

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

**DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR ENERJİ SANTRALLARININ  
TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ**

**ONUR OTLU**

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

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. ŞÜKRÜ BEKDEMİR**

**İSTANBUL, 2012**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR ENERJİ SANTRALLARININ  
TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ**

Onur OTLU tarafından hazırlanan tez çalışması 20 Haziran 2012 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. Şükrü BEKDEMİR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Şükrü BEKDEMİR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Galip TEMİR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Yrd. Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

## ÖNSÖZ

---

Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi her sene artmakta, hem son kullanıcılar hem hükümetler fosil yakıtların yerine çevreye daha duyarlı ve sürdürülebilir enerji kaynaklarını tercih etme yoluna gitmektedir.

En büyük potansiyeli gösteren yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan rüzgar enerjisi dünya çapında büyük bir yükseliş göstermiş olup hemen her gelişmiş ülke enerji pastasında rüzgar enerjisine önemli bir pay vermeye başlamıştır.

Rüzgar enerjisi elektrik üretimi için genel olarak kara üzerinde kullanılmakla beraber elektrik üreten türbinleri sığ sulara hatta daha derin denizlere yerleştirmenin sunduğu çözümler ve verim açısından avantajları vardır. Bu çalışmada bu çözümler ve avantajlar teknik ve ekonomik açıdan incelenecektir.

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında yardımlarını sunan sayın hocam Doç. Dr. Şükrü BEKDEMİR'e, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca sayısız bilgiler aktaran Makina Mühendisliği Anabilim Dalı hocalarıma ve her zaman desteklerini sunan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 2012

Onur OTLU

## İÇİNDEKİLER

---

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	vii
KISALTMA LİSTESİ .....	viii
ŞEKİL LİSTESİ .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiv
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ .....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Hipotez.....	2
<b>BÖLÜM 2</b>	
DÜNYANIN GÜNCEL ENERJİ GÖRÜNÜMÜ .....	3
2.1 Enerji Kavramı.....	3
2.2 Dünya Çapında Güncel Enerji Tüketimi .....	4
2.3 Türkiye’de Güncel Enerji Tüketimi .....	6
2.4 Yenilenebilir Enerjiye Yönelim Trendi .....	8
2.5 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı .....	10
2.6 Mevcut Rüzgar Enerjisi Kaynakları ve Kullanımı .....	11
2.7 Dünyada Gelecek İçin Rüzgar Enerjisi Planları .....	19
2.8 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Kaynakları ve Kullanımı.....	22

## BÖLÜM 3

RÜZGAR ENERJİSİNİN TEMELLERİ .....	29
3.1 Rüzgarın Oluşum Mekanizması.....	29
3.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi .....	30
3.3 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Elde Etmenin Tarihçesi .....	31
3.4 Temel Rüzgar Enerjisi Denklemleri .....	33
3.5 Enerji Santrali Türleri .....	39
3.6 Kapasite Faktörü .....	40
3.7 Rüzgar Enerjisinde Verim Arttırma Yöntemleri.....	44
3.8 Rüzgar Enerjisinin Ana Şebeke İçindeki Payı.....	46

## BÖLÜM 4

DENİZ ÜZERİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ HAKKINDA BİLGİLER .....	47
4.1 Deniz Üzeri Rüzgar Türbinlerinin Tercih Sebepleri .....	48
4.2 Deniz Üzeri Rüzgar Türbinlerinin Avantajlı ve Dezavantajlı Yönleri .....	48
4.2.1 Kurulum Yeri Bakımından .....	48
4.2.2 Maliyetler Bakımından .....	50
4.2.3 Kurulum Süreci Bakımından .....	51
4.2.4 Türbinlerin Kuruldukları Bölgeye Etkileri Bakımından .....	52
4.2.4.1 İnsanlar Üzerindeki Etkiler .....	52
4.2.4.2 Doğa Üzerindeki Etkiler .....	55
4.2.5 Kurulum Alanındaki Kısıtlamaların Etkileri .....	59

## BÖLÜM 5

GÜNÜMÜZDE DENİZ ÜZERİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ .....	61
5.1 Kurulu Deniz Üzeri Rüzgar Türbinleri.....	61
5.2 Deniz Üzeri Türbinlerin Yapısal Çeşitleri .....	64
5.3 Deniz Tabanına Oturan Rüzgar Türbinleri.....	68
5.4 Yüzer Tip Rüzgar Türbinleri.....	72
5.5 Bazı Ticari Yüzer Tip Türbin Tasarımları .....	76

## BÖLÜM 6

DENİZ ÜZERİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN HESAPLAMALAR .....	79
6.1 Enerji Üretimi Hesaplamaları.....	79
6.1.1 Rüzgar Hızına Göre Üretilen Anlık Elektrik Enerjisi.....	80
6.1.2 Kapasite Faktörünün Belirlenmesi.....	81
6.1.3 Deniz Üzerinde Kurulum İle Elde Edilebilecek Kazanç .....	81
6.2 Mukavemet Hesapları.....	82
6.2.1 Statik Yük.....	83
6.2.2 Rüzgar Yükü.....	83
6.2.3 Dalga ve Akıntı Yükleri .....	85

BÖLÜM 7 .....	86
MALİYET HESAPLAMALARI .....	86
7.1 Rüzgar Enerjisinin Maliyetine Genel Bakış.....	86
7.2 Deniz Üzeri Rüzgar Enerjisi Projesi için Maliyet Hesaplaması.....	89
7.2.1 Türbin Maliyeti .....	89
7.2.2 Kurulum Maliyeti.....	91
7.2.3 Bakım ve İşletme Maliyetleri .....	92
7.2.4 Şebekede Rüzgar Enerjisinin Payının Artmasının Etkileri .....	92
7.2.5 Rüzgar Enerjisi için Özel Uygulamalar .....	94
7.3 Maliyet Hesaplama Formülleri.....	94
7.4 Yabancı Kaynaklı Maliyet Hesaplamaları .....	95
7.5 Örnek Maliyet Hesaplaması.....	101
BÖLÜM 8 .....	104
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	104
KAYNAKLAR .....	106
ÖZGEÇMİŞ .....	109

## SİMGE LİSTESİ

---

$E_K$	Kinetik enerji
$m$	Kütle
$v$	Hız
$P_T$	Teorik güç
$\dot{m}$	Debi
$\rho$	Hava yoğunluğu
$A$	Pervane alanı
$D$	Pervane çapı
$A_g$	Pervane girişi öncesi kesit
$A_\phi$	Pervane çıkışı sonrası kesit
$v_g$	Pervane girişi öncesi hız
$v_\phi$	Pervane çıkışı sonrası hız
$\Delta v$	Hız farkı
$H$	Rotor merkezi yüksekliği
$Z_0$	Pürüzlülük boyutu (metre)
$U_{10}$	10 dakikalık ortalama rüzgar hızı
$\sigma_U$	Rüzgar hızı standart sapması
$H_s$	Dalga yüksekliği
$T_p$	Pik periyodu
$B$	Yıllık bakım ve onarım maliyetleri
$i$	Enflasyon değeri
$r$	Faiz değeri
$S$	Hurda bedeli
$t$	Türbin ömrü
$P_R$	Anma gücü
$C_f$	Çalışma faktörü
$W/m^2$	Watt / metrekare

## KISALTMA LİSTESİ

---

kW	Kilowatt
MW	Megawatt
GW	Gigawatt
TW	Terawatt
kWh	Kilowatt saat
MWh	Megawatt saat
GWh	Gigawatt saat
TWh	Terawatt saat
CO <sub>2</sub>	Karbon dioksit
SO <sub>2</sub>	Sülfür dioksit
EEA	Avrupa Enerji Ajansı
EU-27	Avrupa Birliği kapsamında 27 ülkeden oluşan bölge
A.B.D.	Amerika Birleşik Devletleri
m/sn	Metre/saniye
km	Kilometre
EWEA	Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği
AWEA	Amerika Rüzgar Enerjisi Birliği
OSWinD	Deniz Üzeri Rüzgar Yenilikçilik ve Gösterim
EPDK	Enerji Piyasası Denetleme Kurulu
REPA	Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası
TÜREB	Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
DWIA	Danimarka Rüzgar Endüstrisi Birliği
OTEC	Okyanus Termal Enerji Dönüşümü
dBA	A-ağırlıklı desibel
kV	Kilo Volt
WFD	Sular Çerçeve Direktifi
MSFD	Denizler Stratejik Çerçeve Direktifi
DNV	Det Norske Veritas (Standart Kuruluşu)
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
MBD	Masrafların bugünkü değeri



## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1	Dünya enerji tüketimi (BP 2011 Enerji İstatistikleri).....	4
Şekil 2. 2	Dünya genelinde enerji tüketimi ve kaynaklar arasında dağılımı (BP).....	5
Şekil 2. 3	Dünya Genelinde Elektrik Tüketimi .....	5
Şekil 2. 4	Türkiye kurulu kapasitesi, 1923 – 1970 .....	6
Şekil 2. 5	Türkiye kurulu kapasitesi, 1923 – 2010 .....	6
Şekil 2. 6	Dünya karbon dioksit salınımı, milyon ton (U.S. EIA).....	8
Şekil 2. 7	Kara üzerindeki teknik rüzgar enerjisi potansiyeli [10].....	13
Şekil 2. 8	Avrupa deniz üstü rüzgar enerjisi potansiyeli.....	14
Şekil 2. 9	Ülkelerin deniz üstü RES için müsait alanları (EEA).....	15
Şekil 2. 10	2030 yılı için tahmin edilen deniz üzeri potansiyel (EEA).....	16
Şekil 2. 11	Rüzgar hızı verileri.....	17
Şekil 2. 12	Avrupa'daki 50 m'den daha az derinlikte sular .....	17
Şekil 2. 13	Amerika kıyılarındaki rüzgar hızları.....	19
Şekil 2. 14	EİE rüzgar ölçüm istasyonları .....	23
Şekil 2. 15	REPA 50 metre yükseklik için ortalama rüzgar hızları.....	24
Şekil 2. 16	REPA 70 metre yükseklik için ortalama rüzgar hızları.....	24
Şekil 2. 17	REPA 50 metre yükseklik için ortalama güç yoğunlukları .....	25
Şekil 2. 18	REPA 50 metre yükseklik için kapasite faktörü.....	25
Şekil 2. 19	Türkiye rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı (MW) (TÜREB).....	26
Şekil 2. 20	Türkiye İşletmedeki ve Lisansı Verilmiş Rüzgar Enerjisi Santralleri Haritası	26
Şekil 2. 21	Rüzgar enerjisi kapasitesinin bölgelere göre dağılımı (TÜREB).....	27
Şekil 2. 22	Rüzgar enerjisi kapasitesinin yatırımcılara göre dağılımı (TÜREB).....	27
Şekil 2. 23	Rüzgar enerjisi kapasitesinin türbin markasına göre dağılımı (TÜREB).....	28
Şekil 2. 24	Alınan lisansların bölgelere göre dağılımı (TÜREB) .....	28
Şekil 3. 1	Anma gücü ve yaklaşık rotor çapı cinsinden gelişim (DWIA, 2006) .....	33
Şekil 3. 2	Dört mevcut rüzgar türbininin güç-hız eğrileri (Hoojwijk [28]).....	43
Şekil 3. 3	Güç-hız eğrileri ve Weibull dağılımına göre hesaplanmış tam yük saatleri (Hoogwijk [28]).....	44
Şekil 3. 4	Teknik potansiyelin farklı tam yük saati sınıfları içinde dağılımı (EEA) .....	45
Şekil 3. 5	Avrupa'da tam yük saatlerinin dağılımı (EEA, 2008).....	46
Şekil 4. 1	Kurulum için müsait alanlara indirgenmiş Avrupa'daki teknik deniz üzeri potansiyelin değişimi (EEA, 2008) .....	60
Şekil 5. 1	367 MW kurulu güçteki Walney deniz üzeri rüzgar tarlası, İngiltere .....	62

Şekil 5. 2	40 MW gücündeki Middelgrunden rüzgar çiftliği, Danimarka .....	62
Şekil 5. 3	160 MW gücündeki Horns Rev I rüzgar çiftliği, Danimarka .....	63
Şekil 5. 4	Avrupa’da deniz üzeri rüzgar enerjisi pazarının gelişimi (1991-2007) .....	63
Şekil 5. 5	Avrupa’da kurulu ve kurulması planlanan deniz üzeri rüzgar çiftlikleri .....	64
Şekil 5. 6	Derin Sularda Türbin Kurulumunun Gelişimi .....	65
Şekil 5. 7	Çeşitli destek yapıları ve uygulanabilir su derinlikleri (Malrotha, 2007) .....	67
Şekil 5. 8	Deniz üstü rüzgar türbinleri için temeller .....	67
Şekil 5. 9	Deniz tabanına oturan destekler .....	70
Şekil 5. 10	Deniz tabanına bağlantı çeşitleri (Houlsby – Brine, 2000) .....	71
Şekil 5. 11	Yüzer platform için tasarım süreci .....	74
Şekil 5. 12	Yüzer türbinler için destekler .....	76
Şekil 5. 13	Statik stabilite sağlanması için yöntemleri gösteren üçgen .....	76
Şekil 5. 14	Windfloat (Principle Power) .....	77
Şekil 5. 15	Hywind (Statoil Hydro) .....	78
Şekil 7. 1	Avrupalı üreticiler için ortalama türbin fiyatları .....	90
Şekil 7. 2	Üretim tahmini ile gerçekleşen arasındaki yüzde fark (Lange et al. 2006) ..	94
Şekil 7. 3	Sabit %4 faizli finansman ile rüzgar enerjisi maliyetleri (EEA) .....	97
Şekil 7. 4	Özel teşebbüs kaynaklı finansman ile rüzgar enerjisi maliyetleri (EEA) .....	97
Şekil 7. 5	2005, 2020 ve 2030 yılları için üretim maliyetleri [10] .....	100
Şekil 7. 6	Deniz üstü potansiyelin derinliğe göre maliyet hesaplaması .....	100
Şekil 7. 7	Kuzey Avrupa ülkeleri için deniz üstü potansiyel kullanım maliyeti .....	101

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 2. 1 GWh cinsinden Türkiye elektrik üretimi (TÜİK) .....	7
Çizelge 2. 2 Kaynaklara göre elektrik üretimi (TÜİK) .....	7
Çizelge 2. 3 ABD için deniz üzeri rüzgar enerjisi potansiyeli.....	18
Çizelge 2. 4 Avrupa için deniz üzeri rüzgar enerjisi potansiyelleri [10].....	21
Çizelge 3. 1 Rüzgar türbinlerinin gelişimi üzerine öngörüler .....	39
Çizelge 3. 2 Rüzgar enerjisinin gelecekteki gelişimi için özet [10] .....	44
Çizelge 4. 1 Gürültü seviyeleri için örnekler (Sustainable Development Commission)	53
Çizelge 7. 1 Kara ve deniz üstü rüzgar tarlaları için masraf tahminleri .....	87
Çizelge 7. 2 Kıyıya mesafe ile artan maliyet artış oranı (EEA, 2008) .....	88
Çizelge 7. 3 Su derinliğine bağlı olarak deniz üstü kurulum maliyeti artışı (EEA, 2008)	91
Çizelge 7. 4 Su derinliği ve kıyıya mesafeye bağlı olarak maliyet artışı (EEA, 2008) .....	91
Çizelge 7. 5 Rüzgar enerjisi üretimi için maliyet tahminleri [10] .....	95

---

## DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR ENERJİSİ SANTRALLARININ TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ

Onur OTLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şükrü BEKDEMİR

Enerji ihtiyacının her sene arttığı dünyamızda bu ihtiyaç yüzyıllar boyunca fosil yakıt kaynakları ile karşılanmış fakat bu yakıtların yarattığı çevre sorunları ve fosil yakıtların dünya genelindeki rezervlerinin azaldığı ancak birkaç on yıldır yetkili çevrelerin dikkatini çekmiştir.

Ülkelerin çevre kirliliğini önleme, enerjide sürdürülebilirlik sağlama ve yakıt bakımından dışa bağıllığını azaltma amacıyla son on yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgilerini arttırdıkları bilinmektedir. Nispeten fakir ülkelerde fayda/maliyet oranının yüksek olması sebebiyle henüz fosil yakıtların egemenliği sorgulanmazken özellikle Avrupa ülkelerinde ve Amerika'da çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları üzerine araştırmalar ve yatırımlar artarak devam etmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya genelindeki potansiyeli ve günümüz teknolojisi ile bu potansiyelden yararlanma olanağı göz önüne alındığında rüzgar enerjisi ön plana çıkmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla büyük ölçekte kullanılabilirliği daha yüksek olan rüzgar enerjisi çoğu gelişmiş ülkenin enerji planında önemli yer edinmiştir; öyle ki İngiltere, Almanya ve bazı İskandinav ülkeleri birkaç on yıl içerisinde enerji üretimlerinin %20'ye varan kısımlarını rüzgar enerjisinden elde etmeyi planlamaktadırlar.

Rüzgar enerjisinin temelleri yel değirmeni benzeri kara üzerinde kurulan türbinlerle atılmasına ve günümüzde de kurulu rüzgar enerjisi kapasitesinin çok büyük bir bölümü

kara üzerinde olmasına rağmen, türbinlerin deniz üzerinde kurulmasının da teknik ve çevresel avantajları vardır. Bu avantajların değerlendirilmesi sonucunda özellikle Baltık Denizi'nde son on yıl içerisinde oldukça büyük yatırımlar yapılmıştır.

Bu çalışmada deniz üzerinde kurulan rüzgar enerjisi türbinlerinin teknik, çevresel ve ekonomik yönlerden incelemesi yapılacak ve hangi durumlarda kurulumlarının mantıklı olacağı konusunda fikir yürütülecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji, deniz üzeri, rüzgar türbinleri

**A TECHNICAL AND ECONOMICAL ANALYSIS  
OF OFFSHORE WIND TURBINES**

Onur OTLU

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr Şükrü Bekdemir

The ever-increasing demand for energy in our world has been answered with fossil fuels for centuries, and it has only been in recent decades that the environmental problems created by the consumption of fossil fuels and the decrease in the worldwide reserves of these fuels has attracted the attention of authorities.

It is known that countries have focused more on renewable energy sources in the latest decades through aims of preventing pollution, creating sustainability in their energy policies and also in order to reduce foreign dependability on fuels. While the dominance of fossil fuels in relatively poor countries remains unchallenged due to its cost-to-effect ratio, developed countries such as those in Europe and the U.S. increase their research and investments in various renewable energy sources.

When we take into account the worldwide potential for renewable energy sources and our ability to draw from this potential with our current state of technology, wind energy stands as a strong choice. Having a relatively higher scalability to large-scale installations, wind energy has an important place in many developed nations' energy policies for the future such that England, Germany and some Scandinavian countries aim to produce as much as 20% of their total energy production from wind sources in a few decades.

While the foundations of wind energy lie in the windmill-like ground based wind turbines and the current wind energy capacity is largely comprised from such installations, there are technical and environmental advantages to deploy turbines over water. Through exploiting such advantages large investments have been made in the last decade, especially in the Baltic Sea.

This study includes an analysis of offshore wind energy turbines from technical, environmental and economical viewpoints and an assessment of under which conditions their installations will be reasonable.

**Key words:** Wind energy, renewable energy, offshore, wind turbines

#### 1.1 Literatür Özeti

Deniz üstü rüzgar enerji santralleri ile ilgili literatür genel olarak yabancı kaynaklıdır. Avrupa Birliği'nin, A.B.D.'nin ve İngiltere, Danimarka, Almanya gibi ülkelerin hazırlamış olduğu raporlarda rüzgar enerjisinden yararlanmanın bu nispeten yeni yolu hakkında bilgi verme ve teknik ile ekonomik fizibilitenin araştırılması amaçlanmaktadır.

Teknik açıdan bakıldığında üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı bakımından genel rüzgar enerjisi denklemleri geçerli olmakla beraber deniz üzerinde rüzgar şartlarının, özellikle daha yüksek rüzgar hızının ve kapasite faktörünün üretimde ne kadarlık artış sağlayabileceği araştırılmış, bunun dışında deniz koşullarında türbinlerin çalışabilmesi için hangi düzenlemelere gidilmesi gerektiği ve deniz tabanına sabitlemenin hangi yollarla yapılabileceği aktarılmıştır. Deniz tabanına sabitleme çeşitlerinin su derinliğine ne ölçüde bağlı olduğu pek çok kaynakta gösterilmiştir. Deniz üstü rüzgar türbinlerinin çevreleri ve doğal yaşam üzerinde nasıl etkileri olduğu bazı Avrupa Birliği araştırmalarında incelenmiş ve bu konuda kara üzeri rüzgar türbinlerinden ayrılan yönleri belirtilmiştir. Ekonomik açıdan yapılan incelemelerde genellikle rüzgar tarlalarının deniz üzerinde kurulmasının getireceği ek maliyet ve bunun birim elektrik enerjisi üretim maliyetini nasıl etkilediği üzerinde durulmuştur.

Türkçe literatürde kara üzerindeki türbinler hakkında teknik bilgiler ve ekonomik fizibilite çalışmaları mevcuttur. Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi ile ilgili enerji denklemleri gerek üniversitelerdeki yenilenebilir enerji derslerinde, gerek konu ile ilgili



yayınlarda kolaylıkla bulunabilmektedir. Türkiye'deki belli başlı bölgelerde kara üzerinde rüzgar enerjisinin ekonomik fizibilitesi ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır.

## **1.2 Tezin Amacı**

Deniz üstü rüzgar enerjisi ile ilgili kaynakların çoğu farklı kişiler ve kurumlar tarafından ve genelde konu ile ilgili giriş seviyesinde bilgi verilmesi, belli bir bölge için fizibilitenin belirlenmesi ya da özel bir teknik konuda bilgi verme amacı ile yazılmıştır. Türkçe kaynaklar arasında kara üzerindeki rüzgar türbinleri ile ilgili detaylı bilgi bulunmasına karşılık deniz üstü rüzgar enerjisi santralleri ile ilgili yeterli sayıda kaynak bulunmamaktadır. Bu çalışma ile konu hakkındaki güncel teorik, teknik ve ekonomik bilgi birikiminin Türkçe bir kaynakta toplanması ve Türkiye açısından teknolojinin yatırıma uygunluk durumunun araştırılması hedeflenmiştir.

## **1.3 Hipotez**

Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi, yenilenebilir enerji kaynakları içinde ekonomik açıdan mantıklı olma ve günümüzde yaygınlaşma hızı açısından en önce yer alan yöntemlerden birisidir. Kara üzerinde rüzgar tarlaları kurulmasının bazı dezavantajları olması ve deniz üzerindeki daha güçlü rüzgar kaynaklarından yararlanılması isteği sonucunda deniz üstü rüzgar enerjisi santralleri 2000'li yılların sonunda kuramsal seviyeden çıkıp ilk deneme amaçlı ve bunu takiben ticari kurulumları yapılmış, şu anda gelişmiş kıyı devletlerinin enerji politikalarında gelecek planlarına kattığı elektrik üretim tesislerine dönüşmüştür. Bu sistemlerin teknik ve ekonomik avantajları şu andaki en büyük eksi yanı olan maliyet artışını yenebilirse gelecekte çok daha yaygın kurulumlar yapılması olasıdır.

Türkiye 2023 yılı için olan gelişim planlarında yenilenebilir enerji konusunda yüksek hedefler belirlemiş ve 2007 yılından itibaren rüzgar enerjisinden elektrik üretimi lisanslarının özel kuruluşlara tahsisi ile beraber kurulu rüzgar enerjisi kapasitesinde büyük bir sıçrama yaşamıştır. Ülkemizin özellikle Kuzey Ege kıyıları açıklarında yüksek rüzgar enerjisi yoğunluğu mevcuttur. Deniz üstü rüzgar enerjisi santralleri ekonomik açıdan mantıklı birer yatırım olurlarsa ülkemizin gelecekteki yenilenebilir enerji piyasasında önemli bir pay sahibi olabilirler.

### DÜNYANIN GÜNCEL ENERJİ GÖRÜNÜMÜ

#### 2.1 Enerji Kavramı

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, iletişim için en önemli kaynağın artık “enerji” olduğu dünyamızda ülkelerin enerji teminini sağlamak için giriştikleri mücadeleler, geçtiğimiz yüzyılın en önemli gelişmelerine sebep olmuştur.

Günümüzde dünya genelindeki enerji ihtiyacının karşılanmasında fosil yakıtların egemenliği tartışılmaz olsa da, güncel gelişmelerin ve araştırmaların sonucunda gelişmiş ülkeler alternatif enerji kaynakları aramaya başlamışlardır. Kimisi binlerce yıl öncesine dayanan, hareket ve ısı elde etme amaçlı enerji dönüşümü yöntemlerinin güncel teknolojik ve bilimsel gelişmeler ile harmanlanması sonucunda fosil yakıtlara gerek duyulmadan elektrik üretebilme imkanına kavuşulmuştur.

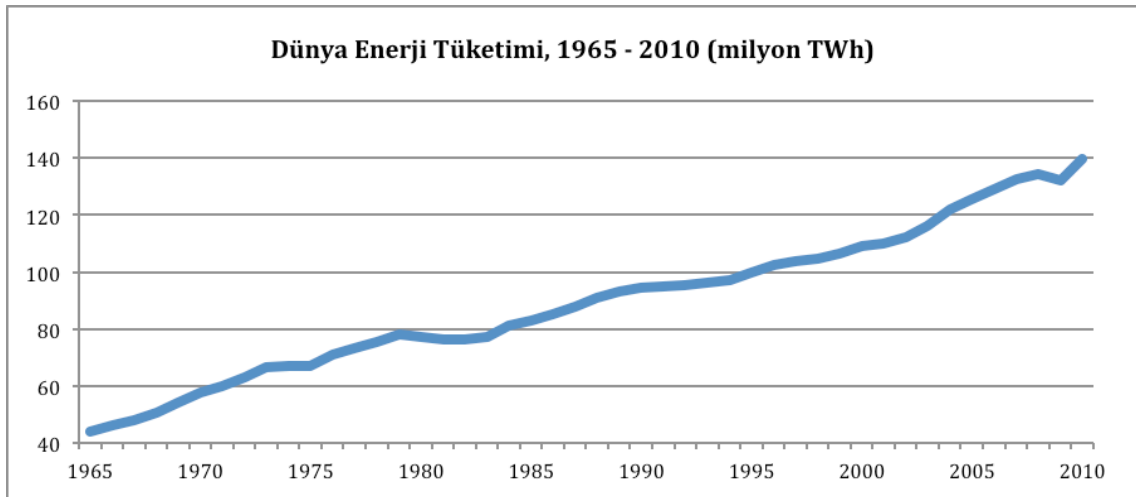
“Yenilenebilir enerji” olarak adlandırılan ve rüzgar, güneş, biyokütle, dalga / gelgit gibi doğal oluşumlardan enerji elde edilmesini sağlayan bu yöntemlerde- gelgit hareketleri hariç - enerjinin ana kaynağı güneştir. Dünyaya toplam olarak  $10^{17}$  Watt enerji yayan güneş bu sayede yerkürenin ısınmasına ve bitkilerin fotosentez yapabilmesine, atmosferde rüzgarın ve bunun sonucunda dalgaların oluşmasına kaynak oluşturur. Güneş enerjisi fotovoltaik güneş panellerinde, dalga ve gelgit enerjisi yüzer dönüşüm

aygıtlarında, biyokütle kimyasal tepkimeler sonucunda ve rüzgar enerjisi rüzgar türbinleri aracılığıyla elektriğe dönüştürülebilir.

## 2.2 Dünya Çapında Güncel Enerji Tüketimi

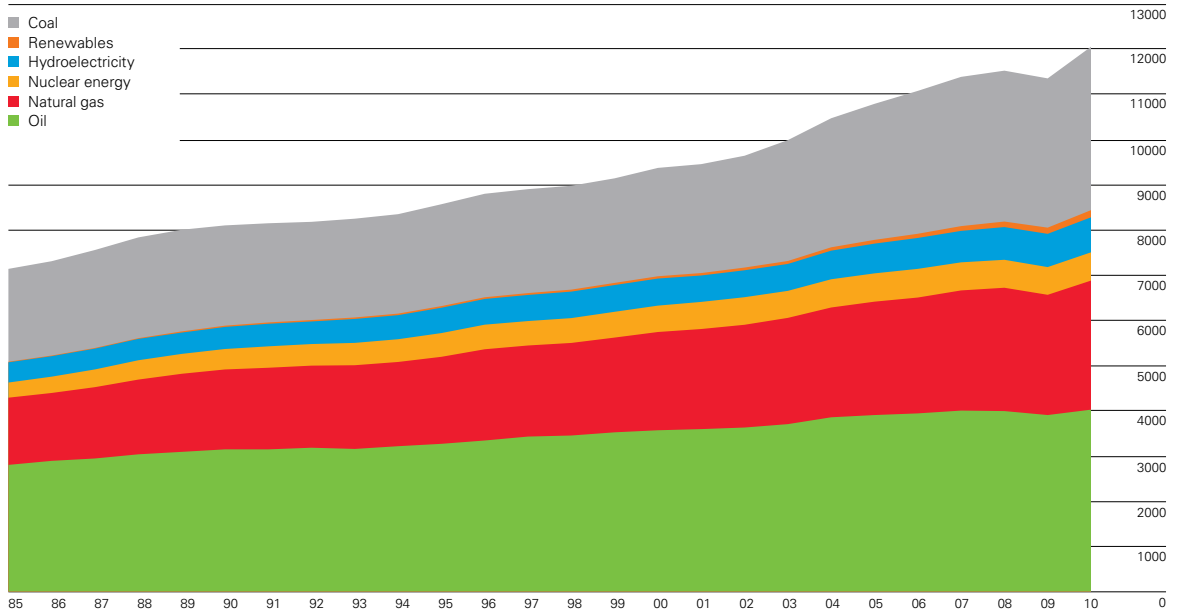
Dünya çapında enerji tüketimi kavramı buhar makinasının icadı ile kömür ve odun tüketimi ile başlamış olup, 20. yüzyılın başlarında petrol kaynaklı sıvı yakıtların tüketimi öne çıkmıştır. Üretim, taşıma, petrol kaynaklı ürünlerin üretimi gibi kullanım alanlarının yanı sıra elektrik üretimi amacıyla da oldukça büyük miktarlarda petrol kaynaklı yakıt (doğalgaz, fuel-oil, küçük işletmeler için dizel generatörler) kullanılmıştır.

Dünyanın çeşitli ülkelerinde doğal kaynakların zenginliği, sanayi üretiminin türü ve miktarı, ulaşım için harcanan enerji gibi çeşitli faktörler kullanılan enerji ve yakıt miktarını ve türlerini belirler. Dünya genelinde yılda tüketilen toplam enerji miktarı 2000 yılında 9.382 milyon ton petrol eşdeğeri iken bu değer 2005 yılında 10.800,9, 2010 yılında 12.002,4 milyon ton petrol eşdeğerine ulaşmıştır. Bu değer yaklaşık 140 milyon TWh'e denk gelmektedir. TWh cinsinden dünya enerji tüketiminin senelere göre artışı Şekil 2. 1'de görülebilir [1].



Şekil 2. 1 Dünya enerji tüketimi (BP 2011 Enerji İstatistikleri)

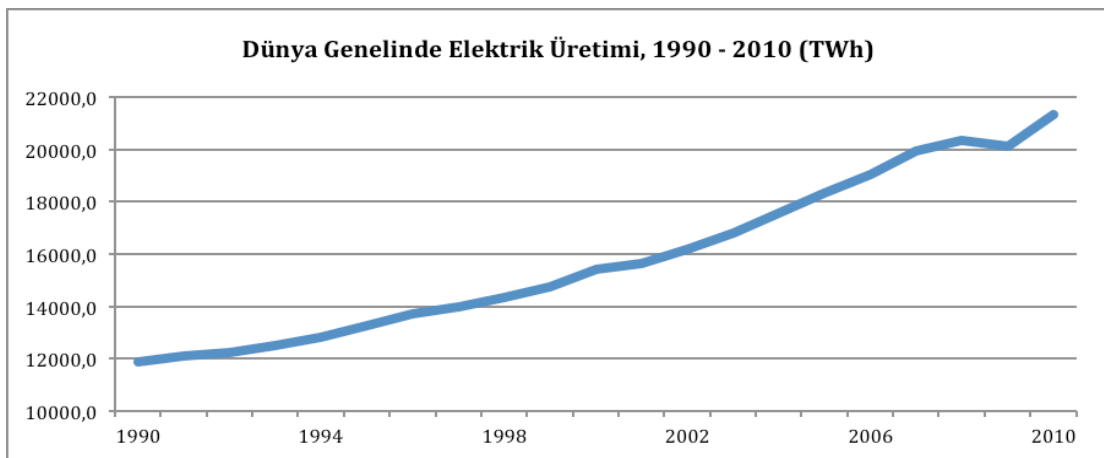
2010 yılına kadar Dünya genelindeki enerji tüketimi ve çeşitli enerji kaynakları arasında dağılımı Şekil 2. 2'de verilmiştir [1].



Şekil 2. 2 Dünya genelinde enerji tüketimi ve kaynaklar arasında dağılımı (BP)

Toplam enerji tüketimi gibi elektrik enerjisi üretimi ve tüketimi de dünya genelinde artmaktadır. Sanayileşmiş ülkelerin yüksek seviyede seyreden tüketimlerinin yanısıra Çin, Hindistan, Brezilya, Meksika gibi hızla sanayileşen ve gelişen ülkelerin elektrik tüketimleri geçtiğimiz on yıl içinde hızla artmıştır. Hızla gelişmekte olan ülkelere Çin'in elektrik üretimi 1990 yılında 621,2 TWh iken bu değer 2000 yılında 1.355,6 TWh, 2010 yılında 4.206,5 TWh olarak gerçekleşmiştir. Hindistan için elektrik üretimi 1990 yılında 284,2 TWh iken 2000 yılında 554,7, 2010 yılında 922,2 TWh elektrik enerjisi üretilmiştir. Bu ülkelerde yıllık elektrik enerjisi üretimi artmaya devam edecektir.

