

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜRKİYE'DE KURULABİLECEK DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR SANTRALLERİNİN
TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ**

AHMET MERT ÖZDİLİM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ZEHRA YUMURTACI**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE'DE KURULABİLECEK DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR SANTRALLERİNİN
TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ**

Ahmet Mert Özdilim tarafından hazırlanan tez çalışması 26.05.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Zehra Yumurtacı
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Zehra Yumurtacı
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Şükrü Bekdemir
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Levent Kavurmacioğlu
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Son yıllarda artan enerji ihtiyacı ve fosil yakıtların olumsuz etkileri nedeniyle tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme söz konusudur. Rüzgar enerjisi de bu kaynaklar arasında en popüler olanıdır. Gelişen teknoloji ve vadettiği enerji potansiyeliyle rüzgar enerjisinin bir kolu olan deniz üstü rüzgar santralleri, son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Dünyada hızla yayılan bu enerji türünün henüz Türkiye'de bir örneği bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında deniz üstü rüzgar santrali kurulumu için ülkemizdeki en uygun bölgeler incelenip teknik ve ekonomik analizi yapılacaktır.

Tez çalışmamı hazırlarken bana her türlü yardımını sunan sayın hocam Doç. Dr. Zehra YUMURTACI'ya ve yüksek lisans eğitimim boyunca benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 2017

Ahmet Mert ÖZDİLİM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	1
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
ENERJİ	3
2.1 Dünyada Güncel Enerji Durumu	4
2.2 Türkiye'de Güncel Enerji Durumu	6
BÖLÜM 3	
RÜZGAR ENERJİSİ	8
3.1 Rüzgar Enerjisinin Oluşumu	8
3.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi.....	10
3.3 Rüzgar Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Güncel Durumu	12
3.4 Rüzgar Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları	15
3.5 Rüzgar Türbin Temel Bileşenleri.....	16
3.6 Temel Rüzgar Denklemleri	18
3.6.1 Betz Kanunu	19
3.6.2 Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu ve Rayleigh Dağılımı	21

BÖLÜM 4

DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR ENERJİSİ.....	24
4.1 Deniz Üstü Rüzgar Santrali Temel Faktörleri.....	26
4.1.1 Rüzgar Profili	26
4.1.2 Deniz Derinliği ve Temel Seçimi	26
4.1.2.1 Yerçekimi Merkezli (Gravity) Temel	26
4.1.2.2 Tek Kazık (Monopile) Temel	27
4.1.2.3 Üç Ayak (Tripod) Temel	28
4.1.2.4 Ceket (Jacket) Temel	28
4.1.2.5 Yüzer (Floating) Temel	29
4.1.3 Kıta Sahanlığı	29
4.1.4 Deniz Trafiği.....	30
4.1.5 Askeri Alanlar.....	30
4.1.6 Sosyal ve Çevresel Faktörler	30
4.1.7 Maliyet Faktörü	31

BÖLÜM 5

TÜRKİYE'DE DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR POTANSİYELİ ANALİZİ.....	32
5.1 Metodoloji	32
5.2 Deniz Üstü Rüzgar Santrali Kurulabilecek Bölgelerin Belirlenmesi	35
5.3 Bozcaada Deniz Üstü Rüzgar Santrali Analizi	42
5.3.1 Rüzgar Gücü Hesabı, Türbin Seçimi ve Yerleşimi	43
5.3.2 Ekonomik Analiz	46
5.3.2.1 Yıllık Sermaye Masrafları.....	47
5.3.2.2 Yıllık İşletme ve Bakım (O&M) Masrafları	50
5.3.2.3 Birim Enerji Maliyet.....	52
5.3.2.4 Yerli İmalat Teşviki ve Karbon Emisyon Geliri	52
5.3.2.5 Birim Enerji Geliri, Net Kazanç ve Geri Ödeme Süresi	53
5.3.2.6 Eskalasyon, Faiz ve Kurulu Gücün Ekonomik Analize Etkisi	54

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	622

SİMGE LİSTESİ

A	Süpürme Alanı
c	Skala Faktörü
C_k	Yıllık Sermaye Masrafı
C_m	Yıllık İşletme ve Bakım Masrafı
C_p	Güç Faktörü
C_s	Birim Tesis Bedeli
D	Kanat Çapı
E_k	Kinetik Enerji
E	Üretilen Yıllık Enerji
e	Eskalasyon Oranı
g	Birim Elektrik Maliyeti
g_c	kWh Başına Karbon Geliri
g_k	kWh Başına Sermaye Masrafı
g_m	kWh Başına İşletme ve Bakım Masrafı
g_y	kWh Başına Yerli İmalat Geliri
g_T	kWh Başına Enerji Geliri
I_d	İlk Yatırım Tutarı
i	Faiz Oranı
k	Şekil faktörü
N_e	Kurulu Güç
n	Santral Ömrü
r	İskonto Oranı
t	Yıl
V	Rüzgar Hızı
V_{ref}	Referans Yükseklikteki Hız
V_h	İstasyon Yüksekliğindeki Hız
V_i	Kanat Giriş Hızı
V_0	Kanat Çıkış Hızı
V_k	Ortalama Hız
P_k	Rotordan Elde Edilen Güç
$\dot{m}$	Kütleli Debi
μ	Yüzey Pürüzlülük Katsayısı
ρ	Hava Yoğunluğu

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CO ₂	Karbon Dioksit
dB	Desibel
Eİİ	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EWEA	European Wind Energy Association
GW	Gigawatt
GWEC	Global Wind Energy Council
GWh	Gigawatt Saat
G.Ö.S.	Geri Ödeme Süresi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
km	Kilometre
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt Saat
LPG	Liquefied Petroleum Gas
M.Ö.	Milattan Önce
M.S.	Milattan Sonra
MW	Megawatt
MWh	Megawatt Saat
NO ₂	Azot Dioksit
OWC	Observed Wind Climate
REPA	Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
TWh	Terawatt Saat
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
\$	Dolar
€	Euro

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması	4
Şekil 2.2 Dünyada 2015 Yılı Birincil Enerji Tüketimi Dağılımı	5
Şekil 2.3 Dünyada 2015 Yılı Elektrik Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı	5
Şekil 2.4 Türkiye'de 2016 Yılı Elektrik Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı	6
Şekil 3.1 Basit Rüzgar Çevrimi	9
Şekil 3.2 Coriolis Etkisi.....	9
Şekil 3.3 Persler Tarafından Kullanılan İlk Yatay Yel Değirmeni.....	11
Şekil 3.4 Brush Türbini ve Poul La Cour Türbini	11
Şekil 3.5 10 MW Gücündeki ST10 Türbini	12
Şekil 3.6 Gansu Rüzgar Santrali.....	13
Şekil 3.7 Türkiye Rüzgar Potansiyeli Atlası.....	14
Şekil 3.8 Soma Rüzgar Santrali.....	15
Şekil 3.9 Rüzgar Türbin Bileşenleri.....	16
Şekil 3.10 Bir Rüzgar Türbini Boyunca Oluşan Rüzgar Hızı.....	19
Şekil 3.11 $\lambda = v_0/v$ Oranına Göre Rotor Verimliliği.....	21
Şekil 3.12 Weibull Olasılık Dağılımı Fonksiyonu.....	22
Şekil 3.13 Skala Faktörü c'nin Rayleigh Dağılımı Üzerinde Etkisi	23
Şekil 4.1 London Array Deniz Üstü Rüzgar Santrali.....	25
Şekil 4.2 Global Deniz Üstü Rüzgar Kapasitesi	25
Şekil 4.3 Yerçekimi Merkezli Temel	27
Şekil 4.4 Tek Kazık Temel	27
Şekil 4.5 Üç Ayak Temel	28
Şekil 4.6 Ceket Temel	28
Şekil 4.7 Yüzer Temel	29
Şekil 5.1 Örnek Rüzgar Verileri.....	32
Şekil 5.2 İstasyona Ait Yükseklik ve Kordinat Bilgileri	33
Şekil 5.3 Verilerin dosyadan WAsP'a eklenmesi	33
Şekil 5.4 Verilerin Programa Tanıtılması	34
Şekil 5.5 OWC raporu	34
Şekil 5.6 Türkiye'deki Deniz Otomatik Gözlem İstasyonları.....	36
Şekil 5.7 Karadeniz Bölgesi Askeri Yasak Bölgeler	39
Şekil 5.8 Akdeniz Bölgesi Askeri Yasak Bölgeler.....	39
Şekil 5.9 Ege Bölgesi Askeri Yasak Bölgeler.....	39

Şekil 5.10	Karadeniz Bölgesi Eğitim-Atış Sahaları	40
Şekil 5.11	Akdeniz Bölgesi Eğitim-Atış Sahaları.....	40
Şekil 5.12	Ege Bölgesi Eğitim ve Atış Sahaları	40
Şekil 5.13	Ege Denizi Kıta Sahaneliği Haritası	41
Şekil 5.14	Bozcaada WASP Analizi.....	43
Şekil 5.15	Bozcaada'da Türbin Yerleşimi Yapılacak Alan	45
Şekil 5.16	Bozcaada Türbin Yerleşimi	45
Şekil 5.17	Eskalasyon Oranının Yatırım Maliyeti ve Birim Enerji ile Değişimi.....	55
Şekil 5.18	Eskalasyon Oranının Geri Ödeme Süresi ile Değişimi.....	55
Şekil 5.19	Faiz Oranının Yatırım Maliyeti ve Birim Enerji ile Değişimi	56
Şekil 5.20	Faiz Oranının Geri Ödeme Süresi ile Değişimi	56
Şekil 5.21	Kurulu Gücün Birim Enerji ve Geri Ödeme Süresi ile Değişimi.....	57

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Kurulu Güç Kapasitesi En Yüksek 10 Ülke	13
Çizelge 5.1 İstasyonlara Ait Rüzgar Hız ve Güç Yoğunluğu Sonuçları	36
Çizelge 5.2 Rüzgar Potansiyeli Yüksek Olan Bölgeler	38
Çizelge 5.3 Deniz Üstü Rüzgar Enerji Santralleri İçin Uygun Bölgeler	42
Çizelge 5.3 SWT-3.3 Türbin Özellikleri	44
Çizelge 5.4 Birim Maliyet Hesabında Kullanılan Bazı Değerler	47
Çizelge 5.5 Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi Yatırım Maliyeti Dağılımı	47
Çizelge 5.6 İnşaat Süresince Eskalasyon Hesabı	48
Çizelge 5.7 İnşaat Süresince Faiz Hesabı	48
Çizelge 5.8 Bir Değere Getirilmiş Maliyetler Yöntemi ile Sermaye Maliyeti Hesabı.....	49
Çizelge 5.9 Bir Değere Getirilmiş Maliyetler Yöntemi ile O&M Maliyeti Hesabı	51
Çizelge 5.10 Yerli İmalat Teşvikleri.....	52
Çizelge 5.11 Kaynaklara Göre Elektrik Birim Enerjisi Alım Garantisi	53

**TÜRKİYE'DE KURULABİLECEK DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR SANTRALLERİNİN
TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ**

Ahmet Mert ÖZDİLİM

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Zehra YUMURTACI

Bu çalışmada, deniz üstü rüzgar enerjisinin dünyadaki güncel durumundan bahsedilmiş ve rüzgar enerjisinin temel etkenleri incelenmiştir. Günümüzde Türkiye'de deniz üstü rüzgar santrali bulunmamaktadır. Bundan dolayı, bir santral kurulurken izlenilebilecek adımlar bu çalışmada detaylıca incelenmiştir. WASP'ta (Wind Atlas Analysis and Application Program) analiz edilmek üzere Türkiye'nin 43 farklı noktasında bulunan deniz otomatik gözlem istasyonlarına ait son 1 yıldaki saatlik ortalama hız ve yön değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Deniz üstü rüzgar enerjisi potansiyeli en yüksek bölgeler WASP'ta yapılan analizler sonucunda belirtilmiştir. 43 bölgeden geriye kalan bu 11 bölge kıta sahanlığı, deniz trafiği, eğitim atış sahası ve askeri yasak bölge açısından da değerlendirildikten sonra, Bozcaada santral kurulumu için en uygun alan olarak belirlenmiştir. 9.7 m/s gibi yüksek bir yıllık ortalama rüzgar hızına sahip olan Bozcaada'ya analizler sonucunda 300.3 MW kurulu

güce sahip bir deniz üstü rüzgar santralinin kurulabileceği hesaplanmıştır. Daha sonra yapılan ekonomik analizde santral yatırımı, işletme ve bakım masrafları hesaplanmış ve santralin birim enerji maliyeti 8.56 \$cent/kWh olarak bulunmuştur. Devlet tarafından verilen teşvikler eklendiğinde deniz üstü rüzgar santralinden elde edilebilecek birim enerji geliri 15.34 \$cent/kWh ve santralin geri ödeme süresi ise 9.9 yıl olarak hesaplanmıştır. Böylece, Bozcaada'nın hem teknik hem de ekonomik olarak rüzgar santrali kurulumu için uygun bir bölge olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, deniz üstü rüzgar santrali, WAsP

**TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF POTENTIAL
OFFSHORE WIND FARMS IN TURKEY**

Ahmet Mert ÖZDİLİM

Department of Mechanical Engineering
MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Zehra YUMURTACI

In this study, be mentioned about current situation of offshore wind energy in the world and essential factors associated with offshore wind energy have been examined. At the present time, there is no installed offshore wind farm in Turkey. Therefore, potential following steps have been examined in detail during under construction of a new offshore wind farm. In order to analysing of 43 different meteorological station in WAsP (Wind Atlas and Application Program), hourly mean wind velocity and direction which are belong to last year, have been provided from General Directorate of Meteorology. The best potential regions have been indicated according to WAsP analyses. After, these 11 remaining areas had been evaluated in terms of continental shelf, seaway, military forbidden zone and fire sector, Bozcaada was found best area for potential offshore wind farm. Result of analysis, offshore wind farm which would have 300.3 MW installed capacity, can be established in Bozcaada where has 9.7 m/s annual average wind velocity. Afterwards, investment and O&M cost of wind farm

have been calculated and unit electricity cost has been found as 8.56 \$cent/kWh. Considering government subsidies, unit income would be reached 15.34 \$cent/kWh and payback period have been calculated as 9.9 years. In the lights of both technical and economic analyses, Bozcaada has convenient conditions for potential offshore wind farm.

Keywords: Energy, offshore wind farm, WAsP

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde deniz üstü rüzgar santrali araştırmalarının büyük çoğunluğu yabancı kaynaklıdır. Özellikle Danimarka, İngiltere ve ABD'nin yaptığı çalışmalar deniz üstü rüzgar enerjisinden yararlanma konusunda tüm dünyaya ışık tutmaktadır. Yayınlanan analizler ve raporla ile bu teknoloji hakkında bilgi birikiminin artması ve fizibilite çalışmalarının çoğalması amaçlanmaktadır. Türkçe literatürde ise deniz üstü rüzgar santralleri hakkında fazla kaynak olmamasına rağmen birkaç makale ve yüksek lisans tezi bulunmaktadır.

Deniz üstü rüzgar santrallerinin teknik analizlerinde, genel olarak kara üstü santrallere göre rüzgar rejiminin sabit ve hızının yüksek olması üzerinde durulmuştur. Bu analizlerde rüzgar enerjisi ile ilgili her yayında kolaylıkla bulunabilen genel rüzgar denklemleri kullanılmıştır. Ayrıca santral kurulabilecek bölge kısıtlamaları, deniz derinliği, türbin temel yapısı, sosyal ve çevresel faktörler hakkında da araştırmalar mevcuttur. Ekonomik olarak deniz üstü rüzgar santrallerinin ilk yatırım, işletme ve bakım masraflarının incelenmesi ve bunların elektriğin kWh maliyeti başına yaptığı etki birçok araştırmaya konu olmuştur.

1.2 Tezin Amacı

Türkiye, enerjide dışa bağımlılığı azaltmak için son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru yönelmektedir. Özellikle güneş, rüzgar ve jeotermal enerji üzerine büyük yatırımlar mevcuttur. Bu kaynaklar arasından ülkemizde potansiyeli en yüksek

olan rüzgar enerjisidir. Günümüzde Türkiye'deki rüzgar enerjisi ile ilgili araştırmaların hemen hemen hepsi karasal rüzgar santralleri hakkındadır. Üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemizin deniz üstü rüzgar enerjisi bakımından umut verici bir potansiyele sahip olduğu varsayılsa da bu konuda detaylı çalışmalar bulunmamaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de kurulabilecek bir deniz üstü rüzgar santralının teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Yenilenebilir enerjinin tüm dünyada yaygınlaşmasıyla birlikte rüzgar enerjisinden elektrik üretimi odak noktası haline gelmiştir. Deniz üstü rüzgarlarının daha güçlü olması ve karasal rüzgar santrallerinin bazı dezavantajlarından dolayı 1990'lü yılların başından itibaren deniz üstü rüzgar santralleri kurulmaya başlanmıştır. Günümüzde ise birçok kıyı devleti bu enerji türünü temel enerji politikası haline getirmektedir. Teknik açıdan birçok avantaja sahip olan deniz üstü rüzgar santrallerinin en büyük dezavantajı ise yüksek maliyetleridir. Fakat gelişen teknoloji ile bu maliyetlerin azalması ve yakın gelecekte deniz üstü rüzgar enerjisinin yaygınlaşması mümkündür.

Yenilenebilir enerjinin Türkiye elektrik üretimindeki payının, 2023 yılında %30 olması hedeflenmektedir. Buna paralel olarak 2023 yılında rüzgar enerjisi kurulu gücünün 20 bin MW değerine ulaşması da bir başka önemli hedeftir. Ülkemizin kıyı bölgelerinin rüzgar potansiyelinden yararlanmak için deniz üstü rüzgar santral yatırımlarına başlanırsa bu hedeflenen değerlere daha rahat ulaşmak mümkündür. Ayrıca bu yatırımlar Türkiye'nin yenilenebilir enerji piyasasında önemli bir rol almasını sağlayabilir.

BÖLÜM 2

ENERJİ

Enerji bir gereksinimdir. Dünyadaki hayat, evrendeki enerji sayesinde meydana gelmiştir. Tarih boyunca uygarlıklar hayatta kalabilmek ve diğer uygarlıklar ile rekabet edebilmek için uygun enerji kaynaklarını aramış; doğada kolayca bulunabilen maddelerin yakılması ile başlayan enerji üretimi zamanla fosil yakıtlar ile devam etmiştir. Üretim, taşıma ve iletişim için en önemli kaynağın artık enerji olduğu dünyamızda ülkelerin enerji temini sağlamak için giriştikleri mücadeleler, geçtiğimiz yüzyılın en önemli gelişmelerine sebep olmuştur.

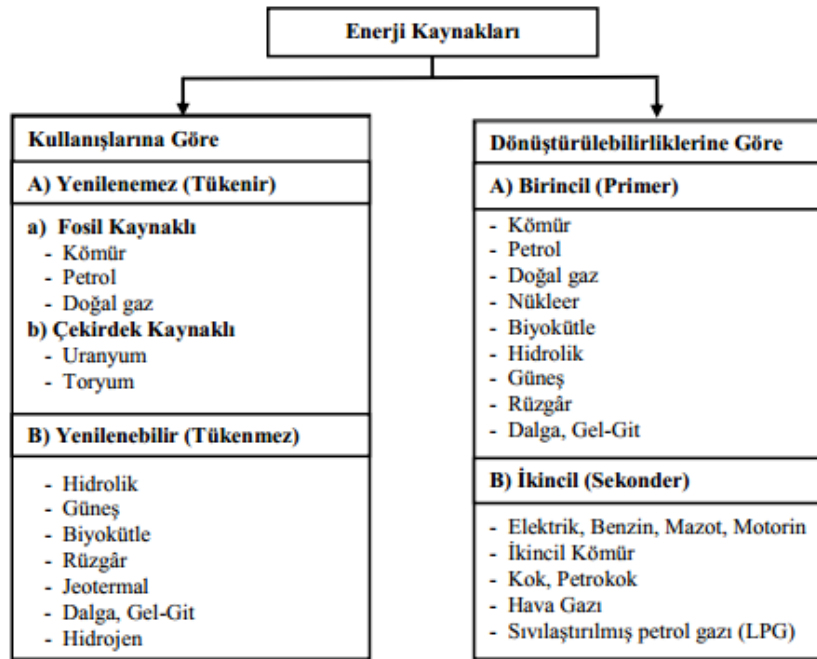
Enerji, teknik açıdan ise iş yapabilme yeteneği veya değişiklik meydana getirme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Termodinamiğin 1. Kanunu'ndan da bilindiği üzere enerji yoktan var edilemez, var olan enerji de yok edilemez. Enerjiyle iş yapabilme, ancak enerjinin bir formdan başka bir forma geçmesiyle mümkündür. Yani enerji üretiminden bahsedildiğinde aslında enerji dönüşümü kastedilmektedir [1].

