören, M.** (2005). Rüzgar enerjisi potansiyeli ölçümü ve rüzgar türbini seçimi, *Mühendis ve Makina*, 46 (551), 20-30.

[33] **Kaplan, Y.A.**, (2016). Rayleigh ve Weibull dağılımları kullanılarak Osmaniye bölgesinde rüzgar enerjisinin değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20 (1), 62-71., doi:10.19113/sdufbed.63806.

[34] **Eskin, N., Artar, H., Tolun, S.**, (2008). Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 12, 839-851., doi:10.1016/j.rser.2006.05.016.

[35] **Gülersoy, T., Çetin, N.S.** (2010). Menemen bölgesinde rüzgar türbinleri için Rayleigh ve Weibull dağılımlarının kullanılması, *Politeknik Dergisi*, 13 (3), 209-213.

[36] **Bilgili, M., Şahin, B., Şimşek, E.**, (2010). Türkiye'nin Güney, Güneybatı ve Batı bölgelerindeki rüzgar enerjisi potansiyeli, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 30 (1), 1-12.

- [37] **Kurban, M.&Kantar, Y.M.&Hocaoğlu, F.O.** (2006). Rüzgar enerjisi potansiyelinin araştırılmasında Weibull ve Rayleigh dağılımlarının kullanılması, *Sakarya University Journal of Science*, 10 (1), 14-21.
- [38] **Çelik, A.N.**, (2003). A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey. *Renewable Energy*, 29, 593-604,. doi:10.1016/j.renene.2003.07.002.
- [39] **Kocaman, M., Güngör, M.G.** (2017). Kompleks Bir Sahada Birden Fazla Ölçüm Direği Kullanılarak Yapılan Saha Modellemesi ve Enerji Analizi, 4. *İzmir Rüzgar Sempozyumu*, (ss.63-82). İzmir: Eylül 28-30.
- [40] **Chime, A. H., Acker, T.**, (2011). *Comparison of the actual and predicted wind energy production of a wind turbine using Windpro and Wasp software*. Erişim Tarihi: 7 Ocak 2018, [https://nau.edu/uploadedFiles/Academic/CEFNS/Centers-Institutes/Folder\\_Templates/\\_Media/Comparison-Of-The-Actual-And-Predicted-Wind-Energy-Production-Of-A-Wind-Turbine-Using-WindPro-And-WAsP-Software-Poster.pdf](https://nau.edu/uploadedFiles/Academic/CEFNS/Centers-Institutes/Folder_Templates/_Media/Comparison-Of-The-Actual-And-Predicted-Wind-Energy-Production-Of-A-Wind-Turbine-Using-WindPro-And-WAsP-Software-Poster.pdf)
- [41] **Güzel, S.** (2014). *Rüzgar enerjisi potansiyel hesaplanmasında kullanılan bilgisayar programlarının karşılaştırılması*(Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [42] **Dhunny, A.Z., Lollchund, M.R., Rughooputh, S.D.D.V.**, (2017). Wind energy evaluation for a highly complex terrain using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Renewable Energy*, 101, 1-9,. doi:10.1016/j.renene.2016.08.032.
- [43] **Hwang, Y., Paek, I., Yoon, K., Lee, W., Yoo, N., Nam, Y.**, (2010). Application of wind data from automated weather stations to wind resources estimation in Korea. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24 (10), 2017-2023,. doi:10.1007/s12206-010-0613-z.
- [44] **Kalmikov, A., Dupont, G., Dykes, K., Chan, C.** (2010). Wind Power Resource Assessment in Complex Urban Environments: MIT Campus Case-Study Using CFD Analysis, *AWEA 2010 Windpower Conference*, (ss.1-28). Dallas: Mayıs 23-26.
- [45] **Özede, S.** (2013). *Wind resource assessment and wind farm modeling in complex terrain: Bodrum Peninsula case study using computational fluid dynamics*(Yüksek lisans tezi). Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [46] **Ucar, A., Balo, F.**, (2009). Investigation of wind characteristics and assessment of wind-generation potentiality in Uludağ-Bursa, Turkey. *Applied Energy*, 86 (3), 333-339,. doi:10.1016/j.apenergy.2008.05.001.
- [47] **Jain, P.** (2011). *Wind energy engineering*. New York: McGraw-Hill.
- [48] **Manwell, J.F., MCGowan, J.G., Rogers, A.L.** (2009). *Wind energy explained: theory, design and application*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- [49] Hiester, T.R., Pennell, W.T. The meteorological aspects of siting large wind turbines. Pacific Northwest Laboratories Report PNL-2522, NTIS, 1981.
- [50] **Katinas, V., Marciukaitis, M., Gecevicius, G., Markevicius, A.**, (2017). Statistical analysis of wind characteristics based on Weibull methods for estimation of power generation in Lithuania. *Renewable Energy*, 113, 190-201,. doi:10.1016/j.renene.2017.05.071.
- [51] **Seguro, J.V.&Lambert, T.V.** (2000). Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85, 75-84.
- [52] **Pessanha, J.F.M., Oliveira, F.L.C., Souza, R.C.** (2017). Teaching statistical methods in engineering courses through wind power data, *Revista de Ensino de Engenharia*, 34 (1), 85-92.

- [53] **Justus, C.G.** (1978). *Winds and wind system performance*. Philadelphia: Franklin Institute Press.
- [54] **Lysen, E.H.** (1983). *Introduction to wind energy*. Amersfoort, The Netherlands: Consultancy Services Wind Energy Developing Countries.
- [55] **Bursa.(t.y.)**. Erişim: 7 Ocak 2018, <http://www.bursa.com.tr/bursanin-cografyasi-iklimi-ve-nufusu>
- [56] **YEGM.(t.y.)**. Erişim: 7 Ocak 2018, <http://www.yegm.gov.tr/YEKrepa/BURSA-REPA.pdf>
- [57] **Bursa Elektrik Santralleri.(t.y.)**. Erişim: 7 Ocak 2018, <http://www.enerjiatlası.com/sehir/bursa/>
- [58] **Cattin, R., Schaffner, B., Kunz, S.**, Validation of CFD Wind Resource Modeling in Highly Complex Terrain, *European Wind Energy Conference and Exhibition*, Atina, 2006.
- [59] **Simirisoglu, N., Breton, S.P., Crasto, G., Hansen, K.S., Ivanell, S.**, (2014). Numerical CFD comparison of Lillgrund employing RANS. *Energy Procedia*, 53, 342-351,. doi:10.1016/j.egypro.2014.07.242.
- [60] **Ferry, M.** (2002). New Features of MIGAL Solver, *9th PHOENICS User Conference*, (ss. 1-23). Moscow: Eylül.
- [61] **Tian, W., Ozbay, O., Hu, H.**, (2018). An experimental investigation on the wake interferences among wind turbines sited in aligned and staggered wind farms. *Wind Energy*, 21, 100-114,. doi:10.1002/we.2147.
- [62] **Kurban, M.&Kantar, Y.M.&Hocaoğlu, F.O.** (2005). Weibull dağılımları kullanarak rüzgar hız ve güç yoğunluklarının istatistiksel analizi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 205-218.
- [63] **Akpınar, E.K., Akpınar, S.**, (2005). An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics. *Energy Conversion and Management*, 46, 1848-1867,. doi: 10.1016/j.enconman.2004.08.012.
- [64] **Çetin, N.S., Başaran, K.**, (2011). Rüzgar Türbinlerinde Kapasite Faktörü ve Türbin Sınıfı İlişkisi, *6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, (ss.131-136). Elazığ: Mayıs 16-18.