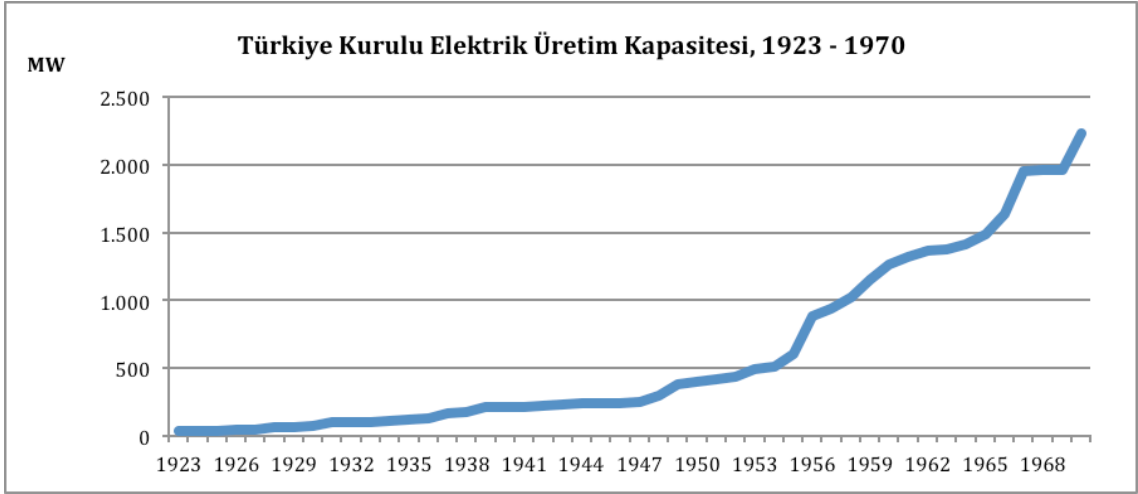
Dünya genelindeki elektrik enerjisi üretimi artışı Şekil 2. 3'ten görülebilir.



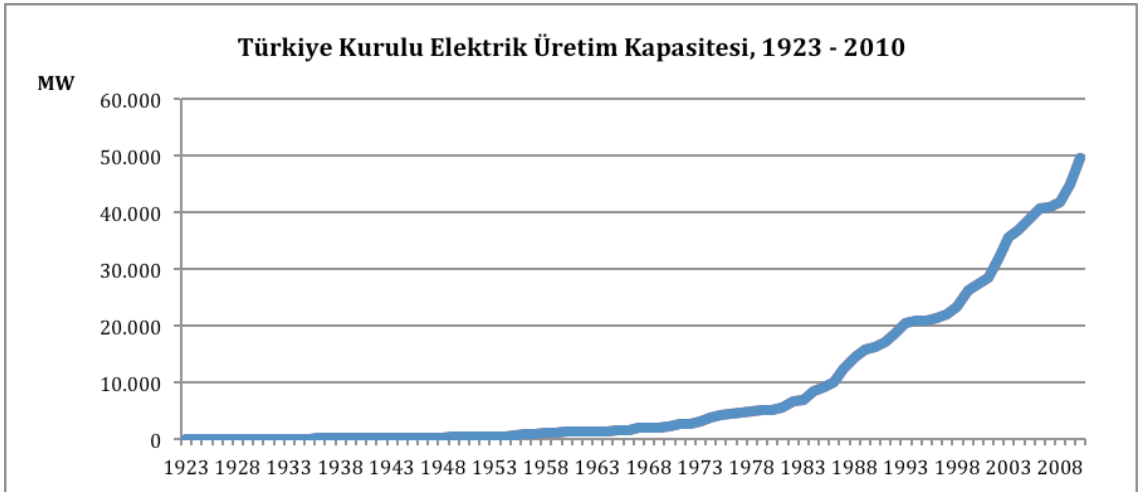
Şekil 2. 3 Dünya Genelinde Elektrik Tüketimi

### 2.3 Türkiye’de Güncel Enerji Tüketimi

İlk olarak Osmanlı döneminde Karaköy-Beyoğlu tüneli, Feshane gibi fabrikalar vev benzeri alanlarda yerel olarak elektrik üretimi yapılmış olup ülke çapında elektrik ağı oluşturulması ve yaygınlaştırılması Cumhuriyet sonrasında gerçekleştirilmiştir. TEİAŞ’ın istatistiklerinde ilk olarak 1913 yılında 17,2 MW termik, 0,1 MW hidroelektrik olmak üzere 17,3 MW kurulu elektrik kapasitesi olduğu yer almaktadır [2]. 1923 yılı için kurulu termik kapasite 32,7 MW’a, toplam kapasite 32,8 MW’a çıkmıştır. 2010 yılına kadar Türkiye’deki kurulu toplam elektrik üretim kapasitesi Şekil 2. 4’te görülebilir.



Şekil 2. 4 Türkiye kurulu kapasitesi, 1923 – 1970



Şekil 2. 5 Türkiye kurulu kapasitesi, 1923 – 2010

Türkiye’de elektrik enerjisi üretimi 2009 yılında 194.813 GWh, tüketimi ise 156.894 GWh olmuştur. Üretilen elektrik enerjisi %73,8 termik, %26,2 hidrolik kaynaklardan elde edilmiştir [3]. 2010 yılı için toplam kurulu güç 49.524,1 MW, brüt elektrik üretimi 211.207,7 GWh, elektrik tüketimi 172.050 GWh olarak gerçekleşmiştir. 2011 yılı içinde EÜAŞ’ın kendi bünyesi ve bağlı ortaklıkları ile üretim şirketleri ve otoprodüksiyon kapsamında üretilen elektrik enerjisi miktarı aylara bağlı olarak Çizelge 2. 1’deki gibi gerçekleşmiştir [5]:

Çizelge 2. 1 GWh cinsinden Türkiye elektrik üretimi (TÜİK)

2011			
Aylar	EÜAŞ + EÜAŞ Bağı Ortaklıkları + Mobil	Üretim Şirketleri + Otoprodüksiyon + İşletme Hakkı Devirleri	Toplam
Ocak	7.576,6	11.934,9	19.511,5
Şubat	7.012,0	10.666,2	17.678,2
Mart	7.551,7	11.599,3	19.151,1
Nisan	7.404,5	10.335,6	17.740,1
Mayıs	7.748,4	9.765,6	17.514,0
Haziran	7.929,5	10.033,2	17.962,7
Temmuz	9.110,0	11.766,3	20.876,3
Ağustos	8.398,0	12.032,5	20.430,5
Eylül	7.187,5	11.657,0	18.844,5
Ekim	7.030,9	11.677,5	18.708,3
Kasım	7.233,0	11.736,2	18.969,2
Aralık	8.168,9	12.850,4	21.019,3
<b>Toplam</b>	<b>92.350,9</b>	<b>136.054,7</b>	<b>228.405,6</b>

2012 yılında ilk iki ay için üretim toplam ve kaynaklarına ayrılmış şekilde elektrik üretimi Çizelge 2. 2’de belirtildiği şekilde gerçekleşmiştir.

Çizelge 2. 2 Kaynaklara göre elektrik üretimi (TÜİK)

2012	OCAK	ŞUBAT
TERMİK	16.327,0	13.867,2
HİDROLİK+JEOTERMAL+RÜZGAR	5.096,9	6.055,2
<b>TOPLAM</b>	<b>21.423,9</b>	<b>19.922,4</b>

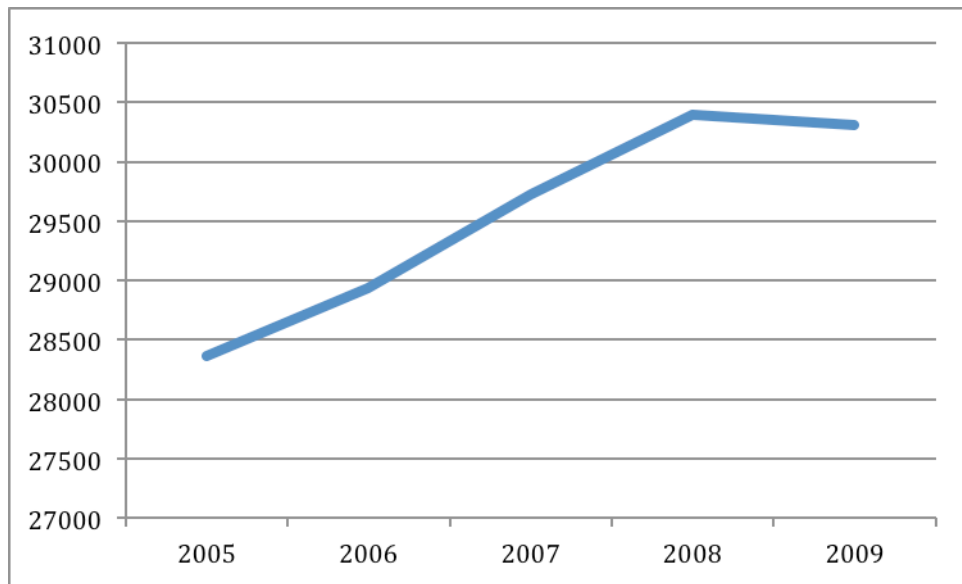
Türkiye genelinde elektrik üretim ve tüketim miktarlarının artması ile beraber kurulu gücün artırılması için de çalışmalar sürdürülmektedir. Doğalgaz rezervi bulunmayan ülkemizde 2010 yılındaki 211.207,7 GWh elektrik üretiminin 98.143,7 GWh’lık kısmının doğalgaz kullanılarak yapılmış olması [3] da tedarik sıkıntıları yaşanması ve stratejik risk olması bakımından bir sorun olarak kabul edilmektedir. Bunların sonucunda

ülkemizdeki ilk nükleer elektrik üretim tesisinin kurulması, sanayi tesislerine otoprodüksiyon imkanının yasal olarak tanınması, yenilenebilir enerji yatırımlarına ve teşviklerine hız verilmesi gibi geniş kapsamlı yenilikler planlanmış ve bir kısmı hayata geçirilmiştir.

#### 2.4 Yenilenebilir Enerjiye Yönelim Trendi

Geçtiğimiz yüzyılın son dönemlerinde çeşitli bilimsel araştırmalar ve hesaplamalar sonucunda uzun yıllardır temel enerji kaynağı olarak fosil yakıtların kullanılmasının dünya ekolojisi için onarılması oldukça zor hasarlar oluşturduğu ve bunun yanında dünya genelindeki petrol rezervlerinin gittikçe azalma trendi gösterdiği belirlenmiştir.

2009 yılında fosil yakıtların yakılması ile dünyaya 30.313 milyon ton CO<sub>2</sub> salınımı yapılmış olup, bu salınımın geçmiş yıllara göre gösterdiği değişim Şekil 2. 6'da belirtilmiştir.



Şekil 2. 6 Dünya karbon dioksit salınımı, milyon ton (U.S. EIA)

Doğaya salındığı yerler fabrikalar, güç üretim tesisleri, taşıtlar, ısınma amaçlı kullanıldığı konutlar ve benzeri fosil yakıtların yakıldığı yerler olan CO<sub>2</sub>'nin yanı sıra fosil yakıtların yakılması sonucu atmosfere SO<sub>2</sub>, azot oksitler (NO<sub>x</sub>), kurşun ve kükürt bileşikleri, is ve kurum parçacıkları, tam yanma gerçekleşmemiş uçucu hidrokarbonlar ve benzeri çevre ve insan sağlığı için zararlı yanma ürünleri salınımı gerçekleşmektedir.

Kurulu 1 GW deniz üzeri rüzgar türbini anma kapasitesi, yılda ortalama 3.400.000 MWh elektrik üretimi sağlayabilir. Aynı miktar elektriği fosil yakıtlarla üretmek için 1,7 milyon ton kömür veya 780 milyon metreküp doğal gaz yakılması gerekecek ve bunun sonucunda yılda 2.7 milyon ton karbon dioksit eşdeğeri açığa çıkacaktır. [6]

Belirtilmiş olan yanma ürünlerinden SO<sub>2</sub>, azot oksitler (NO<sub>x</sub>) ve kurşun bileşiklerinin atmosferde birikerek ve güneş ışınları ile tepkimeye girerek zamanla asit yağmurlarının oluşumuna yol açtığı belirlenmiştir. Asit yağmurlarının insanların, hayvanların ve bitkilerin sağlığı için zararlı olmasının yanı sıra binalar ve makineler veya taşıtlar için de zararlı olduğu gözlemlenmiştir.

CO<sub>2</sub> salınımının belki de en önemli etkisi, ile beraber “sera etkisi” olarak adlandırılan dünya atmosferinin sıcaklığının artmasına yol açmasıdır.

Dünyayı çevreleyen atmosfer, içeriğindeki gazlar vasıtasıyla dünyaya gelip yansyarak uzaya doğru giden güneş ışınlarının enerjisinin bir kısmını soğurarak atmosferin ısınmasına sebep olur. Yüzyıllar boyunca bu gazların bileşimi hemen hemen aynı kalmış olup, bu sayede dünyada yaşanılabilir sıcaklıkların oluşması mümkün olmuştur. Buna karşılık geçtiğimiz yüzyıl boyunca yoğun fosil yakıt kullanımı sonucunda atmosfere yüklü miktarda CO<sub>2</sub>, ve benzeri sera etkisine yol açan gazlar salınmıştır.

Artan CO<sub>2</sub> ve gazlarının etkisi ile dünyadan yansıyan güneş ışınlarının enerjisinin daha büyük bir kısmı soğurularak atmosferde kalmakta, bu da atmosferde, denizlerde ve kara üzerinde sıcaklıkların yükselmesine yol açmaktadır.

Sera etkisinin yol açtığı “küresel ısınma”nın önümüzdeki yıllarda tam olarak hangi seviyelere ulaşacağı ve atmosfer sıcaklığının tam olarak kaç derece artacağı kesin olarak bilinmemekte ve bu etkinin yol açacağı gerçek sonuçlar hakkında geniş spekülasyonlar yapılmakta olsa dahi, küresel ısınmanın şu andaki etkileri konusunda somut veriler mevcuttur. 23 noktada yapılan deniz seviyesi ölçümlerinde 1900’den 1997 yılına kadar 18,5 cm yükselme kaydedilmiştir [7]. 1993 ile 2011 arasındaki uydu ölçümlerinde deniz seviyesinde yılda 3,2 mm (toplam yaklaşık 6 cm) artış olduğu görülmüştür [8]. Dünya genelinde sıcaklıkların artması ile kara üzerindeki buzulların erimesi ile deniz seviyesinin daha da yükselmesi, dünya iklim dengesinin bozulması, geniş ölçekli kuraklık ve çölleşme görülmesi, içilebilir su kaynaklarına ulaşımın



zorlaşması gibi dünya çapında felaketlere yol açacak gelişmelerin olacağı öngörülmektedir. Bu sebeple çoğu gelişmiş ülke sera etkisi yaratan fosil yakıt tüketimini düşürmek için enerji tasarrufu sağlanması ve daha temiz enerji kaynaklarının tercih edilmesi amacıyla önlemler almaktadır.

Avrupa Birliği'nin "iklim-enerji düzenleme paketi" 2020 yılına kadar birlik içindeki toplam enerji tüketiminde %20 yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasını ve bütün üye ülkelerin taşıma için harcanılan enerjide %10 yenilenebilir enerjinin pay almasını hedef koymuştur.

Amerika Birleşik Devletleri'nde yenilenebilir enerji kullanımının artırılması, iklim değişikliği risklerinin azaltılması ve ülkenin uzun vadeli düşük karbon üretimli bir ekonomiye dönüştürülmesi için gündemde olup Başkan Barack Obama 2011 Beyaz Saray bülteninde 2035 yılına kadar ülkenin elektrik üretiminin %80'inin temiz enerji kaynaklarından üretilmesi çağrısında bulunmuştur. 2009 yılındaki Beyaz Saray bülteninde A.B.D.'nin CO<sub>2</sub> salınımlarının 2030 yılına kadar %50 ve 2050 yılına kadar %80 azaltılması hedef gösterilmiştir [9].

## **2.5 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı**

"Yenilenebilir" enerji kaynağı tanımı, iş elde etmek için kullanılan enerji kaynağının enerji üretimi gerçekleştikten sonra doğal yöntemlerle yeniden oluştuğunu veya oluşturulabildiğini belirtir.

Kömür ve petrol ürünleri gibi fosil yakıtlar karbon içeren organik bileşenlerin yer altında basınç ve ısı etkisi altında milyonlarca yıl süren dönüşümü sonucunda oluşmuş olup yakılarak enerji elde edildikten sonra yeniden eski formlarına döndürülmeleri mümkün değildir. Bu sebeple bu yakıtların belirli bir süre zarfında dünyadaki stoklarının azalacağı ve kalan kaynakların yer yüzüne çıkartılması daha zor ve maliyetli bölgelerde olacağı düşünülmektedir. Bu yakıtları bir döngü içerisinde tüketildiği miktarda üretmenin bir yolu olmadığı için fosil yakıtların "yenilenebilir" olmadığı söylenebilir.

Buna karşılık enerji üretimi esnasında tükenmeyen veya üretim potansiyeli azalmayan, çoğunlukla doğal yollardan ve güneş kaynaklı elde edilen enerji kaynakları da vardır.

Sürdürülebilir bir enerji politikasının izlenilebileceği bu tip enerji kaynakları arasında güneş, rüzgar, dalga, gel-git, jeotermal, biyokütle ve nükleer enerji sayılabilir.

Belirtilen bu enerji kaynaklarından gel-git ve nükleer enerji kaynakları haricinde kaynağı güneşten dünyaya gelen ısı ve ışık enerjisidir. Güneş ışınlarını kollektörler ile iş elde edilen akışkanı (su veya diğer sıvılar) ısıtacak şekilde kullanarak ısınma ihtiyaçları karşılanabilir veya elde edilen buharın türbinlere aktarımı yoluyla elektrik üretimi yapılabilir. Geçtiğimiz yüzyılın sonlarında yaygınlaşan şekilde ışınlar fotovoltaik panellere yönlendirilerek doğrudan elektrik üretimi de sağlanabilir.

Güneşin atmosferi farklı bölgelerde farklı miktarlarda ısıtması sonucunda hava basıncı farkları ve bunun sonucunda rüzgar oluşur. Genelde rejimi belli olan büyük ölçekli sürekli rüzgarlar veya yerel rüzgarlar türbinler yoluyla elektrik üretimi amaçlı kullanılabilir.

EEA'ya göre 1992 ile 2006 arasında yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji ve elektrik üretimi sürekli olarak artmıştır; rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklarından yapılan üretimde özellikle yüksek artış görülmüştür. 2006 yılında yenilenebilir enerji EU-27 bölgesinde toplam enerji tüketiminin %9,3'ünü ve brüt elektrik tüketiminin %14,5'ini karşılamıştır [10].

## **2.6 Mevcut Rüzgar Enerjisi Kaynakları ve Kullanımı**

Yenilenebilir enerjinin ülkelerin toplam enerji tüketimindeki payının artmasında rüzgar enerjisi temiz ve uygun maliyetli bir kaynak olarak kendisini kanıtlamıştır. Bu sayede geçmiş yıllarda rüzgar enerjisi sektörü ciddi oranda yükseliş göstermiştir.

Küresel Değişim Hakkında Alman Danışmanlık Konseyi, dünya çapında kara ve deniz üzerinde toplam olarak 278.000 TWh rüzgar enerjisi üretim teknik potansiyeli olduğunu, buna karşılık bu potansiyelin ancak %10 – 15'lik bir kısmının sürdürülebilir olarak kullanılabileceğini kabul etmiştir. Almanya içinde 25.000 GW kurulu güce büyük sorunlarla karşılaşmadan ulaşılabileceği düşünülmektedir [11].

Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi'ne göre 2011 sonu itibariyle dünya genelinde kurulu rüzgar türbinlerinin anma güçlerinin toplamı 238.351 MW olmuştur. [12] Dünya

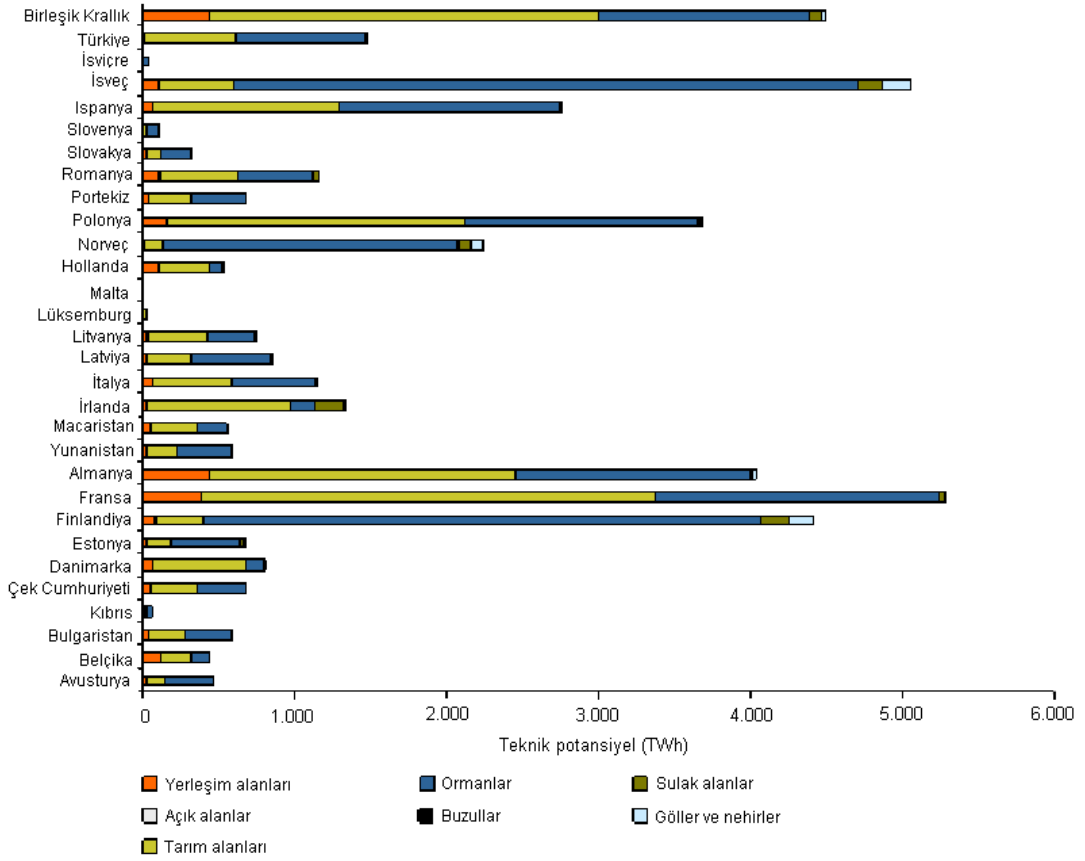
genelindeki kapasite 2000 ile 2006 arasında 4 katına çıkmış olup 2011 yılında 2010'a göre 41 GW artış gerçekleşmiştir. Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği'nin (World Wind Energy Association) 2010 yılı için bilgilerine göre dünya genelindeki rüzgar türbinleri yılda 430 TWh elektrik üretme kapasitesine sahiptir, bu da dünya çapında elektrik tüketiminin %2,5'una karşılık gelmektedir. [13] Bu değerin 2013 yılında %3,35'e ve 2018 yılında %8'e ulaşması beklenmektedir (BTM Consult). 2009 yılında dünya üzerinde kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi en yüksek olan ülkeler A.B.D., Çin ve Almanya olarak sıralanmışken 2010 yılında liderlik Çin'e geçmiştir.

Dünya genelindeki rüzgar enerjisi sektöründe 40 milyar Euro'luk ciro gerçekleştiği ve 670.000 kişiye iş sağlandığı bildirilmiştir [13].

Hoogwijk et al. 2004'teki araştırmalarında Batı Avrupa'da kara üzerinde kurulacak türbinler için 10 m yükseklikte rüzgar hızının 4 m/sn'dek yüksek olduğu yerler düşünüldüğünde potansiyelin 4.000 TWh olduğunu ve bu potansiyelin yarısının 0,10 \$ / kWh'tan düşük bir maliyetle üretilebileceğini belirtmiştir.

Yine Batı Avrupa için Dünya Enerji Konseyi tarafından 1994'te yapılan bir araştırmada 10 metre yükseklikte 5,1 m/sn'den daha yüksek rüzgar hızı bulunan bölgelerin %4'ünün rüzgar enerjisi üretimi için uygun olduğu ve mevcut elektrik şebekesinden 50 km'den daha uzak bölgeler de çıkartıldığında teknik potansiyelin 1.300 TWh olduğu hesaplanmıştır. 2008 sonu itibariyle Avrupa Birliği – EU 27 ülkelerinde 65 GW kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi mevcut olup 142 TWh elektrik üretilmiş ve AB elektrik talebinin %4,2'si karşılanabilmiştir [14].

Türkiye ile beraber Avrupa ülkelerinin teknik rüzgar enerjisi potansiyeli Şekil 2. 7'de görülebilmektedir.



Şekil 2. 7 Kara üzerindeki teknik rüzgar enerjisi potansiyeli [10]

Bununla beraber, Türkiye için bu potansiyelin önemli bir kısmı dağlık bölgelerde yer almaktadır. Dağlık bölgelerde erişimin zorluğu ve yol ve nakil hatlarının kısıtlılığı rüzgar çiftliklerinin buralarda kurulumunu zorlaştırmaktadır. Ek olarak, yükseklik arttıkça rüzgar enerjisi için güç yoğunluğu azalmaktadır. EEA'nın araştırmasında deniz seviyesine yakın yükseklikte bölgeler için 8 MW/km<sup>2</sup> olarak hesaba katılan güç yoğunluğu değeri, 600 – 2.000 m yükseklik arası için 4 MW/km<sup>2</sup> olarak kabul edilmiştir. Bu kabul, İtalyan araştırmacılar tarafından Apennine dağlarında bir örnek bölgede yapılan güç yoğunluğu araştırmasının sonucunda bulunan 800–1000 m yükseklik için 4,2 MW/km<sup>2</sup> değeri ile uyumludur.

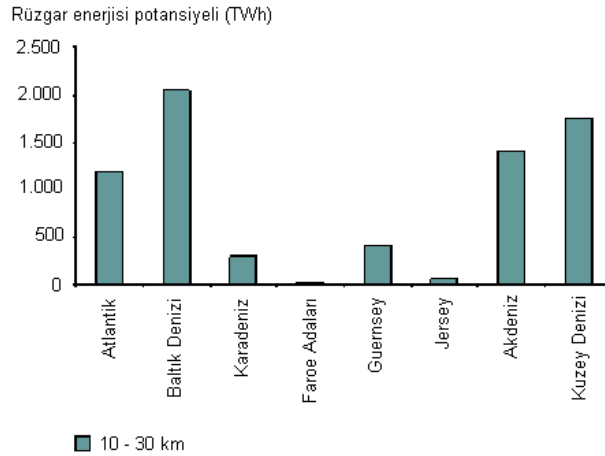
Dağlık bölgelerde sıradışı sertlikte hava şartları ve buz oluşumu sebebiyle türbinin çalışması daha sık kesilebilir, buna karşılık mevcut türbinler için yalnızca iki sefer 10 günden uzun süre devre dışı kalma görülmüştür.

Deniz üzerinde kurulumlar için EWEA ve Greenpeace (2003) kurulum bölgesini 20 metre su derinliğine kadar kısıtlamış ve potansiyeli yılda 417 TWh olarak tahmin

etmiştir. EEA araştırmasına dahil olan Avrupa ülkelerinde deniz üzeri kurulumlar için ulaşılabilir teknik potansiyel 2030 yılı için 30.000 TWh olarak tahmin edilmektedir; bu değer kara üzerinde kurulum için tahmin edilen 45.000 TWh potansiyelin üçte ikisidir. Araştırma dahilinde kara üzerindeki 5.000.000 km<sup>2</sup> alana karşılık 750.000 km<sup>2</sup> deniz alanının incelenmiştir. Bu çalışmada veri olarak 2000 – 2005 arasındaki ortalama rüzgar hızları kullanılmıştır. [10]

Günümüzde ve öngörülebilir gelecekteki teknoloji seviyesi, deniz üzerinde rüzgar enerjisi üretimini kısıtlamaktadır. Kıydan 50 metreden daha fazla mesafedeki bölgeler için çoğu zaman rüzgar hızı verileri derlenmemiştir, buna ek olarak günümüzdeki imalat teknikleri ile bu açıklıklarda türbin inşaatları yapmak zorlayıcı olmaktadır. Bu sebeple EEA'nın 2008'deki rüzgar enerjisi hesaplamalarına kıydan 50 m'den fazla uzaklıktaki bölgeler dahil edilmemiştir.

Aşağıdaki şekilde görülebileceği gibi Avrupa dahilinde 10-30 kilometre arasındaki rüzgar üretim potansiyeli Baltık ve Kuzey Denizi ile Akdeniz'e yoğunlaşmıştır. Kıydan 10-30 km açıklıktaki 7.100 TWh'lık üretim potansiyelinin sırasıyla %29, %25 ve %20'si bu alanlarda bulunmaktadır. Bununla beraber bu kapsamdaki bazı bölgelerde deniz derinliği 50 metreyi aşmaktadır.

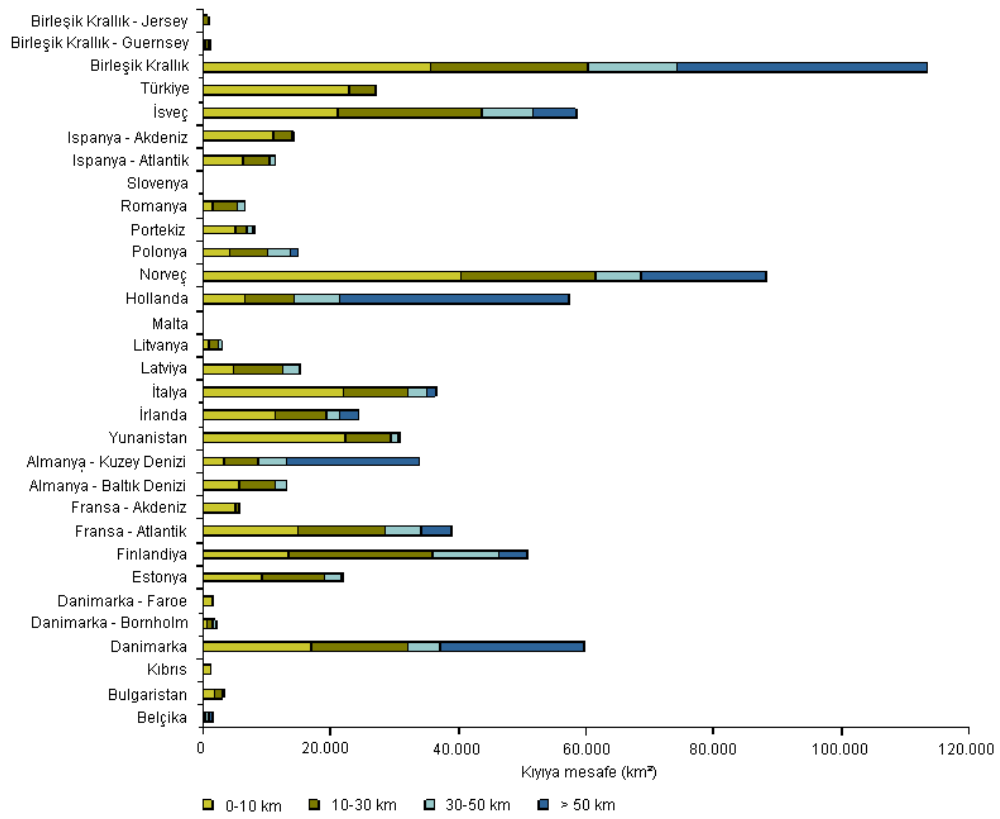


Şekil 2. 8 Avrupa deniz üstü rüzgar enerjisi potansiyeli

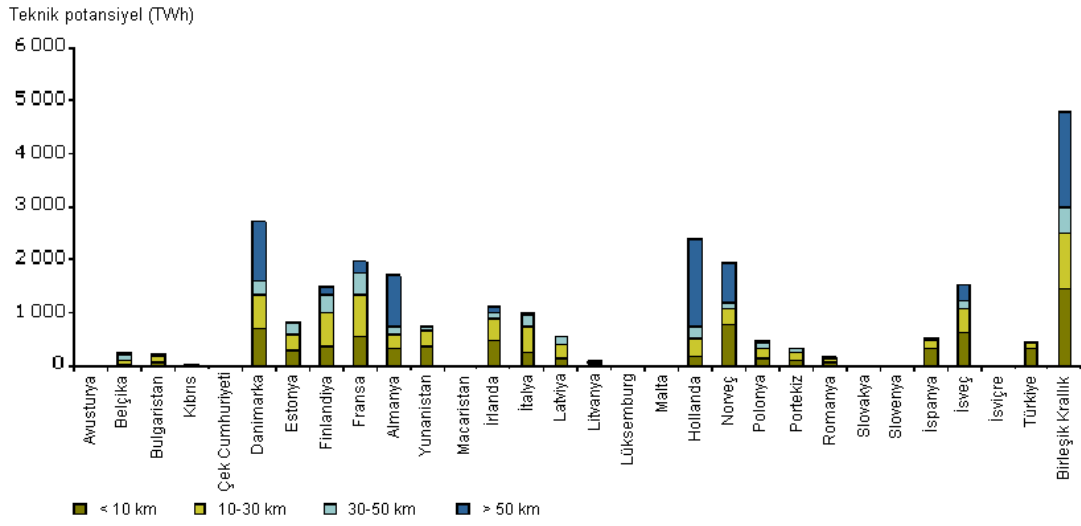
Daha açıklarda, kıydan 30 – 50 km arasında aynı üç bölge toplam rüzgar enerjisi potansiyelinin %30, %30 ve %20'sini oluşturmaktadır. Bu aralık için toplam rüzgar enerjisi potansiyeli 3.300 TWh olarak hesaplanmıştır. Araştırmada ek olarak rüzgar enerjisi üretim potansiyelinin seneler içinde ne kadar değişiklik gösterdiği incelenmiştir.