Günümüzdeki hızlı nüfus artışı, teknolojik gelişmeler ve sanayileşme, enerji tüketiminin hızla artmasına ve dolayısıyla enerji talebinin de artmasına neden olmaktadır. Enerji, üretim sektörü için önemli bir etmen olduğundan bir devletin sosyal ve ekonomik kalkınma potansiyelinin de bir göstergesi olduğu söylenebilir.

Yaşamımızın her alanında olan enerji; kimyasal, termal, mekanik, hidrolik, güneş, rüzgar, nükleer, jeotermal ve elektrik enerjisi gibi değişik şekillerde bulunabilmekte ve uygun yollarla birbirine dönüştürülebilmektedir. Ekonomik açıdan farklı yöntemlerle enerji sağlanan kaynaklar, değişik sınıflandırma şekillerine sahiptir [2]. Kullanıma göre enerji kaynakları ikiye ayrılır. Bunlar; yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarıdır. Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi dönüştürülebilirliklerine göre enerji kaynakları da birincil

enerji kaynakları ve ikincil enerji kaynakları olmak üzere yine ikiye ayrılmıştır. Yenilenemez enerji kaynakları kullandıkça rezervleri tükenen ve oluşumu çok uzun seneler alan kaynaklardır. Bunlara örnek fosil yakıtlar ve radyoaktif elementlerdir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise; doğal kaynaklardan elde edilen, uzak bir gelecekte bile tükenme riski olmayan ve kendini yenileyebilen enerji kaynaklarıdır. Bunlara örnek olarak güneş, rüzgar, jeotermal ve dalga enerjisi verilebilir.

Enerjinin değişime uğramamış haline birincil enerji denir. Birincil enerji kaynakları; petrol, kömür, doğal gaz, nükleer, hidrolik, biokütle, dalga-gelgit, güneş ve rüzgardır. Birincil enerjinin dönüştürülmesi sonucu elde edilen enerji de ikincil enerji şeklinde tanımlanmaktadır. Elektrik, benzin, mazot, motorin, hava gazı, LPG bu tip enerji kaynaklarındandır [2].

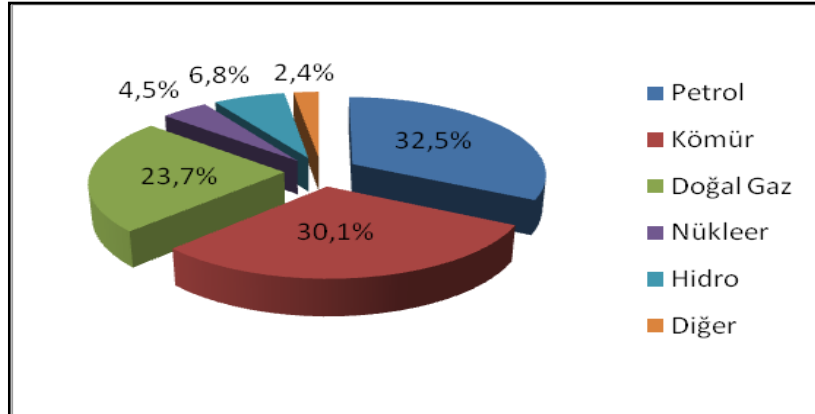


Şekil 2.1 Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması [2]

2.1 Dünyada Güncel Enerji Durumu

Birincil enerji kaynakları, dünyada kullanılan enerjinin büyük kısmını kapsamaktadır. 2015 yılı sonuçlarına göre dünyada birincil enerji kullanımı 12.928 Milyar TEP (milyar ton eşdeğer petrol) değerindedir. Şekil 2.2'de birincil enerji kullanımında en yüksek paya sahip enerji kaynakları verilmiştir. Bunlar sırasıyla; petrol (%32.5), kömür (%30.1),

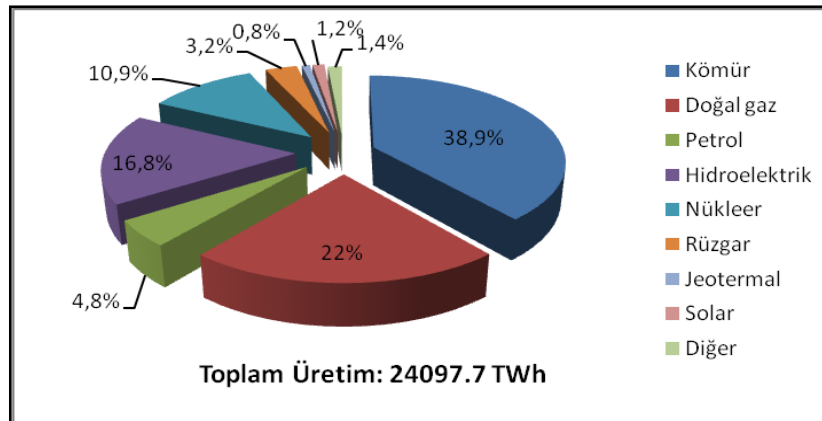
doğal gaz (%23.7) olduğu görülmektedir. Burada diğer enerji kaynakları olarak bahsedilen; güneş, rüzgar, biyoyakıt ve jeotermal gibi enerji kaynaklarıdır [3].



Şekil 2.2 Dünyada 2015 Yılı Birincil Enerji Tüketimi Dağılımı

British Petrol'ün 2015 yılı için yayınladığı rapora göre dünyada birincil enerji tüketimi en fazla olan ülkeler; Çin (3.1 Milyar TEP), ABD (2.2 Milyar TEP), Hindistan (882 Milyon Tep) ve Rusya (718 Milyon TEP)'dir.

Şekil 2.3'te dünyada 2015 yılı elektrik enerjisi üretiminde kullanılan birincil enerji kaynaklarının dağılımı verilmiştir. Aynı birincil enerjiden elektrik enerjisi üretim miktarı 24097.7 TWh olarak gerçekleşmiştir. Elektrik enerjisi üretiminde en büyük paya sahip olan birincil enerji kaynakları sırasıyla; kömür (%38.9), doğal gaz (%22), hidrolik (%16.8), nükleer (%10.9) ve diğer (%6.6) olarak dağılmıştır [3].



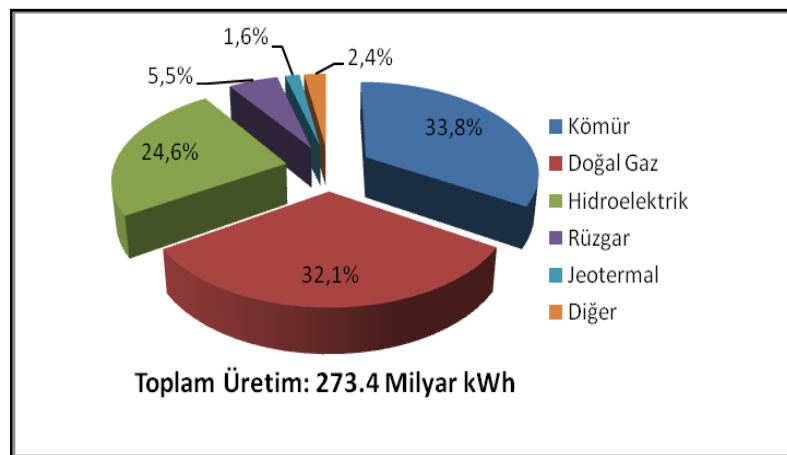
Şekil 2.3 Dünyada 2015 Yılı Elektrik Üretim Kaynaklarına Göre Dağılımı

Dünyada en fazla elektrik üretimi yapan ülkelere baktığımızda ise 2015 yılı verilerine göre 5682 TWh ile Çin birinci sıradadır. 4324 TWh ile ABD ikinci, Hindistan 1368 TWh ile üçüncü, Rusya da 1062 TWh ile dördüncü sıradadır [3].

Şekil 2.3'ten de anlaşılacağı gibi dünyada elektrik üretiminin büyük bir kısmı fosil yakıtlar ile sağlanmaktadır. Bu enerji kaynaklarının doğada sınırlı kapasitede olduğunu ve yakın bir gelecekte tükenecek olduğunu düşündüğümüzde enerji konjonktürünün yenilenebilir enerjiye doğru kayması elbette beklenen bir durumdur. Gelişmiş ülkeler yenilenebilir enerji konusunda ciddi yatırımlar yapmaktadır. Örneğin; Avrupa Birliği Komisyonu da 2013 yılında yayınladığı 2020 Yılı Enerji Hedefleri'ne göre üye ülkelerin 2020 yılına kadar elektrik üretiminin %20'lik kısmını hidroelektrik harici yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi hedefini koymuştur.

2.2 Türkiye'de Güncel Enerji Durumu

Ülkemizde 2016 yılı elektrik üretimi 273.4 Milyar kWh olup kaynaklara göre dağılımı Şekil 2.4'te verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı gibi Türkiye, elektrik üretiminin %65'ten fazla kısmını sadece doğal gaz ve kömürden sağlamaktadır. Bu iki enerji kaynağı da Türkiye'de yok denecek kadar az olduğundan ülkemiz, enerjide dışa bağımlı bir durum sergilemektedir. Fakat bu bağımlılık, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2019 yılı için yayınladığı hedefler doğrultusunda azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu rapora göre 2016 yılı itibarıyla yaklaşık %7,8 pay sahibi olan rüzgar, güneş, biyokütle ve jeotermal enerjinin 2019 yılında %15 seviyesine çekilmesi hedeflenmektedir.



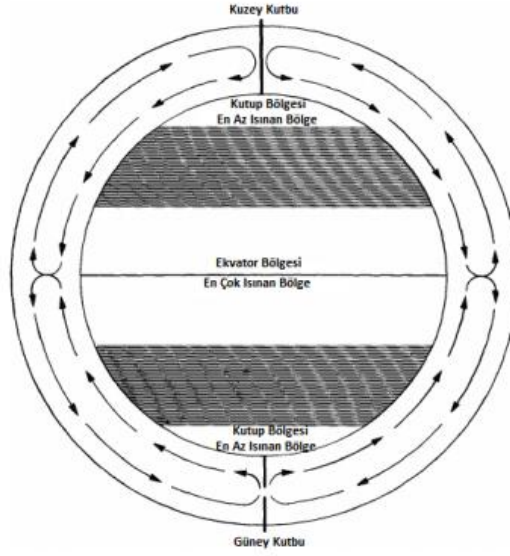
Şekil 2.4 Türkiye'de 2016 Yılı Elektrik Üretim Kaynaklarına Göre Dağılımı

Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji arzı içindeki payının arttırılmasına yönelik olarak 6094 sayılı kanun kapsamında ise, hidroelektrik üretim tesisi ile karasal rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi için 7.3 \$cent/kWh, jeotermal enerji tesisi için 10.5 \$cent/kWh, biyokütleyle dayalı üretim tesisi ile güneş enerjisine üretim tesisi için 13.3 \$cent/kWh fiyat desteği sağlanmıştır. Ayrıca yenilenebilir enerji santrali kurulumunda mekanik veya elektro-mekanik aksamın Türkiye'de üretilmiş olması durumunda yerli imalat teşviki verilmekte ve 10 yıl süre ile elektrik satışında sabit fiyat garantisi sağlanmaktadır. Bu doğrultuda enerji şirketleri yenilenebilir enerji santral yatırımlarını gittikçe hızlandırmaktadır. %98.5'i ithal edilen doğal gazın yerine, kaynak çeşitliliği sağlanarak yerli kaynak kullanımının arttırılması, dışa bağımlılığın azaltılması enerji sektörü açısından büyük önem arz etmektedir.

3.1 Rüzgar Enerjisinin Oluşumu

Rüzgar basit olarak, hava akımının yüksek basınç bölgesi ile alçak basınç bölgesi arasındaki yer değiştirmesidir. Kainatın ve tüm enerji kaynaklarının temeli olan güneş, rüzgarın da oluşumunu sağlamaktadır. Güneş, dünyanın geoid yapısı ve elips şeklindeki yörüngesi sebebiyle her bölgeyi aynı oranda ısıtamamaktadır. Bunun sonucundan bölgeler arasında basınç ve sıcaklık farkları oluşur dolayısıyla rüzgar oluşumuna zemin hazırlar.

Yeryüzündeki temel rüzgar hareketini açıklamak gerekirse; ekvator ve çevresindeki bölgeler daha çok ısınırken, kutuplar daha az ısınmaktadır. Ekvatordaki ısınan ve hafif olan hava atmosferin üst katmanlarına yükselir, kutuplara doğru ilerler ve alçalır. Dünyanın kendi eksenini etrafındaki dönüşünden de etkilenen hava, sonuç olarak global bir sirkülasyon oluşturur [4]. Basit rüzgar çevrimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

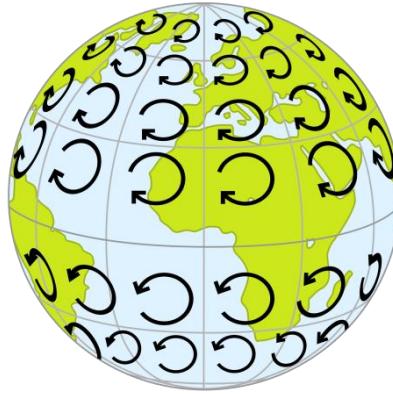


Şekil 3.1 Basit Rüzgar Çevrimi

Rüzgar hareketini etkileyen üç ana etken vardır. Bunlar;

Basınç Etkisi: Güneşin yerküreyi aynı oranda ısıtmamasından kaynaklanır. Bazı bölgeler daha az ısındığından basınç farkı meydana gelir. Bölgeler arasındaki mesafe başına düşen bu basınç farkına basınç gradyanı denir ve basınç gradyanı ne kadar büyük olursa rüzgara etkileyen kuvvet o derece fazla olur. Dolayısıyla rüzgar hızı doğru orantılı olarak yükselir [5].

Coriolis Etkisi: Yerkürenin kendi eksenini etrafındaki hareketinden kaynaklanır. Normal şartlar altında hava molekülleri düz bir şekilde hareket edecektir fakat Coriolis Etkisi sayesinde bu hava molekülleri bir sapmaya uğrar. Rüzgar, kuzey yarımkürede saat yönünde, güney yarımkürede ise saatin tersi yönünde sapma gösterir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Coriolis Etkisi

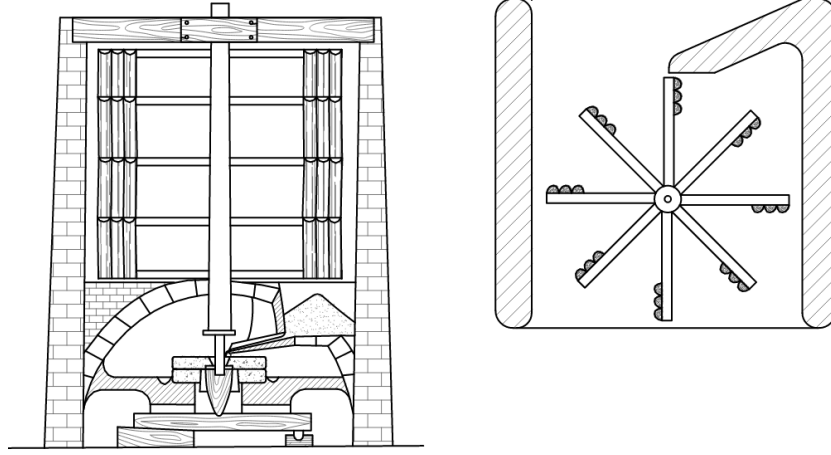
Sürtünme Etkisi: Bu etki yeryüzünün hareket eden havaya karşı gösterdiği sürtünme direncinden doğmaktadır ve hava akışını yavaşlatıp yönünü de etkileyebilmektedir. Ayrıca türbülanslı rüzgar akışına da bu etki sebep olmaktadır. Yerden yükseldikçe sürtünme etkisi azalmaktadır ve bu etki atmosfer sınır çizgisine kadar gitmektedir [6].

Bu ana etmenlerin yanı sıra gece-gündüz farkı, topografik sebepler, bölge nemlilik oranı gibi etmenler de rüzgar oluşumunu şekillendirmektedir. Özetle, ana etmenler küresel rüzgarları, diğer etmenler ise yerel rüzgarları meydana getirir. Küresel rüzgarlar; dönenceler civarından Ekvator'a doğru, kuzey yarım kürede kuzeydoğudan güney yarım kürede güneydoğudan esen alize rüzgarları, kutuplardan 60° enlemlerine doğru esen kutup rüzgarları ve 30° enlemleri ile 60° enlemleri arasında esen batı rüzgarlarını kapsamaktadır. Mevsimsel ya da günlük oluşabilen meltemler, fön rüzgarları, musonlar ve tropikal rüzgarlar ise yerel rüzgarlara örneklerdir.

3.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

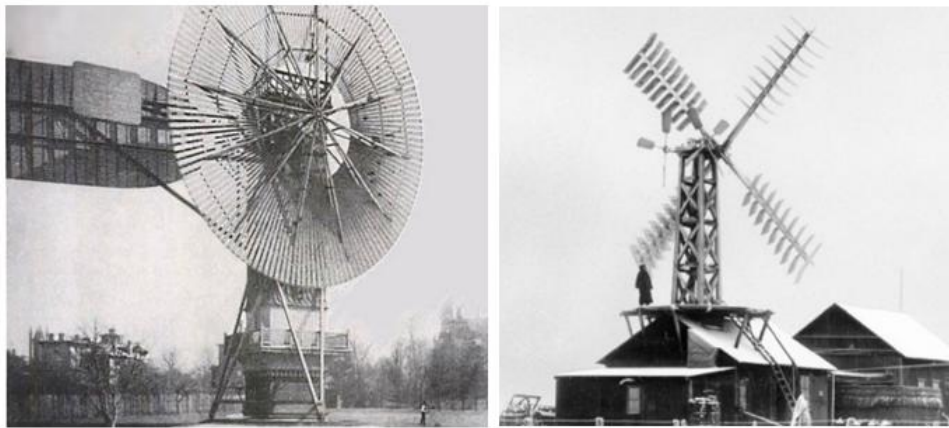
Rüzgar, insanlar tarafından iş yapabilmek için kullanılan ilk doğal kuvvetlerden biridir. Başlangıç olarak tahıl öğütmek için rüzgar enerjisinden yararlanılıp yel değirmenleri tasarlanmıştır. Daha sonra insanlar tarımsal bölgeyi genişletmek için rüzgar enerjisini sulama amacıyla kullanmıştır.

Mekanik güç olarak ilk kez kullanılan rüzgarın tahmini geçmişi M.Ö. 17. Yüzyıla dayanmaktadır. Bu dönemlerde Babil İmparatoru Hammurabi'nin rüzgar gücünü sulama amacıyla kullandığına dair kanıtlar mevcuttur. Resmi tarih kayıtlarındaki en eski yel değirmeni ise M.S. 7. Yüzyılda Persler tarafından kullanılmıştır. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi bu değirmen yatay eksenli olup ilkel bir tasarıma sahipti ve tahıl öğütmek için kullanılmıştı [7].



Şekil 3.3 Persler Tarafından Kullanılan İlk Yatay Yel Değirmeni

Rüzgar türbini ile elektrik üretimini ilk kez 1888 yılında Amerikalı bilim adamı Charles Francis Brush başarmıştır (Şekil 3.4 sol). Türbin 17 metre rotor çapına ve 12 kW güce sahipti. Ayrıca bu türbin 20 sene boyunca elektrik üretti. Modern rüzgar türbinlerinin ilk örneği ise Danimarkalı bilim adamı Poul La Cour tarafından tasarlanan rüzgar türbinidir (Şekil 3.4 sağ). Bu türbin 23m rotor çapına ve 5kW kapasiteye sahipti. Poul La cour, 1891-1918 yılları arasında güçleri 10-35 kW aralığında 100'den fazla türbin tasarlamış ve rüzgar türbinlerinin bugünkü halini almasında büyük katkılar sağlamıştır. 1920 yılında ise Albert Betz isimli Alman bilim adamı, rüzgarın sahip olduğu enerjinin fiziksel olarak en fazla %59.26'sından faydalanılabileceğini kanıtladı ve daha sonra buna Betz Kanunu adı verildi [7].