Sonuçlar yıldan yıla üretim kapasitesinde ciddi değişiklik olabildiğini göstermektedir: 2004 ve 2003 yılları arasında rüzgar hızlarında ciddi farklılıklar kaydedildiği için 2004 yılındaki üretim potansiyeli 2003 yılına göre %11 daha fazla olmuştur. Bazı bölgelerde bu farkın daha da açıldığı görülmüştür; örneğin Danimarka (Kuzey Denizi) ve Almanya (Baltık ve Kuzey Denizi) için 2003 ve 2004 arasındaki fark %30'a yaklaşmıştır.

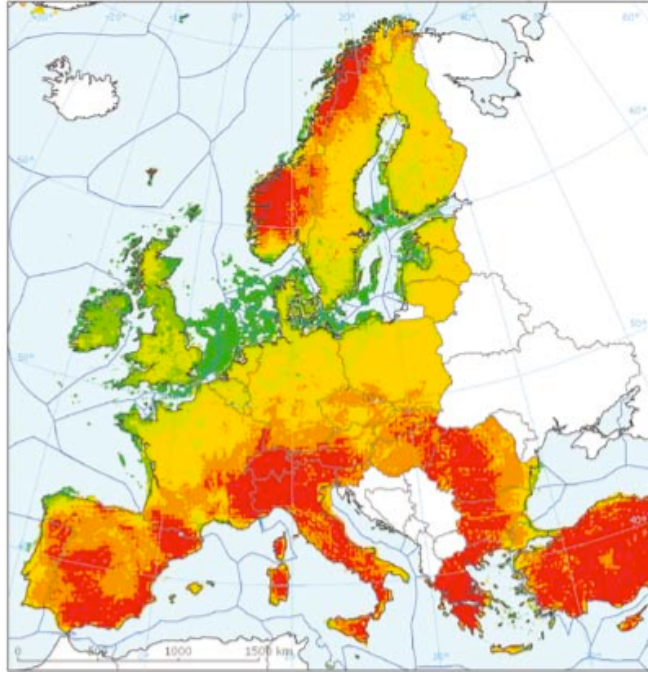
Avrupa içerisinde deniz üzeri kurulumlar için en fazla alan İngiltere (114.000 km<sup>2</sup>) ve Norveç (88.000 km<sup>2</sup>) kıyılarında bulunmaktadır. Rüzgar enerjisi üretim potansiyeli ile kıydan açıklığın arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılabilmesi için kurulum alanları kıydan 0-10 km, 10-30 km, 30-50 km ve 50 km'den uzak olacak şekilde bölünmüş ve Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Ülkelerin deniz üstü RES için müsait alanları (EEA)



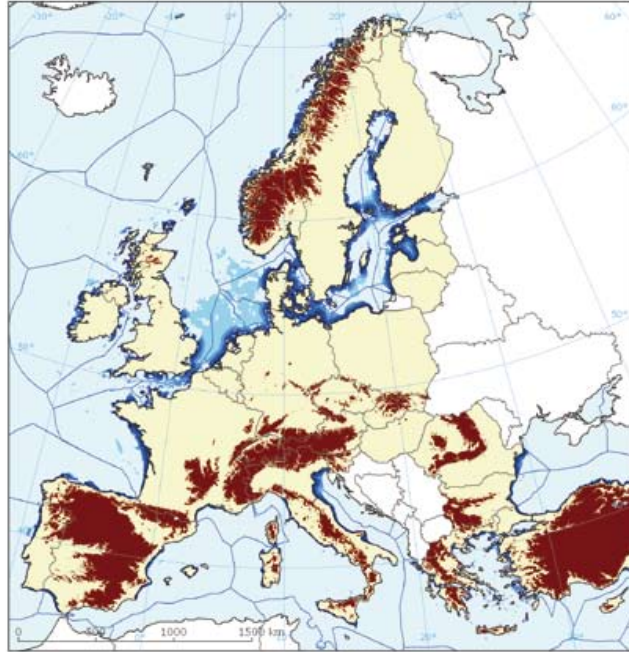
Şekil 2. 10 2030 yılı için tahmin edilen deniz üzeri potansiyel (EEA)



Rotor mili yüksekliğinde  
ortalama rüzgar hızı  
2000 – 2005 (m/sn)



Şekil 2. 11 Rüzgar hızı verileri



Deniz üzeri ve dağlık bölgeler



Şekil 2. 12 Avrupa'daki 50 m'den daha az derinlikte sular

Sığ denizlerde ticari ölçekte rüzgar türbinleri kurulumunun 10 seneden uzun bir süredir devam ettiği Avrupa'da kurulu 39 proje 2.000 MW'tan daha fazla kapasiteye sahiptir. Bu pazarda hükümetlerin teşvikleri önemli etkiye sahip olmuştur. Avrupa Birliği ve

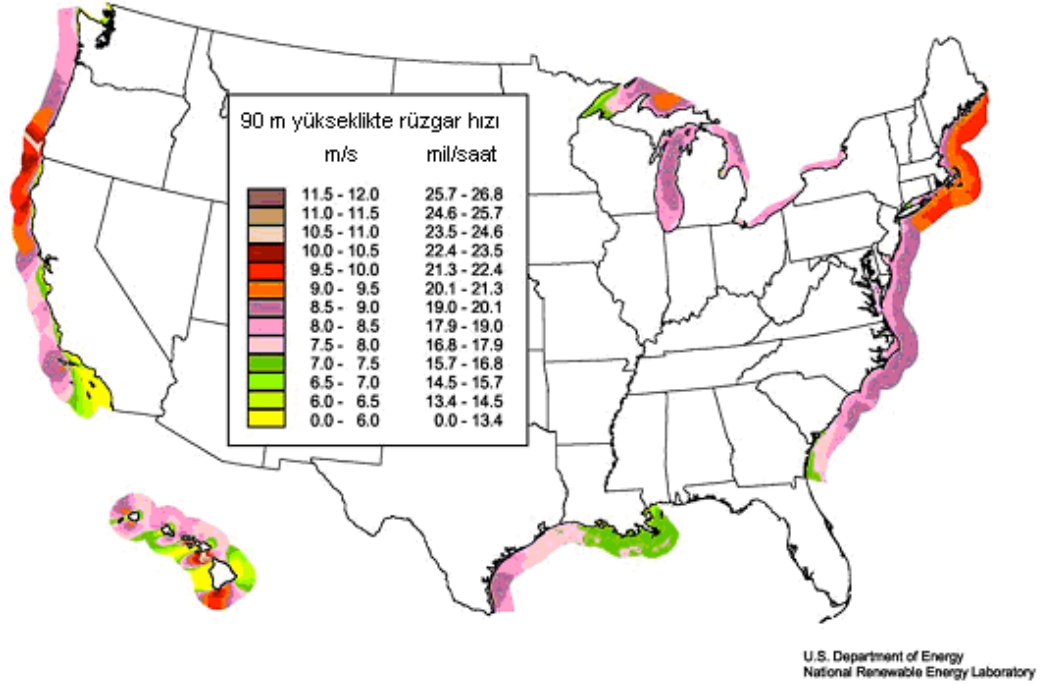


Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği (EWEA)'nın hedefleri deniz üzeri rüzgar çiftlikleri kurulumlarının 2020 yılına kadar 40 GW, 2030 yılına kadar 150 GW'a ulaşmasıdır. [15] Buna karşılık, günümüz koşulları için Amerika Birleşik Devletleri'nde 5 GW'lık deniz üzeri kurulum kapasitesi öne sürülmüştür. [16]

Amerika Birleşik Devletleri'nin uzun okyanus kıyıları ve bu bölgelerdeki rüzgarın elektrik üretimi için uygun olması sebebiyle deniz üzeri rüzgar türbinleri için önemli miktarda enerji kaynağı bulunmaktadır. A.B.D. sahilleri, Büyük Göller bölgesi ve okyanuslardaki kıta sahanlığı bölgelerinde yıllık ortalama rüzgar hızı 7 m/s üzeri olan yerler için toplam rüzgar enerjisi kaynağı 4.150 GW, yani A.B.D.'nin mevcut elektrik üretim kapasitesinin yaklaşık 4 katı olarak hesaplanmıştır [17]. Bu kapasiteden 1.070 GW 30 metreden daha sığ sularda, 630 GW 30 – 60 m arası sularda ve 2.450 GW 60 m'den daha derin denizlerde bulunmaktadır.

Çizelge 2. 3 ABD için deniz üzeri rüzgar enerjisi potansiyeli

Bölge	0-30 m derinlik	30-60 m derinlik	>60 m derinlik	Toplam
New England	100,2	136,2	250,4	486,8
Orta Atlantik	298,1	179,1	92,5	569,7
Güney Atlantik	134,1	48,8	7,7	190,7
Kaliforniya	4,4	10,5	573	587,8
Pasifik Kuzeybatı	15,1	21,3	305,3	341,7
Büyük Göller	176,7	106,4	459,4	742,5
Meksika Körfezi	340,3	120,1	133,3	593,7
Hawaii	2,3	5,5	629,6	637,4
Toplam	1.071,2 GW	628,0 GW	2.451,1 GW	4.150,3 GW



Şekil 2. 13 Amerika kıyılarındaki rüzgar hızları

## 2.7 Dünyada Gelecek İçin Rüzgar Enerjisi Planları

Avrupa Çevre Ajansı'nın 2008'de yaptığı bir araştırma, rüzgar enerjisinden yararlanma açısından aşağıdaki noktaları ortaya çıkartmıştır:

Sadece teorik enerji kaynağı olarak düşünüldüğünde Avrupa'da çok yüksek bir rüzgar enerjisi potansiyeli mevcuttur. Türbin teknolojilerinin günümüzdeki durumu ile yapılan hesaplamalarda bu potansiyelin 2020'deki enerji talebinin yaklaşık 20 katına eşdeğer olduğu görülmektedir.

Kara üzerinde kurulabilecek türbinler için en büyük rüzgar enerjisi potansiyeli kuzeybatı Avrupa'nın tarım ve sanayi yapılan bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Sahil açıklarındaki en büyük potansiyel Kuzey Denizi, Baltık Denizi ve Atlantik Okyanusu'nun sığ sularında bulunmakta olup Akdeniz ve Karadeniz'de bazı yerel çapta potansiyele sahip bölgeler görülmektedir. Derin sulardaki rüzgar enerjisi potansiyeli daha da büyüktür fakat maliyetlerin fazla yüksek olması çalışmanın vadesi içinde değerlendirmeye katılmamasına yol açmıştır.

Kara üzerindeki rüzgar enerjisi potansiyelinin kullanılabilirliği açısından çevre kaynakları önemli bir sorun olmayıp Natura 2000 ve diğer korumaya alınmış alanlar listeden çıkartıldığında potansiyelde yalnızca %13,7 düşüş olmuştur. Buna karşılık beşeri faktörler, özellikle rüzgar çiftliklerinin görsel açıdan rahatsız edici olabilmesi, gerçekleştirilebilecek potansiyelin daha çok düşmesine yol açmaktadır.

Sığ sularda çevresel ve beşeri etkenler daha kısıtlayıcıdır. Sahilden 10 km açığa kadar olan bölgenin %4'ü hesaplama alınır ve deniz trafiği, doğalgaz ve petrol platformları, askeri bölgeler, çevresel açıdan koruma altındaki bölgeler vs. kapsamdan çıkartılırsa potansiyel enerjinin %90'dan büyük bir kısmı azalmaktadır – 2020'de miktar 2.800 TWh'a ve 2030'da 3.500 TWh'e düşmektedir.

Rüzgar enerjisinin üretim maliyetleri, PRIMES standardında ortamala elektrik üretimi masrafına kıyaslandığında kara üzerindeki rüzgar enerjisi potansiyelinin ekonomik açıdan mantıklı kısmı 2020 yılı için 9.600 TWh'e, sığ sular için 2.600 TWh'e düşmektedir. Toplam teknik potansiyelin ufak bir kısmı olmasına karşılık, ekonomik açıdan rekabetçi olabilecek bu kısım 2020 yılı için öngörülen enerji talebinin 3 katından daha fazladır. Bununla beraber rüzgar enerjisinin bu kadar yüksek oranda kullanılabilmesi için mevcut elektrik nakil ve dağıtım hatlarına eklentiler yapılmalı ve bölgedeki elektrik üretimi ve tüketimi arasındaki güç akışı sürekli olarak dengelenmelidir. Yukarıdaki ekonomik açıdan mantıklı potansiyel içerisinde bu gereklilikler ve doğuracakları masraflar dahil edilmemiştir. [10]

Çizelge 1.4'te 2020 ve 2030 yılları için öngörülen teknik, sahil bölgesinin %4'lük kısmı alınarak ve kurulum yapılamayacak bölgeler çıkartılarak sınırlandırılmış ve ekonomik olarak mantıklı rüzgar enerjisi potansiyelleri bulunmaktadır:

Çizelge 2. 4 Avrupa için deniz üzeri rüzgar enerjisi potansiyelleri [10]

		Yıl	TWh	2020 ve 2030 talebinin katı
Teknik potansiyel	Kara Üzerinde	2020	45 000	11–13
		2030	45 000	10–11
	Deniz Üzerinde	2020	25 000	6–7
		2030	30 000	7
	Toplam	2020	70 000	17–20
		2030	75 000	17–18
Sınırlandırılmış Potansiyel	Kara Üzerinde	2020	39 000	10–11
		2030	39 000	9
	Deniz Üzerinde	2020	2 800	0.7–0.8
		2030	3 500	0.8
	Toplam	2020	41 800	10–12
		2030	42 500	10
Ekonomik Olan Potansiyel	Kara Üzerinde	2020	9 600	2–3
		2030	27 000	6
	Deniz Üzerinde	2020	2600	0.6–0.7
		2030	3400	0.8–0.8
	Toplam	2020	12 200	3
		2030	30 400	7

2020 yılında Avrupa Birliği'nin genişletilmiş EU-27 bölgesi içerisinde elektrik talebinin karşılamada rüzgar enerjisinin payı %12 olarak öngörülmüştür. Bu projeksiyonda EU-27 dahilinde 2010 yılında 80 GW kurulu kapasite (3,5 GW deniz üzerinde) ve 2020 yılında 180 GW kurulu kapasite (35 GW deniz üzerinde) mevcut olacağı tahmin edilmektedir. Bu değerler 2010 yılı için toplam güç üretiminin %5'ine ve 2020 yılında enerji talebine göre %11,6 ile %14,3 arasına denk gelmektedir.

Avrupa Yenilenebilir Enerji Konseyi sunduğu yol haritasında 2020 yılında rüzgar enerjisinin 477 TWh'e ulaşacağını tahmin etmektedir [18]. Greenpeace ve Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi en iyimser senaryolarında Avrupa dahilindeki rüzgar gücü kapasitesini 1990 yılındaki 41 GW'tan 2020 yılında 385 GW'a ulaşacağını belirtmişlerdir (Greenpeace ve GWEC, 2008). Bu hedef rüzgar enerjisi kaynaklarının varlığından çok pazarın büyümesi ve teknolojinin ilerlemesine dayanmaktadır.

A.B.D. Enerji Bakanlığı 2010 yılında Deniz Üzeri Rüzgar Yenilikçilik ve Gösterim (OSWinD) inisiyatifini başlatarak A.B.D.'de ticari deniz üzeri rüzgar enerjisi üretimini desteklemeyi ve hızlandırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla çeşitli makaleler hazırlanmış ve gelecek için planlar yapılmıştır. OSWinD 2030 yılına kadar maliyeti 0,07 \$/kW'a kadar

düşürülmüş 54 GW deniz üzeri rüzgar enerjisi tesisi kurulmasını hedeflemektedir, ara bir hedef olarak 2020 yılı için 0,10 \$/kW ve 10 GW kurulu güç belirlenmiştir.

A.B.D.'nin deniz üzeri rüzgar enerjisi stratejisinde Atlantik kıta sahanlığı üzerinde kurulması planlanan santraller büyük önem taşımaktadır. A.B.D. İçişleri Bakanlığı dahilinde 2010'da açıklanan Smart from the Start inisiyatifi ile bu bölgede çevreye duyarlı deniz üzeri rüzgar çiftliklerinin kurulması hızlandırılmaya çalışılmaktadır. İçişleri Bakanlığı'nın kurulum için onay verdiği 12 yenilenebilir enerji projesi (güneş, rüzgar ve jeotermal enerji) ile 4.000 MW'a yakın elektrik üretim kapasitesi hedeflenmektedir. A.B.D. Enerji Bakanlığı da 2009 yılındaki ARRA uygulaması ve 2009-2010 bütçeleri ile deniz üzeri rüzgar türbinlerinin araştırma ve test aşamalarına 90 Milyon \$'dan fazla kaynak ayırmıştır.

Enerji Bakanlığı'nın 2008 raporunda A.B.D.'nin 2030 yılında elektrik ihtiyacının %20'sini rüzgar enerjisinden karşılayabileceği ve deniz üzeri kaynaklardan 54 GW kapasite sağlanabileceği belirtilmiştir. [9]

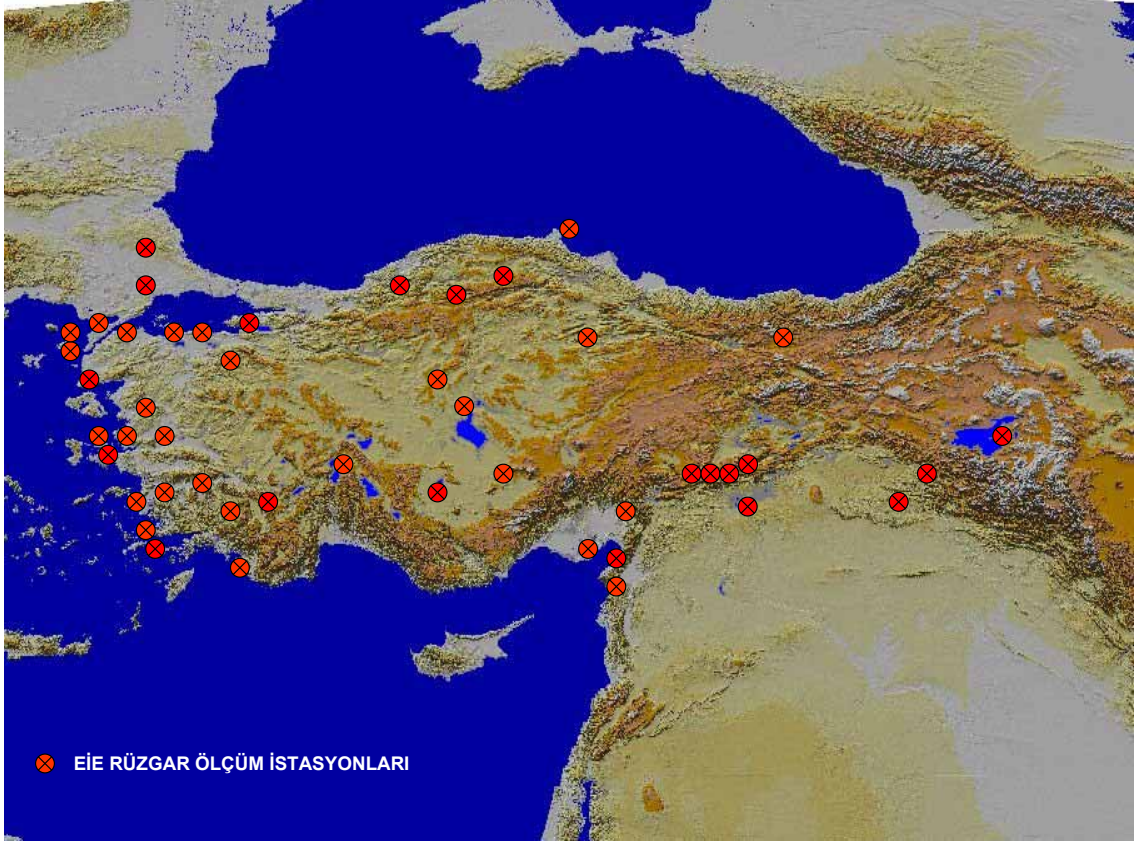
## **2.8 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Kaynakları ve Kullanımı**

Türkiye'de büyüyen ekonominin bir yan etkisi olarak elektrik enerjisi ihtiyacı her gün artmaktadır. Diğer kaynakların yanı sıra rüzgar enerjisi alanında da yatırımlar sürmektedir. Özellikle EPDK'nın 2007 yılındaki ihalesinden sonra lisans başvurularında ve proje kapasitelerinde büyük bir artış yaşanmıştır. Yenilenebilir enerji üretimi için teşvik sağlayan 2005 ve 2007 tarihli yasalar sonucunda da rüzgar enerjisi özel şirketler için daha cazip bir alan haline getirilmiştir.

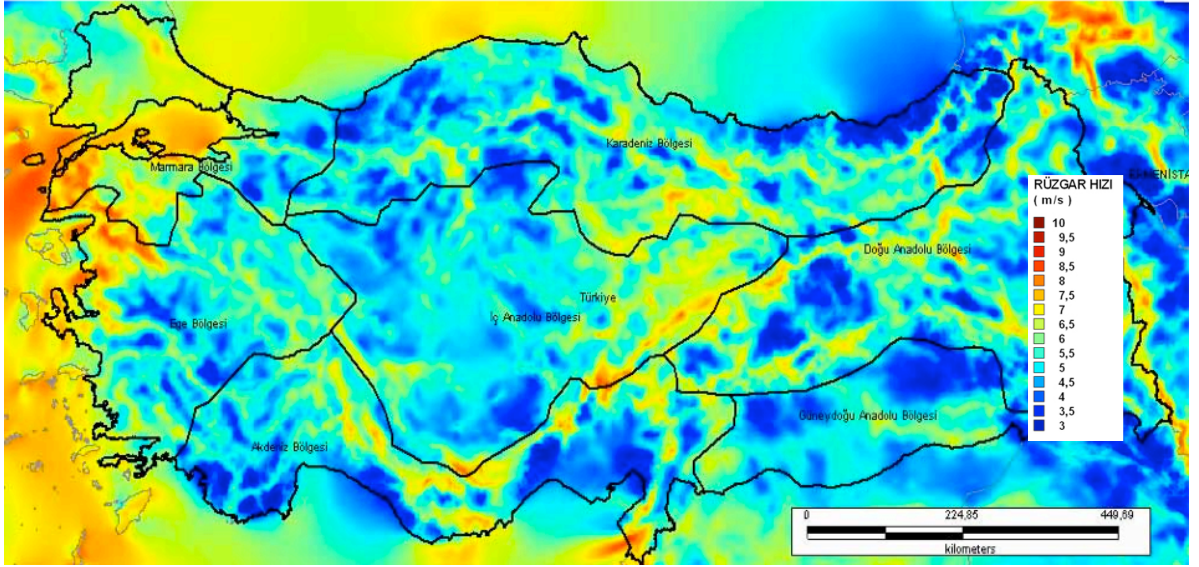
Belirtilen teşvikler ve ülke genelinde yeni projelerin hayata geçmesi, 2023 yılı için konulan ülke elektrik üretiminin %30'unun yenilenebilir kaynaklardan gerçekleşmesi ve 20 GW kurulu rüzgar enerjisi kapasitesine erişilebilmesi için gereklidir. [19]

Türkiye'deki rüzgar enerjisi kaynakları, 2007 yılında sonuçlanan Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) projesi ile 30, 50, 70 ve 100 metre yükseklikteki rüzgar hızları, rüzgar ortalamaları ve yoğunlukları ile referans bir rüzgar türbini için 50 m yükseklikteki yıllık kapasite faktörü açısından 200 m x 200 m çözünürlükte haritalandırılmıştır. REPA sisteminde yerel ve geniş ölçekli rüzgar ölçümleri, bilgisayar simülasyonları, dağlık

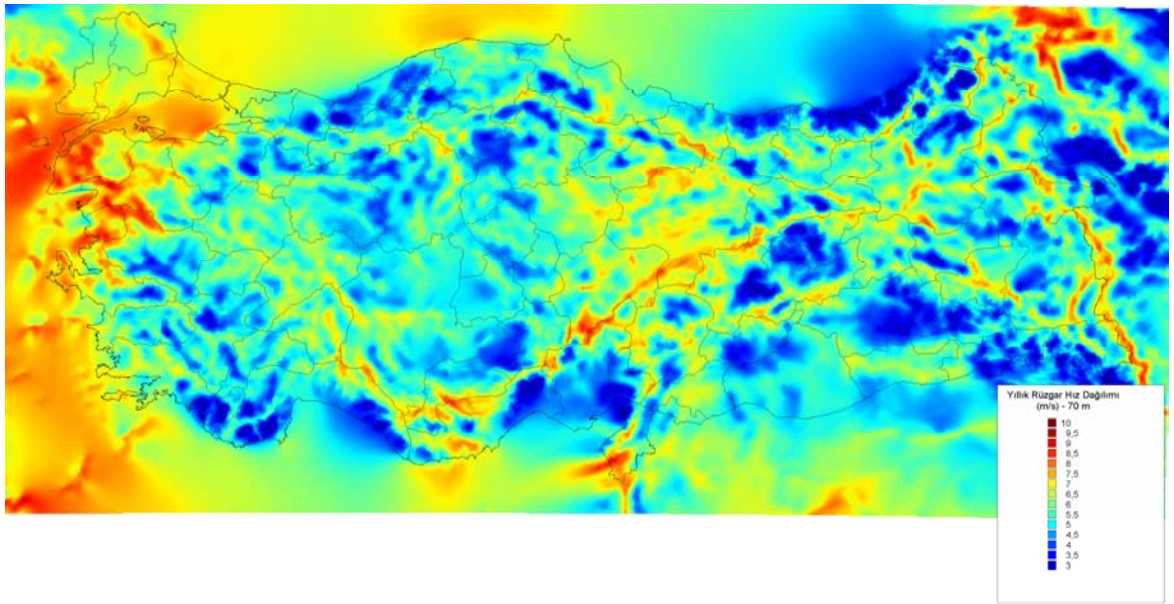
alanlar ve vadiler gibi yer şekilleri dikkate alınmış ve yerleşim alanları, aşırı eğim, 1.500 m'den fazla yükseklik gibi çeşitli sebeplerden rüzgar enerjisi santrali kurulması uygun olmayan yerler de belirtilmiştir. [20]



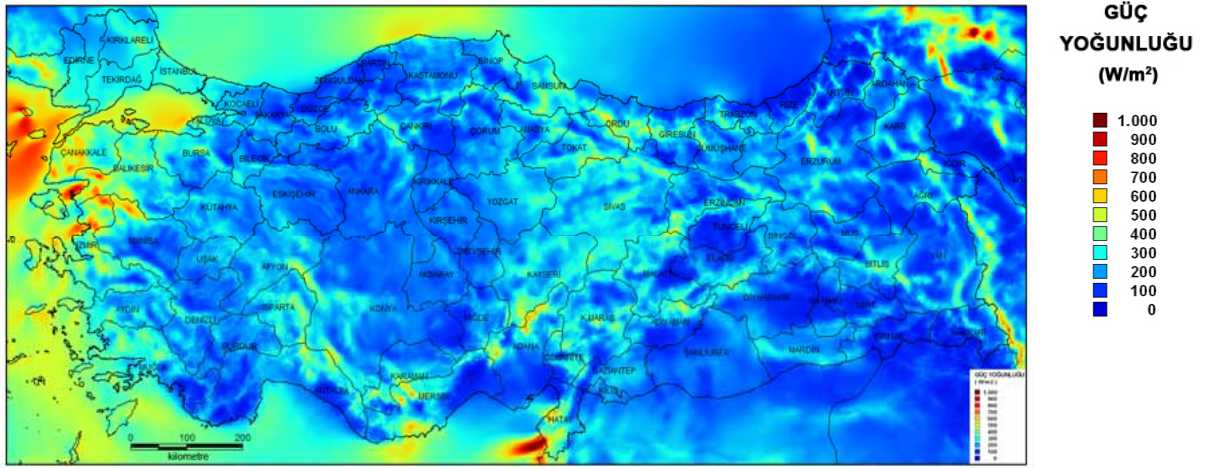
Şekil 2. 14 EİE rüzgar ölçüm istasyonları



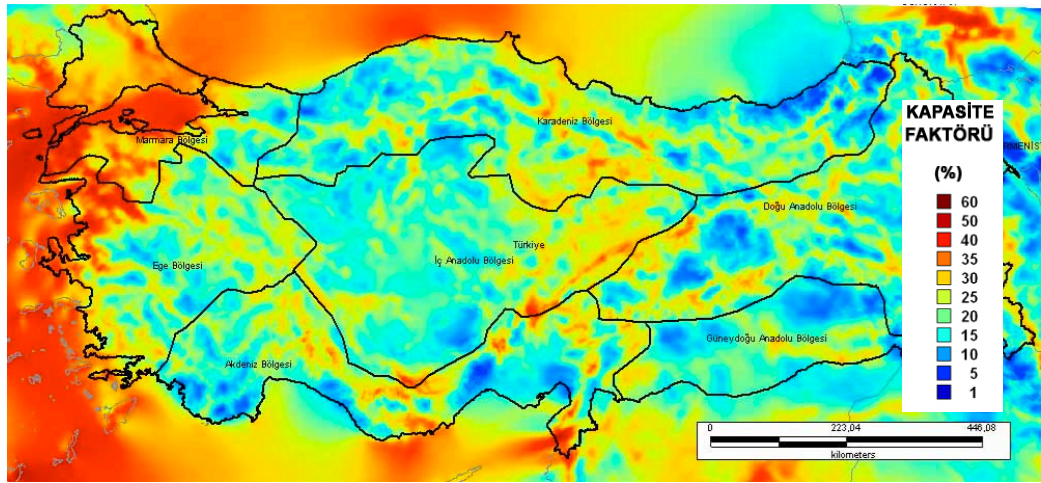
Şekil 2. 15 REPA 50 metre yükseklik için ortalama rüzgar hızları



Şekil 2. 16 REPA 70 metre yükseklik için ortalama rüzgar hızları



Şekil 2. 17 REPA 50 metre yükseklik için ortalama güç yoğunlukları



Şekil 2. 18 REPA 50 metre yükseklik için kapasite faktörü

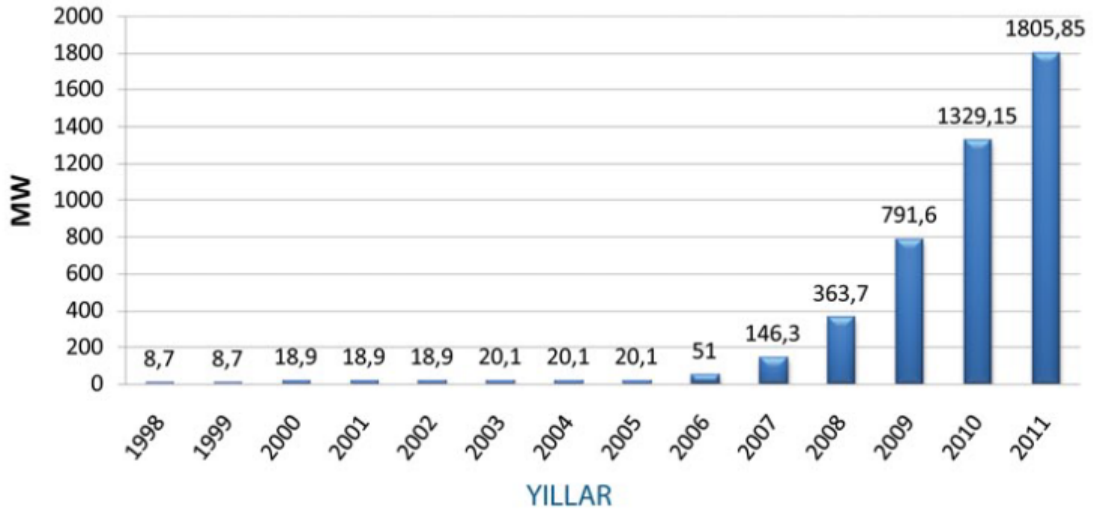
REPA'dan elde edilen veriler ışığında Türkiye'nin toplam rüzgar enerjisi potansiyeli karasal alanlar için 37.836 MW, deniz üzeri için 10.013 MW, toplam olarak 47.399 MW olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada 50 metre yükseklikte yıllık ortalama rüzgar hızının 7,0 m/sn'den ve kapasite faktörünün %35'ten yüksek olduğu bölgeler dikkate alınmış,  $\text{km}^2$  başına 5 MW'lık türbin kurulabileceği düşünülmüş ve kurulum için uygun olmayan alanlar dahil edilmemiştir. Bununla beraber, rüzgar enerjisi santrali yatırımlarının sadece REPA verilerine dayanılarak planlanmaması, yerinde inceleme ve ölçüm yapılması gerekliliği önem taşımaktadır. Elektriksel altyapı açısından trafo merkezlerine bağlanabilecek rüzgar enerjisi kapasitesi 2013 yılı sonuna kadar 11.193 MW olarak tahmin edilmekte olup 2023 yılı sonu için 20.000 MW hedefi mevcuttur.

Rüzgar enerjisinin yüksek yoğunlukta ve yeterli hızda olduğu bölgelerde 10 yıl öncesinden başlayarak pilot kurulumlar yapılmaya başlanmış olup günümüzde de



Bozcaada, Bandırma, Hatay ve Çanakkale’de rüzgar enerjisi üretimine devam edilmektedir. Gökçeada’da 10 adet 70 m’lik rüzgar türbini kullanılarak çok küçük bir sahadan adanın elektrik ihtiyacının %81’inin karşılanabileceği hesaplanmıştır [21]

Türkiye’deki kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi yıllar içinde Şekil 2. 19’da gösterildiği gibi değişmiştir:

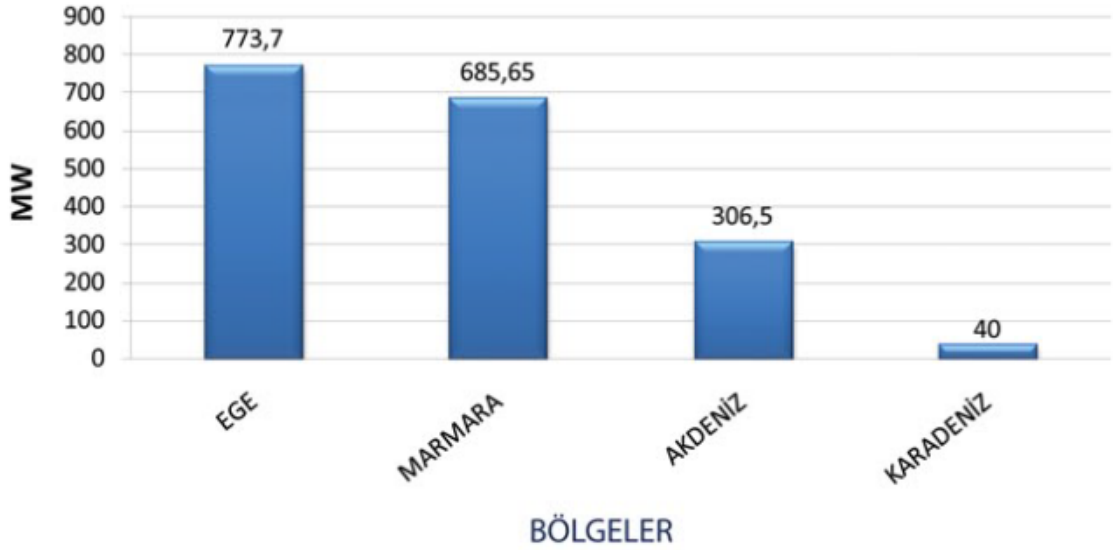


Şekil 2. 19 Türkiye rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı (MW) (TÜREB)



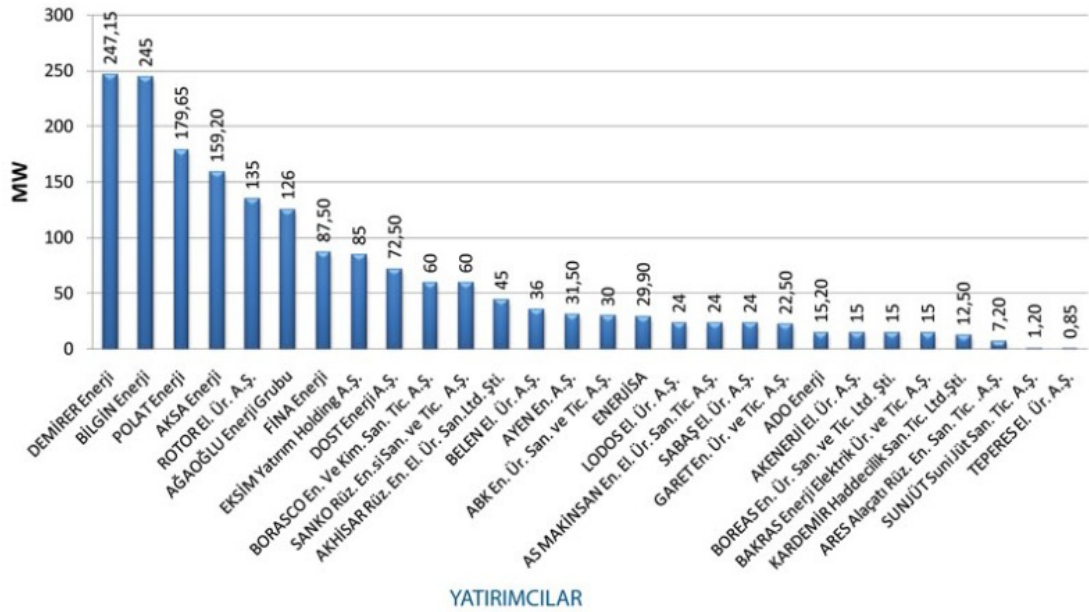
Şekil 2. 20 Türkiye İşletmedeki ve Lisansı Verilmiş Rüzgar Enerjisi Santralleri Haritası

2010 yılında eklenen 537,55 MW’lık ek kapasite ile bir önceki yıla göre %68 kapasite artışı sağlanmıştır. 2011 yılında ise artış 476,4 MW ile %36 olmuştur. [22] Ülkemizde kurulu rüzgar enerjisi santrallerinin büyük bir kısmı Ege ve Akdeniz bölgelerinde olup, santrallerin coğrafi bölgeler göre dağılımı Şekil 2.21’de gösterilen şekildedir.



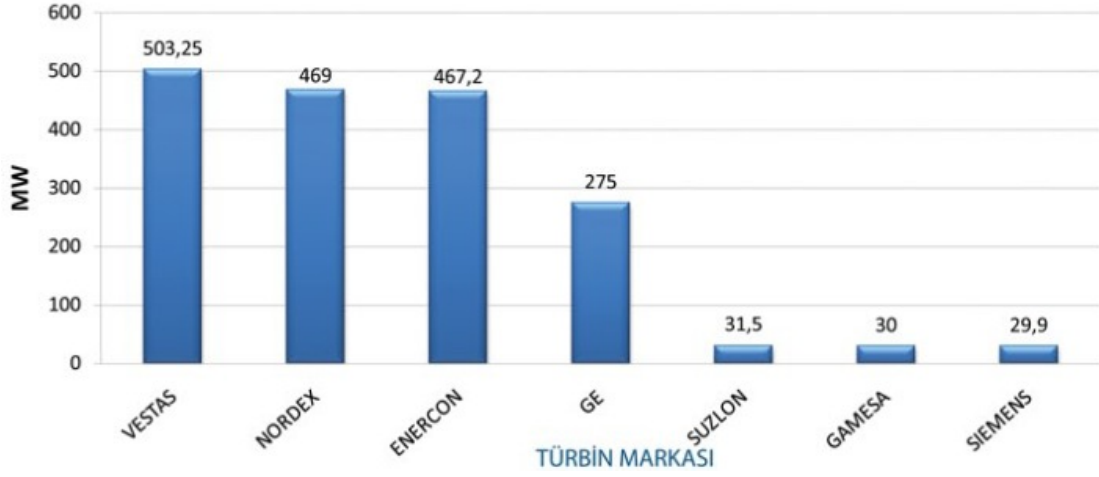
Şekil 2. 21 Rüzgar enerjisi kapasitesinin bölgelere göre dağılımı (TÜREB)

İşletme durumundaki rüzgar enerji santrallerinin yatırımcı firmalara göre dağılımı Şekil 2. 22'de belirtilmiştir.



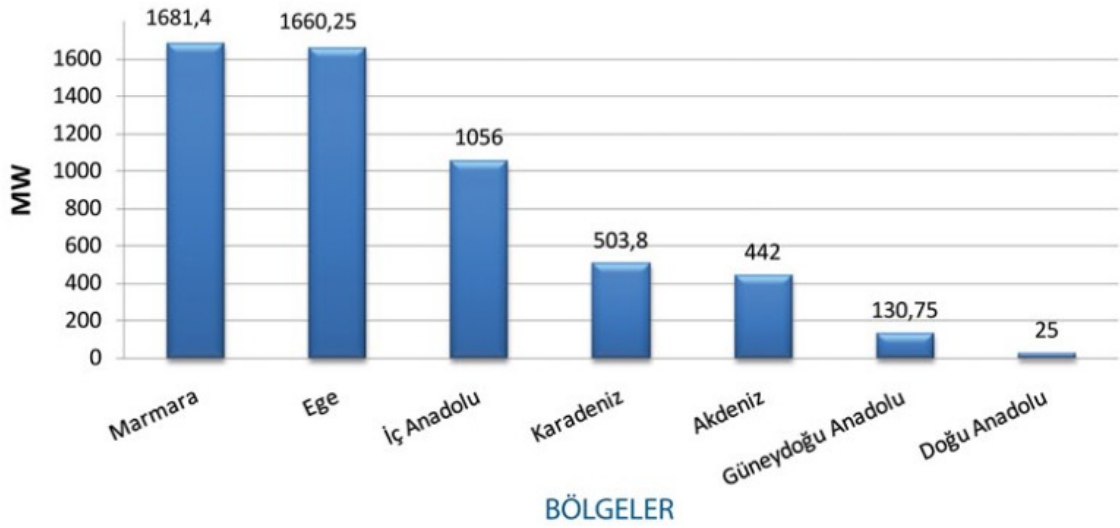
Şekil 2. 22 Rüzgar enerjisi kapasitesinin yatırımcılara göre dağılımı (TÜREB)

Dünya üzerindeki büyük türbin üreticileri Türkiye pazarında doğrudan veya temsilcileri aracılığıyla yer edinmiş olup bu üreticilerin türbinleri aşağıdaki pazar payına sahiptir. Bununla beraber yerli türbin ve yedek parçası üretimi daha küçük ölçekte yapılmaktadır.



Şekil 2. 23 Rüzgar enerjisi kapasitesinin türbin markasına göre dağılımı (TÜREB)

2007'deki ihalede rüzgar enerjisi üretimi lisansı alan büyük şirketlerin ve yabancı ortaklıkların da projelerinin tamamlanması ile Türkiye'de kurulmuş rüzgar enerjisi kapasitesi ciddi oranda artacaktır. Mevcut durumda Türkiye'de lisansı alınmış rüzgar enerjisi santrali projelerinin toplam gücü 5.499,2 MW olup bölgelere göre dağılımı Şekil 2.24'te verilmektedir [22].



Şekil 2. 24 Alınan lisansların bölgelere göre dağılımı (TÜREB)

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında maliyet, enerji yoğunluğu, dünya genelinde potansiyel gibi konular göz önüne alındığında rüzgar enerjisi oldukça iyi bir konumda durmaktadır.

### RÜZGAR ENERJİSİNİN TEMELLERİ

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında maliyet, enerji yoğunluğu, dünya genelinde potansiyel gibi konular göz önüne alındığında rüzgar enerjisi oldukça iyi bir konumda durmaktadır.

#### 3.1 Rüzgarın Oluşum Mekanizması

Çoğu yenilenebilir enerji kaynağı gibi rüzgar enerjisinin kaynağı da Güneş'tir. Güneşten ışık yoluyla gelen enerjinin yeryüzündeki kara ve denizlerde farklı sıcaklık artışlarına sebep olur. Sıcaklıklardaki değişim sonrasında atmosferde hava basıncı değişiklikleri meydana gelir.

Bir hava hareketi olan rüzgar, temel olarak basınç farkları sonucunda havanın yüksek basınç olan ortamdaki düşük basınç olan ortama geçmesi olarak nitelendirilebilir. [23] Bu temel sebebin dışında dünyanın dönmesinden kaynaklanan Coriolis kuvveti etkisinde oluşan sürekli olarak niteleyebileceğimiz rüzgarlar da mevcuttur. Bu basınç farklarının ve geostrofik etkilerin yüksek olduğu yerlerde rüzgarlar daha güçlü olarak yaşanır. İki nokta arasındaki hava basıncı ne kadar fazla ise rüzgar şiddeti o kadar büyük olur.

Rüzgarlar genel olarak "sürekli rüzgarlar" ve "yerel rüzgarlar" olarak ikiye ayrılabilir. Sürekli rüzgarlar sıcaklık farkları yanı sıra Dünya'nın kendi eksenini ve Güneş etrafında dönüşü, kutup ekseninin eğimi, büyük deniz veya kara oluşumları gibi zamanla değişmeyen faktörlerden meydana gelir ve bilindik tarih boyunca mevcut olmuşlardır.

Yerel rüzgarlar ise geçici karakterde olup değişken sıcaklık farklarından, kara ve denizlerin gündüz-gece sıcaklık değişimlerinden ve atmosferdeki diğer hava hareketlerinden kaynaklanır.

İki nokta arasındaki basınç farkı, atmosferik koşullar ve yeryüzüne yakın kesimlerde yeryüzü şekilleri rüzgarın şiddetini etkiler. Dünya üzerinde bazı noktalarda rüzgar hızı ortalaması yıllık olarak çok düşük ve zamanla aşırı değişken iken bazı noktalarda sürekli belirli bir ortalama üzerinde şiddette rüzgar bulunmaktadır. Bu değişkenlik rüzgar enerjisinden faydalanmak istenildiğinde detaylı ve uzun vadeli ölçümler yapılmasını gerektirir. Günümüz rüzgar türbinlerinin verimli çalışabilmesi için rüzgar hızının 4 m/sn'den yüksek olması gereklidir.

Özellikle kara üzerinde kurulacak rüzgar türbinleri için yer şekillerinin rüzgar üzerindeki etkilerinin de dikkate alınması gerekir. Rüzgar enerjisi temel olarak yüzeyden 10 m ile 200 m arasındaki yüksekliklerdeki rüzgar durumu ile ilgilendir, bu bölge için yer şekillerinin etkileri iki kategori içinde sınıflandırılabilir [24]:

1 Pürüzlülük: Kara yüzeyi ve yüzeydeki pürüzlülük yaratan çimen, tarım ürünleri, çalılıklar gibi etkenler yüzeye yakın rüzgar hızının azalmasına neden olur, bu duruma yerin pürüzlülüğü adı verilir. Hesaplamanın yapılacağı nokta pürüzlülüğün etkilenmemek için bu elemanlardan çok daha yüksek olmalıdır.

Yer şekilleri: Kara üzerindeki şekillerin ortalama ölçüsü hesaplanacak noktanın yüksekliğinden çok fazla ise bu durum rüzgar hızlarını etkiler. Tepelerin ve yamaçların zirvesinde veya üst kısımlarında rüzgar hızlanır, fakat bu yer şekillerinin eteklerinde ve vadilerde yavaşlar.

### **3.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi**

Rüzgar enerjisi insanların faydalı iş sağlamak için kullandığı ilk doğal kuvvetlerden olup temel olarak deniz taşıtlarına hareket gücü sağlamak ve ilkel yel değirmenlerinde tahıl öğütmek ve daha sonraları su kaynaklarından nispeten uzak alanlarda tarım yapılabilmesi için su pompalamak amacıyla kullanılmıştır.

Rüzgar enerjisinin deniz taşıtlarındaki kullanımı ilkel tek yelkenli gemilerde kürek gücüne ek olarak kullanılması ile başlamış, zamanla gelişen ve karmaşıklaşan yelken

yapıları ile deniz taşıtlarının ana güç kaynağı haline gelmiştir. Ortaçağ ve Yeniçağ boyunca deniz taşımacılığında ve savaş gemilerinde hareketi sağlayan ve ülkeler arası ticaret ile coğrafi keşifleri mümkün kılan yelkenli gemiler buhar makinasının icadı ile bir süre daha yedek hareket kaynağı olarak kullanılmışsa da günümüzde hobi amaçlı kullanımlar hariç yerini motor tahrikli itiş sistemlerine bırakmıştır.

Günümüzün rüzgar türbinlerine benzer mantıkta kara üzerinde rüzgar enerjisinden faydalı iş elde etmenin ilk örnekleri Hindistan, Tibet, İran gibi doğu ülkelerinde yel değirmenlerinde olmuştur. 10. Yüzyılda Perslerin dikey eksenli yel değirmenleri kullandığına dair kanıtlar bulunmaktadır. Bununla beraber Çinlilerin de çok eski zamanlardan beri yel değirmenlerini kullandığı düşünülmektedir.

Avrupa'da yel değirmenlerinin kullanımı daha sonra – 12. yüzyıl sonlarında – başlamış olup burada daha çok yatay eksenli yer değirmenleri kullanılmıştır. Bunun sonucunda gücün yatay eksenden dikey eksene taşınması, değirmenin rüzgar yönüne dönebilmesi ve rotorun gerekli zamanlarda frenlenebilmesi ihtiyaçları doğmuş, bu problemlerin çözülmesi ile dikey eksenli yel değirmenlerine göre daha karmaşık fakat daha yüksek verimli değirmenler elde edilebilmiştir.

### **3.3 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Elde Etmenin Tarihi**

Charles F. Brush 19. yüzyılda icat ettiği doğru akım dinamosu ile kurşun asit pillerin ve ilk ticari elektriksel ışıkların kullanımını sağlamıştır. 1887-1888 yıllarında Brush ilk otomatik hareketli elektrik üreten rüzgar türbinini inşa etmiştir. 17 m rotor çapındaki bu türbin 144 kanatçıktan oluşuyor ve 12 kW elektrik üretti.

Daha sonraları daha hızlı dönen rüzgar türbinlerinin daha yüksek verime sahip olduğu anlaşılmış ve Paul la Cour 1891-1918 yılları arasında 20-35 kW güç aralığında 100'den fazla türbin tasarlamıştır. (Heier, 1998)

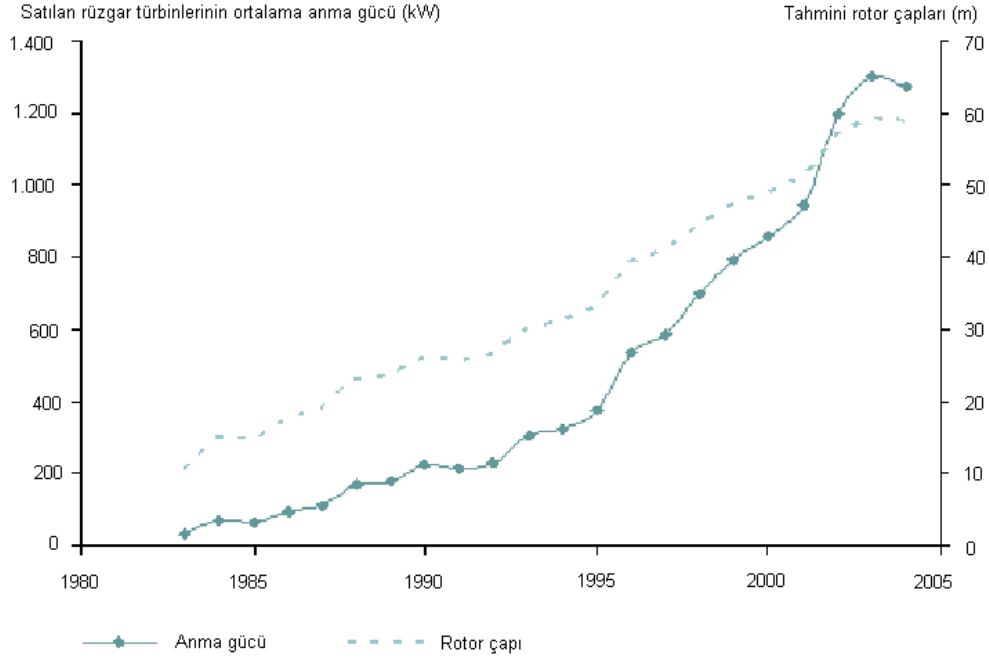
Rüzgar türbinlerinin aerodinamik olarak geliştirilmesi sonucunda 1941 yılında Smith-Putnam 1250 kW'lık 53 m rotor çaplı bir türbini inşa etmiş, 1957 yılında Danimarka'da 200 kW'lık 24 m rotor çaplı Gedser türbini yapılmıştır.

1958 yılında yapılan Hütter türbini 34 m rotor çapına ve 100 kW güç üretimine sahipti. Alman Allgaier 1950'lerin başında kütle üretimini amaçlayan ilk santrali kurmuştur.

Amerika, İsveç ve Almanya'da MW güç çıkışlı türbinler tasarlanmış, büyük güçlü türbinler daha sonra ABD, Almanya, Hollanda ve Danimarka'da geliştirilmiştir. 1980'de Kaliforniya'da 1.500 MW'lık bir tesis 50, 100 ve 250 kW'lık türbinlerler inşa edilmiştir.

Rüzgar türbinleri güç değeri bakımından ciddi artış göstererek 1980'lerin başında ortalama 50 kW'tan düşük anma güçlerine sahipken ortalama güç değeri 2005'te 1 MW'ın üzerine çıkmıştır (DWIA, 2005). 2006 yılında ticari olarak satılan boyutlar 750 – 2.500 kW arasındaydı (GWEA, 2006).

Türbin boyuna bağlı olarak, rotor çapı da 1980'lerdeki 15 m'den günümüzdeki 1-1,5 MW gücündeki türbinler için 60-80 m'ye ulaşmıştır (EWEA, 2003). EWEA'nın bulguları türbinin anma gücü ile rotor çapı arasındaki bağı örneksel olarak ortaya koymaktadır; anma gücü rotor çapının karesi ile orantılı olarak artmaktadır. Buna bağlı olarak 100 m çaplı bir rotor yaklaşık 3 MW anma gücüne denk gelecektir, 70 m rotor çaplı bir türbin ise yaklaşık 1,5 MW anma gücüne sahip olacaktır. 2 MW anma gücüne sahip ortalama bir türbin için rotor çapı 80 m dolaylarında olmaktadır. Şekil 3.1'de türbin anma gücünün ve rotor çapının tarih içinde gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 3. 1 Anma gücü ve yaklaşık rotor çapı cinsinden gelişim (DWIA, 2006)

Bununla beraber rotor merkezinin yüksekliği de anma değeri üzerinde etkiye sahiptir. Daha yüksek boylu türbinlerde rüzgardan elde edilen ek güç ile daha büyük türbin için oluşacak ek maliyet dengelenmelidir. [10] EWEA büyük kara üzerine kurulu türbinler için rotor merkezi yüksekliğinin neredeyse rotor çapına eşit olduğuna ulaşmıştır.

Gelecekte daha büyük güçte türbinler için türbin ve rotor boyutlarının daha da büyüyeceği tahmin edilebilir. Bu tarz büyük türbinlerde rotor çapı 150 m'ye ulaşabilecektir. Rotor çapı kulenin yüksekliğini de belirlemekle beraber, gelecekteki deniz üzeri rüzgar türbinlerinde rüzgar hızının daha az bozuntuya uğraması sebebiyle kule yüksekliğinin rotor çapından daha az olması beklenebilir.

### 3.4 Temel Rüzgar Enerjisi Denklemleri

Rüzgar türbinleri hareket eden hava molekülerinin kinetik enerjisini önce türbin kanadında dönme kinetik enerjisine, sonra bu dönmenin bir elektrik generatörüne aktarılması ile elektrik enerjisine çevrilmesi ile çalışır.



Rüzgar enerjisi, temel olarak belirli bir kütle ve hıza sahip hava parçacıklarının karşılıklarına çıkan cisme uyguladıkları kuvvettir. Bu açıdan kinetik enerji formüllerinin temellerine dayanır. Bu formül,

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.1)$$

Bu formülde  $E_K$  hava parçacıklarının, yani rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjiyi,  $m$  hava parçacıklarının kütlelerini (kg),  $v$  ise rüzgar hızını (m/sn) gösterir.

Rüzgar enerjisinin birim zamandaki bileşeni – yani teorik rüzgar gücü – ise hareket eden hava debisi ile ilişkilidir.

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (3.2)$$

Bu formülde  $\dot{m}$  rüzgar debisini (kg/sn) gösterir. Rüzgar debisi, hava moleküllerinin yoğunluğu ve hava hareketinin kesitini oluşturan türbin pervanesi alanı biçiminden aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\dot{m} = A \cdot v \cdot \rho \quad (3.3)$$

A türbin süpürme alanını belirtmekte olup belirlenmesi

$$A = \frac{\Pi \cdot D^2}{4} \quad (3.4)$$

formülü ile türbin kanadı çapı D kullanılarak yapılabilir. Teorik rüzgar gücü, türbin kanat çapının karesi ile orantılıdır; bu sebeple geçtiğimiz on yıllarda gelişen yapısal teknolojiler ile beraber türbin kanat çapları sürekli olarak artırılmıştır.

Rüzgar debisinin teorik rüzgar gücü formülünde yerine konulması sonucunda

$$\begin{aligned} P_T &= \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v \cdot v^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \end{aligned} \quad (3.5)$$

rüzgar teorik gücü türbin kanat alanı, hava yoğunluğu ve rüzgar hızına bağlı olarak elde edilir. Rüzgar gücü, rüzgar hızının kübü ile orantılı olarak değişmektedir. [25]

Bu formül ile belirli bir aksel hız ve kesitteki hava hareketinin toplam kinetik enerjisi hesaplanabilir. Bununla beraber, bu enerjinin tamamı türbin tarafından dönme enerjisine çevrilemez. Kütle korunumu yasası gereği ve pervanenin havanın geçişi ile beraber dönebilmesi için pervane kesiti boyunca gelen hava akışı pervanenin arkasından yoluna devam etmelidir; gelen rüzgarın bütün kinetik enerjisini pervaneye aktararak “durması” gibi bir durumdan söz edilemez. Pervane arkasında akışa devam eden havanın da pervaneden çıkış hızına bağlı olarak belirli bir kinetik enerjisi olacaktır, dolayısıyla enerjinin korunumu yasası da pervanede dönme kinetik enerjisine çevrilen enerjinin pervaneye gelen rüzgarın sahip olduğu toplam enerjinin ancak belirli bir kesimi olacağını belirtir.

Rüzgardan pervaneye aktarılan gücün teorik hesaplamaları yapılırken hava akışı ve pervane ile ilgili olarak aşağıdaki kabuller yapılmaktadır:

Pervanenin merkezinde akışı engelleyen bir göbek kısmı olmadığı, sonsuz kanatçığa sahip olduğu ve kanatçıklarda hava sürtünmesi olmadığı kabul edilmektedir.

Pervaneye hava girişinin ve hava çıkışının kontrol hacmini sabit tutabilmek ve bütün hava akışını dahil edebilmek amacıyla aksel olduğu kabul edilir.

Hava akışının sıkıştırılmaz olduğu, havanın yoğunluğunun sabit kaldığı ve hava ile kanatçıklar arasında ısı transferi olmadığı kabul edilir.

Pervanenin kütlelessiz olduğu, pervaneye veya pervanenin arkasındaki hava akışına açılal momentum aktarımı olmadığı kabul edilmektedir.

Pervanenin kesit alanı  $A$  ( $m^2$ ) olarak belirtilmiştir. Havanın tam pervane içinden geçerkenki hızını  $v$ , pervaneye girişi esnasındaki yüksek hızını  $v_g$  ve daha dar kesitini  $A_g$ , pervanede enerjisinin bir kısmını bıraktıktan sonra çıkarken sahip olduğu daha düşük hızı  $v_c$  ve daha geniş kesitini  $A_c$  olarak tanımlayalım.

Sürekli akış olan sistemde kütle korunumu yasası ile pervaneden önce, pervane kesitinde ve pervaneden çıkış sonrasında aynı hava akışı için aşağıdaki formüller yazılabilir:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_g \cdot v_g = \rho \cdot A \cdot v = \rho \cdot A_c \cdot v_c \quad (3.6)$$

Rüzgarın pervane üzerinde uyguladığı kuvvet aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} F &= m \cdot a \\ &= m \cdot \frac{dv}{dt} \\ &= \dot{m} \cdot \Delta v \\ &= \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_g - v_\xi) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Bu kuvvetin yaptığı iş diferansiyel olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$dE = F \cdot dx \quad (3.8)$$

Birim zamanda yapılan iş, yani güç ise

$$P = \frac{dE}{dt} = F \cdot \frac{dx}{dt} = F \cdot v \quad (3.9)$$

olmaktadır. Üstte belirlenen kuvvet değeri bu formülde yerine yazıldığında

$$P = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_g - v_\xi) \quad (3.10)$$

pervanenin dönüşü esnasında rüzgardan elde edilen güç tanımlanmış olur.

Elde edilen gücü tanımlamanın kütlenin korunumu dışında diğer bir yolu da rüzgarın pervaneden önceki ve sonraki kinetik enerjilerinin farkını hesaplamaktır. Hesaplamalarımıza dahil ettiğimiz hava akışı üzerinde enerjinin korunumu yasasını uyguladığımızda enerji farkını, yani çekilen gücü aşağıdaki şekilde hesaplayabiliriz:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_g^2 - v_\xi^2) \quad (3.11)$$

Formülde debi yerine kütlenin korunumu yasası uygulanmasındaki tanım yazılırsa

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_g^2 - v_\xi^2) \quad (3.12)$$

formülüne erişilir. Rüzgardan pervaneye aktarılan gücü hesaplamak için birisi diferansiyel işten, diğeri enerjinin korunumu yasasından hareketle elde edilen iki formül de geçerlidir. İki formülün eşitlenmesi sonucunda aşağıdaki sonuca ulaşılır:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_g^2 - v_\xi^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_g - v_\xi) \quad (3.13)$$

Denklemin iki tarafının incelenmesi sonucunda  $v$ ,  $v_g$  ve  $v_\zeta$  değerleri için aşağıdaki eşitliğe ulaşılır:

$$(v_g^2 - v_\zeta^2) = (v_g - v_\zeta) \cdot (v_g + v_\zeta) = v \cdot (v_g - v_\zeta) \quad (3.14)$$

$$v = \frac{1}{2} \cdot (v_g + v_\zeta) \quad (3.15)$$

Bu eşitlikten pervane kesitinde rüzgar hızının pervaneye geliş ve pervaneden uzaklaşma hızlarının ortalamasına eşit olduğu sonucu çıkmaktadır.

Elde edilecek rüzgar gücünün en yüksek olacağı  $v_g$  ve  $v_\zeta$  değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot (v_g + v_\zeta) \right) \cdot (v_g^2 - v_\zeta^2) \\ &= \frac{1}{4} \cdot A \cdot \rho \cdot (v_g + v_\zeta) \cdot (v_g^2 - v_\zeta^2) \\ &= \frac{1}{4} \cdot A \cdot \rho \cdot (v_g^3 - v_g \cdot v_\zeta^2 + v_\zeta v_g^2 - v_\zeta^3) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Hangi pervane sonrası rüzgar çıkış hızı değeri  $v_\zeta$  için elde edilecek gücün en yüksek olacağı türev yolu ile bulunabilir:

$$\frac{dP}{dv_\zeta} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (-3v_\zeta^2 - 2v_g \cdot v_\zeta + v_g^2) \quad (3.17)$$

Türevdeki  $(-3v_\zeta^2 - 2v_g \cdot v_\zeta + v_g^2)$  kısmı 0'a eşitlenir ise

$$\begin{aligned} (-3v_\zeta^2 - 2v_g \cdot v_\zeta + v_g^2) &= 0 \\ \Delta' &= v_g^2 - (-3v_g^2) = -4v_g^2 \\ \sqrt{\Delta'} &= 2v_g \\ v_{\zeta(1,2)} &= \frac{-v_g \pm 2v_g}{3} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Rüzgarın türbin çıkış hızı  $v_\zeta$  için karşımıza iki seçenek çıkmaktadır:

$$\begin{aligned} v_{\zeta 1} &= -v_g \\ v_{\zeta 2} &= \frac{1}{3} v_g \end{aligned} \quad (3.19)$$

$v_c$  için pozitif olan değeri alırsak türbinde en yüksek güç alımını sağlamak için rüzgar çıkış hızının giriş hızının  $\frac{1}{3}$  kadarı olması görülür. Buradan hareketle

$$\begin{aligned}
 P_{maks} &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{2}{3} v_g \cdot \left( v_g^2 - \left( \frac{1}{3} v_g \right)^2 \right) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{16}{27} v_g^3 \\
 &= 0,592 \cdot \rho \cdot A \cdot v_g^3
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

Bu elde edilen değerden A dairesel kesitine ve  $v_1$  hızına sahip bir hava hareketinden rüzgar türbini ile elde edilebilecek gücün en fazla hava hareketinin toplam kinetik enerjisinin  $\frac{16}{27}$  kadarı, yani %59,2'si olabileceği ortaya çıkmaktadır. Betz limiti olarak adlandırılan bu değer ısı makinalarındaki Carnot limiti benzeri şekilde rüzgar türbinleri için ulaşılabilecek en yüksek verim değerini ifade etmektedir. Formüllerin hesaplanması amacıyla yapılan kabuller “ideal pervane ve hava hareketi” için, sürtünme olmadan ve hava hareketinin tamamının aksenel hareket ettiği şeklindedir. Sürtünme kayıpları, hava akışının ideal olmaması, gerçek bir pervanenin oluşturacağı verim düşüşleri ve pervaneden sonraki mekanik ve elektrik kayıplar sebebiyle gerçek bir rüzgar türbininden elde edilebilecek enerji verimi bu değerden daha düşük olacaktır. Yine de, günümüzdeki büyük rüzgar türbinleri pervanelerine gelen rüzgardan %45 - %50 arasında güç alımı yapabilmektedirler, bu da teorik olarak mümkün olan azami değer %75 - %85'ine kadar çıkmaktadır.

Rüzgar hızı belirli bir yükseklikte ölçülmüşse ve başka bir yükseklikteki rüzgar hızı hesaplanmak isteniyorsa pürüzlülük katsayısı kullanılarak aşağıdaki şekilde bulunabilir;

$$\frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^a \tag{3.21}$$

Bu formülde  $h_1$  (m) rüzgar şiddetinin ölçüldüğü yükseklik ve  $h_2$  (m) rüzgar şiddetinin bulunmak istendiği yüksekliktir. Bu yüksekliklerdeki rüzgar hızları sırasıyla  $V_1$  ve  $V_2$  olarak (m/s) yazılır, formüldeki  $a$  pürüzlülük katsayısıdır. (Durak, 2000)

Bu tipteki dönüşümler rüzgar haritasındaki değerlerin yüzeyden 10 metre yükseklik için verilmiş olduğu fakat türbinin rotor merkezinin 80 – 100 metre gibi yüksekliklerde olduğu durumlar için gereklidir. Daha detaylı olarak aşağıdaki logaritmik formül kullanılabilir:

$$V_H = V_{10} \left( \frac{\ln(H / z_0)}{\ln(10 / z_0)} \right) \quad (3.22)$$

Bu formülde,

H metre cinsinden rotor merkezi yüksekliğini,

$V_H$  m/sn cinsinden rotor merkezi yüksekliğindeki rüzgar hızını,

$V_{10}$  m/sn cinsinden 10 metre yükseklikteki rüzgar hızını,

$z_0$  metre cinsinden pürüzlülük boyutunu belirtir.

Bu formülde ısı etkiler göze alınmamıştır.

Çizelde 3. 1’de günümüzde kullanılan ve 2020 ile 2030 yılları tahminleri için türbin anma gücünün rotor çapına bağlı değişimi verilmiştir [10]:

Çizelge 3. 1 Rüzgar türbinlerinin gelişimi üzerine öngörüler

	Kara Üzerinde			Deniz Üzerinde		
	Günümüzde Ortalama	Gelecekte		Günümüzde Ortalama	Gelecekte	
		2020	2030		2020	2030
Anma gücü (MW)	1,5	2	2	2-6	8	10
Rotor çapı (m)	60-80	80	80	80-129	140	150
Rotor merkezi yüksekliği (m)	80	80	80	100	120	120

### 3.5 Enerji Santrali Türleri

Elektrik enerjisi üretim santralleri birkaç farklı türde sınıflandırılabilir. Enerji elde edilen yakıtın veya kaynağın türüne bağlı olarak yenilenebilir enerji santralleri (rüzgar, güneş, jeotermal, hidroelektrik, dalga enerjisi, OTEC..), fosil yakıt yakan santraller (kömür, doğalgaz, fuel-oil santralleri, küçük çaplı üretim için dizel jeneratörler) veya nükleer yakıt tüketen santraller olarak sınıflandırma yapılabilir. Benzer şekilde katı, sıvı veya gaz yakıt tüketimine göre de sınıflandırma yapılabilir.