Şekil 3.4 Brush Türbini ve Poul La Cour Türbini

İkinci Dünya Savaşı sonrasında Johannes Juul, 200 kW güce sahip bir türbin tasarladı. Gedser türbini adı verilen bu türbin üç kanatlı ve kanat açılarıyla hız kontrolüne sahipti.

Ayrıca indüksiyon motoru da ilk kez bu türbinde kullanıldı. Bu özellikleriyle Gedser türbini günümüzdeki türbin teknolojilerine ilham kaynağı oluşturmuştur. Rüzgar enerjisi, ilk büyük sıçrayışını 1973 yılındaki petrol krizinden sonra yaşamıştır. Petrol fiyatlarının büyük oranda yükselmesi ve fosil yakıtların rezerv problemi, ibreyi yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru döndürmüştür. 1980-1990 yılları arasında dünyada binlerce rüzgar türbini kurulmuş ve bunların şebeke bağlantıları gerçekleştirilmişti. Fakat 1990'ların başına kadar türbin güçlerinde ve verimlerinde önemli gelişmeler yaşanmamıştır [8] . Son 25 yılda ise yoğun mühendislik çalışmaları sonucunda türbin kapasiteleri 500kW'tan 8MW'a kadar çıkmıştır. Günümüzde en büyük kapasiteye sahip rüzgar türbini ise bir Norveç firması tarafından geliştirilmiş, 10 MW gücünde ve 167m rotor çapına sahiptir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 10 MW Gücündeki ST10 Türbini

3.3 Rüzgar Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Güncel Durumu

Rüzgar enerjisi, dünyada kullanımı gittikçe popülerleşen ve potansiyeli hiç de azımsanmayacak kadar yüksek, tükenmez bir enerji kaynağıdır. Dünya rüzgar enerji potansiyelini belirlemek için IEA tarafından birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, rüzgar hızı 5.1 m/s üstünde olan bölgelerin bazı teknik ve toplumsal kısıtlamalar nedeni ile %4'ünün kullanılabileceği öngörülmüştür. Buna dayanarak global teknik rüzgar potansiyeli 53000 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Rüzgar enerji potansiyeli yüksek olan kıtalar ve bölgeler sırasıyla Kuzey Amerika (14000 TWh/yıl), Doğu Avrupa ve Rusya (10600 TWh/yıl), Afrika (10600 TWh/yıl), Güney Amerika (5400 TWh/yıl), Batı Avrupa (4800 TWh/yıl), Asya (4600 TWh/yıl) ve Okyanusya (3000 TWh/yıl) şeklindedir [2].

Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü 2016 yılı itibari ile 433 GW'tır ve elektrik üretimi içerisindeki payı %3.1'dir. Çizelge 3.1'de kurulu güç bakımından ilk on ülke kapasite ve pay yüzde değerleri verilmiştir [9]. Çin, dünya kurulu gücünün %33.6lık kısmına sahiptir ve en yakın rakibi ABD'yi neredeyse ikiye katlamış şekilde liderliğini sürdürmektedir.

Çizelge 3.1 Kurulu Güç Kapasitesi En Yüksek 10 Ülke

Ülke	MW	%
Çin	145360	33.6
ABD	74470	17.2
Almanya	45000	10.4
Hindistan	25100	5.8
İspanya	23025	5.3
Birleşik Krallık	13600	3.1
Kanada	11200	2.6
Fransa	10400	2.4
İtalya	9000	2.1
Brezilya	8700	2

Dünyada 2017 yılı itibariyle en büyük kapasiteye sahip rüzgar çiftliği, Çin'de bulunan Gansu Rüzgar Santrali'dir. Şuan 8000MW kurulu güce sahip olan bu santral 2020 yılında kapasitesini 20000MW'a çıkarmayı hedeflemektedir (Şekil 3.6). Kapasite bakımından Gansu'yu, ABD'de bulunan Alta Rüzgar Merkezi (1550MW) ve Hindistan'da bulunan Muppandal Rüzgar Santrali (1500MW) izlemektedir.



Şekil 3.6 Gansu Rüzgar Santrali

Rüzgar Santrali'dir ve 240MW güce sahiptir (Şekil 3.8). Soma'yı, Geycek Rüzgar Santrali (168MW) ve Balıkesir Rüzgar Santrali (143MW) takip etmektedir.



Şekil 3.8 Soma Rüzgar Santrali

3.4 Rüzgar Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları;

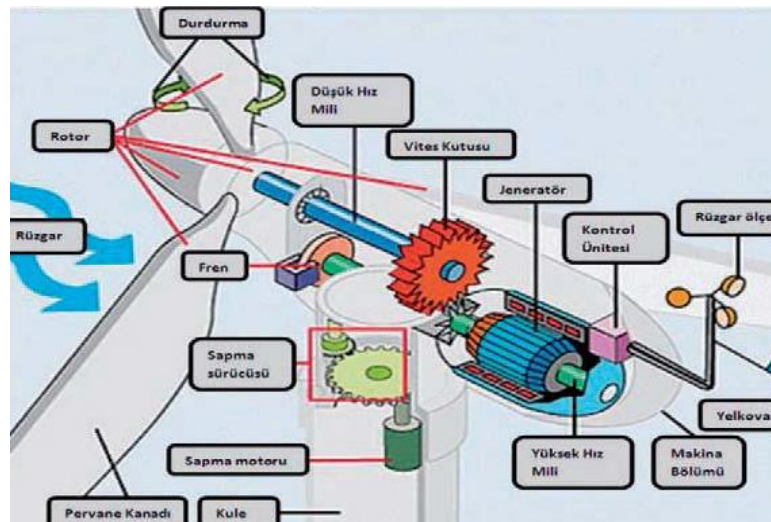
- Tükenmez: Temel kaynağı güneş olduğu için yeryüzünde hayat devam ettiği sürece rüzgar varlığı da sürecektir. Fosil yakıtlar gibi rezervi sınırlı değildir.
- Çevre Kirliliğine Neden Olmaz: Atmosfere CO₂ ve NO₂ gibi gazlar salmaz, temiz bir enerji kaynağıdır.
- Ham Madde Masrafı Yoktur: Doğalgaz, kömür, petrol gibi hammadde tüketimi olmadığından hiçbir zaman hammadde masrafı ödenmez.
- Kurulum Süresi ve Maliyeti: Hidrolik, nükleer ve termik santraller ile karşılaştırıldığında hem daha çabuk kurulup devreye alınabilir hem de daha az maliyetle kurulur.
- Geri Dönüşüm Süresi Azdır: Rüzgar türbinlerinin kurulumu sırasında harcanan enerji 3 ay gibi kısa bir sürede üretilebilir.
- Dışa Bağımlılık Azdır: Sadece bir defaya mahsus türbin ithali yönünden dışa bağımlılık vardır. Hammadde masrafı olmadığından termik ve nükleer santraller gibi hammadde ithali gerçekleşmez.

Dezavantajları;

- Sürekli Olmaması: Rüzgarın hiç esmediği, az estiği veya çok şiddetli estiği zamanlarda türbinler kapalı olduğundan enerji üretimi olmaz. Bu yüzden rüzgar enerjisi diğer enerji kaynaklarına oranla üretim tahmin edilebilirliği yüksek değildir.
- Gürültü: Aerodinamik ve mekanik gürültü olmak üzere iki tür gürültü vardır. Aerodinamik gürültü, kanat profilinin sınır tabakasındaki türbülanslı hava ve kanat profilinin çıkış uçlarında oluşan girdaptır. Mekanik gürültü ise dişli kutusu, hidrolik pompalar ve jeneratör soğutma sistemi gibi kısımlardan kaynaklanır. Bu yüzden rüzgar santrallerinin yakınında yerleşim birimi bulunmamalıdır.
- Kuş Ölümleri: Hızla dönen türbin kuş ölümlerine sebep olabilir. Bu yüzden santraller göçmen kuşların geçiş rotası üzerine kurulmamalıdır.

3.5 Rüzgar Türbin Temel Bileşenleri

Rüzgar türbini en basit olarak rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşmesini sağlayan makinedir. Bunun yel değirmeninin geliştirilmiş versiyonu olduğu da söylenebilir. Rüzgar, enerjisinin bir bölümünü kanatlar vasıtasıyla dönen şafta iletir ve böylece mekanik enerji elde edilir. Daha sonra bu mekanik enerji jeneratör yardımıyla elektrik enerjine dönüştürülür [4]. Yatay eksenli rüzgar türbini günümüzde en çok kullanılan rüzgar türbin çeşididir. Şekil 3.9'da yatay eksenli bir rüzgar türbinin temel bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Rüzgar Türbin Bileşenleri

Rotor: Kanatlar ve göbekten oluşan bölümdür. Türbin performansı ve maliyeti bakımından en önemli kısımdır.

Kanat: Rüzgar gücünü yararlı enerjiye çevirmek için gerekli torku üretir. Günümüzdeki türbinlerin hemen hemen hepsi 3 kanatlı olarak dizayn edilir. Yapı malzemesi olarak fiberglas ile kuvvetlendirilmiş plastikler veya karbon fiber/epoksi kompozisyonları kullanılır [5].

Göbek: Kanatlar için dayanak noktası olup, kanatların düşük hız mili ile arasındaki bağlantıyı sağlar. Kanatlar, rüzgarı yakalar ve rüzgarın gücünü göbeğe aktarır, göbek ise bu gücü düşük hız miline iletir. Ayrıca türbinin optimum aralıkta çalışmasını sağlayan kanat açısı sisteminin bulunduğu kısımdır. Sfero döküm veya çelikten yapılır [12].

Düşük Hız Mili: Pervane göbeğini dişli kutusuna bağlar. Dakikada 20-30 devir hızı ile döner. Aerodinamik frenlerin çalışması için hidrolik sisteme ait boruları içerir [12].

Dişli Kutusu: Düşük hız milinin dönme hızını jeneratörün ihtiyaç duyduğu yüksek hıza dönüştürür. Hızı 30 ile 90 kat arttırabilir [12]. Rüzgar türbininin en ağır ve en pahalı parçasıdır.

Nacelle: Makine bölümü olarak da bilinir. Görevi, düşük ve yüksek hız milini, jeneratörü, dişli kutusunu, kontrol ünitesini ve freni dış etkilere korumaktır. Bazı türbinlerde bu bölüm, bakım sırasında helikopter inebilecek kadar büyüktür [7].

Jeneratör: Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Rüzgar türbinlerinde senkron, asenkron ve doğru akım jeneratörleri kullanılabilir. Fakat en yaygın kullanım asenkron jeneratörlerdir. Bunun en önemli nedenleri; rüzgar hızının ani değişimlerinde meydana gelen tork titreşimlerini başarılı şekilde azaltabilmesi, basit mekanik yapı, üretim ve bakım maliyetlerinin düşük olması ve dayanıklı yapısıdır [13].

Sapma Mekanizması (Yaw): Maksimum gücü elde etmek için rotoru rüzgar yönüne döndüren ve bu yönde kalmasını sağlayan mekanizmadır [13].

Kontrol Ünitesi: Bileşenlerin çalışması ve türbinin performans verilerinin izlenmesi ve kaydedilmesini sağlar. Bir arıza halinde türbini otomatik olarak durdurabilir [13].

Kule: Hem statik yüke hem dinamik yüke en fazla maruz kalan bölümdür. Kanatlar ve nacelle kutusundaki bütün elemanların ağırlıklarına ve rüzgar gücüne dayanmalıdır. En çok kullanılan tip çelik kulelerdir. Temellerinde ise genellikle beton dolgu kullanılır. [5]

3.6 Temel Rüzgar Denklemleri

En basit şekilde rüzgar enerjisi, hareket halindeki havanın sahip olduğu kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilir. Bunun için fizikte çok yaygın olarak kullanılan aşağıdaki kinetik enerji formülünden yararlanılır. Bu formülde "m" rüzgarın kütesini ve "v" rüzgar hızını temsil eder.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad [\text{Joule}] \quad (3.1)$$

Güç, birim zamanda yapılan enerji anlamına geldiği için (3.1)'de kütle yerine birim zamandaki kütle geçişi yani kütleli debi ($\dot{m}$) yazıldığında çıkan denklem hareket eden havanın gücünü verir.

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \quad [\text{Watt}] \quad (3.2)$$

Kütleli debi ($\dot{m}$) ise aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$\dot{m} = \rho AV \quad [\text{kg/s}] \quad (3.3)$$

(3.3), (3.2)'de yerine yazıldığında teorik güç denklemi adı verilen aşağıdaki bağıntı elde edilir. Burada ρ [kg/m^3] havanın yoğunluğunu ve A [m^2] kanat süpürme alanını temsil eder.

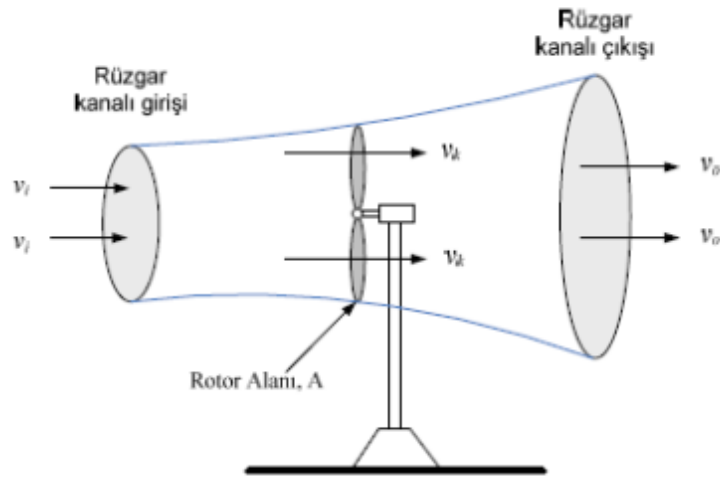
$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (3.4)$$

Bu denkleme göre rüzgar teorik gücü; hava yoğunluğuna, kanatların süpürdüğü alana ve rüzgar hızına bağlıdır. Güç, rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı şekilde artar. Örneğin; türbinin 1 saatte 10 m/s rüzgar hızında sağladığı enerji, 5 m/s hızında 8 saatte elde edilebilir.

3.6.1 Betz Kanunu

Kanatlara ulaşan rüzgarın tamamı rotorda mekanik enerjiye dönüşmez. Türbin kanatlarına gelen hava akımı, kütle korunumu kanunu gereği türbin sonrası da yoluna devam eder, bütün kinetik enerjisini türbine aktarıp durması fiziksel olarak mümkün değildir. Rotor kanatları tarafından yakalanan gerçek güç miktarı, rüzgar kanalı giriş hava akışı ile rüzgar kanalı çıkış hava akışı arasındaki kinetik enerji farkıdır.

$$P_k = \frac{1}{2} \dot{m} [v_i^2 - v_o^2] \quad (3.5)$$



Şekil 3.10 Bir Rüzgar Türbini Boyunca Oluşan Rüzgar Hızı [14]

(3.5)'de belirtilen bilinmeyenler;

- P_k : Rotordan elde edilen mekanik rüzgar gücü [Watt]
- v_i : Kanat girişindeki rüzgar hızı [m/s]
- v_o : Kanat çıkışındaki rüzgar hızı [m/s]
- v_k : Kanat düzlemindeki ortalama rüzgar hızı [m/s]

$$v_k = \frac{v_i + v_o}{2} \quad (3.6)$$

Rüzgar, kanal boyunca hareket ettiği sırada sürekli olarak sabit bir formda değildir. Bundan dolayı dönen kanatlar boyunca hareket eden havanın kütleli debisi, havanın yoğunluğu, kesit alanı ve ortalama hızın çarpımıyla elde edilebilir.

$$\dot{m} = \rho A \frac{v_i + v_o}{2} \quad (3.7)$$

Rotordan elde edilen mekanik güç, (3.5)'de yerine koyarak bulunur.

$$P_k = \frac{1}{2} \left[\rho A \frac{v_i + v_o}{2} \right] (v_i^2 - v_o^2) \quad (3.8)$$

(3.8) matematiksel olarak tekrar düzenlenirse denklem aşağıdaki gibi olur.

$$P_k = \frac{1}{4} \rho A \left(1 + \frac{v_0}{v_i}\right) \left(1 + \frac{v_0^2}{v_i^2}\right) \quad (3.9)$$

(3.9)'a referans olması için, aynı alandan geçen serbest hava akımının giriş gücü (3.4) gibi yazılır.

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_i^3 \quad (3.10)$$

Rotordan elde edilen mekanik gücü (P_k) rotora giren hava akımı gücüne (P_0) oranlayarak bulunan sabite "güç faktörü" adı verilir ve C_p ile gösterilir.

$$C_p = \frac{P_k}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_0^2}{v_i^2}\right) \left(1 + \frac{v_0}{v_i}\right) \quad (3.11)$$

(3.11)'de $v_i=v$ ve $\lambda = v_0/v$ olarak tanımlanırsa C_p aşağıdaki gibi bulunur.

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + \lambda) (1 - \lambda^2) \quad (3.12)$$

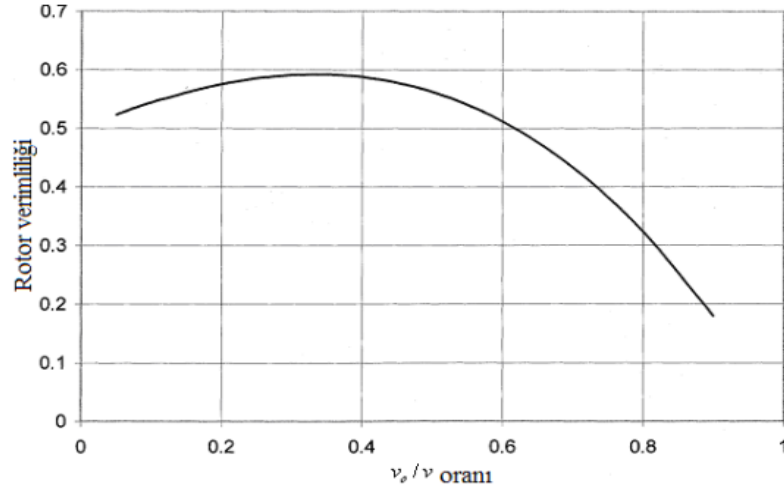
(3.11) ve (3.12)'de gösterilen C_p rotor verimidir. Maksimum rotor verimini bulmak için C_p 'nin λ 'ya göre türevi alınıp sıfıra eşitlenmesi gerekir.

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = \frac{1}{2} (-3\lambda^2 - 2\lambda + 1) = 0 \quad (3.13)$$

(3.13)'ten $\lambda_1 = -1$ ya da $\lambda_2 = 1/3$ kökleri bulunur. Hız oranları pozitif çıkması gerektiğinden v_0/v_i oranı $1/3$ olarak bulunur. Yani türbinden en yüksek gücü almak için rüzgarın giriş hızı çıkış hızının 3 katı olmalıdır. Bu oran (3.12)'de yerine yazıldığında maksimum güç faktörü $C_{p_{maks}}=0.5926$ olarak bulunur. Bu durumda maksimum teorik verim %59.26'dır ve buna Betz Limiti ya da Betz Kanunu adı verilir. Ayrıca hız oranları (3.9)'da yerine yazıldığında gerçek güç formülü elde edilir.

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (3.14)$$

$\lambda = v_0/v$ oranına göre rotor verimliliği eğrisi Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11 $\lambda = v_0/v$ Oranına Göre Rotor Verimliliği [14]

Herhangi bir rüzgar hızı için, rotorun verimi dönüş oranının bir fonksiyonudur. Rotor çok yavaş döndüğünde, kanatlara etki etmeden geçen rüzgar miktarı daha fazla olduğundan rotor verimi de düşer. Rotor çok hızlı döndüğünde de, bir kanat diğer kanada doğru artan türbülans yarattığından rotor verimi yine düşer.