Enerji santrallerini sınıflandırmanın bir diğer yolu ise ülke çapındaki elektrik şebekesi içinde üstlendiği role göre sınıflandırma yapmaktır. Ülke çapında elektrik üretiminin büyük bir kısmını sürekli olarak üretme görevi olan santrallere temel yük (base load) santralleri adı verilir. Genellikle birim elektrik üretme maliyeti düşük olan bu santraller elektrik ağındaki ihtiyaç çok azalmadığı sürece tam kapasite ile sürekli olarak çalıştırılırlar. Bu tip santrallere örnek olarak kömür yakılan büyük elektrik santralleri ve nükleer santraller gösterilebilir.

İkinci tip olan, elektrik şebekesindeki yükü takip eden (load following) santrallerde elektrik üretim maliyeti daha fazladır. Bu tip santrallerin üretilen elektrik miktarını koşullara göre hızlı şekilde artırıp azaltabilmesi istenir. Elektrik üretimi şebekedeki talep yüksek olduğunda veya gün içi pik zamanlarında elektrik alım fiyatının yüksek olmasına bağlı olarak üretim firması tarafından arttırılır. Elektrik taban alım fiyatının aşağı çekildiği ve tam kapasite ile üretimin ekonomik olmadığı zamanlarda üretim aşağı çekilir. Hidroelektrik santrallerde de şebekenin talebi yüksek değilse baraj gölü veya nehir seviyesini korumak amacıyla üretim azaltılır. Bu tip santrallere örnek olarak doğalgaz kombine çevrim, fuel-oil ve hidroelektrik santraller gösterilebilir.

Son tip olan aralıklı (intermittent) üretim yapan santraller ise devamlı devrede olmayıp elektrik üretim maliyeti yüksek olan üretim santralleridir. Bu tip santrallerde elektrik tüketiminin pik yaptığı zamanlarda veya yenilenebilir enerji kaynaklı santraller için enerji kaynağı mevcut olduğunda üretim yapılır. Bu santrallerin ülke çapındaki şebekenin ihtiyacını devamlı olarak veya büyük oranda karşılaması değil, mevcut santrallere destek olması veya tüketim yerine yakın bölgede elektrik üretilerek aktarım kayıplarını ve masraflarını azaltması beklenir. Bu tip santrallere örnek olarak fotovoltaiik güneş panelleri, pistonlu dizel ve fuel-oil generatörler ve günümüzün rüzgar türbinleri örnek verilebilir.

### **3.6 Kapasite Faktörü**

Bir enerji üretim santralinde kapasite faktörü, belli bir süre içerisinde santralin ürettiği elektrik enerjisinin belirtilen süre boyunca tam kapasitede çalışması durumunda üreteceği elektrik enerjisine oranıdır [26]. Kapasite faktörü genellikle tam bir yıl üzerinden hesaplanır. Enerji üretim santralinin türüne bağlı olmadan – termik, nükleer,

rüzgar enerjisi, güneş enerjisi vs. – her santral için kapasite faktörü hesaplanabilir ve elektrik şebekesinde yeterlilik sağlanabilmesi için planlamaların içine dahil edilir.

Doğalgaz kombine çevrimi ile çalışan bir elektrik santralinde generatörlerin 500 MW üretim kapasitesi olması durumunda generatörler maksimum kapasite ile çalışırlarsa bir sene içerisinde

$$500 \text{ MW} \times (365 \times 24 \text{ saat}) = 4.380.000 \text{ MWh} \quad (3.23)$$

elektrik enerjisi üretimi gerçekleşebilir. Bir sene sonucunda bu santralin 2.600.000 MWh elektrik üretmesi sonucunda

$$2.600.000 \text{ MWh} / 4.380.000 \text{ MWh} = 0,593 \quad (3.24)$$

santralin yaklaşık %60 kapasite faktörü ile çalıştığı söylenebilir.

Elektrik şebekesinde sürekli olarak çalıştırılan ve temel yük (“base load”) olarak sınıflandırılan santraller genellikle daha yüksek kapasite faktörüne sahiptir. Kömür ile çalışan büyük bir elektrik santralinin %70-90 kapasite faktörü ile çalışması olağandır. Nükleer enerji santrallerinde kapasite faktörü elektrik üretim ihtiyacına bağlı olarak %100’e yaklaşabilir. 1971-2009 arasında Amerika’daki nükleer enerji santrallerinin kapasite faktörü ortalama %70 iken [27] 2010 yılında %91,2, 2011 yılında %89 olarak gerçekleşmiştir.

Şebekede devamlı devrede olan fakat ancak elektrik üretim ihtiyacı arttığında tam kapasite ile çalıştırılan, yük takibi (load following) amaçlı santrallerde – doğalgaz kombine çevrim santralleri örnek olarak verilebilir – kapasite faktörü %60 seviyelerindedir. Hidroelektrik santrallerinde şebekedeki güç ihtiyacına ve piklere, ayrıca nehir ile baraj gölündeki su seviyelerine bağlı olarak %30 – 80 arasında kapasite faktörleri görülebilir. 2010 yılı için 18.300 MW kapasiteli Three Gorges Dam hidroelektrik santrali için kapasite faktörü %50 olarak gerçekleşmiştir.

Günümüzde rüzgar ve güneş enerjisi ile elektrik üreten santraller ülke çapındaki şebekede genellikle destek amaçlı kullanılırlar ve özellikle elektrik tüketiminin zirve yaptığı zamanlarda diğer santral türlerine destek olmaları beklenir. Güneş enerjisi için kapasite faktörü kurulum alanının enlemine ve bulut miktarına bağlı olarak %15-20 arasında gerçekleşebilir [26].



Bir rüzgar türbininin üzerindeki plaka değeri, türbinin ideal koşullar altında (en uygun rüzgar hızı ve şiddeti, optimum mekanik ve elektriksel durum) üretebileceği maksimum anma gücünü belirtir. Rüzgar hızının daha düşük olması durumunda üretilen enerji azalırken hızın belirli bir değerin üzerine çıkması durumunda da türbinin verimi düşecek ve bir seviyeden sonra türbinin zarar görmemesi için kanatların frenlenmesi (ve elektrik üretiminin kesilmesi) gerekecektir.

Yine bir örnek olarak, generatör anma değeri 4 MW olan bir rüzgar türbini bir sene boyunca tam kapasite ile çalışabilmesi durumunda

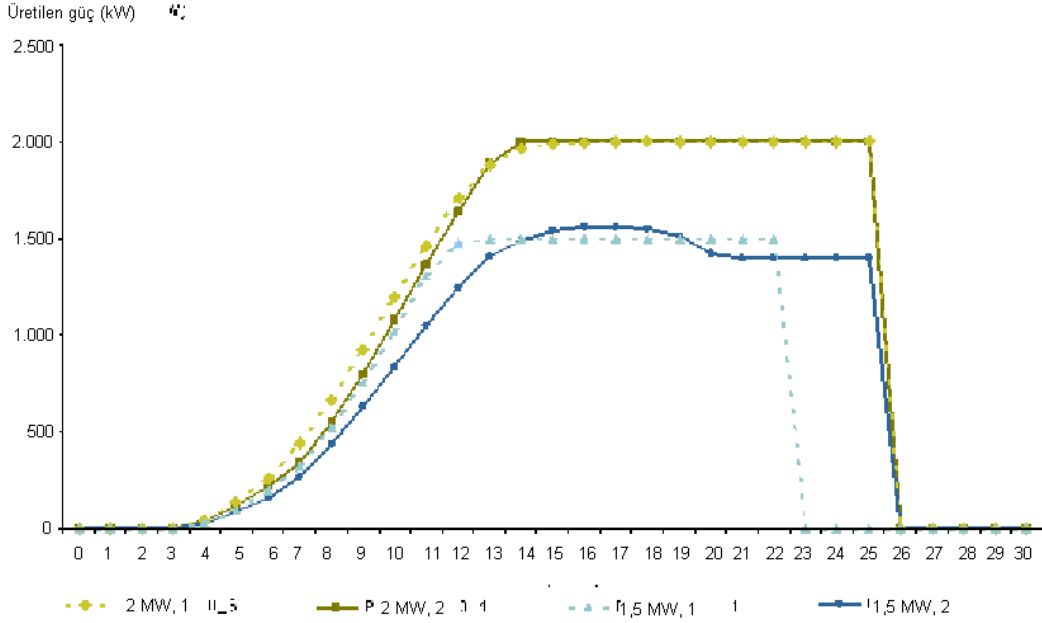
$$4 \text{ MW} \times (365 \text{ gün} \times 24 \text{ saat}) = 35.040 \text{ MWh} \quad (3.25)$$

elektrik enerjisi üretebilir. Bu türbinin sene içerisindeki elektrik üretimi 10.000 MWh olarak gerçekleşmiş ise türbinin kapasite faktörü

$$10.000 \text{ MWh} / 35.0400 \text{ MWh} = 0,285 \quad (3.26)$$

yaklaşık %28 olarak hesaplanabilir. Kara üzerinde kurulan rüzgar türbinleri için kapasite faktörü kurulum bölgesine ve rüzgar rejimine bağlı olarak %20-40 arasında değişebilir (BWEA). Deniz üzerinde kurulmuş rüzgar çiftliklerinde kapasite faktörü genellikle daha yüksek olup Danimarka'da 2009 yılında devreye giren 209 MW kapasiteli Horns Rev 2 deniz üzeri rüzgar çiftliği 2,5 yılda 2.181 GWh elektrik üreterek %47,7 kapasite faktörüne ulaşmıştır.

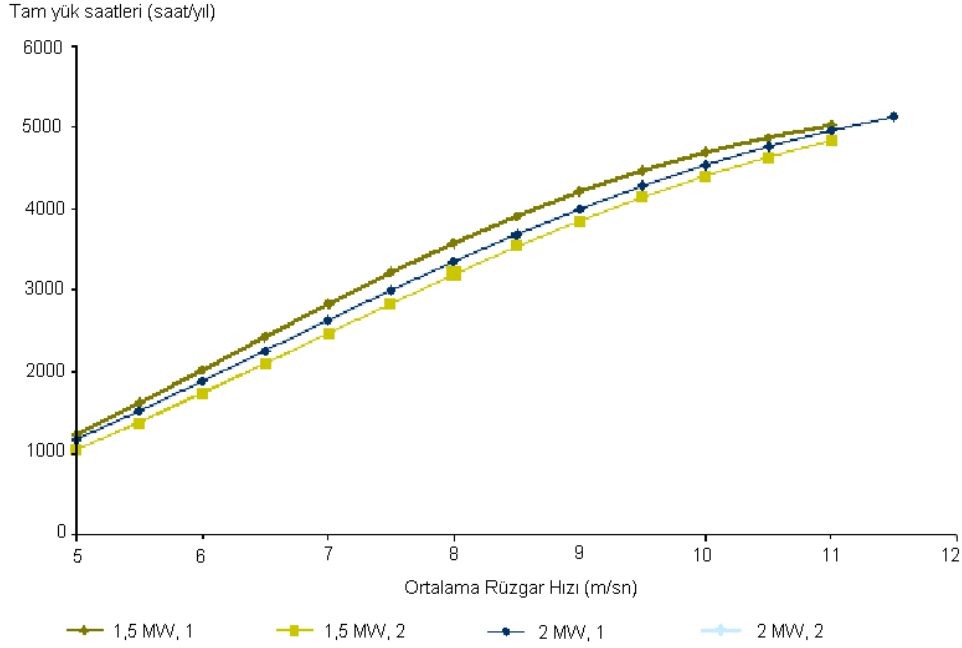
Türbin, kurulu olduğu alandaki rüzgar hızına bağlı olarak anma gücü değerinin bir kısmını üretir. Aşağıdaki tabloda iki adet 1,5 MW ve iki adet 2 MW rüzgar türbininin farklı rüzgar hızlarında ürettikleri güç verilmiştir. Bu değerlerden rüzgar hızının sene içinde değişimini gösteren k katsayısının eklenmesi ile bir Weibull dağılımı çıkartılır ve bu sonuçtan üretim hesaplarında kolaylık sağlaması açısından türbinin gerçek koşullarda çalışmasının kaç saat tam yük ile çalışmasına denk olduğu hesaplanır.



Şekil 3. 2 Dört mevcut rüzgar türbininin güç-hız eğrileri (Hoojwijk [28])

Hesaplanan tam yük saatleri teorik bir değerdir, pratikte tam yük saatleri miktarı iki etken yüzünden daha düşüktür: “dize verimi” ve “rüzgar çiftliğinin çalışmaya müsaitliği”. Dize verimi çarpanı tüm rüzgar çiftliğinin verimini gösterir, bu değer türbinler birbirlerine yaklaştıkça rüzgarın düzenliliğinin bozulması ile düşer. EEA çalışmalarında dize verimini türbinlerin uygun yerleştirildiğini göze alarak kara üzerindeki rüzgar çiftlikleri için 0,925 ve deniz üzerindeki rüzgar çiftlikleri için 0,90 kabul etmiştir.

İkinci verim çarpanı olan rüzgar çiftliğinin çalışmaya müsaitliği, türbinin yıl içindeki tam yük saatleri içinde hangi oranda çalışabilir olduğunu gösterir. Türbinin çalışmaya müsait olmamasına örnek olarak bakım ve tamir işlemleri gösterilebilir. Çalışmaya müsaitlik çarpanı deniz üzeri rüzgar türbinlerinde %10, kara üzerinde 600 m yükseklikten aşağıdaki türbinlerde %3 ve 600 m'den daha yüksekte kurulu türbinlerde %10 alınmıştır (Hoogwijk, 2004). Özet olarak, gerçek koşullardaki tam yük saatlerinin bulunması için deniz üzeri kurulmuş rüzgar türbinleri için teorik tam yük saatlerinin 0,81 ile, kara üzeri kurulmuş türbinler için 0,83–0,90 ile çarpılması gerekir.



Şekil 3. 3 Güç-hız eğrileri ve Weibull dağılımına göre hesaplanmış tam yük saatleri (Hoogwijk [28])

Bu analize göre, günümüzdeki rüzgar türbinleri ve gelecekteki tahmin edilen türbinler için kapasite hesaplamaları Çizelge 3. 2’de belirtildiği gibidir.

Çizelge 3. 2 Rüzgar enerjisinin gelecekteki gelişimi için özet [10]

	Birim	2005			2020			2030		
		Deniz	Kara	Dağ	Deniz	Kara	Dağ	Deniz	Kara	Dağ
Anma gücü	MW	3	2	2	8	2	2	10	2	2
Güç yoğunluğu	MW/km <sup>2</sup>	10	8	4	12	8	4	15	8	4
Dize verimi	%	90	92,5	92,5	90	92,5	92,5	90	92,5	92,5
Çalışabilirlik	%	90	97	90	90	97	90	90	97	90
Yük saati kaybı	%	19	10	17	19	10	17	19	10	17

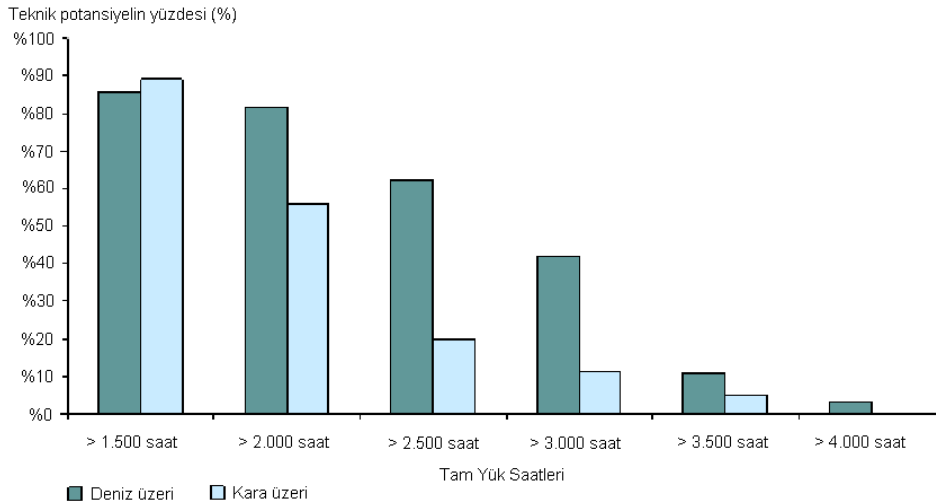
### 3.7 Rüzgar Enerjisinde Verim Arttırma Yöntemleri

Bir rüzgar santralinde verimin arttırılması, santraldeki türbinlerin kapasite faktörlerinin yukarı çekilmesi ile mümkündür. Daha açık olarak bir santralde türbinler maksimum verimi verebilecekleri rüzgar hızında ve rejiminde ne kadar uzun süre çalışabilirlerse santralin verimi o kadar yüksek olacaktır.

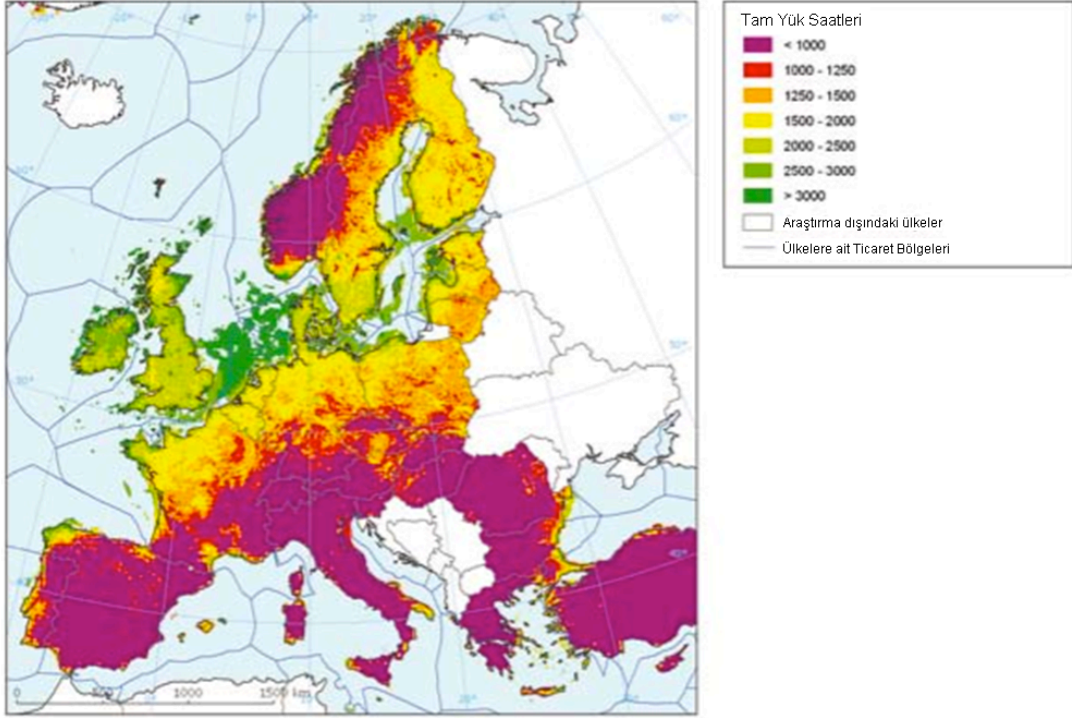
Kara üzerindeki rüzgar santrallerinde kapasite faktörünü kısıtlayan bazı engeller vardır. Kara üzerindeki rüzgarlar genellikle sürekli bir rejimde olmazlar, buna ek olarak rüzgar türbinlerinin etrafındaki yer şekilleri, bitki örtüsü ve yapılar da rüzgar hızını sınırlayabilir.

Bu koşulların daha iyileştirilmesi türbinlerin rüzgarın genel olarak daha sabit rejimde olduğu ve yüzey koşullarının rüzgar hızına olumsuz etkisi olmayacağı deniz üzeri rüzgar türbinlerinde mümkündür. Bu sebepler ile kurulum ve bakım maliyetlerinin daha yüksek olmasına karşılık deniz üzeri rüzgar türbinleri özellikle Kuzey Avrupa'da ekonomik olarak mantıklı birer yatırım olarak devreye alınmıştır.

Denizlerin, özellikle derinliğin fazla olduğu kesimlerinde yüzey pürüzlülüğü karadan daha düşük olduğu için deniz üzerindeki rüzgar hızları karaya göre ciddi oranda daha yüksektir. Bu sayede deniz üzeri rüzgar kaynakları, yıl içinde tam kapasite ile çalışabildiği "tam yük saatleri" biçiminde ifade edildiğinde karaya göre daha yüksek değerlere sahiptir. Kara üzerindeki kaynakların yalnızca %5'i 3.000 tam yük saati (bir sene içinde 8.760 saat olduğuna göre bu değer %35 kapasite faktörüne denktir) ve üzerinde kullanılabilir iken denizdeki rüzgar kaynaklarında bu oran %40'tır. Kara üzerinde tam yük saati değerinin 4.000'i (kapasite faktörü %45) aştığı rüzgar enerjisi potansiyel kaynağı bulunmamaktadır [10].



Şekil 3. 4 Teknik potansiyelin farklı tam yük saati sınıfları içinde dağılımı (EEA)



Şekil 3. 5 Avrupa’da tam yük saatlerinin dağılımı (EEA, 2008)

### 3.8 Rüzgar Enerjisinin Ana Şebeke İçindeki Payı

Çoğu gelişmiş ülkede rüzgar enerjisinden üretilen elektriğin toplam enerji üretimi içerisinde önemli bir yüzdeye ulaştırılması için planlamalar yapılmıştır. İngiltere, Danimarka ve Almanya’da bu hedef %25’e ulaşabilmektedir. Bununla beraber, çoğu yenilenebilir enerji kaynağı gibi rüzgar enerjisi için de ana şebeke dahilindeki toplam üretiminin sorun yaratmayacağı bir üst sınır vardır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimi doğa ve çevre koşullarına bağlı olarak ciddi değişkenlikler gösterebilir, bu sebeple elektrik üretimin büyük kısmının üretilen enerji miktarı istenilen zamanda ve oranda kontrol edilebilen diğer enerji kaynakları ile yapılması çoğu zaman gerekli olmaktadır.

Avrupa dahilinde yapılan araştırmalarda bazı ülkelerde rüzgar enerjisinin toplam elektrik talebinin %40’ına kadar kullanılabileceği belirlenmiştir. Buna karşılık, bu kadar yüksek pay elde edilebilmesi için ana şebekede ciddi geliştirmelere ve sistemin dengelenmesi için ek masraflara ihtiyaç vardır.

### DENİZ ÜZERİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ HAKKINDA BİLGİLER

Rüzgar türbinleri tarihsel gelişimi boyunca temel aldıkları yel değirmenleri gibi kara üzerine kurulmuşlardır. Tarihte tahıl öğütme, su pompalama gibi ihtiyaçların kara üzerinde olması, ayrıca deniz üzerinde inşaatın teknolojik olarak mümkün olmaması sebebiyle yel değirmenlerinin kara üzerinde inşa edilmiş olmaları doğaldır. Rüzgar türbinleri de tarihleri boyunca temel olarak kara üzerinde kalmışlardır.

Yapılan incelemelerde deniz üzerinde rüzgar hızlarının karaya göre daha yüksek ve hem gün içinde hem de yıl boyunca rejimin daha stabil olduğunun görülmesi üzerine elektrik üretimi için deniz üzerinde türbinlerin kurulmasının mantıklı olup olmadığı sorgulanmaya başlamıştır. Rüzgar hızı ve sürekliliği bakımından daha avantajlı olması yanı sıra deniz üzerinde kurulan türbinlerin görüntü kirliliği, gürültü, toprak istismak edilmesi gibi konularda da avantajları bulunmaktadır.

Buna karşılık deniz üzerinde rüzgar türbinleri gibi büyük boyda inşaatların yapılması için inşaat ve malzeme biliminde ilerlemeler yapılması gerekmiştir. Köprü inşaatlarında edinilen deneyimler ve modern malzeme ve inşaat teknolojileri sayesinde kıyıya yakın, sığ yerlerde ilk deniz üzeri türbinler inşa edilmiş, zamanla Kuzey Denizi'nde, İskandinav ülkelerinin sahillerinde ve İngiltere'nin güneydoğu kıyılarında bu türbinlerden "rüzgar çiftlikleri" kurulmuştur.

Deniz üzerindeki petrol kuyularında olduğu gibi daha verimli çalışma için daha derin suların kullanılması zaman içinde düşünülmüş ve yüzer tip sondaj kulelerinden edinilen tecrübe ve teknolojik birikim ile daha derin sularda çalışacak çeşitli yüzer tip deniz üzeri

rüzgar türbinleri imal edilmiştir. Geçtiğimiz on yıl içinde bu tip yüzer rüzgar türbinleri Kuzey Denizi başta olmak üzere Kuzey Avrupa ülkelerinde devreye alınmıştır.

#### **4.1 Deniz Üzeri Rüzgar Türbinlerinin Tercih Sebepleri**

Rüzgar türbinlerinin onlarca senedir uygulanan ve maliyet, inşaat teknikleri ve bakım kolaylığı bakımından deneyim kazanılmış kara üzerinde kurulum yerine deniz üzerinde kurulmaya çalışılması yüklenici firmalar için daha pahalı ve riskli bir seçimidir. Bu seçimin yapılmasında etkin rol oynayan avantajlara bu bölümde değinilecektir.

Bir önceki bölümde belirtildiği gibi, rüzgar türbinlerinin deniz üzerinde konumlandırılmasının en büyük sebebi karaya göre rüzgar hızlarının daha yüksek ve rejimin daha düzenli olmasıdır. Bu sayede elde edilecek kapasite faktörü avantajı ve elektrik üretimindeki artış ve süreklilik firmaların deniz üzerinde kurulumun ek masraflarını göze alabilmesine sebep olmaktadır.

Daha yüksek kapasite faktörüne ilave olarak, deniz üzerindeki rüzgarların günlük rejimi kıyı şehirlerinin elektrik talebinin arttığı saatlerle iyi bir uyum içindedir; bu sebeple en fazla elektrik üretimi talebin en yüksek olduğu zamanlarda elde edilebilir (W. Musial, 2010).

#### **4.2 Deniz Üzeri Rüzgar Türbinlerinin Avantajlı ve Dezavantajlı Yönleri**

İlerleyen bölümlerde deniz üzeri rüzgar türbinlerinin ne zaman tercih edilebileceği, avantaj ve dezavantajları, çeşitleri ve ekonomik fizibiliteleri hakkında bilgi verilecektir.

##### **4.2.1 Kurulum Yeri Bakımından**

Karada kurulacak bir rüzgar çiftliği için arazi temin edilmesi çoğu zaman masraflı ve uğraş gerektiren bir konudur. Çok sayıda türbinin birbiri ile etkileşime girmeden ve gelen rüzgardan azami şekilde faydalanarak çalışabilmesi için geniş bir arazi gereklidir. Bununla beraber kurulum yapılacak arazinin rüzgar hızları ve sürekliliği bakımından maliyet etkin bir çalışma sağlayacak bir konumda seçilmesi gereklidir. Rüzgarın uygun olduğu yerlerde yer şekilleri sebebi ile türbinlerin ve destek ünitelerinin

konumlandırılmasına ve kurulum ile bakım için kolay erişime müsait geniş bir alan mevcut olmayabilir.

Rüzgar kaynağı ve kurulum alanı bakımından uygun bir bölge bulunması durumunda bu alanın diğer amaçlarla kullanımı veya çevredeki yerleşim birimlerine mesafesi göz önüne alınmalıdır. Geniş arazinin istimlak edilmesi esnasında yapılacak harcama maliyetler üzerinde etkili olacaktır, bu sebeple arazi maliyetinin düşük olduğu ve başka bir amaç ile kullanımda olmayan bir bölge seçilmelidir. Bunun haricinde etrafında yoğun yerleşim bulunan bir alanda kurulum yapılması, çevrede yaşayan insanların rüzgar santralının üreteceği gürültü ve türbinlerin görüntüsü sebebiyle kurulumla karşı çıkması ve gerekli izinlerin alınamaması sebebiyle mümkün olmayabilir.

Son olarak, üretilen enerjinin aktarımındaki kayıpların minimumda tutulması amacıyla rüzgar çiftliklerinin tüketim yapılan yerleşim yerlerine yakın olması istenir. Deniz üzeri türbin kurulumlarının bir avantajı elektrik tüketimi merkezlerine yakın olabilmeleridir. Kuzey Avrupa'da Baltık Denizi ve Kuzey Denizi civarında önemli şehirler mevcuttur. Amerika Birleşik Devletleri'nde okyanusa veya Büyük Göller'e kıyısı olan 28 eyalet, ülkedeki elektrik tüketiminin %78'ini gerçekleştirmekte ve üstelik kara içindeki eyaletlere göre daha yüksek elektrik birim fiyatı sunabilmektedir. (Amerika Enerji Bakanlığı, 2008). Elektrik birim fiyatlarının yüksek olduğu konumlarda rüzgardan elektrik üretimi daha kısa sürede rekabetçi olabilecektir.

Kara üzerinde kurulumda bütün bu şartları karşılayan ve arazinin istimlâkinin ekonomik olduğu bir bölge bulunması zor olmaktadır. Rüzgar çiftliğinin deniz üzerinde kurulumu durumunda bu konularda avantaj sağlar. Rüzgarın yeterli hızda ve süreklilikte olduğu bir yer bulmak deniz üzerinde hızların biraz daha yüksek ve sürekliliğin daha fazla olması sebebiyle daha kolay olmaktadır. Bununla beraber bölgede inşaat ve kullanım haklarının alınması daha uygun olmaktadır.

Deniz üzerinde kurulum için bölge seçilirken deniz taşımacılığı hatlarının üzerinde olmaması, belirli balıkçılık alanlarını işgal etmemesi, yerleşim bölgelerinden belirli bir uzaklıkta bulunması ve çevre veya deniz yaşamı için önemli olan yaşam alanlarını tehdit etmemesi istenilir. Bu koşullar sağlanıyor ve rüzgar koşulları olumlu hesaplanmış ise bölgede kurulum yapılabilir.



Deniz üzerinde yapılan kurulumlarda çevredeki insanların gürültüden veya türbinlerin görüntüsünden şikayetleri (turizm yapılan bölgeler hariç) daha az olacaktır, bununla beraber Kuzey Denizi veya İngiltere'nin güneydoğu kıyıları gibi enerji tüketiminin yoğun olduğu yerleşim bölgelerine nispeten daha yakın kurulumlar yapılabilir.

Mevcut deniz bölgelerinin uygun kullanımını sağlamak için uzun vadeli bölge kullanım planları yapılması çok önemlidir. Bu kullanım planlarında rüzgar çiftlikleri gibi denizin yeni kullanım amaçlarına yer verilmektedir.

Rüzgar türbini çiftliğinin kurulacağı alanın rüzgar hesapları yanı sıra bölgenin diğer amaçlar ile kullanımına engel olmaması gereklidir. Buna en önemli örnek olarak türbinlerin kurulacağı alanın yoğun olarak deniz trafiğinde kullanılmayan bir bölge olmasının gerekmesi gösterilebilir.

Bölgede rüzgar rejiminin rüzgar çiftliği kurulumuna uygun olduğu belirlendikten sonra yerel yönetimler ile deniz trafiğinin aksamaması konusunda görüşmeler yapılır ve türbinlerin trafiği nasıl etkileyeceği gözlenir. Genel olarak liman kentlerine çok yakın bölgelerde ve önemli deniz geçitlerine yakın alanlarda türbinlerin kurulamayacağı belli olmaktadır.

Ticari diğer faaliyetler arasında en önemlisi balıkçılıktır. Rüzgar türbinlerinin deniz yaşamı üzerindeki etkilerine daha sonra değinilecek olsa da, rüzgar çiftliğinin avlanan balıkların mevsimsel göç yolları üzerinde olmaması ve balıkçılık gemilerinin sık avlandığı veya avlanma izinleri olan bölgelerde kurulmaması önemlidir.

Geniş bölgeler için deniz üzerindeki teknik rüzgar enerjisi potansiyel enerjisi hesaplamalarına deniz alanının başka amaçlar için kullanımı genellikle dahil edilmez, bu yüzden gerçekte elde edilebilecek toplam enerji teknik potansiyelden daha düşük olacaktır. Bu tip kullanımlara deniz taşımacılığı rotaları, askeri bölgeler, petrol ve doğalgaz aramaları ve turizm için ayrılmış bölgeler örnek gösterilebilir.

#### **4.2.2 Maliyetler Bakımından**

Deniz üzeri rüzgar türbinlerinin en büyük dezavantajı kurulum ve bakım maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Bu bölüm altında kalemlere ayrılarak incelenmeye çalışılacak

maliyetler sebebiyle deniz üzeri rüzgar çiftliği projelerinin oldukça detaylı bir fizibilite araştırması sonrasında kararlaştırılması gerekmektedir.

Kara üzerindeki kurulumlara kıyasla maliyetleri artıran etkenler türbinlerin deniz koşullarında çalışmaya uygun hale getirilmesi için yapılması gereken geliştirmeler, deniz tabanındaki türbin kule temellerinin (veya yüzer türbinlerde platformların) getirdiği ek maliyet, elektrik şebekesinde bağlantı ve yük dengeleme için gereken masraflar ve kurulum giderleridir. Buna ilave olarak türbin kurulumları için gerekli yüzer vinçlerin ve diğer deniz taşıtlarının kiralanması, liman ve depo masrafları ve deniz üzerinde kurulum konusunda deneyimli işgücü ihtiyacı sebebiyle masraflar artmaktadır.

#### **4.2.3 Kurulum Süreci Bakımından**

Genel olarak bakıldığında kurulum masrafları kara üzerinde kurulumla göre çok daha yüksek olmasına karşılık, deniz üzerinde kurulumun avantaj sağladığı kısımlar da vardır.