3.6.2 Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu ve Rayleigh Dağılımı

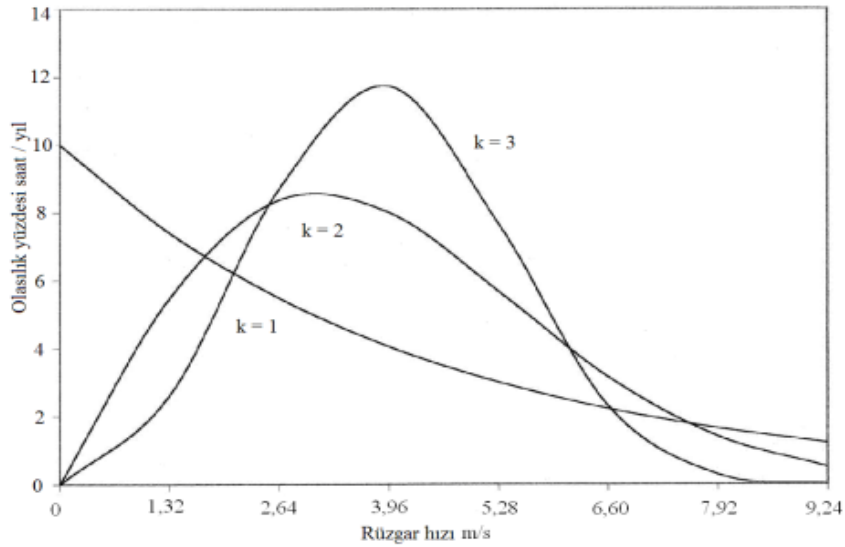
Bir bölgenin yıllık ortalama rüzgar hızı zamana göre değişiklik gösterebilir bu da enerji üretimi değerlendirmesi açısından oldukça önemlidir. Hız değişimleri, tahminleri zorlaştırırsa da bir olasılık fonksiyonu ile yıl içindeki rüzgar hızı değişimleri hesaplanabilir. Weibull olasılık dağılım fonksiyonu adı verilen bu fonksiyon saatlik ortalama rüzgar hızlarının değişimini bulma konusunda en yaygın kullanılan fonksiyondur.

$$F(v) = \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (3.15)$$

(3.15)'te $F(v)$ saatlik ortalama hızının v değerini geçtiği zamanın oranını göstermektedir. Fonksiyon iki parametre ile şekillenmektedir. Skala faktörü " c " yıllık ortalama rüzgar hızına bağlıdır. Şekil faktörü " k " ise ortalama değişkenliğine bağlıdır [4]. Fonksiyonun v sabitine göre türevi alındığından aşağıdaki denklem elde edilir.

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) \quad (3.16)$$

Şekil 3.12'de skala faktörünün 4.4 m/s değeri için ve şekil faktörünün üç farklı durumu için $f(v)$ fonksiyonu gösterilmiştir. $k=1$ eğrisinde görüldüğü üzere sol tarafta keskin bir eğim bulunmaktadır. Bu bölgede çoğu gün rüzgarsızdır. $k=2$ eğrisi birçok bölgede görülmekte olan tipik rüzgar hızı dağılımıdır. Bu dağılımda şiddetli rüzgar günü az sayıdadır ve çoğu gün rüzgar hız ortalamasının altındadır. Son olarak $k=3$ eğrisine sahip bölgede ise hafif ve şiddetli rüzgarların gün sayıları yakındır [14].

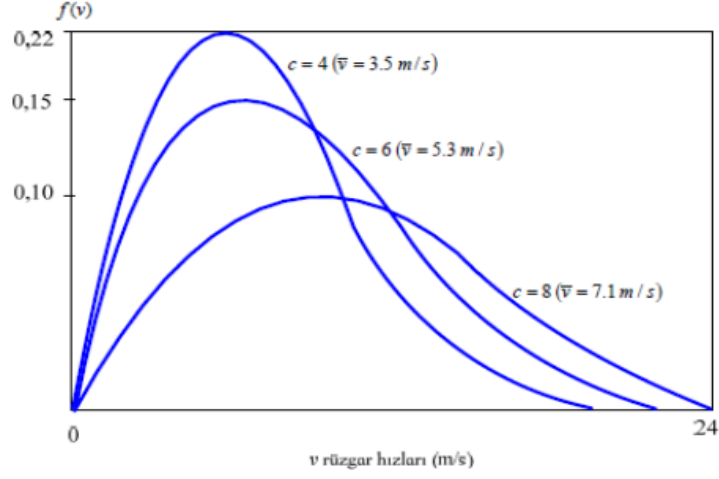


Şekil 3.12 Weibull Olasılık Dağılımı Fonksiyonu [14]

$k=1$ değerindeki Weibull dağılımı, çoğunlukla güvenilirlik çalışmalarında kullanılır ve üstel dağılım olarak bilinir. $k > 3$ eğrisi ise çan eğrisini andırmaktadır.

"c" değeri ne kadar büyük ise eğriler, yüksek rüzgar hızlarına doğru grafiğin sağ tarafına ötelenmektedir. Bu durumda skala faktörünün büyük olması rüzgar şiddetinin yüksek olduğu gün sayısının fazla olduğunu gösterir.

Aslında Weibull dağılımındaki $k=2$ eğrisinin rüzgar hızı, yaygın olarak Rayleigh Dağılımı adıyla bilinmektedir. Rayleigh dağılımına göre, sadece skala faktörünün bilinmesiyle rüzgar hızının bir tanımlaması yapılabilir. Çünkü birçok rüzgarlı bölgede şekil faktörü 1.5 ile 2.5 arasında değişir, skala faktörü de 5 ile 10 m/s arasında bir değere sahiptir [14].



Şekil 3.13 Skala Faktörü c'nin Rayleigh Dağılımı Üzerinde Etkisi [14]

Şekil 3.13'te skala faktörünün Rayleigh dağılımını nasıl etkilediği gösterilmiştir. Skala faktörü arttıkça eğri, grafiğin sağ tarafına yani büyük rüzgar hızlarına doğru kaymaktadır. Böylece ortalama rüzgar hızı artmaktadır. Skala faktörü ve $\vec{v}$ arasındaki denklem ise aşağıda verilmiştir.

$$v_{\text{ort}} = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (3.17)$$

$$\vec{v} = v_{\text{ort}} = \int_0^{\infty} \frac{2v^2}{c^2} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} dv = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \cong 0.886c \quad (3.18)$$

$$\vec{v} = 0.886c$$

DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgar türbinleri, kendisine ilham kaynağı olan yel değirmenleri gibi yıllar boyunca kara üzerine inşa edilmiştir. Tabi ki bundan yüzyıl önce bir rüzgar türbinini denizin üstüne inşa edebilmek için ve üretilen elektriği iletebilmek için gerekli teknolojinin olmaması bunun en büyük sebeplerindendir. Fakat inşaat ve malzeme bilimindeki gelişmeler, insanların köprü ve modern yapı inşaatlarında kazandığı tecrübeler sonucunda denizin üstüne rüzgar türbini kurmak olası hale gelmiştir.

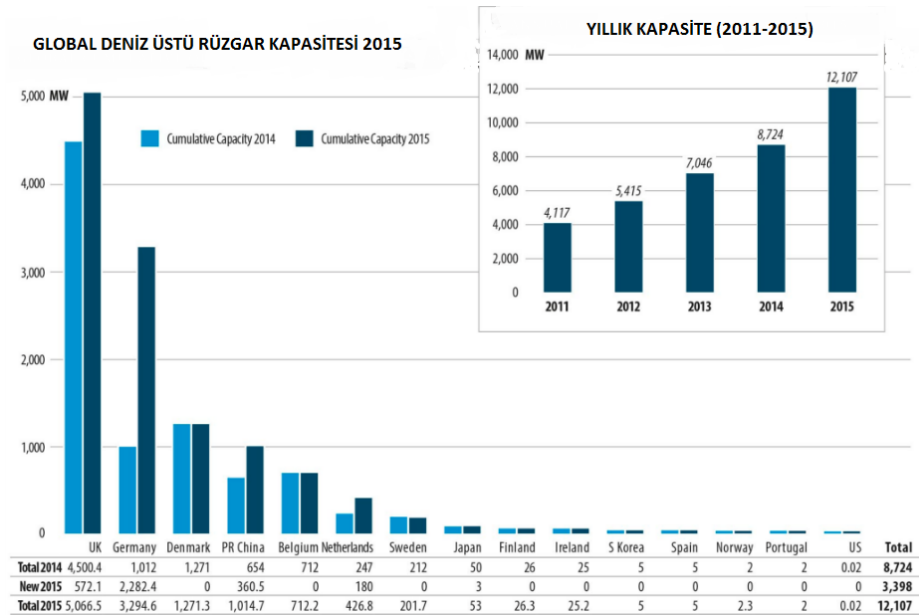
Analizler sonucunda deniz üstü rüzgarlarının kara rüzgarlarına göre daha yüksek hıza ve yıl boyunca daha düzenli rejime sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum insanlara deniz üstüne rüzgar santrali inşa edilmesinin mantıklı olup olmayacağını sorgulatmıştır. Rejim ve yüksek rüzgar hızının yanı sıra kara üstü santralleri gibi toprak işgal etmemesi, gürültü ve görüntü kirliliğine sebep olmaması deniz üstü rüzgar santrallerinin avantajları olarak kabul edilmiştir. Fakat ilk yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyeti açısından da kara üstü santrallerine göre dezavantajlıdır [6].

İlk deniz üstü rüzgar santrali olan Vindeby Rüzgar Santrali, Danimarka'da 1991 yılında tamamlanmıştır ve maliyeti 10.5 milyon \$'dır. Her biri 450 kW gücündeki 11 türbinden oluşmakta ve halen elektrik üretimine devam etmektedir. Günümüzde kapasitesi en yüksek olan deniz üstü rüzgar santrali ise Birleşik Krallık sınırları içerisinde bulunan London Array Rüzgar Santrali'dir (Şekil 4.1). 2012 yılında devreye alınan bu santral 630 MW kurulu güce sahip ve yıllık ortalama 2500 GWh elektrik üretmektedir.



Şekil 4.1 London Array Deniz Üstü Rüzgar Santrali

Dünyadaki toplam deniz üstü rüzgar enerjisi potansiyeli, Avrupa'nın elektrik ihtiyacını 7 kez, Amerika Birleşik Devletleri'nin elektrik ihtiyacını ise 4 kez karşılayacak kadar yüksektir. Bundan dolayı son yıllarda tüm dünyada deniz üstü rüzgar santrallerine büyük yatırımlar yapılmaktadır. Sadece 2015 yılında neredeyse 3,4 GW kurulu güç artışı gerçekleştirilmiştir. 2016 yılı itibariyle dünyadaki deniz üstü rüzgar enerji kurulu gücü 12 GW'ı geçmiş bulunmaktadır. Bu kurulu gücün %40'tan fazlasına sahip olan Birleşik Krallık, sektörde lider iken bunu %27 ile Almanya ve %10.5 ile Danimarka takip etmektedir. Şekil 4.2'de, yıllara göre global deniz üstü rüzgar kapasitesinin artışı ve 2015 yıl sonu itibariyle ülkelere göre dağılımı gösterilmiştir. [9].



Şekil 4.2 Global Deniz Üstü Rüzgar Kapasitesi [9]

4.1 Deniz Üstü Rüzgar Santrali Temel Faktörleri

Deniz üstü rüzgar santralleri kurulabilecek alanların karar verilmesi için bazı kriterler bulunmaktadır. Birinci ve en önemli kriter, yıllık ortalama rüzgar hızının yüksek olmasıdır. Daha sonra belirlenen bölgenin, deniz derinliğine ve taban yapısına, kıta sahanlığına, deniz trafiğine, askeri alanlara ve eğitim-atış sahalarına uzaklığına bakılmalıdır. Bunun yanında göçmen kuşların rotası, ses ve görüntü kirliliği gibi çevresel ve sosyal faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca detaylı maliyet analizinin yapılması çok önemlidir. Zira deniz üstü rüzgar santrallerinin dünyada istenilen seviyede yaygınlaşmamasının en büyük sebebi yüksek maliyetleridir.

4.1.1 Rüzgar Profili

Deniz üstü rüzgarları kara rüzgarlarına oranla daha sabit rejime ve yüksek hızlara sahiptir. Bu durumda, rüzgar türbinlerinin maksimum kapasitede çalışma süreleri artar. Ayrıca rüzgarın daha sabit bir rejime sahip olması türbin yorulmalarını azaltır ve sabit bir güç iletimini sağlar. Genellikle, 100 metre yükseklikte ortalama hızı minimum 7 m/s olan bölgeler deniz üstü rüzgar santrali kurulumuna uygun olarak görülür [6].

4.1.2 Deniz Derinliği ve Temel Seçimi

Derinlik, deniz üstü rüzgar santralleri için önemli bir faktördür. Çünkü derinlik arttıkça türbin kurulumu gittikçe zorlaşır ve maliyet artar. Günümüzde deniz üstü rüzgar santrallerinin kurulumu 50 metre derinliğe kadar uygulanmaktadır [15]. Ayrıca bu santrallerin, yüksek rüzgar hızlarına ve dalgalara karşı dayanıklı olması için temel yapılarının çok güçlü olması gerekir. Bunun için farklı derinliklerde ve taban yapılarında kullanılmak üzere 5 adet temel çeşidi geliştirilmiştir.

4.1.2.1 Yerçekimi Merkezli (Gravity) Temel

Genellikle beton veya çelikten yapılır. Deniz derinliğine ve rüzgar türbinin kapasitesine göre ağırlığı 500 ile 1500 ton arasında değişmektedir. Bu temel çeşidi, sakin ve derin olmayan sular için geliştirilmiştir. Kütle ve maliyet neredeyse suyun derinliğinin karesi ile arttığından bu tip temellerin kullanıldığı derinlik genellikle 10 metre civarındadır.

Başka bir dezavantajı ise detaylı bir sualtı ve temel güçlendirme çalışması gerekmektedir [7].



Şekil 4.3 Yerçekimi Merkezli Temel

4.1.2.2 Tek Kazık (Monopile) Temel

Deniz tabanına hidrolik bir çekiç yardımıyla çakılan çelik borudan oluşur. Bu çelik boru 4-6 metre çapa ve 175-1000 ton arasında ağırlığa sahiptir. Tek kazık temellerin kullanılması için deniz tabanının kum veya balçık olması gerekir. Bundan dolayı deniz tabanı hazırlığına gerek yoktur ve düşük maliyetlidir. Deniz üstü rüzgar santrallerinde en yaygın olarak kullanılan bu temel tipi 25 metre derinliğe kadar uygulanabilir [16].



Şekil 4.4 Tek Kazık Temel

4.1.2.3 Üç Ayak (Tripod) Temel

Bir çelik borunun üç ayak ile desteklenecek şekilde dizaynı yapılmış temel çeşididir. Üç ayak temellerin, mukavemeti yüksektir ve her ayak deniz tabanına çakılır. Bundan dolayı düzensiz deniz tabanlarında bile dayanıklılığı çok yüksektir. 20-40 metre derinliğe sahip bölgelerde kullanımı yaygındır. Maliyeti yerçekimi merkezli ve tek kazık temellere göre biraz daha yüksektir [16].



Şekil 4.5 Üç Ayak Temel

4.1.2.4 Ceket (Jacket) Temel

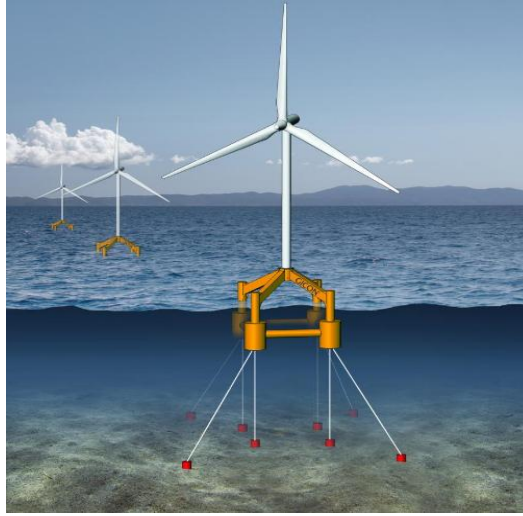
Rüzgar türbini, dört ayaklı bir platform üzerine yerleştirilir ve bu platformun tüm ayakları deniz tabanına çakılmaktadır. Karmaşık bir konstrüksiyona sahip olan ceket temel tipi 20-50 metre derinliğe sahip denizlerde kullanılır.



Şekil 4.6 Ceket Temel

4.1.2.5 Yüzer (Floating) Temel

Karadan uzaklaştıkça rüzgarlar daha güçlenir ve rüzgar rejimi karanın etkilerinden kurtulduğu için daha düzenli hale geçer. Bu sebeple karadan daha uzak sularda kurulacak türbinlerin daha yüksek verimli çalışacağı bilinmektedir. Fakat diğer temel tipleri ile 50 metreden daha derin sularda kurulum yapılması mümkün değildir. Yüzer temel çeşidi bu soruna bir çözüm olarak geliştirilmiştir. Türbin deniz tabanına özel halatlarla bağlanmaktadır. Henüz dünya genelinde kullanımı yeni başlamış olan bu tasarımın ilk örnekleri Kuzey Denizi'nde Danimarka açıklarında bulunmaktadır [17].



Şekil 4.7 Yüzer Temel

4.1.3 Kıta Sahanlığı

Kıta sahanlığı, kıyı ülkesinin deniz altında devam eden doğal uzantısına verilen isimdir. Kıta sahanlığı sınırları içerisinde olan bölge o ülkenin parçası sayılmaktadır. Bir ülkenin izin verilebilir kıta sahanlığı, Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi'ne göre 12 deniz mili olarak kabul edilmiştir. Türkiye'nin Karadeniz ve Akdeniz'de kıta sahanlığı diğer ülkelerden oldukça uzakta olduğu için sorun teşkil etmemektedir. Fakat Ege Denizi'ndeki bazı bölgelerin Yunan adalarına çok yakın olmasından dolayı burada ikili antlaşmalar gereği kıta sahanlığı 6 deniz mili olarak kabul edilmiştir [18]. Bu yüzden Ege'de bazı bölgelerde deniz üstü rüzgar santralleri kurulumuna uygun değildir.

4.1.4 Deniz Trafiği

Günümüzde birçok ÷lkede artan deniz trafiği deniz üstü rüzgar santrallerinin kurulmasında sorun teşkil etmekte ve bununla ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Üç tarafı denizlerle çevrili olan ÷lkemiz için de hem uluslararası hem de yerel deniz taşımacılığı çok önemlidir. Fakat rüzgar potansiyeli yüksek bölgelerin bazıları bu deniz taşımacılığı yapılan rotalar üzerinde kaldığından santral kurulumu için uygun değildir. Ülkemizde hali hazırda bir deniz üstü santrali ya da projesi bulunmadığından dolayı bu duruma yönelik de bir çalışma maalesef yoktur. Buna rağmen bu çalışmada potansiyel santral bölgesi seçilirken özellikle uluslararası deniz taşımacılığını etkilemeyecek biçimde tercih yapılmasına dikkat edilmiştir.

4.1.5 Askeri Alanlar

Bazı kıyı bölgeler ya da deniz üzerinde bulunan bazı alanlar askeri amaç için kullanıldığından deniz üstü rüzgar santrali kurmaya uygun değildir. Bunların içinde askeri özel alanlar, eğitim ve atış sahaları bulunmaktadır [19]. Günümüzde bir çok otorite bu durumun deniz üstü rüzgar santrallerinin yaygınlaşması konusunda büyük bir engel olduğunu ileri sürmektedir.

4.1.6 Sosyal ve Çevresel Faktörler

Rüzgar türbinlerinin olumsuz etkileri arasında gürültü ve görüntü kirliliği vardır. Bir rüzgar türbini 100 dB seviyelerinde gürültü üretebilir. Türbinden 100 metre uzaklıkta bu şiddet, 50 dB'e düşer ki bu değeri konuşma seviyesidir. 300 metreye gelindiğinde ise türbin gürültüsü neredeyse duyulmaz hale gelecektir [20]. Aynı zamanda bu uzaklık rüzgar türbini yerleştirilirken bir yerleşim alanına olabilecek en yakın mesafe olarak kabul edilmiştir. Türbinden 500 metre uzakta ise ses seviyesi 30 dB şiddete kadar düşecektir ki bu seviyenin insanları rahatsız etmesi pek de mümkün değildir. Bu bilgilerden yola çıkarak deniz üstü rüzgar türbinlerinin kurulumu zaten kıyıda bir miktar uzakta başladığı için karadaki rüzgar santrallerine oranla gürültü kirliliği bakımından çok daha iyi durumda olduğu söylenebilir.