Bunların en önemlisi, imalat ve kısmen montajı yapılmış türbinlerin kurulum alanına getirilmesidir. Kule gövdesi ve başının imalatı yapılmış türbinler genellikle üretim alanından kara üzerindeki kurulum yerine yakın bir limana gemilerle konteyner içerisinde nakledilirler, buradan itibaren kurulum yerine karadan nakliye edilmeleri gerekir. Bu çok uzun ve ağır parçaların nakliyesi için özel taşıyıcı araçlar ile konvoylar oluşturularak uygun genişlikte yollardan ve taşımacılığı aksatmayacak saatlerde aktarımın gerçekleştirilmesi gerekir.

Deniz üzerinde yapılan kurulumlarda üretilmiş olan parçalar gemi ile doğrudan kurulum bölgesine getirilebilir ve yüzer vinçler ile kurulumları yapılabilir. Bu sayede maliyet açısından olmasa da nakliye süresi bakımından avantaj elde edilebilir.

Kulelerin deniz tabanına gömülü olacağı bir rüzgar çiftliği kurulumunda planlama aşamasında kurulum yapılacak bölgedeki deniz tabanı derinlik, derinliğin değişkenliği ve taban yapısının kuleleri taşıma konusunda ne kadar dayanıklı olabildiği araştırılmalıdır. Kurulum başladığında deniz tabanında kulelerin ve voltaj doğrultucular gibi yapıların temelleri için çalışmalar yapılmalı, ayrı ayrı kulelerin voltaj doğrultucusuna ve kontrol birimlerine enerji aktarımı yapacağı kablolar için kanallar

açılmalı ve son olarak üretilip yükseltilmesi yapılmış elektriğin karada ana şebeke ile birleşeceği noktaya taşınması için kanal açımı yapılmalıdır.

Temel kurulduktan sonra kulelerin bu temellere oturtulması, deniz altında birleştirme ve sabitleme işlemlerinin yapılması ve kule başlarının oturtulabilmesi için yüzer vinçler, kaldırma elemanları ve deniz altında birleştirme ve kontrol için kullanılacak ekipman gereklidir. Bu ekipmanların masrafı ve bunları kullanacak daha zor bulunan kalifiye elemanlar için olan giderler yüksek maliyet doğurmaktadırlar.

Kulelerin, destek ekipmanlarının ve kablo hatlarının kurulumu ve kurulumun kontrolü bittiğinde oldukça yüksek bir meblağ harcanmış olacağı için tesisin ekonomik açıdan verim sağlayacak bir bölgede kurulmuş olması son derece önemlidir.

#### **4.2.4 Türbinlerin Kuruldukları Bölgeye Etkileri Bakımından**

Rüzgar çiftliğinin kurulduğu bölgede insanları ve çevreyi etkileyen bazı değişimler yaşanmaktadır. Bunlar genellikle negatif yönde etki gösterebilir de rüzgar enerjisinin diğer enerji üretim yöntemlerine kıyasla genel avantajları göz önüne alındığında kabul edilebilirler.

##### **4.2.4.1 İnsanlar Üzerindeki Etkiler**

Rüzgar türbinlerinin insan üzerindeki en olumsuz etkileri kanatların ürettiği gürültü ve görüntü kirliliğidir. Deniz üzerinde kurulum yapılması sonucunda türbinler insanların yaşam alanlarından önemli ölçüde uzaklaşacağı için bu etkiler azalsa dahi yine de bu etkiler göz önünde tutulmalıdır.

Rüzgar türbinlerinin görsel etkisi, kurulumlarının çevrelerindeki görsel veya estetik düzeni değiştirmesi olarak tanımlanabilir. (EWEA, 2004). Denizler gibi geniş ve düz alanlarda türbinlerin basit geometrik şekiller içinde yerleştirilmesi algılanması daha rahat olduğu için daha az rahatsız edici olacaktır. (DWIA, 2009).

Bir yerleşim yeri açıklarında kurulumu yapılmış bir rüzgar çiftliğinin görüntü açısından yaşayanların bazılarının hoşuna gitmeyeceği açıktır. Bu sebeple ve yerleşim yerinin deniz trafiğini de olumsuz etkilememek amacıyla deniz üzeri rüzgar çiftlikleri yerleşim

yerlerine çok yakın kurulmamalı fakat elektrik aktarım kayıplarının az tutulabilmesi için mesafenin çok uzak olmamasına dikkat edilmelidir.

Sahilden 10 kilometre uzaklığa kadar olan bölgeler için rüzgar türbinlerinin görsel etkisi önemli bir seviyededir, çünkü rüzgar çiftlikleri sahilden görülebilir durumdadır. Hollanda gibi bazı ülkelerde temel olarak görüntünün olumsuz etkisi sebebiyle kıyıda 12 deniz mili (yaklaşık 22 km) uzaklığa kadar rüzgar çiftlikleri kurulması yasaklanmıştır. İngiltere’de de Ocak 2009’daki rüzgar çiftlikleri firma ihalesinin üçüncü turunda önceliğin 12 milden uzaktaki projelere verilmesi tavsiye edilmiştir.

Denizde kurulumu yapılmış rüzgar santrallerinin ürettiği gürültünün insanları olumsuz etkilemesi daha düşük bir olasılıktır. Bir rüzgar türbininin çalışmasında asıl olarak iki tip ses yayılımı ortaya çıkar: Türbin elemanlarının hareketi sonucu oluşan mekanik sesler ve havanın rotor kanatları üzerinde akışı sonucu oluşan aerodinamik sesler. (BWEA, 2000). Mekanik sesler genellikle sabit frekanslı seslerdir; aerodinamik sesler ise daha değişken olup karakteri türbin modeline ve rüzgar hızına göre ciddi oranda değişebilir (Alberts, 2006 [29]). Türbinin dönüşü esnasında kanatçıklar kule hizasını geçerken tok bir ses çıkar; modern büyük rüzgar türbinlerinde kanatçıkların kule hizasından geçiş sıklığı saniyede bir kere civarındadır.

Çizelge 4. 1 Gürültü seviyeleri için örnekler (Sustainable Development Commission)

<b>Kaynak/ortam</b>	<b>İndikatif gürültü seviyesi (dBA)</b>
Acı eşiği	140
250 m uzaktaki jet uçağı	105
7 m uzaktaki asfalt kırıcı	95
100 m uzaktaki 48 km/saat hızla giden kamyon	65
Kalabalık dükkan	60
100 m uzaktaki 64 km/saat hızla giden otomobil	55
350 m uzaktaki rüzgar çiftliği	35-45
Sessiz ev içi	35
Kırsal bölgelerde gece arkaplan sesi	30-40

Rüzgar türbinlerinin ne kadar gürültülü algılandıklarını belirlemek, arka plan seslerinin değişkenliği yüzünden zordur. Kırsal alanlarda türbinlerin ürettiği ses, arka plan gürültüsü daha az olduğu için şehirlere göre daha çokmuş gibi algılanacaktır. Rüzgar türbinleri genellikle rüzgar hızının çok olduğu yerlerde kurulduğu için rüzgar sesi türbinlerin ürettiği sesi bastırabilir (AWEA, 2007). Buna karşılık rüzgar yavaşlayınca ve özellikle geceleri türbinlerden gelen ses daha çok dikkat çekici olabilir. İnsanların rüzgarın etkisinden korunmuş oldukları durumlarda rüzgar türbinlerinin sesini duyabilmeleri mümkün olabilir.

Tek bir rüzgar türbininden gelen ses şiddeti seviyesi genellikle 90 ile 100 dB(A) olarak ölçülür. Türbinden 40 metre uzakta ses şiddeti konuşma seviyesi olan 50-60 dB(A)'ya düşer. 500 metre uzakta seviye 25-35 dB(A)'ya inecektir. Genel olarak, kara üzerinde türbinden 300 ile 400 metre uzaklık arasında türbinin ürettiği sesler duyulmaz olacaktır. Yine de, geceleri toprak seviyesinde rüzgar hızı az fakat türbinin rotor yüksekliğinde yeterince rüzgar olduğunda sesler daha uzaktan "fark edilebilir" olabilmektedir. Hollanda'da yapılan bir araştırmada arka plan gürültüsü çok azken ve rotor seviyesinde rüzgar hızı fazla iken rüzgar çiftliğinin yaydığı ses 500 – 1.000 metre uzaklıktan duyulabilmiştir (van den Berg, 2003 [30]).

Ses sorununu aşmak için kullanılan en yaygın yöntem türbinler ile yerleşim yerleri arasındaki mesafeyi ses seviyesi yasalarda belirtilen seviyeye düşecek kadar fazla tutmaktır. Danimarka'da yerleşim yerleri için ses seviyesi sınırı 42-44 dB olarak belirlenmiştir (DWIA, 2007). Hollanda'da 15 MW'a kadar olan rüzgar çiftlikleri çevre düzenlemelerinde belirlenen ses seviyelerinin altında kalmak mecburiyetindedir. Belirlenmiş seviyeler kırsal yerleşim alanları için 40 dB(A) ve şehir bölgeleri için 50 dB(A) olup geceleri seviyeler 30 ile 45 dB(A) arasında çekilmelidir.

Rüzgar türbinlerinin çevrelerinde yaşayan insanlar için görüntü ve ses dışındaki etkileri de mevcuttur. Türbinlerin kanatlarının oluşturduğu hareketli gölgeler ve değişken yansımalar rahatsız edici olabilir. Rüzgar çiftliklerinin kapladığı alan büyük gibi görünse de türbinler, elektrik düzenleme istasyonları ve ulaşım yolları gibi bütün destek birimleri ile beraber bir rüzgar çiftliğinin alanının ancak %5'i fiziki olarak kullanılmış

durumdadır (CWEA, 2007). Boş kalan alanlarda tarım gibi faaliyetler yapılmaya devam edebilir.

#### **4.2.4.2 Doğa Üzerindeki Etkiler**

Kara ve deniz üzerinde kurulacak rüzgâr türbinlerinin doğal yaşam üzerinde olumsuz etkileri olabileceği kurulum tecrübeleri ve araştırmalar sonucunda belirlenmiştir. Kara üzeri kurulumların olumsuz etkileri daha çok yerleşik ve göçmen kuşlar için kanatlarla çarpışma tehlikesi, göç rotalarının değişmesi ve yerleşme alanlarının kısıtlanması olmaktadır. Deniz üzerinde kurulumu yapılmış rüzgar çiftliklerinin çevre üzerindeki etkileri ise deniz kirliliği, deniz bitkileri üzerindeki etkileri, balıklar üzerindeki etkileri, deniz memelileri üzerindeki etkileri ve deniz kuşları üzerindeki etkileri olarak değerlendirilebilir.

Rüzgar türbinlerinin kurulumu bittikten sonra herhangi bir yakıt tüketmemesine ve atık üretmemesine karşılık, türbinlerin kurulumu esnasında kullanılan deniz taşıtları ve kurulum makinaları denize önemli miktarda atık dökülebilir. Bununla beraber türbinlerin bakımı esnasında yine ulaşım ve bakım işlemleri için kullanılan taşıtlar ve makinalar belirli bir miktar kirliliğe yol açacaktır.

Türbinlerin deniz bitkileri üzerindeki en önemli olumsuz etkisi kurulumdan önce türbinlerin temellerinin kurulumu için yapılan taban ıslah çalışmalarında olmaktadır. Deniz tabanındaki yaşamın önemli ölçüde zarar görebildiği bu çalışmalar bölgede yaşayan deniz canlılarının yaşam dengesini bozabilmekte ve düzenin tekrar kurulması uzun zaman almaktadır. Türbin kurulumlarının mercan oluşumlarına da zarar verebildiği görülmüştür.

Bununla beraber, bazı gözlemlerde deniz tabanında kuleler için oluşturulan temellerin deniz bitkilerinin ve mercanların oluşumuna bir çeşit destek olabildiği ve çeşitli canlıların bu temelleri ve kulelerin deniz altında kalan kısımlarını korunma amaçlı kullanabildiği görülmüştür.

Deniz üzerinde kurulan rüzgar türbinlerinin balıklar üzerindeki olumsuz etkileri göç yollarının değişmesine neden olabilmeleri ve deniz bitkilerine olan etkileri sebebiyle besin kaynaklarını yok edebilmesidir. Bununla beraber deniz türbinlerinin tabana

oturan kısımlarının balıkların yumurtlaması için uygun bir koruyucu ortam oluşturduğu çeşitli gözlemlerde görülmüştür.

Deniz memelileri, deniz üzerinde kurulu rüzgar türbinlerinden birkaç farklı şekilde etkilenebilirler. Kurulum aşamasında kazık çakılması ve diğer inşaat işlerinden kaynaklanan gürültü ve titreşimler bu canlıların geniş bir alandan uzaklaşmasına sebep olabilir. Kazık çakılması esnasında yayılan enerji, çevredeki fokların duymasını engelleyebilecek kadar yüksek seviyededir (OSPAR, 2004). Türbinlerin çalışması esnasında ses ve titreşimler suya aktarılmaya devam etmektedir, bu da bu hayvanların haberleşme ve beslenme davranışlarını etkileyebilmektedir. Bununla beraber, rüzgar türbinlerinin yaydığı frekans deniz memelilerinin yankı ile yön bulma frekanslarının çok üzerinde olduğu için sonar olarak çalışan sistemlerinin kısıtlanacağı söylenemez. Rüzgar çiftliği ile kıyı arasında elektrik taşıyan kablolardan yayılan yapay elektromanyetik alanın bu alanlara duyarlı deniz canlılarında, özellikle vatoz ve köpekbalığı türlerinde etkiye yol açacağı öne sürülebilir, fakat kabloların birkaç metre yakını hariç yayılan elektromanyetik alanın şiddeti yerkürenin elektromanyetik alan şiddetinin çok altındadır. Nysted deniz üzeri rüzgar çiftliğinde yapılan araştırmalar 132 kV alternatif akım kablosunun etrafındaki balıkların göç düzeninde bir değişikliğe yol açmadığını göstermiştir [31].

Deniz memelilerinin yaşam bölgeleri besin kaynakları olan balıkların nüfusundan da etkilenebilir. Rüzgar çiftlikleri kurulan bölgede balıkçılık yapılmaması balık nüfusunun artmasında önemli pay sahibidir, bununla beraber türbinlerin diğer deniz canlılarına olan olumsuz etkileri balıklar için de geçerlidir. Bazı balık türlerinin düşük frekanslı seslere duyarlı oldukları bilinmektedir (Popper ve Carlson, 1998). Yine de rüzgar türbinlerinin deniz altı yaşamı için en önemli etkilerinin türbin temellerinde yeni canlıların yaşam alanı bulmasını sağlayan yapay bir resif görevi görmeleri olduğu söylenebilir. Bu etki sonucunda yerel deniz canlıları türleri ciddi değişim geçirebilir ve filtreleme ile beslenen deniz canlıları önemli bir ikincil nüfus oluşturabilir (Petersen ve Malm, 2006). Bu sebeple deniz üzeri rüzgar çiftliklerinin deniz yaşamına etkileri düşünülürken yerel canlı nüfusunda nasıl bir değişime sebep olacakları incelenmelidir.

Deniz üzerinde kurulmuş rüzgar çiftliklerinin ürettiği gürültünün deniz canlılarını olumsuz etkilemesi mümkündür. Bu gürültünün deniz kuşları, balıklar ve deniz memelileri üzerindeki etkileri incelenmiş ve gerçekten de bazı türler üzerinde olumsuz etkileri olabildiği fark edilmiştir. Göçmen kuşların rotaları üzerinde bulunan bir ya da daha fazla rüzgar enerjisi çiftliği bariyer etkisinde bulunarak göç rotasının oldukça uzamasına ve sürünün olumsuz etkilenmesine neden olabilir.

Deniz üzerindeki rüzgar türbinlerinde kuşların türbin kanatlarına çarpması sonucu oluşan ölümler hakkında elimizde az bilgi vardır. Kuşların hareketlerini izlemek ve çarpışmalar ile kaçınma hareketlerini takip edebilmek için radar ve termal görüntüleme kullanılabilir. Bu araçlar ile kayıplar aşağıdaki veriler yardımıyla modellenilebilir:

İncelenen alandan geçen kuş sayısı,

Rüzgar çiftliği bölgesine giren kuşların oranı,

Rotor yüksekliğinde uçan kuşların oranı,

Rotor pervanelerinin ulaşabileceği alandan geçen kuşların oranı,

Önceki her bir seviye için kaçınma hareketleri,

Rotorun süpürdüğü alandan çarpışma olmadan geçebilme ihtimali.

(Desholm, 2006; Desholm et al., 2006)

Bununla beraber, göçleri esnasında Kuzey Denizi ve Baltık Denizi'nden geçen Almanya'nın kuzeyindeki kanaldan geçen 250 türbden yüzlerce milyon kuşun yaklaşık yarısının türbinlerle çarpışma riski oluşturabilecek yükseklikten uçtuğu tahmin edilmektedir (Hüppop et al. ,2006). Göçmen kuşlar normal şartlar altında gece dahi karşılıklarına çıkan engellerden kaçınabilirler, fakat deniz üzerindeki aydınlatılmış objeler kuşlar için bir çekim kaynağı oluşturabilir ve çok sayıda çarpışma gerçekleşebilir. Türbinlerin ışıklandırılmasının sürekli değil de aralıklı olması çarpışma riskini azaltabilir. Belirtilen çarpışmadan kaçınma davranışı, yan etki olarak kuşların beslenme alanında azalmaya yol açabilir. Çok nadir olarak, deniz üzerindeki rüzgar türbinlerinde yarasaların da çarpışma sonucu öldükleri görülmüştür.



Bu şekildeki bir modelleme yaklaşımı, Danimarka Nysted'deki 72 türbinin kurulmuş olduğu göçmen kuşların rotası üzerindeki rüzgar çiftliğinde uygulanmıştır. Tahmin edilen çarpışma oranı her bir güz için türbin başına 0,7 kuş gibi düşük bir değer olmuştur, bunda kaçınma hareketlerinin büyük etkisi bulunmaktadır. Çoğu kuş gündüz 3 km uzakta, gece 1 km uzakta uçuş rotalarını yükselterek türbinlerden kaçınmışlardır. Rüzgar çiftliğine giren kuşlar ise uçuşlarını alçaltarak rotor türbinlerinin altından geçmişlerdir, türbinler arasındaki koridorlardan uçmuşlardır ve türbin bölgesinden en kısa yoldan çıkmışlardır.

Bu olumsuz etkilerine karşın rüzgar türbinlerinin çevre ve doğal yaşam için olumlu etkileri de vardır. Bunlardan en önemli olanı fosil yakıtların tüketiminin azaltılması sonucunda sera gazlarının salınımının azaltılmasıdır. Deniz üzerindeki rüzgar türbinlerinin ilave olarak doğrudan olumlu etkileri de kayıtlara geçmiştir. Rüzgar türbinlerinin kurulduğu alanda balıkçılık yapılmaması ve askeri veya sivil hareketlilikten uzak kalması o bölgedeki deniz canlıları için bir sığınak işlevi görmesini sağlayabilir. Türbinlerin yapay resif işlevi görmesi ile farklı türler yaşam alanı bulabilir, bunun sonucunda deniz memelileri ve deniz kuşları için beslenme olanakları artabilir. (a07)

2000 yılında imzalanan Sular Çerçeve Direktifi (Water Framework Directive, WFD) ve 2008 yılında devreye giren Denizler Stratejik Çerçeve Direktifi (Marine Strategy Framework Directive, MSFD) sonucunda Avrupa Birliği ülkelerinin 2020 yılına kadar deniz bölgelerinde "doğal yaşam için iyi durumda" onayı alması gerekmektedir. Deniz üzeri rüzgar çiftliklerinin etkilerinin de bu anlaşmalar bazında incelenmesi gerekecektir.

Danimarka sularında rüzgar çiftlikleri kurulmaya başlandığı 1990'larda kurulum için öngörülen alanlarda doğal yaşam için önemli bölgeler bulunup bulunmadığı araştırılmış, araştırma sonucunda bazı bölgelerin ördeklerin kışı geçirmek için kullandığı önemli barınaklar olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda bazı "özel koruma alanları" oluşturulmuş ve bu alanlar rüzgar çiftliği kurulumunun doğal yaşamı koruma öncelikleri ile uyumlu olmadığı yerler olarak belirlenmiştir.

Doğal hayata olan etkinin azaltılması için en önemli adım rüzgar çiftliklerinin kurulacağı alanların detaylı bir inceleme sonucunda seçilmesidir. Buna rağmen negatif etkiler

engellenemiyorsa, bu etkileri azaltmak için çözümler aranmalı, azaltılamayan etkiler için telafi yöntemleri geliştirilmelidir.

Etkileri azaltmak için rüzgar çiftliği planında alınacak önlemler, türbinlerin kuşların uçuş rotası boyunca konumlandırılmaması ve birbirine mümkün olduğunca yakın kurularak toplam alanın azaltılması ve alternatif olarak türbinler arasında uçuş koridorları bırakılması olarak sıralanabilir. Türbin kulelerinde ve nasellerde kuşların ve yarasaların yuva kurabileceği yerler olmamalıdır. Mümkün oldukça elektrik aktarım kabloları yer altında konumlandırılmalıdır. Çarpışma riskinin yüksek olduğu yerlerde rotor kanatları göze çarpacak şekilde renklendirilmelidir. Aydınlatma mümkün olduğunca az ve kesikli olmalıdır. Türbin temellerinin resif etkisi yaratması istenilmiyorsa deniz altındaki yüzeyler canlıların yerleşmesini engelleyecek tasarımda olmalı ve buna uygun kaplamalar yapılmalıdır.

Türbinler için temel atma ve kurulum işlemleri deniz canlıları için kritik öneme sahip dönemlerde yapılmamalı ve uygun koruyucu önlemler alınmalıdır. Örnek olarak kazık çakılması öncelikle düşük kuvvetle yapılırsa deniz memelilerine ses kaynağından uzaklaşma fırsatı verilmiş olacaktır.

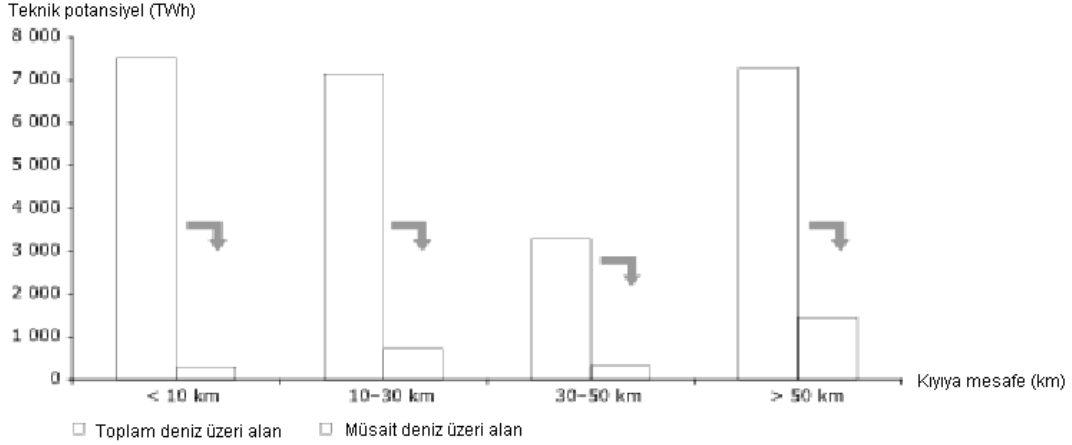
Zararı azaltma uğraşlarının yeterli fayda sağlamadığı zamanlarda doğal hayat dengesinin korunması için alternatif yerleşme ve beslenme alanları oluşturulması gibi telafi yöntemlerine başvurulabilir.

#### **4.2.5 Kurulum Alanındaki Kısıtlamaların Etkileri**

EEA'nın araştırmasında sosyal ve ticari kısıtlamalar sonrasında kıydan 0-10 km açıklıktaki alanın ancak %4'ünün rüzgar çiftlikleri geliştirmesi için müsait olduğu sonucunda varılmıştır. Kıydan açıldıkça alan planlama için ve sosyal kısıtlamalar daha az olacağı için 10-30 km ve 30-50 km aralıklarında alanın %10'unun rüzgar çiftlikleri kurulumu için müsait olduğu not edilmiştir. Kıydan 50 km ötesi için bölgenin büyüklüğü ve deniz nakliyesi gibi aktivitelerin daha seyrek olduğu için %25 gibi daha büyük bir alanın kullanılabilir olacağı belirtilmiştir.

Deniz üzeri kurulum için toplam teknik potansiyele bu kısıtlamalar uygulanırsa elde edilebilecek enerji miktarı 30.000 TWh'den 3.500 TWh'e düşmektedir. 2030 yılının

türbin kurulum ve enerji aktarım teknolojilerinin düşünüldüğü bu hesaplamada elde edilen sonuç, yine 2030 yılı için 5.100 TWh olan Avrupa'nın enerji ihtiyacının %78'ini karşılamaya yeterlidir. (a07) Bununla beraber, bu araştırmada derin sular için kurulum teknikleri hesaba katılmamış ve sadece 50 m ve daha az derinliklerdeki kurulum olanakları hesap edilmiştir.



Şekil 4. 1 Kurulum için müsait alanlara indirildiğinde Avrupa'daki teknik deniz üzeri potansiyelin değişimi (EEA, 2008)

### GÜNÜMÜZDE DENİZ ÜZERİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Deniz üzeri rüzgar türbinleri, ilk olarak karadaki eşdeğerlerinin deniz tabanına oturtulabilir hali olarak kullanılmaya başlanmış, zamanla daha derin denizlerde kullanılabilmesi için değişikliklere gidilmiştir.

Bu türbinlerde üst kısım – nacelle, gövde içerisindeki ekipman, rotor, pervaneler ve kulenin üst kısmı – kara üzerine kurulan türbinler ile eşdeğerdir. En büyük farklılıklar türbinin deniz yüzeyine yakın, yüzey altındaki ve deniz tabanına oturduğu kısımlardadır.

Deniz üzeri rüzgar türbinleri teknolojileri kara üzerindeki türbinler için olan teknolojinin üzerine eklemelerle gelişmiştir, ve geleceğinde diğer teknoloji ve sanayi disiplinlerinden faydalanması gerekecektir. Bunlar arasında denizlerden petrol ve gaz çıkarma için gerekli mühendislik ve teknoloji bilgileri, deniz üzerinde lojistik hizmet veren firmaların kabiliyetleri, aktarım sistemleri işletmecileri ve enerji nakil hattı altyapı bilgileri sayılabilir.

#### 5.1 Kurulu Deniz Üzeri Rüzgar Türbinleri

2012 yılı itibariyle kurulu en büyük deniz üzeri rüzgar çiftliği İngiltere'deki 367 MW anma gücüne sahip Walney rüzgar tarlasıdır. İkinci sırada yine İngiltere'deki 300 MW gücündeki Thanet Deniz Üzeri rüzgar projesi yer almaktadır.



Şekil 5. 1 367 MW kurulu güçteki Walney deniz üzeri rüzgar tarlası, İngiltere

Danimarka'daki 209 MW gücündeki Horns Rev II ve 207 MW gücündeki Rødsand II deniz üzeri rüzgar tarlaları Kuzey Avrupa kıyısındaki en büyük deniz üzeri rüzgar enerjisi yatırımlarıdır. 166 MW gücündeki Rødsand I rüzgar tarlası ise 2003 yılında devreye girdiğinde dünya üzerindeki en büyük deniz üzeri rüzgar tarlası idi. Kuzey Denizi'ndeki bu rüzgar tarlalarını takiben yine İngiltere'deki 194 MW'lık Lynn – Inner Dowsing, 180 MW'lık Robin Rigg ve 172 MW'lık Gunfleet Sands yatırımları kurulu durumdadır.

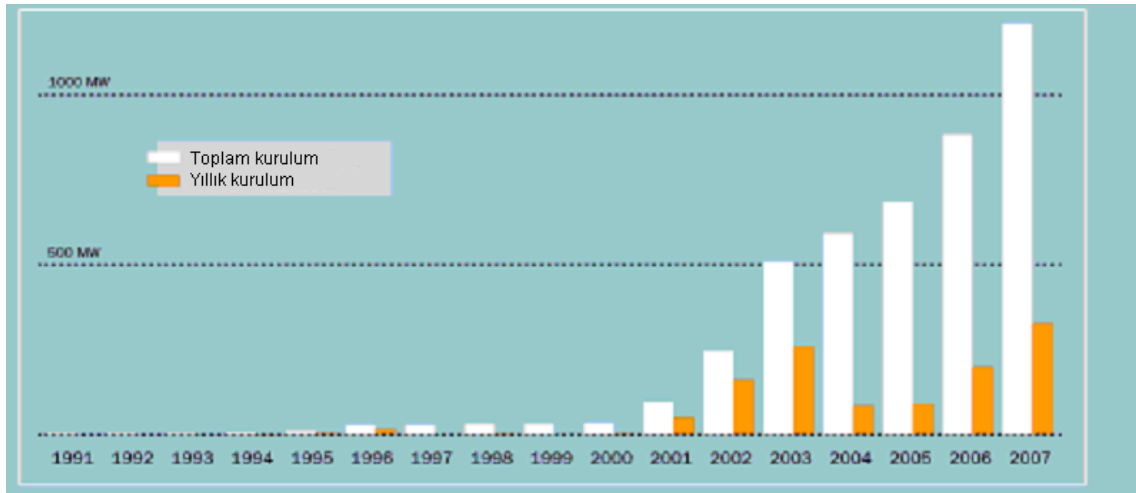


Şekil 5. 2 40 MW gücündeki Middelgrunden rüzgar çiftliği, Danimarka

Henüz inşası sürmekte olan 630 MW'lık Londra Dizesi (İngiltere), 504 MW'lık Büyük Gabbard (İngiltere), 400 MW'lık Trianel Borkum Batı II ve 400 MW'lık BARD Offshore 1 (Almanya) ile yine 400 MW'lık Anholt (Danimarka) gelecekteki büyük kapasiteli deniz üzeri rüzgar tarlası yatırımlarının ilk örnekleridir. Deniz üzeri rüzgar tarlalarına büyük önem verilen ve Avrupa'nın en iyi deniz üzeri rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olan İngiltere'de henüz planlama ve onay aşamalarında olan Dogger Bank, Norfolk Bank, Irish Sea, Hornsea, Firth of Forth gibi deniz üzeri rüzgar tarlası projelerinde 9.000 MW, 7.200 MW, 4.200 MW'a varan toplam rüzgar tarlası anma güçleri hedeflenmektedir.



Şekil 5. 3 160 MW gücündeki Horns Rev I rüzgar çiftliği, Danimarka



Şekil 5. 4 Avrupa'da deniz üzeri rüzgar enerjisi pazarının gelişimi (1991-2007)

2007 yılında Avrupa'da beş ülkede (Danimarka, İngiltere, Hollanda, İsveç ve İrlanda) toplam kapasitesi 1.100 MW olan 25 proje kurulu durumdaydı. 2006 yılında Avrupa'daki deniz üzeri rüzgar türbinleri anma değeri olarak toplam rüzgar enerjisi kapasitesinin %1,8'ini kapsıyordu, fakat rüzgar enerjisinden elektrik üretimi bakımından toplam değerin %3,3'ünü üretmekteydi.



Şekil 5. 5 Avrupa'da kurulu ve kurulması planlanan deniz üzeri rüzgar çiftlikleri

## 5.2 Deniz Üzeri Türbinlerin Yapısal Çeşitleri

Deniz üzerinde kurulan rüzgar türbinleri, türbine destek verecek ve deniz üzerinde sabitlenmesini sağlayacak destek yapılarına göre sınıflandırılabilirler.

Destek yapıları tür olarak kazıkla sabitlenmiş yapılar, desteğin ağırlığı sayesinde sabit kalan yerçekimi tabanlı yapılar, deniz tabanı içine giren kova tip temelli yapılar ve deniz dibine çapa ile bağlı yüzer yapılar olarak sınıflandırılabilirler [32].

Bu yapılar deniz tabanına kurulum ve yük aktarımı konularında aşağıdaki temel yapılardan birisine uyarlar:

Tek kazıklı yapılar

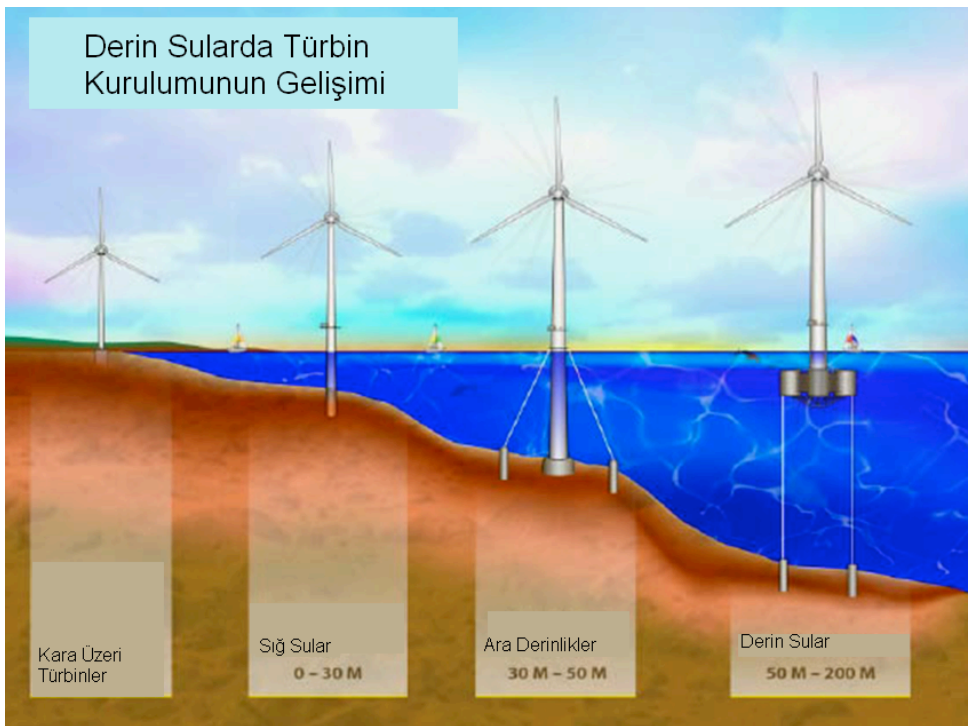
Üç ayaklı yapılar

Kademeli temeller

Ağırlık etkisi ile sabit kalan yapılar

Yüzer destek yapıları

Bu ana tiplerin özelliklerinin birleşimi ile hibrit destek yapıları üretilebilir.



Şekil 5. 6 Derin Sularda Türbin Kurulumunun Gelişimi

Ağırlık etkisi ile sabit kalan temeller, deniz yüzeyi ile temelin tabanı arasında kaldırma etkisi olmaması hedef alınarak tasarlanırlar. Bu hedefe ulaşabilmek için yapının bütün çevre etkileri altında sadece kendi ağırlığının etkisi sayesinde stabil kalabileceği kadar ağırlık kullanılır. Ağırlık temelli yapılar çevre etkilerinin çok şiddetli olmadığı ve temelin



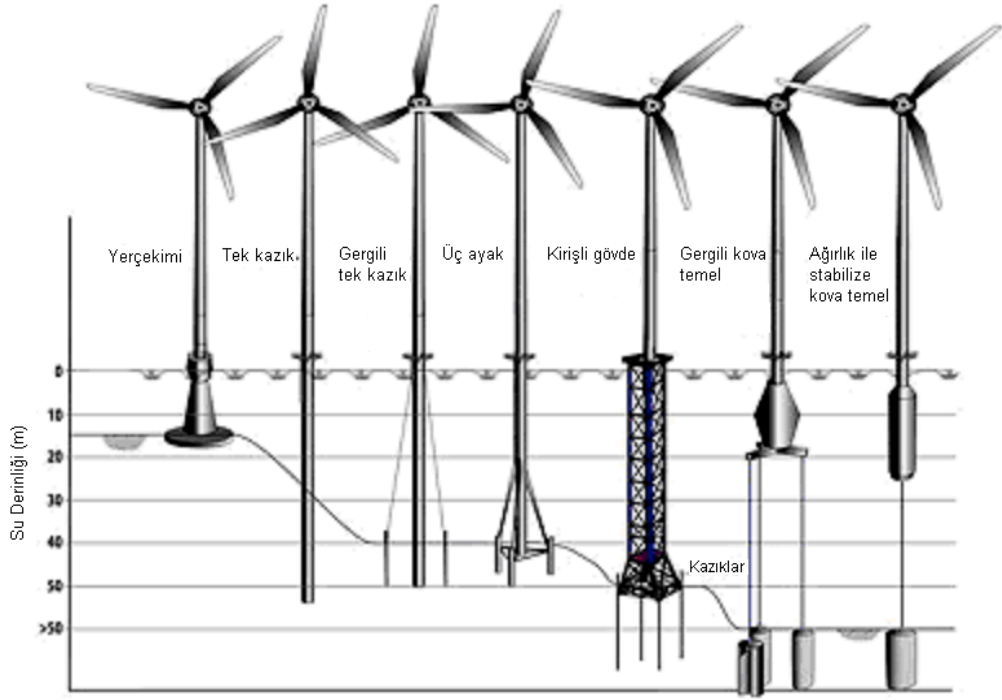
yapısal ağırlığının yeterli olduğu veya balastın düşük maliyet ile eklenebileceği durumlarda rekabetçi olurlar. Balast olarak temel içine sıkıştırılacak kum, beton, kayalar veya demir madeni kullanılabilir. Balast projenin üretim ve taşıma kapasitelerine bağlı olarak temel yapısına üretim esnasında eklenebilir veya ayrı taşınarak kurulumda eklenebilir. Deniz tabanına destek yapısının kurulumunun özel kurulum gemileriyle veya diğer vasıtalarla kurulumunun mümkün olmadığı veya aşırı maliyetli olduğu durumlara uygun bir seçenektir.

Yüzer yapılar mekanik kurulum işlemleri bitmiş olarak üretildikleri yerden yüzer halde kurulum alanına getirilebilir. Su derinliğinin deniz tabanından destek alan bir temel yapısını imkansız veya aşırı maliyetli hale getirdiği projelerde kullanılmaya uygundurlar.

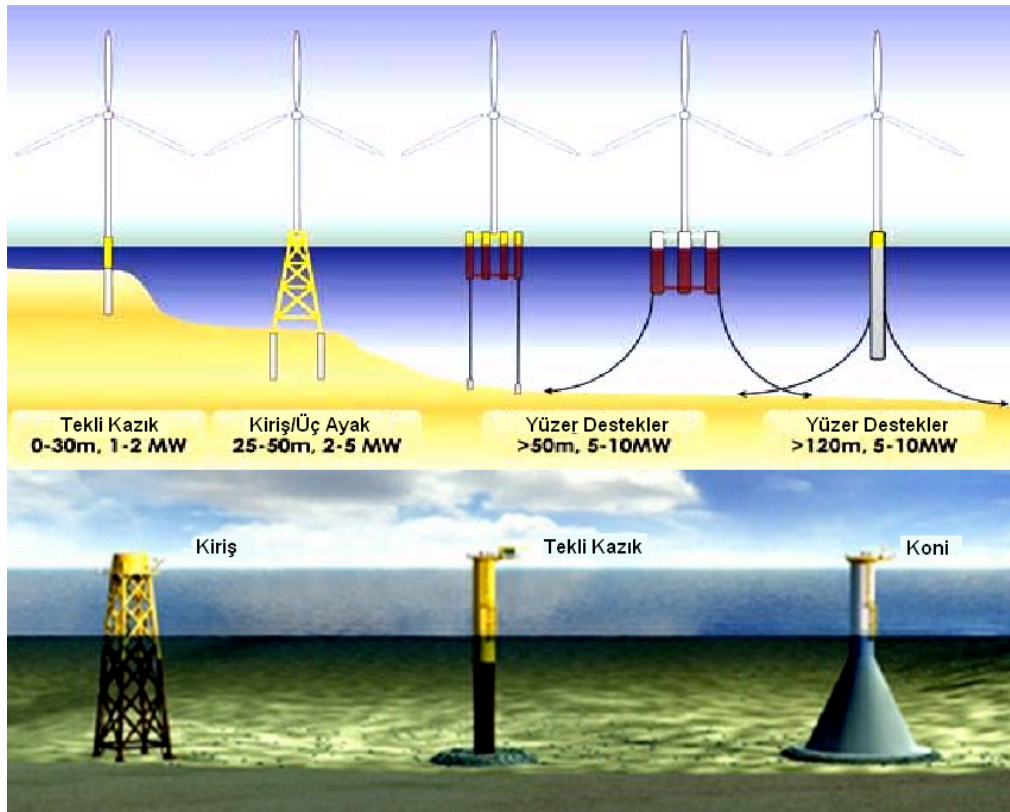
Deniz üzerine kurulan türbinler, temel olarak “deniz tabanına oturan” ve “yüzer tip” olarak ikiye ayrılabilirler.

Deniz üzerine kurulan türbinler ilk olarak kıyıya yakın, sığ denizlerde kullanılmıştır. Deniz yüzeyi ile deniz tabanı arasındaki mesafenin çok büyük olmaması nedeniyle (yaklaşık 50 metre veya daha az) bu tip türbinlerde “deniz tabanına oturan” klasik bir türbin kulesi kullanılmıştır.

“Deniz tabanına oturan tip” rüzgar türbinleri genel yapı itibarıyla kara üzerinde kurulan türbinlere benzerler. Deniz tabanında bir temele oturtulmaları sebebiyle kulenin dayanım hesapları – dalga ve akıntı kuvvetlerinin hesaba katılması dışında – kara üzerindeki türbinler gibidir.



Şekil 5. 7 Çeşitli destek yapıları ve uygulanabilir su derinlikleri (Malrotha, 2007)



Şekil 5. 8 Deniz üstü rüzgar türbinleri için temeller

### 5.3 Deniz Tabanına Oturan Rüzgar Türbinleri

Deniz üzerine kurulan rüzgar türbinleri bu tip ile başlamış olup, türbinlerde kurulumun denizde yapılacak olması sebebiyle kule ve temel kısmında değişikliklere gidilmiştir.

Yapılan değişiklikleri türbinin en üst kısmından başlayarak sıralayacak olursak,

Rotor ve nacelle'de rüzgarın ve denizin etkilerine – su ve tuz korozyonu, yıpratıcı bileşikler – karşı güçlendirilmiş korumalı kaplamalar ve boyalar kullanılır. Bu kaplama ve boyalar koruyucu vasıflarını yitirdiğinde yeniden uygulanır.

Kule gövdesinin deniz yüzeyi üzerindeki kısmı kara üzerindeki türbinlere göre daha şiddetli rüzgara dayanabilecek şekilde tasarlanır.

Kule gövdesinin deniz yüzeyindeki ve su altındaki kısmında dayanım hesaplamalarında dalgaların ve deniz yüzeyi altındaki akıntının şiddeti de göz önüne alınır.

Deniz altında kalan kısımlarda alg, yosun, kabuklu deniz canlıları vs. birikmesini önleyecek pürüzsüzleştirme ve özel boyalar ve kaplamalar kullanılır.

Kulenin temeli deniz tabanında, rüzgar ve su kuvvetleri sebebiyle kulenin yerinden oynamayacağı şekilde çeşitli prensipler ile sabitlenir.

Türbinlerin kurulmasına kulenin tepe ve gövde kısımlarının üretici firmanın atölyesinde imalatı ve montajı ile başlanır. Bu kısma kadar imalat işlemi kara üzerindeki bir türbin ile paralel seyreder.

Kulenin imalatı tamamlandığında parçalar gemiye yüklenerek kurulum yapılacak bölgeye getirilir. Bu esnada deniz tabanında sabitleme yöntemine bağlı temel veya sabitleme hazırlıkları ile kara üzerindeki şebekeye bağlantıların yapılacağı kablo kanallarının açılması gerçekleştirilir.

Tabana sabitleme hazırlıklarından sonra yüzer vinçlerin yardımıyla kule gövdesi temel üzerine oturtulur. Türbinin tepe kısmının kule üzerine oturtulması ile kulenin montajı tamamlanır, bundan sonra rüzgar çiftliğindeki kulelerin elektriksel bağlantıları deniz tabanında yapılır.

Bu tarz daha klasik yapıdaki türbinlerin avantajları hesaplamalarının ve üretimlerinin daha kolay ve bu konuda sektördeki deneyimin daha fazla olmasıdır, bunun haricinde

kurulum süresi ve bununla bağlantılı maliyetler daha düşüktür. Bunun karşılığında türbinin kurulacağı derinlik en fazla 50 metre seviyesinde olacağı için daha derin sularda olabilecek daha güçlü ve sürekli rüzgarlardan faydalanmak mümkün değildir.

Ağırlık etkisiyle sabitlenen rüzgar türbinlerinde temeli oluşturan taban beton tabanlı olup yeterli ağırlığa ulaşmak için gerekli balast olarak kum, demir veya kayalar taban içine doldurulabilir. Temelin genişliği deniz tabanının durumuna göre ayarlanmalıdır. Yapı için düz bir deniz tabanı gereklidir ve her kurulum alanında kumların akıntı ile aşınması sonucu temel etrafında çukur oluşmasını engelleyecek önlemler almak gereklidir.

Ağırlık etkisiyle sabitlenen temeller ile kazıklı temellerin özelliklerini birleştiren ağırlık-kazık hibrit temelerde yine balast kullanılması ve temelin genişliğinin deniz tabanının durumuna göre ayarlanması gereklidir. Destek yapısı, değişken yüklerin karşılanması ağırlık etkisi ve kazığa kuvvet aktarımının birleşimi ile karşılanacak şekilde tasarlanır.

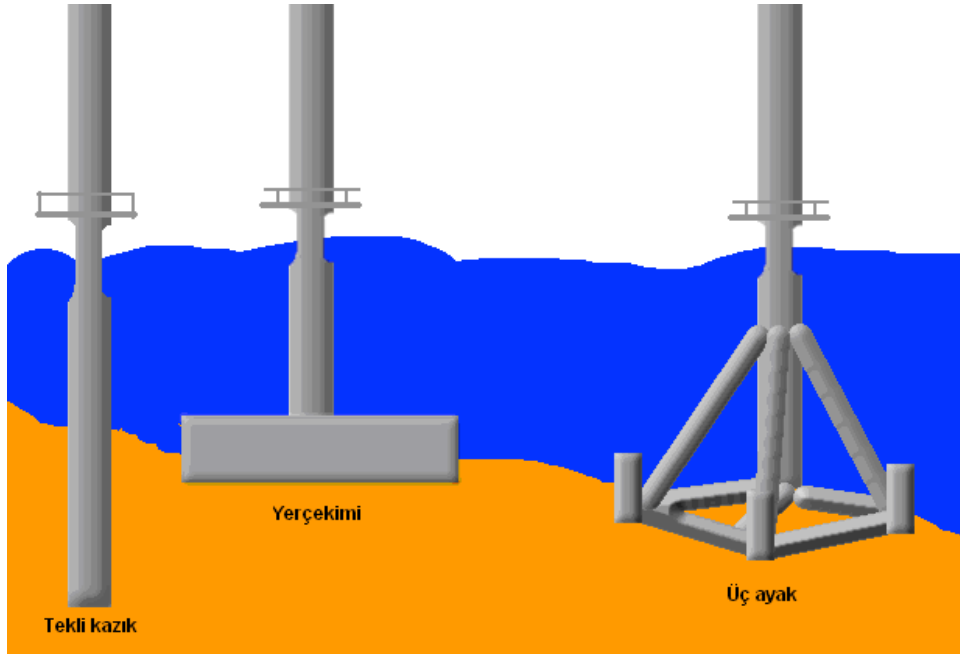
Ağırlık etkisi ile sabitleme yapılan temeller deniz tabanının sıkı olduğu ve su derinliği 25 metreye kadar olan yerlerde kullanıma uygundur.

Deniz tabanına sabitlemenin taban içine gömülen bir kazık ile yapıldığı yöntemlerden tek kazıklı yapılar imalat ve kurulumda basitlik sağlarlar. Başka bir kazıkla sabitleme yönteminde üç ayaklı ve kademeli temeller deniz tabanına sabitlenirler. Deniz üzeri kurulumlarda en yaygın kullanılan yöntem olan kazıkla sabitleme, farklı deniz üzeri platform amaçları için 1940'lerden beri kullanılmakta olup su derinliğinin 150 metreye ulaştığı durumlarda dahi kurulumlar yapılmıştır.

Kazıkla sabitlenen deniz üzerinde veya kıyıya yakın platformların standart kurulum yöntemi, yapının kurulum yapılacak yerde vinçle kaldırılarak veya yüzdürülerek konumlandırılması ve sonrasında kazıkların buhar veya hidrolik güçle çalışan şahmeranlar ile deniz tabanına gömülmesidir. Kazıkların ve şahmeranların desteklenmesi için genellikle yüzer vinçler kullanılır, fakat özel olarak tasarlanmış kurulum amaçlı gemiler veya bu iş için kurulmuş yüzer platformlar da kullanılabilir.

Tekil kazık temeller basit bir tasarıma sahip olup türbin kulesi doğrudan veya geçiş sağlayan bir ara parça aracılığıyla tekli kazık tarafından desteklenir. Yapının gövdesi silindirik çelik tüplerden imal edilir. Kazık derinliğinin kurulum koşullarına göre

ayarlanması gereken bu tip destek yapıları deniz tabanının hareketli olabildiği ve dalga hareketleri ile kazık etrafında çukur oluşması muhtemel kurulum alanlarında avantajlıdır. Olası bir dezavantaj ise derin sularda destek kulesindeki esnemenin çok fazla olabilmesidir. Bu tip temelerde kısıtlayıcı faktör destek kulesinin toplam esneme mesafesi ve titreşimlerdir. 25 metreye kadar olan su derinliklerinde kullanıma uygundur.



Şekil 5. 9 Deniz tabanına oturan destekler

Tekil kazık temellerin bir alternatifi olan desteklenmiş tekil kazık yapılarda tekil kazık, deniz tabanında biraz uzakta temellendirilmiş iki kiriş ile desteklenir. Destek kirişlerinin deniz tabanında ne kadar derine çakılacağına kurulum koşullarına göre karar verilir.

Benzer bir alternatif olan halatla desteklenen tekil kazık sistemlerinde türbini destekleyen kulede deniz seviyesinin üzerinden dört yönde indirilen çelik halatlar deniz tabanında çapalanır ve ön gerilim ile sabitleme yapılır. Bu tip temeller 20 ile 40 metre arasındaki su derinliklerinde kullanılmaya uygundur.

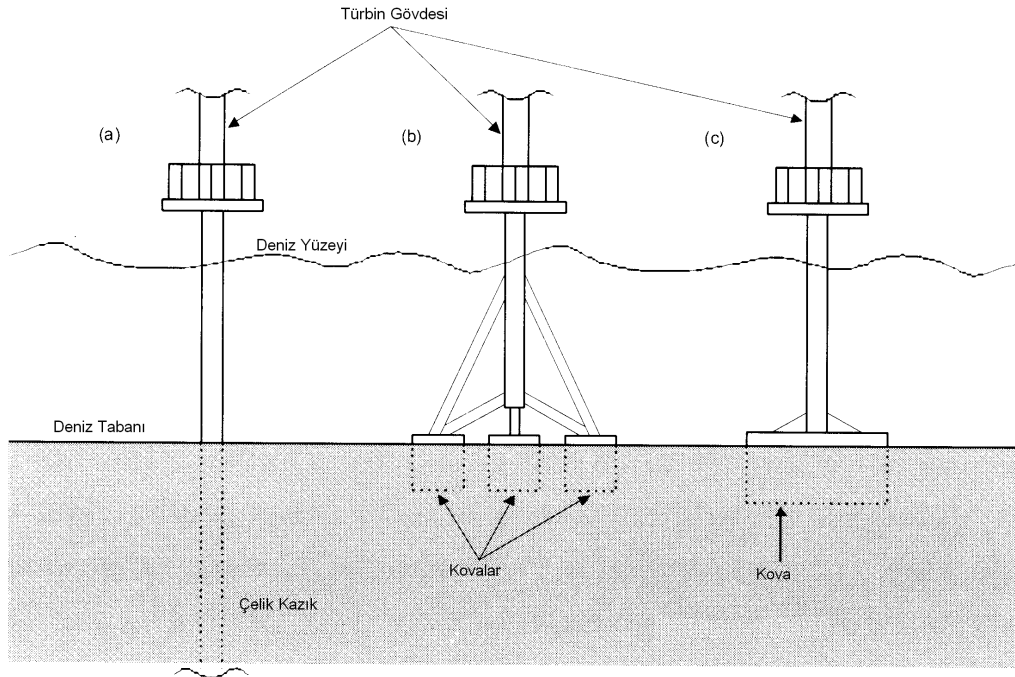
Üç ayak–kazık hibrit destek yapıları deniz tabanına eğimli veya dik üç kazık ile bağlanır. Yükselerek birleşen bu üç ayağın merkezindeki shaft türbini destekler. Ayakların açıklığı ve kazık derinliği çevre ve deniz tabanı koşullarına göre belirlenir. Bu tip yapılar su derinliği 20-50 metre arası olan yerlerde kurulum için oldukça uygundur.

Kova temel olarak adlandırılan sistemlerde türbini taşıyan merkez sütun deniz tabanına kova benzeri, çelik kenarları olan bir temel ile bağlanır. Bu kova vakum oluşturularak deniz tabanına kurulur ve kurulduktan sonra ağırlık temelli olarak çalışır; kova içerisinde hapsolan toprağın ağırlığı kuleyi sabitler. Kovanın derinliği genellikle çapıyla benzer boyutlardadır.

Deniz tabanında dalgaların etkisinin fazla olduğu dönemler kovanın dışarı çekilmesine yetecek kadar uzun olmayacağı için güvenlik sağlanmış olur. Bu dönemlerde deniz tabanının yüzeyi ile kovanın üst yüzeyi arasında dalga etkisi ile bir oyuk oluşabilir fakat tipik dalga periyotları kovanın tamamen açığa çıkması için çok kısadır.

Bu kurulum yöntemi ile çalışma ömrü sonunda kulenin sökülmesi kolaylıkla yapılabilir. Bu tip yapılar 25 metreye kadar olan kurulum derinlikleri için uygundur.

Kova temelin bir alternatifi olan üç ayaklı kova temellerde klasik üç ayaklı temelde kullanılan kazıklar yerine kovalar kullanılır. Türbinin temeli kurulum alanına yüzer halde getirilebilir ve kurulum esnasında her kovanın kontrollü olarak boşaltılması ile ağır kaldırma ekipmanları kullanılmadan ve kazık çakılması gerekmeden kurulum gerçekleştirilebilir.



Şekil 5.10 Deniz tabanına bağlantı çeşitleri (Houlsby – Brine, 2000)

Bu tip temeller çapa işlevi görecek kovaların deniz tabanı içerisinde derine girebileceği kum veya kil tabanlı kurulum alanlarında ve dalgaların oyuk oluşturma etkisinin düşük olduğu yerlerde kullanılabılır. Bu şartların sağlandığı durumlarda 20-50 metre arası derinlikler için uygundur.

Üç ayaklı kafes kule sisteminde üç adet köşe sütunu kullanılır ve birbirlerine kirişler ile bağlanırlar. Deniz tabanında her bir köşe sütünü deniz tabanında istenilen derinlikte çakılan kazıklara bağlanır. Bu tip kuleler 20 ile 40 metre arası derinlikler için uygundur [32].

#### **5.4 Yüzer Tip Rüzgar Türbinleri**

Deniz tabanına kule ve temeller ile oturtulan türbinler deniz üzerindeki rüzgarların elektrik üretimi için karaya göre daha elverişli olmasından faydalanırlar, fakat yapısı gereği ancak belirli derinliklerde kullanılabılırler.

Karadan uzaklaştıkça çoğu bölgede rüzgarlar daha çok güçlenir ve rüzgar rejimi karanın etkilerinden kurtulduğu için daha da düzenli hale geçer. Bu sebeple karadan daha uzak sularda kurulacak türbinlerin daha yüksek bir kapasite faktörü ile çalışacağı bilinmiştir. Fakat klasik, deniz tabanına sabitlenmiş türbin kulesi imalat metodları ile 50 metreden daha derin sularda kurulum yapılması pratik olarak mümkün değildi.

Bu derinliklerdeki sularda rüzgar enerjisinden yararlanılabılması başka bir üretim dalındaki teknolojik gelişmelere bağlı olmuştur.

Yaklaşık 20 yıl önce deniz tabanındaki rezervlerden petrol çıkartılması için kurulan petrol sondaj platformlarında da “deniz tabanına bağlı” temel kuleleri kullanılıyordu. Bu tip platformlarda da sondaj yapılabilecek derinlik, dönemin temel kulesi inşaat tekniklerinin uzanabileceği mesafe ile sınırlıydı. 80’lerin sonuna gelindiğinde daha derin sularda sondaj yapabilmek için gereken temel kuleleri büyüklük, ağırlık ve maliyet bakımlarından kabul edilemez sınırlara dayanmıştı.

Dünya petrol tüketiminin devamlı artması ve daha derin sularda bulunan petrol rezervlerinin yeni yatırımları ekonomik olarak mantıklı kılması sonucunda sondaj platformlarının denizde farklı bir şekilde sabitlenmesi fikirleri üzerinde çalışılmaya başlandı. Bu yeni sabitleme yönteminde platformdan deniz tabanına uzanan rijit bir

“kule” bulunmuyordu; sondaj platformu tabanındaki hava tankları sayesinde su üzerinde yüzer durumda kalabiliyor ve konumunun sabitlenmesi platformdan deniz tabanına uzanan gerilimli “çapa halatları” ile sağlanıyordu. Bu sayede büyük ve maliyetli kulelere ihtiyaç kalmadan ve deniz tabanında ancak çapa noktalarını yerinde tutmaya yetecek büyüklükte temeller kurularak yüzer platformun derin sular üzerinde sabit tutulması sağlanabiliyordu.

Bu platform inşaat tekniğinin başarıya ulaşmasından sonra benzer bir teknik rüzgar türbinleri için kullanılarak daha derin sularda rüzgar enerjisinin kullanılabilmesi sağlanmıştır. Nispeten yeni bir teknik olan ve farklı şirketlerin tasarımları halinde geliştirilmesine devam eden bu yeni yapılar “yüzer tip rüzgar türbinleri”ni oluşturmaktadır. Deniz tabanı derinliğinin kulenin uzanmasının kabul edilebilir olmadığı 50 metre’den daha fazla olması durumunda türbinin su üzerinde yüzer durumda olduğu ve deniz tabanındaki çapa noktaları ve gergili bağlantılar ile konumunun sabit tutulduğu bu tip rüzgar türbinleri kullanılmaktadır.

Henüz Dünya genelinde kullanımına yeni başlanmış olan bu tip rüzgar türbinlerinin ilk örnekleri Kuzey Denizi’nde Danimarka açıklarında bulunmaktadır. Gelecekte bu tipte türbinlerin üretiminin daha fazla yaygınlaşacağı düşünülmektedir.

Yüzer tip rüzgar türbinleri genel olarak kabul görmüş birkaç prensip ile konu üzerinde araştırma yapan firmaların geliştirip patentini aldığı tasarım tiplerinde üretilmekte olsa da temel olarak benzer bir fikri takip ederler. Bu tip türbinlerde kule kısmı deniz yüzeyinde yüzer konumda bulunur, kulenin doğru şekilde kalması ağırlık dengesinin büyük kısmı deniz yüzeyinin altında kalacak şekilde tasarlanması ile sağlanır ve bu sayede yüzer kısmın ters dönmesi önlenir. Yüzer kısmın sabitlendiği deniz temelindeki çapalar ise türbinlerin sabit konumda kalmasını sağlar.

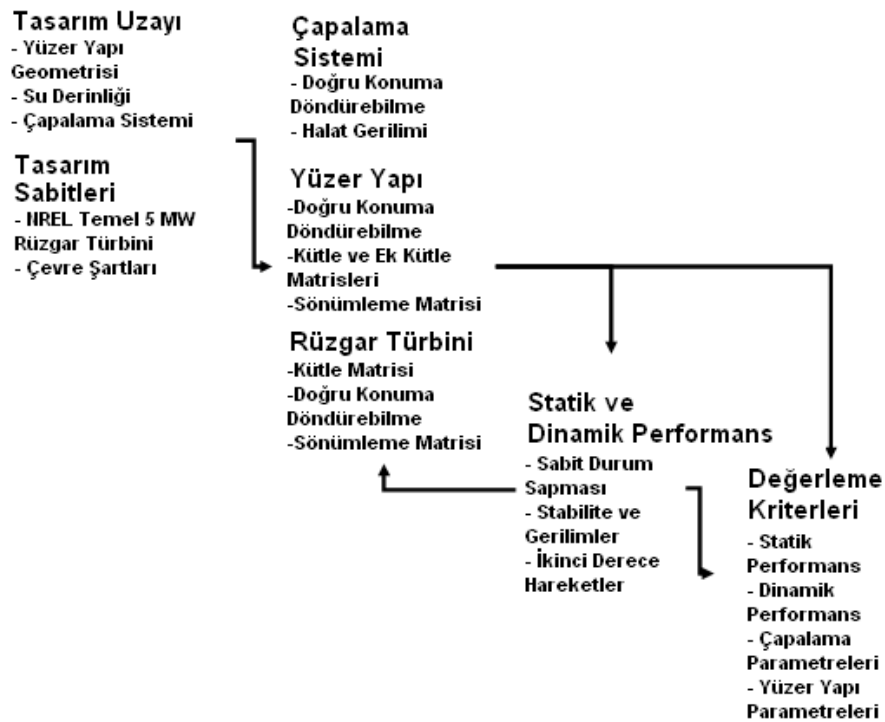
Türbin kulesinden deniz tabanına inen rijit bir kule olmadığı için daha derin sularda kullanım sağlanabilir ve daha büyük rüzgar güçlerinden faydalanılabilir.

Deniz tabanına rijit bir şekilde sabitlenen deniz üzeri rüzgar türbinlerinde olduğu gibi yüzer tip türbinlerde de denizde ve karaya göre daha sert iklim koşullarında uzun süreli çalışmaya uygun olacak gövde güçlendirmeleri, korozyon önleyici kaplamalar ve ışıktandırma ile sinyal sistemleri kullanılır.



Yüzer tip türbinlerde kule kısmının dalgalar ve rüzgar sonucunda hareket etmesini engelleyen çapa bağlantıları, halatların kabloların yüzer kule tabanından dikey olarak (serbest veya gerilmeli) olarak aşağıda indiği veya deniz tabanında geniş aralıklarla yerleştirilmiş çapa noktalarına açılı olarak indiği şekillerde olabilir. Norveç açıklarında devreye alınmış Hywind yüzer türbininde bu tipte açılı kablo bağlantıları kullanılmış, her bir kablonun orta kısmına birkaç tonluk ağırlıklar asılarak kabloda gerilme oluşması sağlanmıştır.

Yüzer tip türbinlerde türbinin deniz üzerinde sabit bir konumda kalması ve rüzgarın veya dalgaların etkisi ile oluşacak eğilmelerin belirli bir değeri (çoğu tasarım için %10) aşmaması hedeflenmektedir. Bu tasarım hedefine kurulum derinliğine ve çevre şartlarına uygun olarak üç ana parametre ile ulaşılabilir.



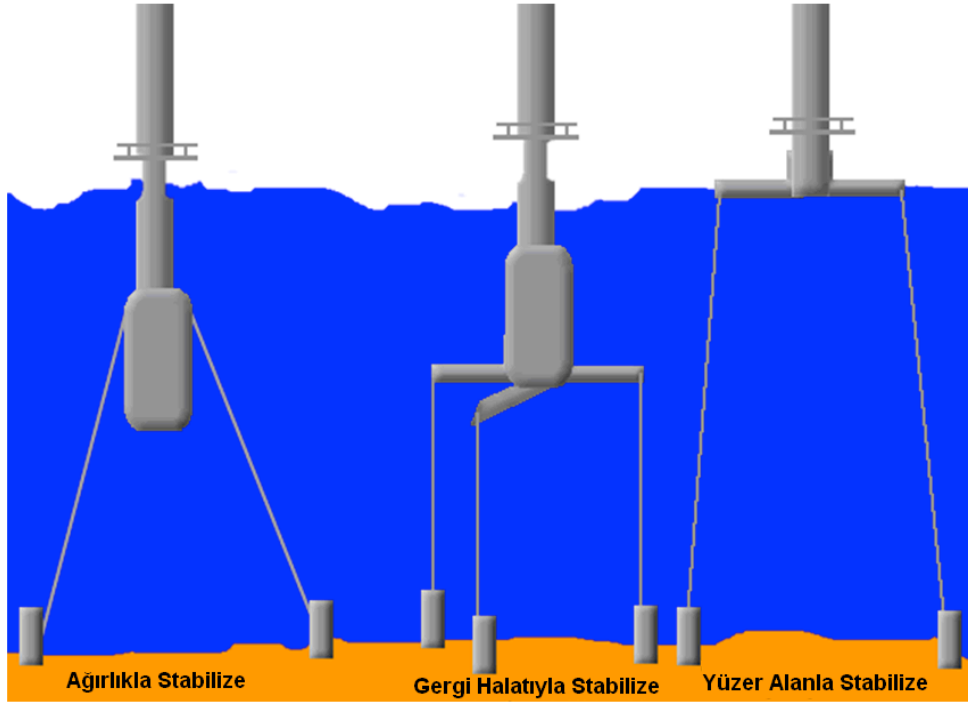
Şekil 5.11 Yüzer platform için tasarım süreci

Yüzer platformun dengesini sağlamak için kullanılacak ilk yöntem, ince ve uzun bir şamandıra tasarımı kullanmaktır. Şamandıranın çelik konstrüksiyona sahip dış yüzeyi türbinin su üzerinde yüzebilmesini sağlarken çelik konstrüksiyonun alt kısmına dökülen beton ile ağırlık merkezi aşağıda tutulur ve dalga ile rüzgar kuvvetlerine karşı türbinin dik durmasını sağlayacak bir karşı kuvvet elde edilir.

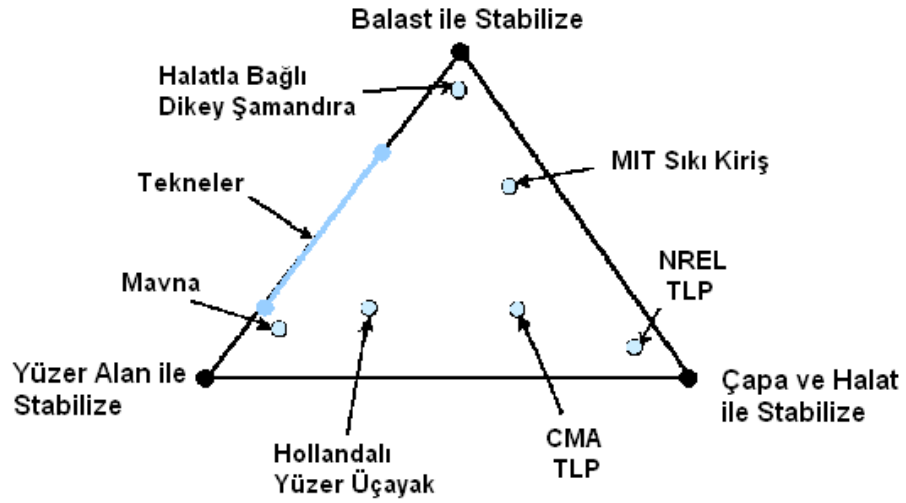
İkinci yöntem, yüzer türbini deniz tabanına sabitleyen çapalama sistemindeki ön gerilmeyi artırmaktır. Çapalama sistemi yüzer platformun alt kenarından dik şekilde deniz tabanına inecek ve ön gerilmenin etkisi ile gergin olacak şekilde (tension leg platform) veya deniz tabanına çoğunlukla 45 derece civarında bir açıyla inecek şekilde (catenary system) düzenlenebilir. İlk tasarımda çelik halatlar üzerinde oldukça yüksek bir ön gerilme mevcut olup platformun rüzgar yönünde veya rüzgarın tersi yönde dönme hareketi yapması bu ön gerilme ile engellenir. İkinci tasarımda ön gerilim daha az olduğu için şamandıra tabanında daha yüksek miktarda beton kullanılması gerekir, ek olarak bu yöntemde açılı şekilde deniz tabanına inen çelik halatlara belirli aralıklarla ağırlıklar asılarak ilave bir gergi kuvveti oluşturulabilir.