Bunun yanı sıra, rüzgar türbinleri çok büyük yapılar olduklarından her zaman çevrede yaşayan halk tarafından doğanın görsel ve estetik yapısını bozmakla suçlanmıştır. Fakat deniz üstü rüzgar türbinleri karadaki rüzgar türbinleri gibi yerleşim yerlerine yakın olmadığından yine bu konuda da daha avantajlıdır.

Ekolojik açıdan bakıldığında kuşlar ve deniz canlılarının etkilenmemesi de deniz üstü rüzgar santrali kurulurken dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Rüzgar türbin kanadının çarpması sonucu görülen kuş ölümleri yaygındır. Bu yüzden santral bölgesinin göçmen kuşların rotası üzerinde bulunmaması gerekmektedir. Buna ek olarak, türbin kurulum aşamasında çok yüksek seviyede ses ve titreşim meydana gelmektedir. Bu durum akustik sinyallerle iletişim kuran deniz memelilerinin beslenme ve haberleşme davranışlarını etkileyebilir [21]. Ayrıca kurulum ve bakım işlemleri sırasında deniz taşıtları ve makinelerin, deniz kirliliğine yol açmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Aksi takdirde bu kirlilik deniz hayvanlarının ölümüne veya göç etmesine sebep olabilir.

4.1.7 Maliyet Faktörü

Deniz üstü rüzgar santrallerinin yaygınlaşmasını engelleyen en büyük faktör ilk yatırım ve bakım maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Kule temelleri ve türbin montajları karadaki santrallere göre çok daha zor ve yüksek maliyetlidir. Kurulum sırasında kullanılan yüzer vinçler ve diğer deniz taşıt araçları, liman masrafları ve bakım sırasında gerekli deniz taşıtları veya helikopter masrafları deniz üstü rüzgar santrallerinin maliyetini oldukça arttırmaktadır. Ayrıca yük dengelemesi için ve elektrik şebekesine bağlantı için gerekli masraflar da hesap edilmelidir [21]. Bu sebeplerden dolayı deniz üstü rüzgar santral projelerinin fizibilite araştırılmasının çok iyi yapılması gerekmektedir.

TÜRKİYE'DE DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR POTANSİYELİ ANALİZİ

5.1 Metodoloji

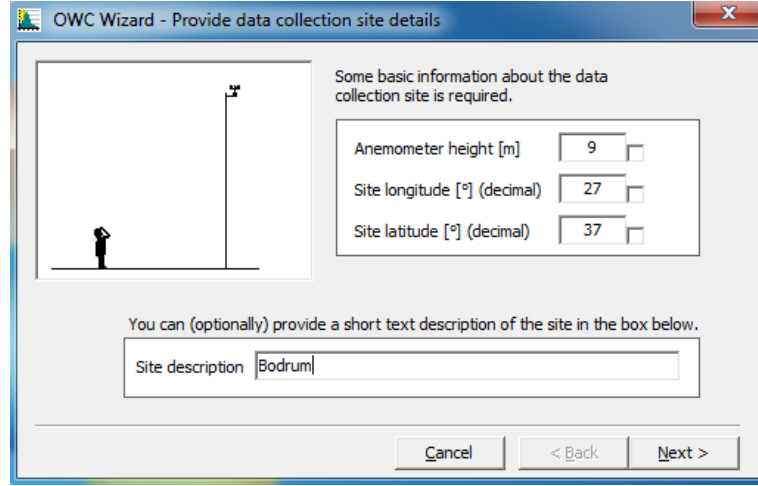
Bir bölgenin rüzgar analizi yapılırken dünyada en çok kullanılan bilgisayar yazılımı WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) isimli programdır. WASP, rüzgar veri analizi, rüzgar iklimi oluşturma ve rüzgar atlası üretimi gibi işlemleri yapabilen bir yazılımdır. Bu çalışmada da bölgelerin rüzgar analizi yapılırken WASP 11 sürümünden yararlanılmıştır.

Saatlik rüzgar verilerinin analizini yapmak için WASP'ın içindeki OWC (observed wind climate) modülü kullanılır. Şekil 5.1'de Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiş rüzgar verileri Bodrum örneği ile gösterilmiştir. 1 Ocak 2016 saat 10:00-11:00 arasında saatlik ortalama rüzgar hızı 5.7 m/s iken rüzgar yönü de 15 derecedir. Bir bölgeye ait son bir yıldaki bu verilerin tümü OWC modülüne girilerek bölgenin rüzgar analizi yapılabilir.

P8											
T.C.											
ORMAN VE SU İŞLERİ BAKANLIĞI											
METEOROLOJİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ											
NOT: Veriler henüz kalite kontrollerinden geçmemiştir.											
İstasyon No	İstasyon Adı	Yıl	Ay	Gün	Saat (UTC)	Saatlik Ortalama Rüzgar	Saatlik Ortalama Rüzgar	Saatlik Ortalama Rüzgar Hızı	Saatlik Maksimum Rüzgarın	Saatlik Maksimum Rüzgarın	Saatlik Maksimum Rüzgar Hızı
						Yönü (°)	Yönü	(m/sn)	Yönü (°)	Yönü	(m/sn)
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	0	13	NNE	8.3	17	NNE	10.1
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	1	11	N	8.2	2	N	10.1
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	2	13	NNE	7.3	21	NNE	9.8
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	3	12	NNE	7.4	19	NNE	9.0
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	4	9	N	6.9	18	NNE	9.3
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	5	5	N	7.5	2	N	9.9
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	6	5	N	7.9	5	N	10.0
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	7	11	N	7.6	12	NNE	9.8
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	8	2	N	5.8	14	NNE	7.6
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	9	4	N	5.3	4	N	7.2
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	10	15	NNE	5.7	24	NNE	7.7
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	11	9	N	5.4	15	NNE	7.8
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	12	357	N	4.7	358	N	7.3
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	13	350	N	4.8	344	NNW	6.9
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	14	2	N	5.5	3	N	7.6
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	15	3	N	5.2	3	N	7.3
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	16	18	NNE	4.8	31	NNE	6.3
17450	BODRUM YALIKAVAK GEMİTAŞI FENER	2016	1	1	17	29	NNE	4.7	32	NNE	6.3

Şekil 5.1 Örnek Rüzgar Verileri

İlk adım olarak Şekil 5.2'de görüldüğü gibi ölçüm yapan istasyonun adı, yerden yüksekliği ve koordinat bilgileri girilir. Daha sonra veri setleri dosyadan çağırılarak Şekil 5.3'teki gibi WAsP'a yerleştirilir.



OWC Wizard - Provide data collection site details

Some basic information about the data collection site is required.

Anemometer height [m]

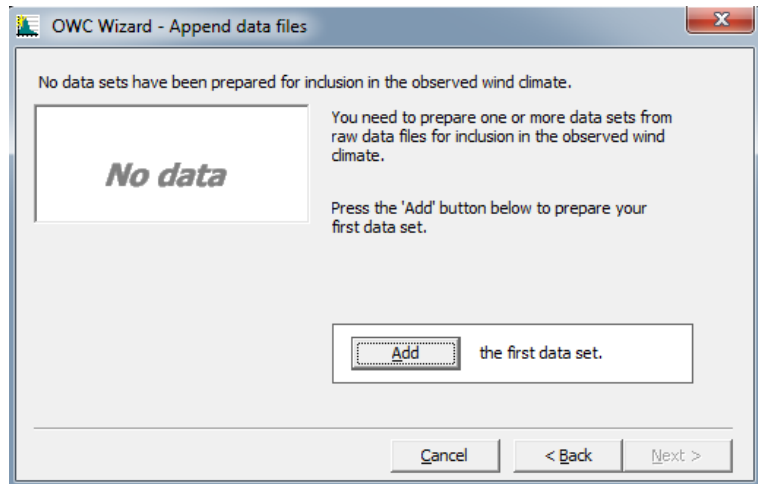
Site longitude [°] (decimal)

Site latitude [°] (decimal)

You can (optionally) provide a short text description of the site in the box below.

Site description

Şekil 5.2 İstasyona Ait Yükseklik ve Kordinat Bilgileri



OWC Wizard - Append data files

No data sets have been prepared for inclusion in the observed wind climate.

No data

You need to prepare one or more data sets from raw data files for inclusion in the observed wind climate.

Press the 'Add' button below to prepare your first data set.

the first data set.

Şekil 5.3 Verilerin dosyadan WAsP'a eklenmesi

Bir sonraki adımda ise Şekil 5.4'te görüldüğü gibi verilerin programa tanıtımı yapılır. Birinci sütundaki verilerin hız, ikinci sütundaki verilerin yön değerlerine ait olduğu belirtilir.

OWC Wizard - Explain the data structure of the file

No header lines

Header rows in file: 0

If the file contains 'header' rows that should be ignored when reading data, then indicate how many such rows there are.

Check the number of elements in a row, and indicate which column contains the speed data and which the direction data.

Speed	Direction
5.8	2
5.3	4
5.7	15
5.4	9
4.7	357
4.8	350
5.5	2

Data elements per row: 2

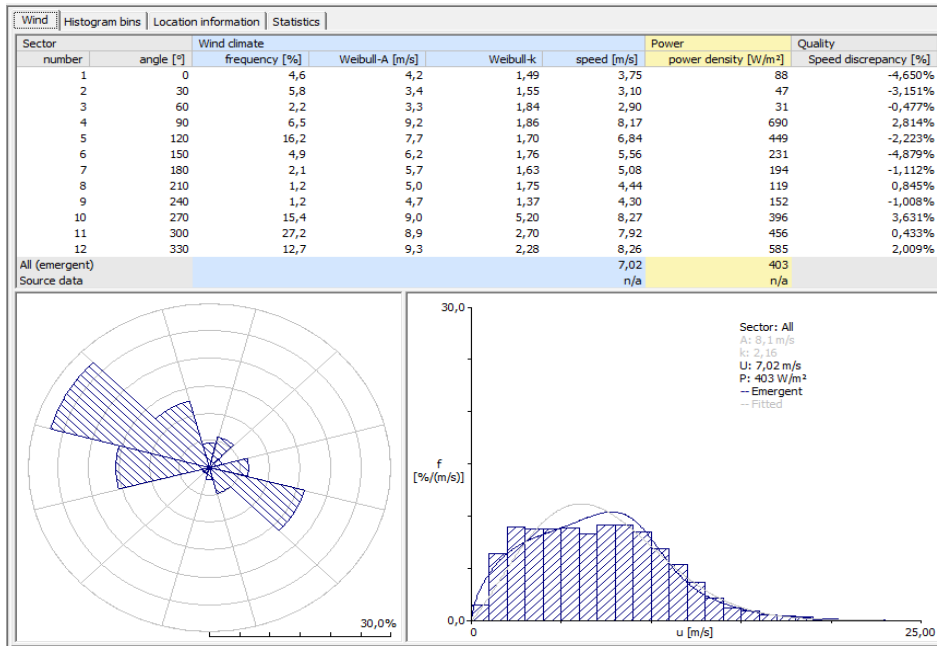
Direction column: 2

Speed column: 1

View file Preview Cancel < Back Next >

Şekil 5.4 Verilerin Programa Tanıtılması

Sonraki adımlarda hız ve yön verilerine ait alt ve üst limitler ayarlanır ve bu sayede limit dışı değerlerin analize dahil edilmemesi sağlanır. Ayrıca rüzgar yönü gösterimi için kaç adet sektör olacağı ve merkez açı değeri seçilir. Modülü sonlandırıldığında OWC analizi tamamlanmış olur ve Şekil 5.5'te görüldüğü gibi bir rapor çıktısı elde edilir.



Şekil 5.5 OWC raporu

OWC ile elde edilen bu raporda seçilen bölgeye ait yıllık ortalama rüzgar hızı, hakim rüzgar yönü, ortalama güç yoğunluğu ve Weibull olasılık dağılım fonksiyonu parametreleri bulunur. OWC modülünün çıktıları bize deniz üstü rüzgar santrallerinin kurabileceği en uygun yerleri belirlememizde yardımcı olacaktır. Fakat bir bölgenin

rüzgar potansiyeli hesaplanırken genelde 100 metre yükseklikteki rüzgar hızı baz alınır. Çünkü rüzgar türbinlerinin ortalama kule yüksekliği bu seviyelerdedir ve daha doğru bir analiz için bu yükseklikteki hızlar kullanılmalıdır. Fakat bizim analizlerimizde kullanılan veriler, istasyon yüksekliklerinde ölçülen verilerdir. Bu nedenle, bölgelerin 100 metre yükseklikteki yıllık ortalama hızlarını bulmak için (5.1)'den yararlanılır.

$$V_h = V_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\mu \quad (5.1)$$

V_h : h yüksekliğindeki hız (m/s)

V_0 = Referans yükseklikteki hız (m/s)

h: Hızını bulmak istediğimiz yükseklik (m)

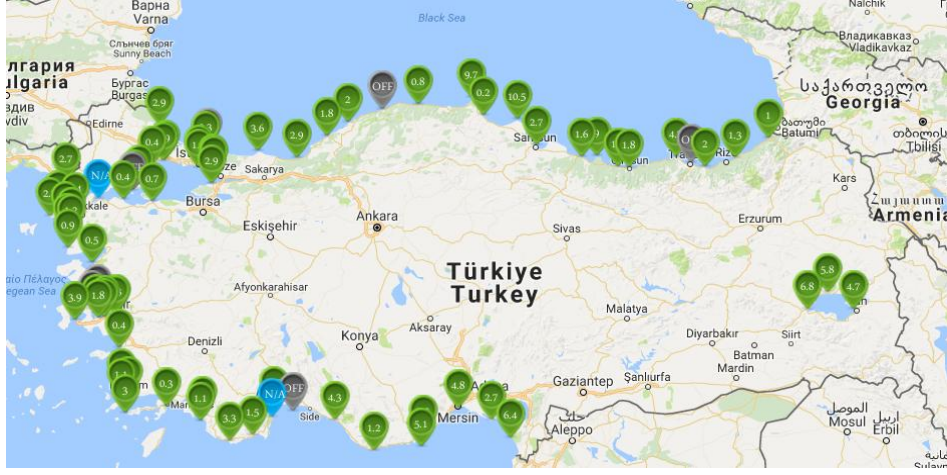
h_{ref} = Referans yükseklik (m)

μ = Yüzey pürüzlülük katsayısı

5.2 Deniz Üstü Rüzgar Santrali Kurulabilecek Bölgelerin Belirlenmesi

Üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemiz, deniz üstü rüzgar santrali potansiyeli bakımında umut vericidir. Karadeniz, Akdeniz, Ege Denizi ve Marmara Deniz'indeki bölgelerin analizi iyi yapıldığında bazı kısımlara kurulacak santraller ile yüksek miktarlarda elektrik üretimi elde edilebilir.

Türkiye'de 2017 yılı itibarıyla 78 adet aktif deniz üstü otomatik gözlem istasyonu mevcuttur (Şekil 5.6). Bu çalışmada, Türkiye'nin deniz üstü rüzgar analizini yapmak için potansiyeli yüksek görülen 43 farklı deniz otomatik gözlem istasyonuna ait son bir yıldaki rüzgar verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir.



Şekil 5.6 Türkiye'deki Deniz Otomatik Gözlem İstasyonları [www.mgm.gov.tr]

Bu 43 istasyona ait rüzgar analizleri bir önceki bölümde anlatıldığı şekilde WASP programı ile yapılmıştır ve ortaya çıkan sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 İstasyonlara Ait Rüzgar Hız ve Güç Yoğunluğu Sonuçları

İstasyon	Ölçülen Rüzgar Hızı (m/s)	Güç Yoğunluğu (W/m ²)
Adana	4.55	128
Alanya	6.82	436
Antalya Finike	2.73	31
Antalya Konyaaltı	3.49	81
Bandırma	3.68	102
Bartın	6.61	346
Bodrum Burnu	6.26	286
Bodrum Kuzey	3.39	48
Bozcaada	7.45	486
Çanakkale Ezine	6.39	307
Karabiga	5.55	251
Çeşme	7.02	403
Datça	7.84	701
Edirne Enez	6.14	339
Erdek	5.54	227
Giresun	1.19	17
Gökçeada Güney	4.86	192

Çizelge 5.1 İstasyonlara Ait Rüzgar Hız ve Güç Yoğunluğu Sonuçları (Devamı)

Gökçeada Kuzey	6.05	305
Hopa	3.01	117
İskenderun	6.55	405
İzmir Azaplar	6.73	326
İzmir Güzelbahçe	5.09	223
İzmir Urla	6.77	313
İzmir Körfezi	5.86	278
Kaş	3.2	49
Kırklareli	5.04	218
Kocaeli Kefken	5.03	171
Kuşadası	5.13	209
Marmara Adası Kuzey	3.68	81
Marmara Adası Güney	4.87	187
Marmaris	3.49	58
Mersin Anamur	4	160
Mersin Silifke	5.04	258
Ordu Perşembe	4.85	163
Ordu Ünye	3.93	72
Rize	2.27	15
Samsun Bafra	5.58	224
Samsun Liman	4.59	134
Sinop	6.07	345
Tekirdağ Ereğli	4.73	166
Trabzon	3.58	108
Trabzon Liman	4.58	113
Yalova	4.5	115

Analiz sonuçları her ne kadar istasyon yüksekliğine ait olsa da Çizelge 5.1'den görüldüğü gibi Türkiye'deki bir çok bölge deniz üstü rüzgar gücü bakımından çok yüksek değerlere sahip değildir. Bölüm 4.1.1'de deniz üstü rüzgar gücünden verimli olarak yararlanabilmek için 100 metre yükseklikte, yıllık ortalama rüzgar hızının minimum 7 m/s olması gerektiğinden bahsedilmiştir. Bu yüzden (5.1) denklemi kullanılarak, istasyon

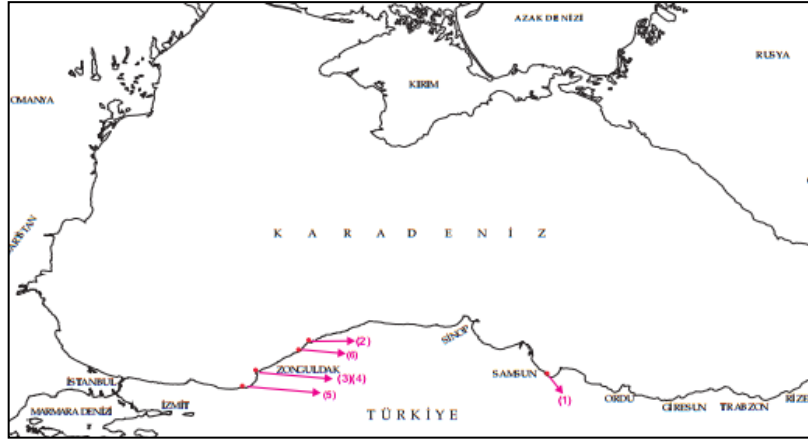
yüksekliğinde analiz edilen değerler, 100 metre yükseklikteki değerlere dönüştürülür. Hesaplamalar sonucunda minimum 7 m/s yıllık ortalama rüzgar hızını sağlayan 11 tane bölge, rüzgar gücü bakımından deniz üstü santrali kurmaya uygun olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2 Rüzgar Potansiyeli Yüksek Olan Bölgeler

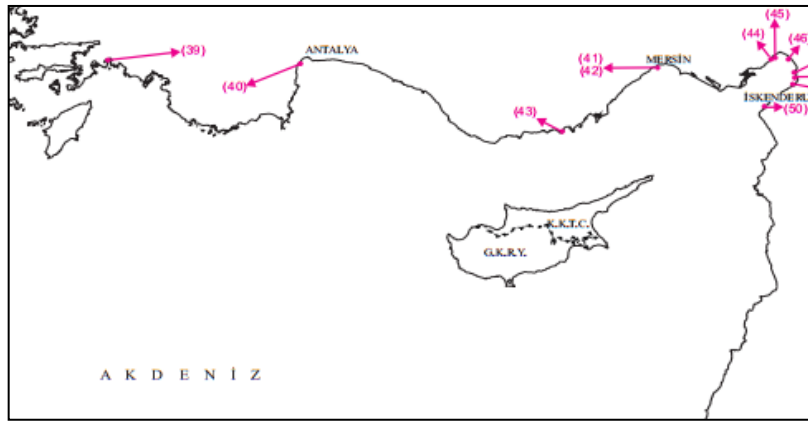
İstasyon	Rüzgar Hızı (m/s)	Güç Yoğunluğu (W/m ²)	100m Yükseklikteki Hız (m/s)
Alanya	6.82	436	8.5
Bartın	6.61	346	8.75
Bodrum	6.26	286	7.3
Bozcaada	7.45	486	9.7
Çanakkale Ezine	6.39	307	8.3
Çeşme	7.02	403	9.15
Datça	7.84	701	7.84
Edirne Enez	6.14	339	7.9
Gökçeada	6.05	305	7.7
Azaplar	6.73	326	8.66
Urla	6.77	313	8.95

Deniz üstü rüzgar santral kurulacak bölgenin askeri ve eğitim-atış sahası içerisinde bulunmaması, deniz trafiğini engellememesi ve kıta sahanlığı açısından sorun teşkil etmemesi önemlidir. Seçilen 11 bölgede bu faktörlere göre değerlendirmeler yapılmıştır. Çanakkale Boğazı'ndaki deniz trafiğini etkileyebilecek olmasından dolayı Çanakkale Ezine bölgesi santral kurulumu açısından uygun değildir.

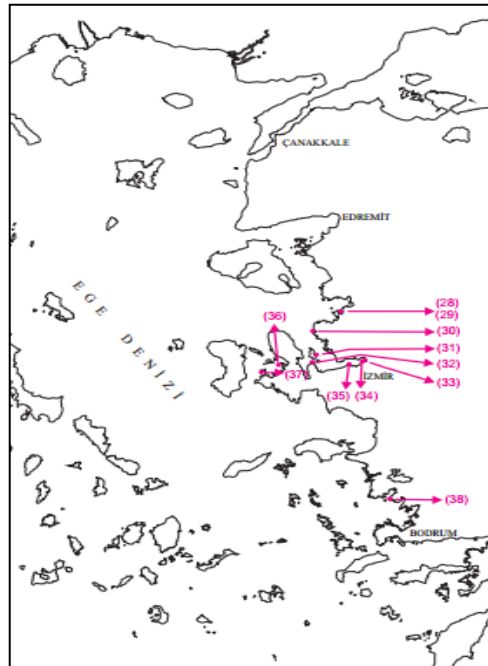
Şekil 5.7'de Karadeniz, Şekil 5.8'de Akdeniz ve Şekil 5.9'da Ege Denizi'ndeki askeri yasak bölgeler gösterilmiştir. Bu haritalara göre Çeşme, Urla ve Azaplar askeri yasak bölgeler içerisinde bulunduğundan santral kurulumuna uygun değildir. Haritalardan görüldüğü gibi Akdeniz, Ege ve Karadeniz'deki diğer bölgeler için herhangi bir engel bulunmamaktadır.



Şekil 5.7 Karadeniz Bölgesi Askeri Yasak Bölgeler [22]

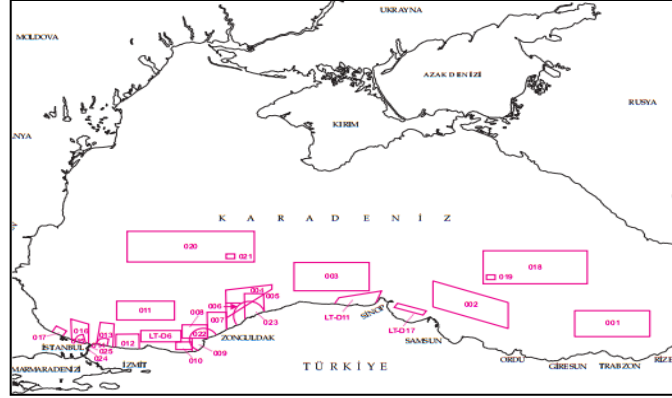


Şekil 5.8 Akdeniz Bölgesi Askeri Yasak Bölgeler [22]

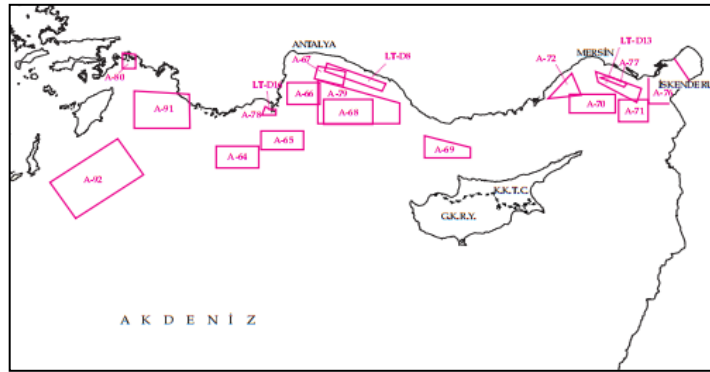


Şekil 5.9 Ege Bölgesi Askeri Yasak Bölgeler [22]

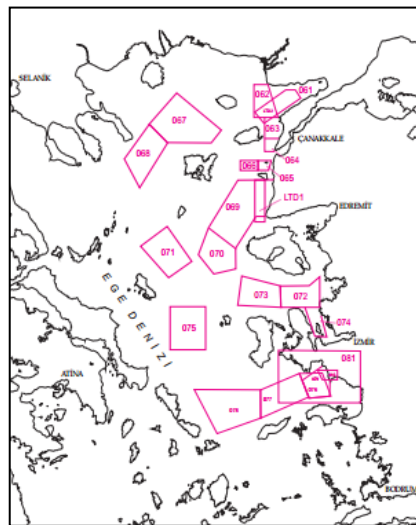
Şekil 5.10'da Karadeniz, Şekil 5.11'de Akdeniz ve Şekil 5.12'de Ege Denizi'ndeki askeri eğitim-atış sahaları gösterilmiştir. Bu haritalara göre yine Urla ve Azaplar bu saha alanları için kaldığından deniz üstü rüzgar santrali kurulumuna uygun değildir.



Şekil 5.10 Karadeniz Bölgesi Eğitim-Atış Sahaları [22]



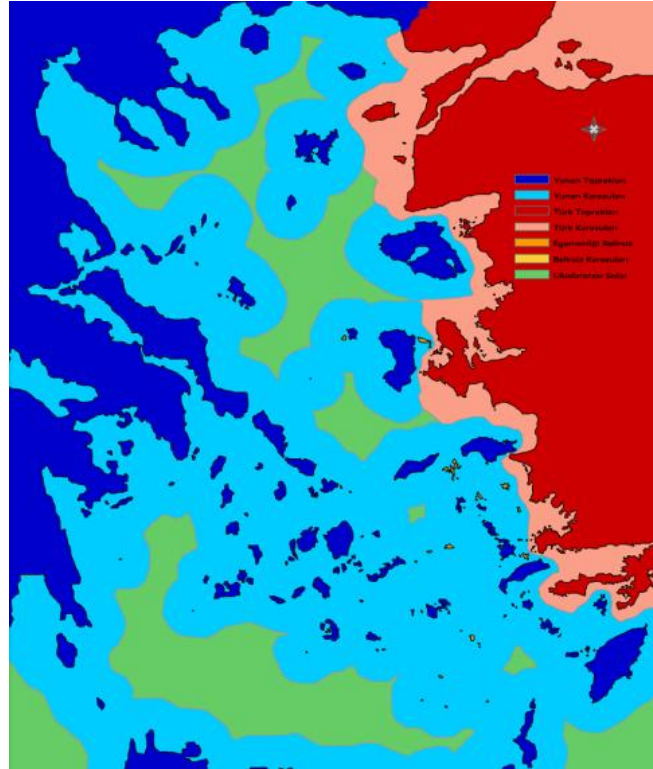
Şekil 5.11 Akdeniz Bölgesi Eğitim-Atış Sahaları [22]



Şekil 5.12 Ege Bölgesi Eğitim ve Atış Sahaları [22]

Geriye kalan bölgeler arasından Ege'de Gökçeada, Bozcaada, Enez, Bodrum ve Datça, Akdeniz'de Alanya ve Karadeniz'de de Bartın askeri yasak bölge veya eğitim atış sahası bakımından santral kurulumu için engel teşkil etmemektedir. Bu bölgelerin bir başka önemli kriter olan kıta sahanlığı açısından değerlendirilmesi gerekmektedir.

Akdeniz ve Karadeniz'de kıta sahanlığı bir sorun teşkil etmemektedir. Ege Denizi'nde Türkiye ile Yunanistan arasındaki kıta sahanlığı haritası Şekil 5.13'te verilmiştir. Türkiye karasuları, Ege Denizi'nde 6 deniz mili mesafesidir [18]. Fakat, Bodrum ve Datça'nın Yunan Adaları'na yakınlığından dolayı mesafe bu bölgelerde 6 deniz milinden daha azdır. Bu durum kıta sahanlığı açısından sorun teşkil edeceğinden bu bölgelere deniz üstü rüzgar santrali kurulamaz.



Şekil 5.13 Ege Denizi Kıta Sahanlığı Haritası

Tüm bu faktörler değerlendirildiğinde Çizelge 5.3'ten de görüleceği gibi Akdeniz'de Alanya, Karadeniz'de Bartın, Ege Denizi'nde Enez, Gökçeada ve Bozcaada deniz üstü rüzgar santrali kurulumu açısından uygun bölgelerdir.

Çizelge 5.3 Deniz Üstü Rüzgar Enerji Santralleri İçin Uygun Bölgeler

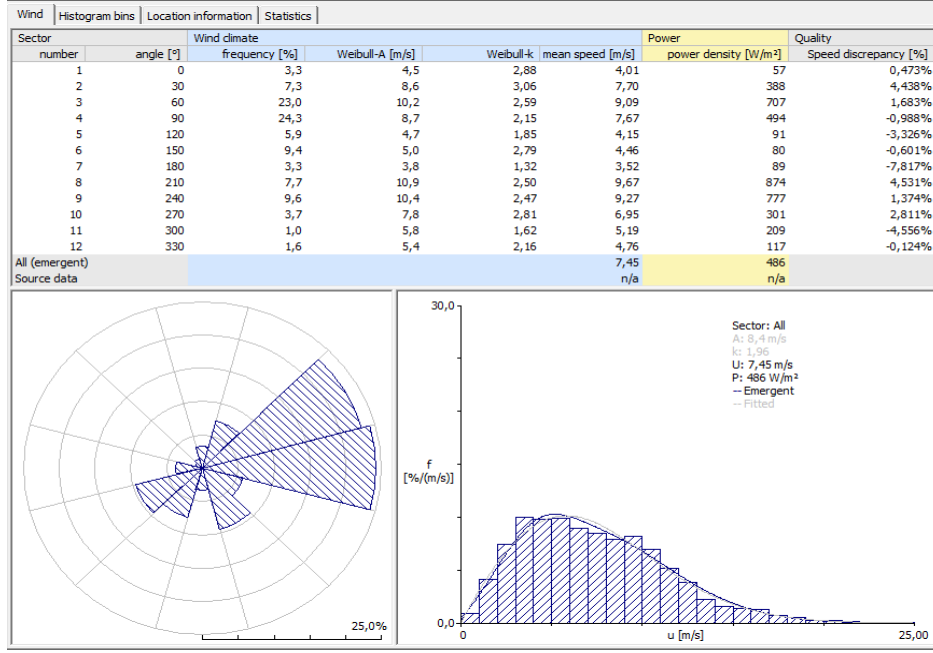
İstasyon	Rüzgar Hızı (m/s)	Güç Yoğunluğu (W/m ²)	100m Yükseklikteki Hız (m/s)	Eğitim ve Atış Sahaları	Askeri Yasak Bölge	Kıta Sahaneliği	Santral İçin Uygunluk
Alanya	6.82	436	8.5	+	+	+	+
Bartın	6.61	346	8.75	+	+	+	+
Bodrum	6.26	286	7.3	+	+	-	-
Bozcaada	7.45	486	9.7	+	+	+	+
Çanakkale	6.39	307	8.3	-	-	+	-
Çeşme	7.02	403	9.15	+	-	-	-
Datça	7.84	701	7.84	+	+	-	-
Enez	6.14	339	7.9	+	+	+	+
Gökçeada	6.05	305	7.7	+	+	+	+
Azaplar	6.73	326	8.66	-	-	+	-
Urla	6.77	313	8.95	-	-	+	-

Deniz üstü rüzgar santrali kurulumu sırasında en çok dikkat edilen özellik bölgedeki yıllık ortalama rüzgar hızıdır. Bu 5 bölge içerisinde Bozcaada yıllık ortalama 9.7 m/s rüzgar hızı ile en yüksek değere sahiptir ve en ona en yakın değere sahip olan Bartın ile arasında 1 m/s gibi büyük bir fark vardır. Dolayısıyla bu çalışmada deniz üstü rüzgar santrali kurulacak bölge olarak Bozcaada seçilmiştir.

5.3 Bozcaada Deniz Üstü Rüzgar Santrali Analizi

Bozcaada, Çanakkale Boğazı'nın 12 mil güneyinde, Ege Denizi'nin kuzey doğusunda yer alan, Türkiye'nin en büyük 3.adasıdır. Adanın batısında 2000 yılından bu yana aktif ve 10.2 MW kurulu güce sahip olan bir karasal rüzgar enerji santrali mevcuttur.

Tüm etkenler incelendikten sonra deniz üstü rüzgar santrali kurulumu için uygun bulunan Bozcaada Kuzey bölümünün, istasyon yüksekliğindeki WAsP analizi sonucunda yıllık ortalama rüzgar hızı 7.45 m/s, güç yoğunluğu 486 W/m² ve hakim rüzgar yönü kuzey doğu olarak bulunmuştur (Şekil 5.14). Daha sonra (5.1) denklemi vasıtasıyla 100 metre yükseklikteki rüzgar hızı 9.7 m/s olarak tekrar hesaplanmıştır.



Şekil 5.14 Bozcaada WAsP Analizi

5.3.1 Rüzgar Gücü Hesabı, Türbin Seçimi ve Yerleşimi

Bir bölgeye ait rüzgar gücü hesabının nasıl yapıldığı 3.bölümde detaylı şekilde anlatılmıştı. Buna göre (3.14) eşitliğinden yararlanılarak Bozcaada'nın rüzgar gücü hesaplanır.

$$P = 0.5 C_p \rho A V^3$$

C_p : Güç faktörü

ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

A : Türbin süpürme alanı (m^2)

V : Ortalama rüzgar hızı (m/s)

Türbin süpürme alanı hesabı yapılırken ise (5.2)'den yararlanılır.

$$A = \pi \frac{D^2}{4} \quad (5.2)$$

D , rotor çapı 130 metre alındı ve (5.2)'de yerine konulduğunda A değeri 13273 m^2 olarak hesaplandı. (3.14) denkleminde güç faktörü, rüzgar santralleri için ortalama 0.4 değerine sahiptir [7]. Hava yoğunluğu ise termodinamik tablolar yardımıyla bulunur. Bozcaada yıllık sıcaklık ortalaması 15.5°C olduğundan bu sıcaklığa denk gelen hava

yoğunluğu, termodinamik tablolardan 1.22 kg/m^3 olarak bulundu. Daha önce yapılan hesaplamalarla yıllık ortalama rüzgar hızı 9.7 m/s olduğu bulunmuştu. Tüm bu değerler denklemde yerine yazıldığında rüzgar gücü $P=2.96 \text{ MW}$ olarak hesaplanmıştır.

Bozcaada rüzgar profili ve hesaplanan güç değeri göz önünde bulundurularak santralde, Siemens SWT-3.3 model deniz üstü rüzgar türbini kullanılmasına karar verilmiştir. Çizelge 5.3'te türbine ait özellikler verilmiştir.

Çizelge 5.3 SWT-3.3 Türbin Özellikleri (Siemens Türbin Kataloğu)

Model	Siemens SWT-3.3
Kapasite	3300 kW
Göbek Yüksekliği	95 m
Rotor Çapı	130 m
Rotor Tipi	Upwind
Rotor Hızı	12.2 devir/dk
Dönüş Yönü	Saat yönünde
Kanat Sayısı	3
Süpürme Alanı	13273 m^2
Başlama Hızı	3 m/s
Kesme Hızı	25 m/s
Nominal Hız	12 m/s

Deniz üstü rüzgar santrali temel yapısının uzun yıllar boyunca doğal afetlere, büyük dalgalara ve akıntılara karşı dayanıklı olması gerekir. Ayrıca bölgenin deniz derinliği ve deniz taban yapısı da temel seçilirken dikkat edilecek hususlardır. Hidrografi ve Oşinografi Daire Başkanlığı'nın yayınladığı haritaya göre Bozcaada açıklarında deniz derinliği 30 metreye kadar ulaşmakta ve bazı bölgelerde kayalıklar görülmektedir. Bu veriler doğrultusunda 4.1.2 numaralı başlıkta bahsedilen temel yapılarına göre Bozcaada için uygun olan temel, üç ayaklı (tripod) temel yapısı olarak seçilmiştir. 30 metre derinliklerde kullanıma uygun olan bu temel yapısının konstrüksiyon güvenliği de çok yüksektir.

Türbin ve temel seçimi yapıldıktan sonra deniz üstü rüzgar santralleri için en önemli bölüm olan türbin yerleşimine başlanmıştır. Belirli bir alana uluslararası standartlar

çerçevesinde en fazla sayıda rüzgar türbini dikmek, o santralin kurulu gücünü ve dolayısıyla yıllık elektrik üretimini arttırmak anlamına gelir. Bozcaada'nın kuzey kıyılarında kayalıklar mevcut olduğundan türbin yerleşiminin bazı bölgelerde kıydan yaklaşık 1.5 km sonra başlaması uygundur. Kuzeyde Tavşan Adası kayalıklarına kadar, doğuda Çanakkale kıyı liman gemiciliğini etkilemeyecek şekilde, batıda ise Çanakkale Boğazı'na geçiş yapacak gemilerle yasal zorunluluğu olan 1 deniz mili mesafesini koruyacak şekilde türbin yerleşimi yapılır [23]. Bu yerleşimde uluslararası standartlara göre türbinler arasında yatay eksende 5D, dikey eksende 10D mesafe bırakılmalıdır ve türbinler hakim rüzgar yönü olan kuzey doğuya dönük şekilde yerleştirilmelidir [7]. Tüm bu koşullar sağlandığında bölgeye her biri 3.3 MW gücünde 91 adet rüzgar türbini yerleştirilir ve bu toplamda 66 km² alan kaplar. Böylece 300.3 MW kurulu güce sahip olacak santralin, türbin yerleşimi yapılacak bölgeye ait görseli Şekil 5.15'te ve yapılan türbin yerleşimi Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.15 Bozcaada'da Türbin Yerleşimi Yapılacak Alan



Şekil 5.16 Bozcaada Türbin Yerleşimi

5.3.2 Ekonomik Analiz

Bir enerji santrali fizibilite çalışmasında teknik analiz kadar ekonomik analiz de önemli yer tutmaktadır. Bir deniz üstü rüzgar santrali yatırımının, kendi maliyetini çıkartabilmesi ve karlı olabilmesi için bölgedeki türbinlerle üretilecek birim elektriğin belirli bir maliyetin altında olması gerekmektedir. Bu maliyet, belirlenen bir zamanda hesaplanan yıllık giderlerin, yıllık elektrik üretimine oranıyla bulunur.

$$g = \frac{C_k + C_m}{E} \quad (5.3)$$

g =Birim Enerji Maliyeti

C_k : Yıllık Sermaye Masrafları

C_m : Yıllık İşletme ve Bakım Masrafları

E = Yıllık Elektrik Enerjisi Üretimi

Bir santralin ekonomik yatırımı faiz ve eskalasyon değerlerinden etkilenir. Bundan dolayı, daha doğru bir elektrik maliyeti, santralin inşaatı ve ömrü boyunca yapılacak bütün masrafların belirli bir tarihe getirilmiş toplamalarının, santralin ömrü boyunca üreteceği elektrik enerjisine bölünmesiyle hesaplanır. Bu metoda bir değere getirilmiş maliyetler yöntemi ya da levelized costs yöntemi adı verilir [24]. Bu yöntemle göre birim enerji maliyeti (5.4) ile hesaplanır. Bu denklemde r iskonto oranını ve t yılı temsil etmektedir.

$$g = \frac{\sum_{t=0}^n [C_k(t) + C_m(t)](1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^n E(t)(1+r)^{-t}} \quad (5.4)$$

Deniz üstü rüzgar santrallerinin tesis maliyeti; kıyıdan uzaklık, deniz taban yapısı ve deniz derinliğine göre değişkenlik göstermektedir. Bozcaada'ya kurulacak olan örnek santralin kıyıya olan uzaklığı 0-10 km arasında ve deniz derinlik ortalaması 20-30 metre arasında bulunduğundan birim tesis maliyeti 2200 \$/kW olarak seçilmiştir [25]. 300.3 MW kurulu güce sahip olacak deniz üstü rüzgar santralinin birim elektrik maliyet hesabı için bir bilgisayar programı yazılmıştır. Yapılan hesaplamalarda kullanılan değerler Çizelge 5.4'te verilmiştir. Kabul edilen bazı değerler literatürlerde verilen aralıklara göre seçilmiştir [25], [26], [27].

Çizelge 5.4 Birim Maliyet Hesabında Kullanılan Bazı Değerler

Birim Tesis Maliyeti	2200 \$/kWh
Santral Ömrü	30 yıl
Santralin İnşaat Süresi	3 Yıl
Birim İşletme ve Bakım Maliyeti	72 \$/kW-yıl
Faiz Oranı	%7
İskonto Oranı	%9
Eskalasyon Oranı	%6

İnşaat süresi boyunca yatırımın dağılımı 1.yıl %30, 2.yıl %40 ve 3.yıl %30 olarak kabul edilmiştir.

5.3.2.1 Yıllık Sermaye Masrafları

20-30 metre deniz derinliğine sahip ve kıyıdan 0-10 km uzaklıkta olan deniz üstü rüzgar santralleri için tesis bedeli (C_s) 2200 \$/kW olarak kabul edilmiştir [25]. Literatüre göre bu maliyetin dağılımı Çizelge 5.5'de gösterilmiştir [28].

Çizelge 5.5 Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi Yatırım Maliyeti Dağılımı

	Yüzde (%)	Birim Maliyet (\$/kW)
Türbin + Kule	55	1210
Trafo + Kablo	15	330
Temeller	20	440
Projelendirme ve Mühendislik	6	132
Çevre Analizi	3	66
Diğer	1	22
Toplam	100	2200

Buna göre santralin ilk yatırım tutarı (I_d) denklem 5.5 ile hesaplanır.

$$I_d = C_s \times N_e \quad (5.5)$$

$$I_d = 2200 \times 300.3 \times 10^3 = 660.66 \text{ Milyon \$}$$

Santralin devreye alınma tarihindeki gerçek toplam yatırım tutarının bulunabilmesi için faiz ve eskalasyon değerlerinin de hesabı katılması gerekmektedir. İnşaat periyodu boyunca yapılacak yatırım masraflarının 3 yıla yayılacak olmasından dolayı, yapılan gerçek toplam masraflar eskalasyon etkisiyle direkt inşaat bedelinden daha yüksek

olacaktır. Buna göre her yıla ait eskalasyon yükleri ve eskale edilmiş masraflar Çizelge 5.6'da hesaplanmıştır.

Çizelge 5.6 İnşaat Süresince Eskalasyon Hesabı

e=%6

İnşaat Periyodu	Harcama Dağılımı (%)	Eskalasyonsuz Harcama Planı (M\$)	Eskale Edilmiş Harcama Planı (M\$)	Eskalasyon Yüğü (M\$)
1	30	198.20	210.09	11.89
2	40	264.26	296.93	32.66
3	30	198.20	236.06	37.86
TOPLAM		660.66	743.07	82.41

İnşaat periyodu boyunca yapılan yıllık harcamalar için kredi çekilirse, inşaat süresi sonunda ek olarak bir faiz yükünün de geri ödenmesi gerekmektedir [24]. Çizelge 5.7'de bu yüklerinin yıllara göre dağılımı ve toplam yatırım maliyeti gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 İnşaat Süresince Faiz Hesabı

i=%7

İnşaat Periyodu	Eskale Edilmiş Harcama (M\$)	Eskale Edilmiş Harcama + Faiz (M\$)	Faiz Yüğü (M\$)
1	210.09	257.37	47.28
2	296.93	339.95	43.02
3	236.06	252.58	16.52
TOPLAM	743.07	849.9	106.83

Çizelge 5.7'de görüldüğü gibi, ilk yatırım maliyetine ek olarak 82.41 Milyon \$ eskalasyon yüğü ve 106.83 Milyon \$ faiz yüğü gelmiştir. Buna göre inşaat sonundaki gerçek toplam sermaye masrafı 849.9 Milyon \$ olacaktır.

Elektrik üretimine başladığı tarihte P değerine sahip olan bir yatırımın, ömrü boyunca sabit yıllık sermaye masrafı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$C_k = P \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5.6)$$

Denklem 5.6'da P yerine gerçek toplam sermaye masrafı 849.9 Milyon \$, i ve n yerine de Çizelge 5.4'te verilen değerler koyulduğunda santral ömrü boyunca sabit yıllık sermaye masrafı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_k = 849.49 \frac{0.07(1+0.07)^{30}}{(1+0.07)^{30} - 1} = 68.49 \text{ Milyon \$ / yıl}$$

Santralin ömrü boyunca sabit sermaye masrafı olan 68.49 Milyon \$ tutarının ana para ve faiz bölümü ile yıllık ödemelerin üretime geçildiği tarihe göre (şimdiki değer) indirgenmiş değerleri Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 Bir Değere Getirilmiş Maliyetler Yöntemi ile Sermaye Maliyeti Hesabı

İşletme Periyodu (t)	Borç (M\$)	Yıllık Faiz Ödemesi (M\$)	Yıllık Ana Para Ödemesi (M\$)	Yıllık Sermaye Masrafı M\$ (C _k)	(1 + r) ^t r=%9	Şimdiki Değer (M\$)
1	849.9	59.5	9	68.49	0.917	62.84
2	840.9	58.9	9.6	68.49	0.842	57.65
3	831.3	58.2	10.3	68.49	0.772	52.89
4	821	57.5	11.0	68.49	0.708	48.52
5	810	56.7	11.8	68.49	0.650	44.51
6	798.2	55.9	12.6	68.49	0.596	40.84
7	785.5	55	13.5	68.49	0.547	37.47
8	772	54	14.4	68.49	0.502	34.37
9	757.6	53	15.5	68.49	0.460	31.53
10	742.1	51.9	16.5	68.49	0.422	28.93
11	725.6	50.8	17.7	68.49	0.388	26.54
12	707.9	49.6	18.9	68.49	0.356	24.35
13	689	48.2	20.3	68.49	0.326	22.34
14	668.	46.8	21.7	68.49	0.299	20.50
15	647	45.3	23.2	68.49	0.275	18.80
16	623.8	43.7	24.8	68.49	0.252	17.25
17	599	41.9	26.6	68.49	0.231	15.83
18	572.4	40.1	28.4	68.49	0.212	14.52
19	544	38.1	30.4	68.49	0.194	13.32
20	513.6	36	32.5	68.49	0.178	12.22
21	481	33.7	34.8	68.49	0.164	11.21
22	446.2	31.2	37.3	68.49	0.150	10.29
23	409	28.6	39.9	68.49	0.138	9.44
24	369.1	25.8	42.7	68.49	0.126	8.66
25	326.5	22.9	45.6	68.49	0.116	7.94
26	280.8	19.7	48.8	68.49	0.106	7.29
27	232	16.2	52.3	68.49	0.098	6.69
28	179.7	12.6	55.9	68.49	0.090	6.13
29	123.8	8.7	59.8	68.49	0.082	5.63
30	64	4.5	64	68.49	0.075	5.16
TOPLAM	0	1204.8	849.9	-	-	703.65

Çizelge 5.8'den de görüleceği gibi santralin ekonomik ömrü boyunca ödenecek sabit yıllık sermaye masraflarının üretime geçildiği tarihe göre değeri (şimdiki değer) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sum_{t=1}^{30} C_k(t)(1+r)^{-t} = 68.49 \times (1+0.09)^{-t} = 703.65 \text{ Milyon \$}$$

Daha sonra deniz üstü rüzgar santralinde yıllık ortalama elektrik üretimi (5.7)'ye göre bulunur ve ekonomik ömür boyunca üretilen toplam elektrik enerjisi hesaplanır.

$$E=8760 \times N_e \times C_p \quad (5.7)$$

$$E= 8760 \times 300.3 \times 10^3 \times 0.4 =105.225 \times 10^7 \text{ kWh/yıl}$$

$$\sum_{t=1}^{30} E(t)(1+r)^{-t} = 105.225 \times 10^7 (1+0.09)^{-t} = 10.81 \times 10^9 \text{ kWh/yıl}$$

Birim elektrik enerjisi başına sermaye maliyeti, bir değere getirilmiş maliyetler yöntemine göre aşağıda hesaplanmıştır.

$$g_k = \frac{703.65 \times 10^8}{10.81 \times 10^9} = 6.51 \text{ \$cent/kWh}$$

5.3.2.2 Yıllık İşletme ve Bakım (O&M) Masrafları

İşletme ve bakım giderleri, santralin işletme süresince tüm işçilik, malzeme, yer kirası, tamir ve bakım, sigorta v.b. harcamaları içermektedir. Deniz üstü rüzgar santrallerinde işletme ve bakım maliyeti ortalama 72 \$/kW-yıl olarak kabul edilir [27]. Bu masrafların; %31'i bakım ve yedek parça, %21'i işletme, %18'i yer kirası, %13'ü sigorta ve %17'si diğer masraflardır [29]. Buna göre santralin yıllık işletme ve bakım gideri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_m=72 \times 300.3 \times 10^3=21.622 \text{ Milyon \$ /yıl}$$

Hesaplanan bu yıllık işletme ve bakım giderlerinin üretime geçildiği tarihe göre değeri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9 Bir Değere Getirilmiş Maliyetler Yöntemi ile O&M Maliyeti Hesabı

İşletme Periyodu (t)	Yıllık O&M Masrafı M\$ (C _m)	(1 + r) ^t r=%9	Şimdiki Değer (M\$)
1	21.622	0.917	19.84
2	21.622	0.842	18.20
3	21.622	0.772	16.70
4	21.622	0.708	15.32
5	21.622	0.65	14.05
6	21.622	0.596	12.89
7	21.622	0.547	11.83
8	21.622	0.502	10.85
9	21.622	0.46	9.96
10	21.622	0.422	9.13
11	21.622	0.388	8.38
12	21.622	0.356	7.69
13	21.622	0.326	7.05
14	21.622	0.299	6.47
15	21.622	0.275	5.94
16	21.622	0.252	5.45
17	21.622	0.231	5
18	21.622	0.212	4.58
19	21.622	0.194	4.21
20	21.622	0.178	3.86
21	21.622	0.164	3.54
22	21.622	0.15	3.25
23	21.622	0.138	2.98
24	21.622	0.126	2.73
25	21.622	0.116	2.51
26	21.622	0.106	2.3
27	21.622	0.098	2.11
28	21.622	0.09	1.94
29	21.622	0.082	1.78
30	21.622	0.075	1.63
TOPLAM	-	-	222.13

Çizelge 5.9'da görüldüğü gibi santralin ekonomik ömrü boyunca işletme ve bakım masraflarının üretime geçildiği tarihe göre değeri 222.13 Milyon \$'dır. Buna göre birim elektrik enerjisi başına O&M maliyeti aşağıda hesaplanmıştır.

$$g_m = \frac{222.13 \times 10^8}{10.81 \times 10^9} = 2.05 \text{ \$cent/kWh}$$

5.3.2.3 Birim Enerji Maliyet

Aşağıda bir değere getirilmiş maliyetler metoduna göre deniz üstü rüzgar santralinden elde edilen elektriğin birim maliyeti hesaplanmıştır.

$$g = g_k + g_m = 6.51 + 2.05 = 8.56 \text{ \$cent/kWh}$$

5.3.2.4 Yerli İmalat Teşviki ve Karbon Emisyon Geliri

Ülkemizde son yıllarda yenilenebilir enerjinin yaygınlaşması konusunda devletin ekonomik olarak büyük desteği söz konusudur. En önemli devlet teşviki; 2010 yılında kabul edilen 6094 sayılı Yenilenebilir Enerji Kanunu gereği santral ekipmanlarının yerli imalat ürünü olması durumunda kazanılan ek gelirlerdir. Çizelge 5.10'da rüzgar santrali türbin ve parçalarının yerli imalatına uygulanan devlet teşvikleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.10 Yerli İmalat Teşvikleri

Kanat	0.8 \$cent/kWh
Jeneratör ve Güç Elektroniği	1 \$cent/kWh
Türbin Kulesi	0.6 \$cent/kWh
Rotor ve Navella Mekanik Aksam Tasarımları	1.3 \$cent/kWh

Çizelge 5.10'da belirtilen türbin kısımlarından 2017 yılı itibariyle Türkiye'de imalatı yapılabilen sadece kanat ve türbin kulesidir. Bu sebeple imalat teşvikinden elde edebileceğimiz yıllık kazanç aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$g_y = 0.8 + 0.6 = 1.4 \text{ \$cent/kWh}$$

Türkiye 2009 yılında Kyoto Protokolü'ne imza attıktan sonra, karbon ayak izi konusu çok ciddi gündem oluşturmaya başlamıştır. Her tesisin havaya saldığı yıllık karbon miktarı devlet tarafından zorunlu denetlemeye alınmıştır. Yenilenebilir enerji santralleri, termik santraller gibi çevreye CO₂ salınımı yapmadığından dolayı devletten "Karbon Emisyon Geliri" adı altında ek bir gelir almaktadır. Bir kömür yakıtlı termik santral kWh başına ortalama 1100 g civarında CO₂ salmaktadır [30]. Avrupa'da 2016 yılı ortalamasına göre 1 ton CO₂ 5.8 \$ değerindedir [31]. Buna göre santralin kWh başına elde edeceği karbon emisyon geliri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$g_c = 1100 \text{ g/kWh} \times 5.8 \text{ \$ /ton}$$

$$g_c = 0.64 \text{ \$cent/kWh}$$

5.3.2.5 Birim Enerji Geliri, Net Kazanç ve Geri Ödeme Süresi

Yenilenebilir enerji teşviklerinden bir diğeri ise yüksek fiyat alım garantisidir. Devlet, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriği diğer kaynaklardan üretilen elektriğe göre daha yüksek fiyattan alım garantisi sunmuştur. 6094 sayılı Yenilenebilir Enerji Kanunu gereği kaynaklara göre uygulanan birim elektrik enerjisi alım fiyatları Çizelge 5.11'de gösterilmiştir [32].

Çizelge 5.11 Kaynaklara Göre Elektrik Birim Enerjisi Alım Garantisi

Yenilenebilir Enerji Tesis Tipi	Uygulanacak Fiyatlar (\$cent/kWh)
Hidroelektrik Santral	7.3
Rüzgar Santrali (Kara)	7.3
Jeotermal Santral	10.5
Biyokütle	13.3
Güneş Enerjisi Santrali	13.3

Çizelge 5.11'den de görülebileceği gibi Türkiye'de henüz deniz üstü rüzgar santralleri ile ilgili kanuni bir düzenleme yoktur. Bunun başlıca sebebi ülkemizde halen kurulmuş veya proje aşamasında olan bir deniz üstü rüzgar santrali bulunmamasıdır. Fakat Çizelge 5.11'de verilenler incelendiğinde, deniz üstü rüzgar santralleri için uygulanabilecek alım garantisi tahmini yapılabilir.

Kanunda uygulanan fiyatlar, birim tesis maliyeti daha az olan santraller için düşük, daha fazla olan santraller için ise yüksektir. Birim tesis maliyeti 1000-1200 \$/kW olan karasal rüzgar santralleri için alım fiyatı 7.3 \$cent/kWh, 1600-1900 \$/kW olan jeotermal santraller için 10.5 \$cent/kWh ve 2000-2500 \$/kW olan güneş santralleri için ise alım fiyatı 13.3 \$cent/kWh'tir [32], [33]. Bu çalışmadaki deniz üstü rüzgar santralinin birim tesis maliyeti Bölüm 5.3.2.1'de 2200 \$/kW olarak alınmıştı. Buna göre birim tesis maliyeti, güneş enerjisi santrallerinin maliyet aralığında bulunduğundan fiyat alım garantisi olarak da 13.3 \$cent/kWh değerinin alınması doğru bir yaklaşım olacaktır. Hatta deniz üstü rüzgar santrallerinin işletme ve bakım masraflarının güneş santrallerine göre çok daha fazla olmasından dolayı bu alım garantisinin daha üst seviyelere çekilmesi bile beklenebilir. Fakat bu çalışmada deniz üstü rüzgar santralleri alım fiyatı için, 2010 yılında yürürlüğe giren 6094 sayılı kanunda güneş enerji santrallerine uygulanan 13.3 \$cent/kWh değeri kabul edilmiştir.

Bunun yanı sıra birim enerji gelirini hesaplerken, daha önce Bölüm 5.3.2.4'te hesaplanan yerli imalat teşviki (g_y) ve karbon emisyon gelirini (g_c) kabul edilen alım fiyatı üzerine ekleyerek bulabiliriz. Buna göre Bozcaada'da kurulacak olan deniz üstü rüzgar santralinin birim enerji geliri;

$$g_T = g_e + g_y + g_c \quad (5.8)$$

$$g_T = 13.3 + 1.4 + 0.64 = 15.34 \text{ \$cent/kWh}$$

olarak hesaplanır.

Bölüm 5.3.2'de yapılan tüm gelir ve gider hesaplamaları sonucunda Bozcaada'ya kurulacak deniz üstü rüzgar santralinin birim enerjisinden elde edilecek net kazanç aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

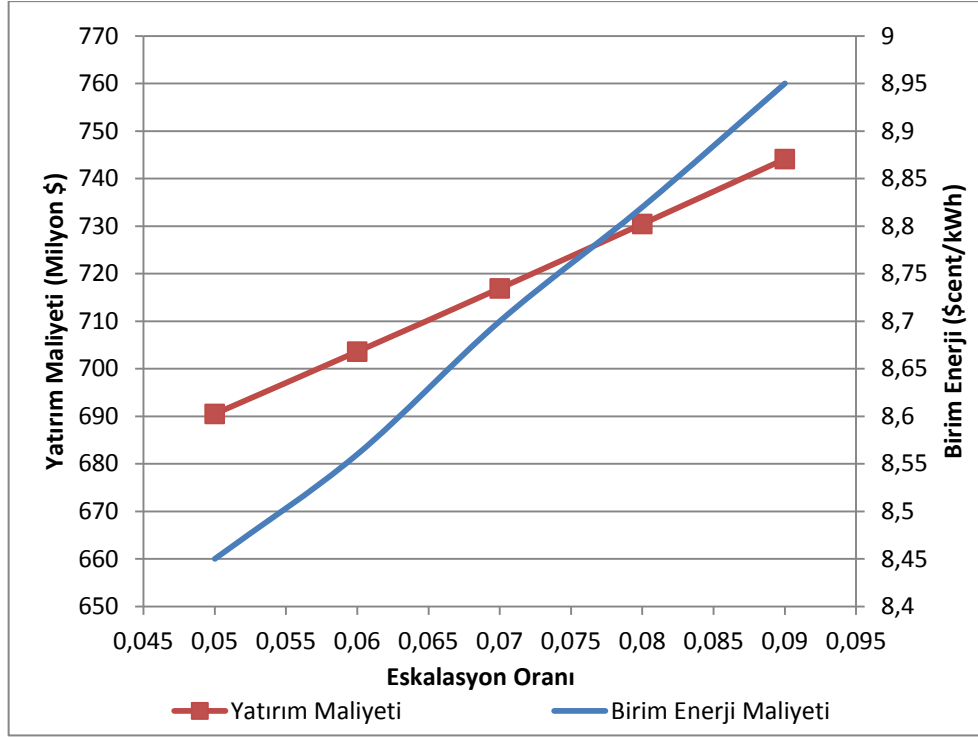
$$g_T - g = 15.34 - 8.56 = 6.78 \text{ \$cent/kWh}$$

Enerji santrali analizinin önemli noktalarından bir diğeri de yatırımın kendini geri ödeme süresidir. Elde edilen bu veri ile santral yatırımının kaç yıl sonra tüm maliyetini çıkaracağı ve bu verinin ekonomik ömür ile karşılaştırılarak yatırımın mantıklı olup olmadığı anlaşılabilir. Tüm hesaplanan değerler sonucunda santral yatırımının kendini geri ödeme süresi; yatırımın toplam şimdiki değerinin bir yılda elde edilecek net kazanca oranı ile hesaplanır.

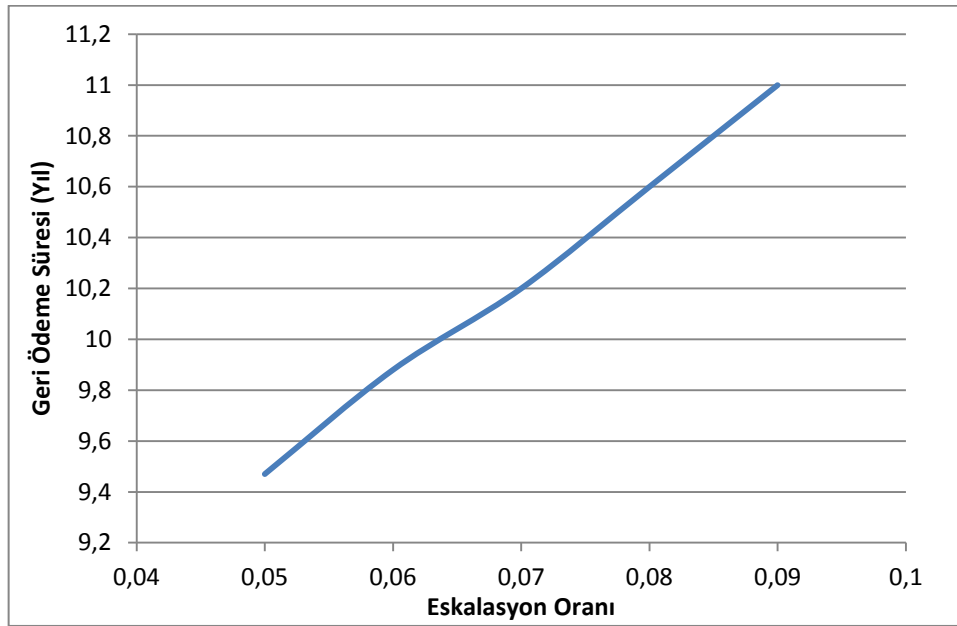
$$G.Ö.S. = \frac{703.65 \text{ Milyon \$}}{6.78 \frac{\text{\$cent}}{\text{kWh}} \times 10.81 \times 10^9 \frac{\text{kWh}}{\text{yıl}}} = 9.9 \text{ yıl}$$

5.3.2.6 Eskalasyon, Faiz ve Kurulu Gücün Ekonomik Analize Etkisi

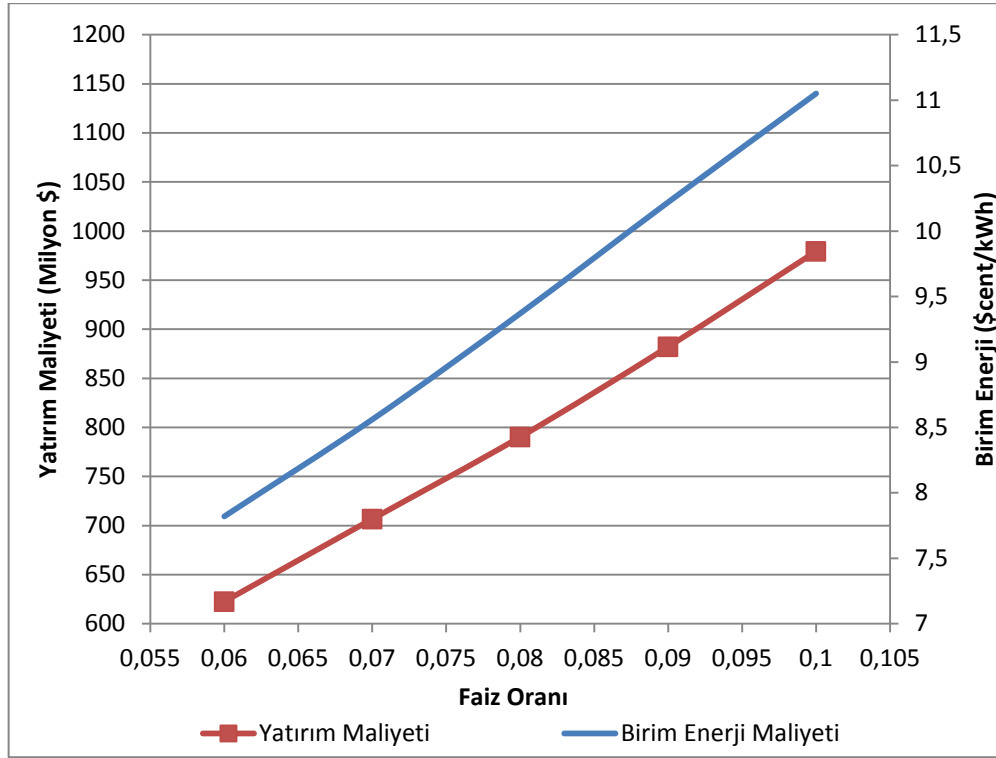
Ekonomik analiz bölümünde yapılan tüm hesaplamalarda Çizelge 5.4'de seçilen eskalasyon ve faiz oranları kullanılmıştır. Fakat bu değerler zamana veya kurumlara bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bu değerlerden birinin değişmesi durumunda yatırım maliyetine, birim enerji maliyetine ve geri ödeme süresine olan etkileri Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de gösterilmiştir.



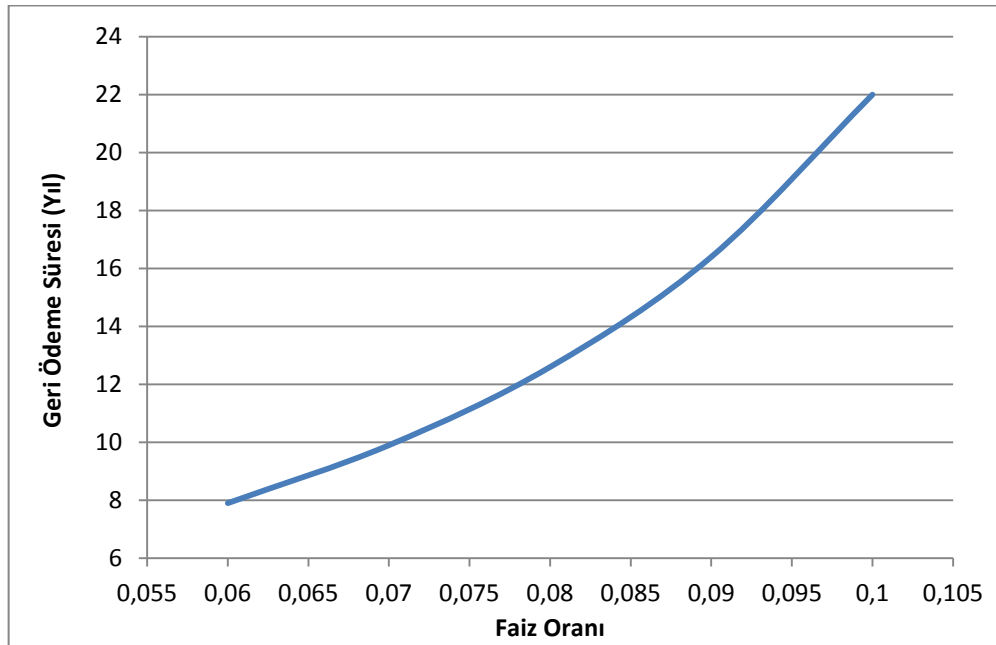
Şekil 5.17 Eskalasyon Oranının Yatırım Maliyeti ve Birim Enerji ile Değişimi
($i=7\%$, $N_e=300.3$ MW)



Şekil 5.18 Eskalasyon Oranının Geri Ödeme Süresi ile Değişimi
($i=7\%$, $N_e=300.3$ MW)

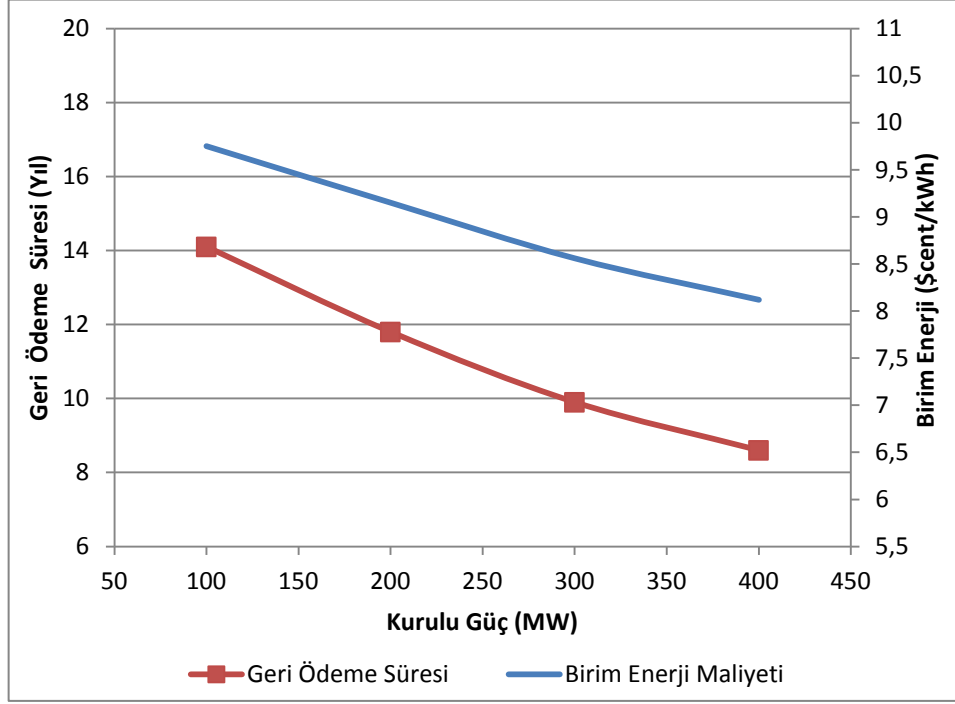


Şekil 5.19 Faiz Oranının Yatırım Maliyeti ve Birim Enerji ile Değişimi
($e=6\%$, $N_e=300.3$ MW)



Şekil 5.20 Faiz Oranının Geri Ödeme Süresi ile Değişimi
($e=6\%$, $N_e=300.3$ MW)

Enerji santrallerinde kurulu güç arttıkça elektrik enerjisinin birim maliyeti ve dolayısıyla geri ödeme süresi azalır. Bu çalışmadaki deniz üstü rüzgar santrali de aynı karakteristik duruma sahiptir. Kurulu gücün birim enerji maliyetine ve geri ödeme süresine göre değişimi Şekil 5.21'de gösterilmiştir.



Şekil 5.21 Kurulu Gücün Birim Enerji ve Geri Ödeme Süresi ile Değişimi
($i=7\%$, $e=6\%$)

Şekil 5.17'ye göre eskalasyon oranının $0.5 < e < 0.9$ aralığı için birim enerji maliyeti $8.45 < g < 8.95$ \$cent/kWh arasında değişmektedir. Şekil 5.19'da ise faiz oranının $0.06 < i < 0.1$ aralığı için birim enerji maliyetinin $7.82 < g < 11.05$ \$cent/kWh arasında değiştiği görülmektedir. Üretim maliyetinin kurulu güce göre değişimi ise Şekil 5.21'de, $100 < N_e < 400$ MW aralığı için $9.75 > g > 8.12$ arasında olduğu gösterilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde global elektrik üretiminin çok büyük bir kısmı fosil yakıtlar ile sağlanmaktadır. Fakat bu yakıtların çok da uzak olmayan bir gelecekte tükenecek olması tüm dünyayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Hidroelektrik ve güneş enerjisiyle birlikte rüzgar, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en çok yatırım yapılan kaynaklardan biridir. Özellikle Kuzey Avrupa ülkeleri coğrafi koşulların getirdiği güçlü rüzgar avantajı ile rüzgar enerjisinde büyük ilerleme kaydetmişlerdir. Gelişen türbin teknolojisi ve deniz üstü rüzgarlarının karaya göre daha güçlü ve sabit bir rejime sahip olması da rüzgar santrallerinin deniz üstüne kurulmaya başlamasını sağlamıştır. Henüz sadece 30 sene gibi kısa bir geçmişi olan deniz üstü rüzgar santrallerinin önümüzdeki yıllarda global elektrik üretiminde önemli bir pay sahibi olacağı öngörülmektedir.

Bu çalışmada, başlangıç olarak dünyadaki ve Türkiye'deki güncel enerji durumundan bahsedilmiştir. Rüzgar enerjisinin tanıtımı yapılmış, ana etmenleri belirtilmiş ve güncel durumu ortaya konmuştur. Daha sonra bir deniz üstü rüzgar santrali kurulurken dikkat edilmesi gereken temel faktörler belirtilmiş ve Türkiye için fizibilite çalışmasına başlanmıştır.

Bu fizibilite çalışmasında, Türkiye'deki 43 farklı bölgede bulunan deniz otomatik gözlem istasyonlarına ait son bir yıldaki saatlik ortalama hız ve yön verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiş ve bölgelerin rüzgar analizleri WASP programı ile yapılmıştır. Analizler sonucunda her bölgeye ait yıllık ortalama rüzgar hızı, hakim rüzgar yönü ve güç yoğunluğu verilerine ulaşılmıştır. Daha sonra bu bölgeler deniz trafiği, kıta sahanlığı, eğitim-atış sahaları ve askeri yasak bölgeler açısından da değerlendirilmiştir.

Bu incelemeler sonucunda, Türkiye'de deniz üstü rüzgar santrali kurulumu açısından en uygun bölge Bozcaada olarak belirlenmiştir. Yıllık ortalama rüzgar hızı 9.7 m/s olan Bozcaada'nın teknik ve coğrafi koşulları göz önüne alınarak yapılan analizde, kurulacak bir deniz üstü rüzgar santralının 300.3 MW kurulu güce sahip olacağı bulunmuştur. Daha sonra yapılan ekonomik analizde, santral yatırımı ve O&M masrafları bir değere getirilmiş maliyetler yöntemi ile hesaplanmış ve santralin birim enerji maliyeti 8.56 \$cent/kWh olarak bulunmuştur. 2017 yılı itibarıyla Türkiye'de deniz üstü rüzgar santralleri ile ilgili bir mevzuat bulunmamasından dolayı elektrik alım fiyatı güneş enerjisi santrallerine sağlanan 13.3 \$cent/kWh fiyatı üzerinden kabul edilmiştir. Buna yerli imalat teşviği ve karbon emisyon geliri de eklendiğinde birim enerji geliri 15.34 \$cent/kWh ve santralin geri ödeme süresi 9.9 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre bir deniz üstü rüzgar santraline uygulanacak alım fiyatının 13.3 \$cent/kWh olması yatırımın karlı olacağını göstermektedir. Böylece Bozcaada'nın bir deniz üstü rüzgar santrali için hem teknik hem de ekonomik anlamda uygun olduğu görülmektedir.

Türkiye'de halihazırda bir deniz üstü rüzgar santrali bulunmamaktadır. Fakat üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemiz, hem coğrafi açıdan hem de bu çalışmadan anlaşılabileceği gibi teknik açıdan deniz üstü rüzgar santrali kurulumuna uygundur. Sadece Bozcaada değil, Ege Denizi'nin diğer bölgeleri, Akdeniz ve Karadeniz'de de bu potansiyele sahip alanların mevcut olduğu çalışmada belirtilmiştir. Bu potansiyelden faydalanılabilmesi için detaylı analizlerin yapılması ve devlet teşviklerinin çıkartılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Şahin, G., (2011). Rüzgar Santrallerinin Önündeki Teknik ve Ekonomik Kısıtlar, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] Koç, E. ve Şenel, M. C., (2013). "Dünyada ve Türkiye'de Enerji Durumu-Genel Değerlendirme", Mühendis ve Makina, 54(639): 34-44.
- [3] British Petrol (BP), (2016). Statistical Review of World Energy 2016, Yayın No: 65, Birleşik Krallık.
- [4] Güzel, B., (2012). Açık Deniz Rüzgar Enerjisi, Fizibilite Adımları ile Bozcaada ve Gökçeada Örnek Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Johnson, G. L., (2006). Wind Energy Systems, Second Edition, Kansas State University, Manhattan.
- [6] Manwell, J.F., McGowan, J.G. ve Rogers A.L., (2009). Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Second Edition, Wiley Publication, Chichester.
- [7] Gasch, R. ve Jochen, T., (2012). Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation, Second Edition, Springer Publication, Berlin.
- [8] Heier, S., (2014). Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems, Third Edition, Wiley Publication, Chichester.
- [9] Gloval Wind Energy Council (GWEC), (2016). Global Wind Statistics, Brüksel.
- [10] Şenel, M. C. ve Koç, E., (2015). "Dünyada ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme", Mühendis ve Makina, 56(663): 46-56.
- [11] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Rüzgar Enerjisi, www.enerji.gov.tr, 15 Nisan 2017.
- [12] Erich, H., (2013). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Second Edition, Springer Publication, Berlin.
- [13] Bianchi, F.D., Battista, H.D. ve Mantz, R.J., (2007). Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design, First Edition, Springer Publication, Berlin.
- [14] Hamamcioğlu, V., (2010). Rüzgar Enerjisi Kaynaklı Elektrik Üretiminin Teknik / Ekonomik Analizi ve Yöresel Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] The European Wind Energy Association (EWEA), (2013). Deep Water: The Next Step for Offshore Wind Energy, Brüksel.

- [16] Stiftelsen Det Norske Veritas (DNV), (2014). Design of Offshore Wind Turbine Structures, Oslo.
- [17] Carbon Trust, (2015). Floating Offshore Wind: Market and Technology Review, Birleşik Krallık.
- [18] T.C. Dışişleri Bakanlığı, Ege Sorunları, <http://www.mfa.gov.tr/baslica-ege-denizi-sorunlari.tr.mfa>, 16 Nisan 2017.
- [19] Lindgreen, F., Johansson, B., Malmlöf, T. ve Lindvall, F., (2013). "Siting Conflicts Between Wind Power and Military Aviation-Problems and Potential Solutions", Land Use Policy, 34: 104-111.
- [20] Van den Berg, G.P., (2006). The Sound of High Winds: The Effect of Atmosperhic Stability on Wind Turbine Sound and Microphone Noise, Doktora Tezi, Groningen Üniversitesi, Groningen.
- [21] Otlu, O., (2012). Deniz Üstü Rüzgar Enerji Santrallerinin Teknik ve Ekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı, (2016). Denizcilere İlan Yıllığı, İstanbul
- [23] Wawruch, R. ve Stupak, T., (2011). "Modelling of Safety Distance Ships", Route and Wind Farm", Archives of Transport, 23: 413-420.
- [24] Dağdaş, A., (2005). "Jeotermal Güç Santrallerinde Enerji Maliyeti", Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2: 84-94.
- [25] Yaşar, A., ve Şimşek, E., (2011). "Offshore Wind Farm Development in Euope and Its Comparison with Onshore Counterpart", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15: 905-915.
- [26] National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2015. Offshore Wind Technologies Market Report, Yayın No: WG14.CG, Virginia.
- [27] International Energy Agency-Renewable Energy Technology Deployment (IEA-RETD), 2012. Offshore Renewable Energy, Yayın No: 1849714703, New York.
- [28] European Energy Association (EWEA), (2015). The Economics of Wind Energy, Brüksel
- [29] National Renewable Energy Laboratory (NREL), (2015). Cost of Wind Energy Review, Yayın No:WE15.CA03, Denver.
- [30] Dincer, İ. ve Acar, C., (2015). "A Review on Clean Energy Solutions for Better Sustainability", International Journal of Energy Research, 39: 585-606
- [31] Barchart Financial Technology & Market Data, <http://www.barchartmarketdata.com>, 20 Mart 2017
- [32] T.C. Resmi Gazete, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, No:6094, 29.12.2010.
- [33] International Energy Agency (IEA), (2016). World Energy Investment Outlook, Yayın No: 612016221P1, Paris

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet Mert ÖZDİLİM
Doğum Tarihi ve Yeri : 05.02.1992, Yalova
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : m.ozdilim@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise		Şehit Osman Altinkuyu Anadolu Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2015	Ford Otosan Otomotiv A.Ş.	Makine Mühendisi