Türbin kulesi çalışacağı alana yüzer halde çekilerek götürülebildiği ve çapalar bu alanda bağlandığı için kurulum nispeten kolaydır. Kapsamlı bakım veya tamirat işlerinde türbin yapısı çapalardan sökülerek kıyıya çekilebilir.

Genellikle daha sığ sularda kullanılan üçüncü yöntem ise platformun deniz seviyesine paralel yüzeyinin artırılması ile deniz suyunun kaldırma kuvvetini daha geniş bir alana yaymayı ve dengeleyici etkisini artırmayı hedefler. Bu teknikte çapalayıcı çelik halatlarda daha az ön gerilmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Yüzer kısmın altında platformun dalga etkileriyle eğilmesini azaltmak için stabilizör bir ağırlık konumlandırılır. Bu tip yüzer türbinler de kurulum alanına yüzer halde götürülerek bağlantıları türbinin çalışacağı alanda yapılabilir.



Şekil 5. 12 Yüzer türbinler için destekler



Şekil 5. 13 Statik stabilite sağlanması için yöntemleri gösteren üçgen

### 5.5 Bazı Ticari Yüzer Tip Türbin Tasarımları

Yüzer tip türbinlerin gelişimi sürmekte olup, bazı firmaların tasarlayıp ticari olarak koruma altına aldığı bazı tasarımlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Principle Power şirketinin patenti altında olan Windfloat tasarımı 2011 sonbaharında Portekiz açıklarında denenecektir.

Bu sistemde üç sütunlu, üçgen bir yüzer platform kullanılacak olup türbin bu sütunlardan birisinin üzerine yerleştirilecektir. Deniz tabanı ile 6 halat bağlantı kuracak ve bu halatların 4 tanesi kulenin kurulu olduğu sütuna bağlanacaktır. Bu asimetrik çapalama ile daha sabit bir yerleşim hedeflenmektedir. Rüzgar yön değiştirdiğinde sütunlarda ağırlık oluşturmak için tutulan balast suyu pompalar ile başka bir sütuna aktarılacak ve rüzgarın itiş yönündeki kuvvet dengelenecektir.



Şekil 5. 14 Windfloat (Principle Power)

Nautica Windpower yüzer türbin tasarımında deniz tabanına tek bir halat ile sabitleme yapılmıştır. Rüzgarın akışına göre kulenin arka tarafında yer alan rotor sayesinde aktif bir yönlendirme sistemine ihtiyaç olmadan kanatlar rüzgarın akış yönüne göre otomatik olarak yön değiştirirler. Rüzgarın akış yönüne göre kulenin arkasında kalan ve iki kanattan oluşan rotorlarda kanatların esneklik göstermesi mümkün olduğundan esnek malzemeden imal edilmiş kanatlar kullanılması ile kanat ömrünün uzayabileceği, gövdeye gelen yüklerin azalacağı ve bakım ihtiyaçlarının azalacağı düşünülmektedir. Bu özellikler ile maliyet bakımından avantajlı bir yüzer türbin tasarımı amaçlanmıştır

Tasarım ve simülasyonları tamamlanmış olan OC3-Hywind tipinde deniz yüzeyinden 120 metre aşağıya kadar inen ve içi dengeleme amaçlı olarak su ile dolu silindirik, ince bir duba üzerinde 5 MW'lık bir türbin konulmuştur. Su derinliğinin 320 metre olduğu kurulum alanında sabitleme açılı halatlar ile yapılacaktır. Balast su ile beraber sistemin ağırlığının 7.4 milyon kg'u aşacağı hesaplanmıştır.



Şekil 5. 15 Hywind (Statoil Hydro)

DeepWind projesinde Ekim 2010'da 12 uluslararası şirket ortak olarak çalışmaya başlamış olup 20 MW'a kadar dikey eksenli ve ekonomik yüzer rüzgar türbinlerinin tasarlanması hedeflenmektedir.

### DENİZ ÜZERİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN HESAPLAMALAR

Deniz üzerinde bir türbin veya bir rüzgar çiftliği kurulması kara üzerinde kurulumla göre daha masraflı ve uzun süren bir süreç olduğu için her projenin başında detaylı bir hesaplama aşaması bulunmaktadır. Hesaplama aşamasına gelinmeden önce de kurulum yapılması düşünülen bölgenin geçmişe dönük uzun vadeli rüzgar rejiminin ölçülmüş olması gerekir.

#### 6.1 Enerji Üretimi Hesaplamaları

Bir bölgede rüzgar çiftliği kurulması fikri çoğunlukla rüzgar haritalarının incelenip yüksek hızlı ve yıl boyunca düzgün rejimli rüzgara sahip bir bölgeye odaklanması ile başlar. Hemen her ülkenin uzun süredir ölçümlerinin birleştirilmesi ile hazırlanan ülke genelinde ve bölgesel rüzgar haritaları mevcuttur, buna ilave olarak bir bölgeye özel olarak daha detaylı ölçümler yapılması ve haritaların detaylandırılması da mümkündür.

Bir bölgedeki genel rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanması veya planlanan bölgedeki her bir türbinin üretebileceği elektrik enerjisinin belirlenmesi gibi farklı amaçlara göre farklı detay seviyelerinde rüzgar verileri kullanılabilir. Küresel ölçekte rüzgar kaynağı hesaplamaları için genelde yeniden analiz verileri kullanılır, buna karşılık bölgesel veya bölgesel rüzgar kaynağı değerlendirmeleri için o bölgede elde edilen verilerin özeti kullanılır. Buna karşılık tek bir türbinin veya rüzgar çiftliğinin güç üretimini öngörebilmek veya bir rüzgar türbininin güç eğrisini çıkartabilmek için kurulum alanında yapılmış ölçümler kullanılır (Monahan [33]; Petersen ve arkadaşları, 1997).

Projenin yatırım maliyetini çıkartabilmesi ve karlı olabilmesi için bölgedeki türbinler ile üretilecek elektriğin birim ünitesinin belirli bir maliyetin altında olması gereklidir. Bu aşamada etüd çalışması ile bölgede kurulum yapılmasının yaklaşık maliyeti ve rüzgar enerjisi hesaplama amaçlı yazılımlar ile yılda üretilebilecek yaklaşık elektrik enerjisi hesaplanır ve olumlu sonuç alınması durumunda kurulumu uygun bir konum olduğu belirlenir.

Görülebileceği üzere hesapların iki aşaması bulunmaktadır: Bölgedeki rüzgar hızlarının, kurulum yapılabilecek yerlerin ve proje kapsamının belirlediği ve projenin elektrik üretim kapasitesinin belirleneceği teknik hesaplar ve bu üretilen elektriğin miktarını yatırım maliyetleri ile karşılayarak projenin ekonomik açıdan faydalı olup olmadığını belirleyen maliyet hesapları.

#### **6.1.1 Rüzgar Hızına Göre Üretilebilen Anlık Elektrik Enerjisi**

Bir rüzgar türbininin üretebileceği anlık elektrik enerjisi, türbinin kurulu olduğu alandaki rüzgar hızına, türbinin kanatlarının süpürdüğü alana ve türbinin rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme verimine bağlıdır.

Bu bileşenlerden rüzgar hızı kurulum yapılmış olan bölgede gün içinde kısa vadeli olarak veya yıllık rejime bağlı olarak uzun vadeli olarak değişkenlik gösterebilir, türbinin tasarlanmış olduğu en üst rüzgar enerjisi seviyesi her zaman mevcut olmayacağı için kapasite faktörü devreye girecek ve yıl içinde türbinin anma gücünün daha az bir kısmının üretilebilmesine sebep olacaktır. İlave olarak türbinin kule yüksekliği de rüzgar hızında belirleyici olacaktır.

Türbinin kanatlarının süpürdüğü alan enerji hesaplamasında doğrudan çarpan olarak yer alır ve mümkün olduğunda büyük olması istenir. Günümüzde imalat teknolojisindeki gelişmeler ve daha hafif malzemelerin geliştirilmesi ile rüzgar enerjisi sanayisinin ilk yıllarına göre oldukça büyük çapta kanatlar kullanılabilir; fakat yine de kanat çapının büyümesi proje maliyetini yükseltmekte ve kulenin maruz kaldığı dinamik yüklemeleri artırmaktadır.

Türbinin kanatçıkları ile yakaladığı rüzgar enerjisini faydalı elektrik enerjisine dönüştürebilme verimi kullanılan mekanik ve elektriksel aksamın verimlerinin çarpımı

olup, çeşitli firmalar yenilikçi redüktör, generatör ve doğrultucu tasarımları ile bu verimi yükseltme çabasındadırlar. Buna örnek olarak Enercon firmasının redüktör ile shaft hızını yükseltmeye gerek kalmadan düşük shaft dönüş hızıyla üretim yapabilen generatör tasarımları gösterilebilir.

Bu bileşenleri formül içinde göstermek istersek, ilk olarak kısım 3.4'te belirtilen rüzgar gücünün formüle edilmiş hali ile başlanır:

$$P_B = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \rho &= 1.223[\text{kg} / \text{m}^3] \\ V &: [\text{m} / \text{s}] \\ P &: [\text{kg} / \text{m}^3][\text{m}^3 / \text{s}^3]: [\text{Watt} / \text{m}^2] \end{aligned} \quad (6.2)$$

Formül birimlerinden görülebileceği üzere  $P_B$  değeri rüzgar esiş yönüne dik bir kesitte bir  $\text{m}^2$  için rüzgarın sahip olduğu gücü gösterir. Bununla beraber, akış sürekliliği açısından türbin kanatlarının bu gücün tamamını yakalaması mümkün değildir.

### 6.1.2 Kapasite Faktörünün Belirlenmesi

Kapasite faktörü, bölgede ölçülen rüzgar hızlarının ve güç yoğunluklarının çeşitli projeksiyonlar ile hesaplanması sonucu belirlenir. En sık kullanılan hesaplama yöntemi Weibull dağılımının oluşturulmasıdır.

### 6.1.3 Deniz Üzerinde Kurulum İle Elde Edilebilecek Kazanç

Bir rüzgar türbininin sığ sularda veya açık denizde kurulumundaki en büyük etken, daha yüksek hızda ve daha sürekli rejime sahip rüzgardan faydalanmaktır. Elektrik enerjisine dönüştürülebilecek rüzgar enerjisinin karaya oranla farkı, projenin ticari açıdan mantıklı olmasını sağlayabilecek büyüklükte olmalıdır.

Yukarıdaki örnekte kara üzerinde kurulan bir rüzgar türbininin üretebileceği elektrik enerjisi miktarı olarak hesaplanmıştı. Deniz üzerinde kurulum yapıldığında üretilen elektrik enerjisi miktarının ne kadar fazla olacağını hesaplayabilmek için, rüzgar hızı haritalarından kara ve deniz üzerindeki hız farklarını incelemek gereklidir.



## 6.2 Mukavemet Hesapları

Ticari olarak bir deniz üzeri alanda rüzgar çiftliği kurulmasına karar verildikten sonra kurulacak türbinlerin yapısal tasarımları yapılmalıdır. Özellikle deniz tabanına oturan türbinler için çoğu bakımdan kara üzeri rüzgar türbini tasarımlarına benzeyen bu aşamada denizde kurulum için bazı eklemeler yapmak gereklidir.

Yapılar ve yapı elemanları aşağıdaki koşulları sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır:

Yapının maruz kalacağı geçici yüklere, işletme yüklerine ve hesaba katıldı ise öngörülen hasar durumunda maruz kalacağı yüklere dayanabilmelidir.

Yapının tasarım ömrü boyunca kabul edilebilir bir yapı güvenliği sağlamalıdır.

Çalışanlar ve çevre için kabul edilebilir bir güvenlik seviyesi sağlamalıdır.

Tasarım ömrü boyunca yıpranmaya karşı yeterli direnç gösterebilmelidir. [32]

Deniz üzeri rüzgar türbinlerinde mukavemet hesapları farklı emniyet sınıflarına uyacak şekilde yapılabilir. Düşük emniyet sınıfı olası bir arıza durumunda yaralanma ve çevre kirlenmesi ihtimalini düşük olduğu, ticari zararların az olacağı ve hayati riskin ihmal edilebilecek kadar düşük olduğu yapılar ve parçalar için kullanılır. Normal emniyet sınıfı arıza durumunda yaralanma veya kirlilik riskinin mevcut olduğu veya önemli ticari zararlar oluşacağı durumlarda kullanılır. Yüksek emniyet sınıfı ise olası bir arızada ciddi yaralanma riski veya hayati tehlike meydana gelebilecek veya çok ciddi ticari zararlar oluşacak durumlarda kullanılır.

Rüzgar türbinleri için destek yapıları ve temeller normalde personel mevcut olmadan işlev görürler ve genellikle normal emniyet sınıfında tasarlanırlar. Meteorolojik ölçüm kuleleri de genellikle normal emniyet sınıfına göre tasarlanırlar.

Buna karşılık ticari öncelikler ve çalışanların güvenliği için destek yapıları ve temeller daha yüksek emniyet sınıflarında tasarlanabilirler. Örnek olarak bir meteorolojik ölçüm kulesinin kaybı sonucunda rüzgar çiftliğinin tamamlanmasında gecikme yaşanabilir, veya rüzgar ölçümlerinin yetersiz olması sonucunda türbinlerin veya destek yapılarının üretimi aşırı maliyetli olacak şekilde yapılabilir. Bu sebeplerle doğacak ek maliyetler bir türbinin kaybının doğuracağı maliyeti aşabilir; bu doğrultuda kule tasarımının yüksek emniyet sınıfında yapılması mantıklı olabilir.

IEC61400-1 ve bunu temel alan DNV-OS-C101 direktiflerinde rüzgar türbinleri ve insansız yapılar için temel alınan normal emniyet sınıfı, yıldaki hata ya da arıza ihtimali olacak şekildedir. Bu emniyet seviyesi arızaların sünek karakterde olması durumunda ve yapıların bir miktar rezerv kapasiteye sahip olması durumunda geçerlidir.

Ciddi yüklere maruz kalınacağı esnada içerisinde çalışanların olacağı rüzgar türbinleri ve türbin yapıları yüksek emniyet seviyesine göre tasarlanmalıdır; bu seviyede yıldaki hata ya da arıza ihtimali  $10^{-5}$  olacak şekilde tasarım yapılmalıdır.

Yapı elemanları ve detay parçaları, mümkün olduğu sürece yük altındaki tepkileri sünek karakterde olacak biçimde şekillendirilmelidir. Bağlantılar pürüzsüz geçişlerle ve parçalar düzgün hizalanacak şekilde tasarlanmalıdır. Bir yapı veya yapı elemanı sünek malzemelerden imal edilmiş olsa dahi kesitinde ani değişiklikler olması durumunda kırılabilir tepkiler verebilir.

### **6.2.1 Statik Yük**

Türbinin ve türbin kulesinin tasarımında başlangıç noktası, türbin nacelle ağırlığının taşınmasını amaçlayan statik yük hesaplarıdır. Bu aşamada rüzgar, dalga, akıntı gibi dinamik etkenler düşünülmeden ağırlığın taşınmasına yönelik kule tasarımı yapılır.

### **6.2.2 Rüzgar Yüğü**

Her rüzgar türbini üzerinde sürekli ve değişken bir rüzgar yükü bulunmaktadır. Nacelle tasarımında bu yük rotor kanatlarının ve nacelle gövdesinin nasıl yüklemeler altında kalacağını belirler ve aynı zamanda rotor kanatlarının belirli bir rüzgar hızında kilitlenmesini ve nacelle'in rüzgardan öte yana döndürülmesini gerektirir.

Türbinin maruz kalacağı rüzgar ikliminin hesaplanmasında devamlı mevcut olabilecek normal rüzgar koşulları ve olağanüstü durumlarda karşılaşılabilecek aşırı rüzgar durumları göz önüne alınır. Normal rüzgar şartları yapının sürekli yükleme şartlarının parçasıdır, aşırı rüzgar durumları ise nadir karşılaşılabilecek dış etkenler olarak sınıflandırılır. Normal rüzgar şartları temel yorulma hesapları içerisinde kullanılır, aşırı rüzgar yükleri ise türbinin, destek yapılarının ve türbin temelinin limit dayanım değerlerinin hesaplanmasında dikkate alınır.

Normal rüzgar koşulları hesaplarında hava yoğunluğu, rüzgar hızının 10'ar dakikalık dilimler içindeki ortalaması, rüzgar hızının kule yüksekliğinde ne kadar arttığı ve rüzgardaki türbülans hesapların içine katılır.

Aşırı rüzgar koşulları hesaplara katılırken hava yoğunluğu ile beraber bölgede karşılaşılması olası ve önceden tanımlanmış fırtına, aşırı türbülans, rüzgar hız ve yönündeki ani değişimler gibi atmosfer olayları tanım içine alınır. [32] Normal ve aşırı rüzgar koşullarının belirlenmesi için IEC61400-1 standardı kullanılabilir; fakat tropik bölgelerdeki kurulumlar için bu standardın tayfunlar ve hortumlar gibi tropik fırtınaları temsil etmede yeterli olamayabileceği göz önüne alınmalıdır.

Normal rüzgar koşulları için rüzgar iklimi 10-dakikalık ortalama rüzgar hızı  $U_{10}$  ve rüzgar hızının standart sapması olan  $\sigma_U$  ile temsil edilir. 10 dakikalık süre gibi kısa vadelerde sabit  $U_{10}$  ve sabit  $\sigma_U$  olan sürekli rüzgar koşullarının mevcut olduğu kabul edilir. Ortalama rüzgar hızı  $U_{10}$  rüzgar şiddetinin bir ölçüsüdür, standart sapma  $\sigma_U$  ise rüzgar hızının ortalamadan ne kadar değişkenlik gösterdiği. Türbülans şiddeti ise  $\sigma_U/U_{10}$  oranı ile belirlenir.

Rüzgar şiddetinin, ortalama rüzgar hızının ve türbülans oranının değerlerine bakılarak türbinin çalıştığı koşul Normal Rüzgar Profili, Normal Türbülans Modeli veya Aşırı Rüzgar Hızı Modeli arasında tanımlanır ve dalga yükü, akıntı, deniz seviyesi, rüzgar ile dalga yüklerinin hangi açıyla kesiştiği gibi etkenlerle beraber türbinin çalışacağı, devreden çıkacağı ve frenleme yapacağı koşullar ve türbinin harici yüklerle dayanım kapasitesi belirlenir. [32]

Kanatçıkların ve nacelle'in maruz kalacağı yükler belirlendikten sonra bu yüklerin türbin kulesine nasıl yansıtacağı hesaplanır. Deniz tabanına oturan türbinlerde rüzgar yükü, kuleyi rüzgar yönünde ve değişken şiddetle döndürmeye çalışan bir kuvvettir. Yüzer platform üzerine kurulu türbinlerde rüzgar yükü platformun önceden belirlenen limit değer (sabitleme prensibine göre genellikle 5 ile 10 derece arası) içerisinde dönmesinden sorumludur. Platformun stabilitesi deniz tabanına sabitleyen çelik halatlar üzerindeki ön gerilim ile sağlanıyorsa, rüzgar yükü bu gerilimin rüzgar yönünde azalmasına ve rüzgarın tersi yönde artmasına yol açar. Sabitleme halatlarının seçilmesinde statik ön gerilme yükü ve dinamik rüzgar yükleri hesaplanmış olmalıdır.

### 6.2.3 Dalga ve Akıntı Yükleri

Kara üzerinde kurulan türbinlerin aksine, denizde kurulan türbinlerde kule üzerinde dalga ve akıntıların da uyguladığı kuvvetler mevcuttur. Yönü ve şiddeti değiştiği için dinamik yük sınıfına giren bu yükler, kurulum alanındaki dalga ve akıntı hareketlerinin önceden belirlenmiş haritalar veya saha ölçümleri sonucunda hesaplanması ile belirlenir ve kulenin tasarımında mukavemet hesaplarına ilave edilir.

Türbinin ve destek yapılarının maruz kalacağı dalga iklimi, önemli dalga yüksekliği  $H_s$  ve pik periyodu  $T_p$  ile tanımlanır. Hesaplamaların yapılacağı 3 veya 6 saatlik periyotlarda sabit  $H_s$  ve sabit  $T_p$  olan sürekli dalga şartlarının mevcut olduğu kabul edilir. Önemli dalga yüksekliği  $H_s$  deniz yüksekliğindeki değişimin standart sapmasının 4 katı olarak tanımlanır. Pik periyodu  $T_p$  deniz yüksekliğindeki değişimin sıfır noktasını geçtiği periyot aracılığıyla tanımlanır. [32]

Özellikle yüzer platform üzerinde kurulu rüzgar türbinlerinde bu kuvvetler platformun sabitletmesini zorlaştıracığı için özellikle önemlidir. Geniş platform yüzeyi ile suyun kaldırma etkisinin platform tabanına dağılması ile sabit tutulan platformlarda yüzey alanının hesaplanmasında dalga ve akıntı yükleri birincil önem taşır; benzer şekilde platformu deniz tabanına sabitleyen halatlardaki ön gerilme ile sabit tutulan platformlarda da ön gerilme yükünün hesaplanmasında etkilidir.

### MALİYET HESAPLAMALARI

Herhangi bir enerji yatırımı yapılacağı zaman projenin fizibilitesi için yapılması gereken hesaplama, yatırım ile üretilen enerjinin ekipman ve kurulum maliyetleri, bakım, mühendislik işleri gibi harcamalardan sonra kWh olarak maliyetinin ne kadar olacağıdır. Rüzgar enerjisinin maliyetinin belirlenmesinde ana parametreler yatırım masrafları (türbin maliyeti, temeller, elektrik kurulumları, ana şebekeye bağlantılar, danışmanlık ücretleri, arazi masrafları, finansman sağlanması, güvenlik ve ulaşım sağlanması) ve işletme ile bakım masraflarıdır. Bu masraflar çeşitli etkenlere bağlı olduğu için ülkeler arasında ciddi farklılıklar görülebilir. [10] Günümüzde bu değer kara üzerinde kurulan rüzgar santralleri için 0,07 \$ / kWh, deniz üzerinde kurulan santraller için ise 0,20 \$ / kWh civarında olup bu birim maliyetin düşürülmesi için çalışmalar sürmektedir.

Enerjinin birim maliyeti hesaplandıktan sonra üretilen bu enerjinin elektrik şebekesine verilmesi esnasında alınacak ücret, projenin kredisinin veya finans kaynaklarının ödemesi, sürekli bakım ve iyileştirme maliyetleri, devlet teşviği var ise ne kadar süreceği ve santralin faydalı ömrü hesaba katılarak yatırımın şirket için faydalı olup olmayacağı belirlenir.

#### 7.1 Rüzgar Enerjisinin Maliyetine Genel Bakış

Projenin anahtar teslim maliyeti bakımından bir rüzgar enerjisi santralının kurulması için toplam bedel kara üzerindeki kurulumlar için 1.000 Euro/kW ve deniz üzerindeki

kurulumlar için 1.200-2.000 Euro/kW olarak tahmin edilmektedir (Junginger [34], ECN 2004). Çizelge 7. 1’de kara ve deniz üzerindeki rüzgar türbinleri kurulumları için ortalama maliyet kalemleri listelenmiştir.

Çizelge 7. 1 Kara ve deniz üstü rüzgar tarlaları için masraf tahminleri

	Kara Üzeri	Kara Üzeri	Deniz Üzeri
	Toplam Yatırım Masraflarındaki Payı (%)	Diğer Masraflar Arasındaki Payı (%)	Toplam Yatırım Masraflarındaki Payı (%)
Türbin	74-82		30-50
Temel	1-6	20-25	15-25
Kurulum	1-9	10-15	0-30
Şebeke Bağlantısı	2-9	35-45	15-30
Danışmanlık	1-3	5-10	
Arazi	1-3	5-10	
Finansal Masraflar	1-5	5-10	
Yol İnşası	1-5	5-10	
Diğer			8
Toplam Anahtar Teslim Yatırım Masrafı	800-1.100 Euro/ KW		1.200-2.000 Euro / KW

Kara üzerindeki kurulumlarda maliyeti belirleyen ana etkenin türbin masrafları olduğu görülmektedir. Deniz üzerindeki kurulumlarda ise türbinlerin kurulacağı temellerin ve ana enerji şebekesine bağlantının maliyeti yatırımın toplam masrafı içerisinde önemli bir paya sahiptir. Deniz üzeri kurulumlar için maliyetler şu anda ciddi miktarda daha yüksektir ve geçtiğimiz senelerde çelik fiyatlarının yüksek olması ve deniz üzerine kurulabilecek türbin üretiminin talebi karşılamaması nedeniyle yükselmiştir. Buna karşılık bu artışların kısa vadeli olup pazarın dengelenmesi ile maliyetin azalacağı ve 2010’da yeni üreticilerin pazara girmiş olması ile durumun iyileşeceği söylenebilir. (Papalexandrou, 2008 [35]).

Literatürdeki incelemelerde deniz üzeri rüzgar türbini yatırım maliyetlerinde en büyük payların %30-50 ile türbin bedeli, %15-30 ile ana şebekeye bağlantı ve %15-25 ile türbin temelleri arasında bölüştüğü görülmektedir. Bununla beraber, türbinlerin kıydan daha uzak yerlerde kurulması , su derinliği daha yüksek ve hava koşullarının daha zorlayıcı olmasını beraberinde getirir.

Kıydan uzaklaşıldıkça en çok artan masraf kalemleri kurulum ve ana şebekeye bağlantıdır. Daha uzak mesafelerde türbinlerin ve kurulum ekipmanının daha uzak mesafeye taşınması gerekeceği için kurulum masrafları artar, buna ek olarak hava koşulları genellikle daha sert olacağı için kurulum zorlaşır. Hava koşulları sebebiyle kurulumu ara verilmesi gereken süre toplam kurulum süresinin %20-30’una ulaşabilir [10].

Uzaklık artışından en çok etkilenen masraf kalemi ana şebekeye bağlantı için kablo kurulumlarıdır. Herman et al. (2003) araştırmasında deniz üzeri kurulumda mesafe artışının getirdiği maliyet artışı incelenmiştir. “Svanen” gemisinin yaptığı kurulumlardaki süreler dikkate alınarak mesafe ile masrafların bağlantısı araştırılmış olup, sonuca göre türbin kurulumu kıyıda 60 km uzakta olduğunda karadaki ana şebekeye bağlantı için oluşan masraf yaklaşık iki katına çıkmaktadır.

Çizelge 7. 2 Kıyıya mesafe ile artan maliyet artış oranı (EEA, 2008)

		Kıyıya Mesafe (km)							
		0–10	10–20	20–30	30–40	40–50	50–100	100–200	> 200
Maliyet (Euro / kW)	Türbin	772	772	772	772	772	772	772	772
	Temel	352	352	352	352	352	352	352	352
	Kurulum	465	476	488	500	511	607	816	964
	Şebeke Bağlantısı	133	159	185	211	236	314	507	702
	Diğer	79	81	82	84	85	87	88	89
	Toplam masraf (Euro / kW)	1.800	1.839	1.878	1.918	1.956	2.131	2.534	2.878
Artış oranı		1	1,022	1,043	1,065	1,086	1,183	1,408	1,598

Mesafe ile ilgili bir başka konu kullanılan güç nakil kablosudur. Bu kalemdeki değişkenler kablo kesiti, deniz tabanının durumu ve trafo istasyonlarına gereksinim duyulabilmesidir. Trafo istasyonları hariç tutulursa deniz üzeri kurulumlar için kablolama maliyetinin kilometre başına 500.000 ile 1.000.000 Euro olduğu kabul edilmektedir (International Association of Engineering Insurers, 2006). Başka bir araştırmada nakil kablosu temini ve döşenmesi için maliyetin kilometre başına 1.000.000 Euro olduğu hesaplanmıştır [35]. Aynı incelemede karaya varıldığında şebeke bağlantı noktasına ulaşılması için gereken nakil kablosu döşeme maliyetinin km başına 650.000 Euro olduğu belirtilmiştir. Mevcut kara üzerinde kurulu rüzgar türbinlerinden üretilen elektriğin birim maliyeti olup gelişmekte olan teknolojiler ve üretim hacminin artması ile bu maliyetin civarına düşmesi beklenmektedir.

Günümüzde kurulu deniz üzeri rüzgar türbinlerinde birim enerji maliyeti seviyesinde olup bu tip türbinlerin üretim hacminin artması ve deniz üzeri kurulum tekniklerinin gelişmesi ve ucuzlaması ile maliyetin civarına düşmesi beklenmektedir. Kara üzeri rüzgar türbinlerinin kurulum ve üretim maliyetini düşürecek teknolojik ve üretim kapasitesi gelişmeleri deniz üzerinde kurulum için olan maliyetleri de düşürecektir. Kara üzerinde rüzgar türbini kurulumları uzun süredir denenmiş ve teknik ve ekonomik açıdan altyapısı yerleşmiş yatırımlardır, deniz üzeri rüzgar türbinleri ise nispeten daha yeni ve henüz geliştirilmeye açık teknolojilerdir.

Deniz üzeri rüzgar türbinlerinin toplam maliyetine baktığımızda aşağıdaki durum göze çarpmaktadır:

Türbinin nacelle ve rotor kısmı ve elektrik ekipmanı için olan masraflar hemen hemen aynı düzeydedir; deniz üzerinde kurulacak rüzgar türbinlerinde ekonomik açıdan daha etkileyici olan unsurlar deniz kurulumu için yapılacak hesaplamalar, kule veya yüzer platformun özel yapısı ve kurulum esnasında ve sonrasında bakım veya revizyonlar için kuleye erişimin daha uğraştırıcı olmasıdır.

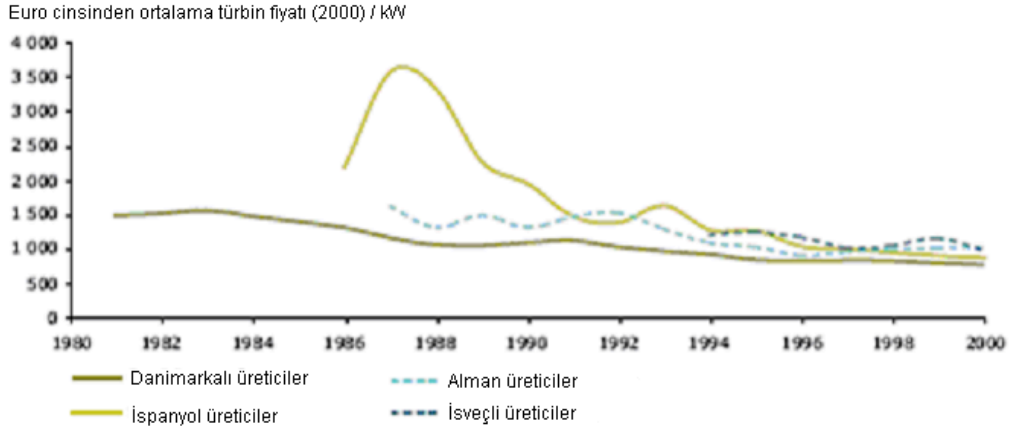
## **7.2 Deniz Üzeri Rüzgar Enerjisi Projesi için Maliyet Hesaplaması**

Deniz üzerinde rüzgar enerjisi santralleri kurulabilmesi için gerekli maliyet, kara üzerinde kurulum için gerekli maliyetlerden bazı kalemler için büyük farklılık gösterir. Türbinin kendisinin maliyeti ve bakım maliyetlerinin gerekli parçalar için olan kısmı kara üzerinde yapılan kurulumlar ile benzer olsa da türbinin deniz tabanına sabitlenmesi için gerekli temellerin ve kurulumun kendisinin maliyeti kara üzerinde kurulumla göre oldukça yüksektir. Bakım masraflarını arttıran konu deniz üzerindeki türbine ulaşmak için ilave masraflar ve kalifiye iş gücü gerekmesidir. Kara üzerindeki ana şebekeye bağlantı masrafları da türbinin karadan uzaklığı arttıkça toplam maliyetler içinde çok ciddi bir yer tutmaktadır. Genel elektrik şebekesi içinde rüzgar enerjisinin payının artması sonucunda doğan ek gereksinimler ise kara üzerindeki kurulumlar ile benzer ek maliyetler getirir.

### **7.2.1 Türbin Maliyeti**

Özellikle kara üzerindeki kurulumlarda maliyetin önemli bir kısmını oluşturan türbin masraflarının fiyatları tarihsel gelişiminde türbin boyutunun büyümesi ile düşme göstermiştir [34] [36]. 2000'li yıllara girildiğinde türbin masrafları 750-1.000 Euro/kW seviyesinde idi [34] [37].





Şekil 7. 1 Avrupalı üreticiler için ortalama türbin fiyatları

Çeşitli Avrupalı üreticiler için rüzgar türbini yatırım masraflarının tarihsel gelişimi şekil 7. 1’de görülmektedir [37].

Türbin yatırımı masraflarının zamanla daha da aşağı inmesi beklenmektedir. Türbin üreticileri rüzgar enerjisi için üretim maliyetlerinin her türbin nesli için %3–5 arasında inmesini beklemektedirler (EWEA). Daha az iyimser bir öngörü, yatırım masraflarının yılda %1–2,2 arasında azalacağı yönündedir (Fellows, 2000). Fiyatlardaki düşüş çalışanların tecrübe kazanması, çalışma veriminin artması, standartların oluşması ve iş alanlarının özelleşmesi, gelişen teknoloji ve tasarımların araştırma ve geliştirme ile iyileştirilmesi ile sağlanabilecektir. Rüzgar türbinleri için “ilerleme oranı” %80–95 seviyesindedir [34] [37], bu da toplam kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi iki katına çıktığında türbin masraflarının %5–20 arasında azaldığına işaret eder.

Deniz üzeri kurulumlar için bir maliyet öngörüsü, rüzgar enerjisi projenin bileşenlerine (temel, ana şebekeye bağlantı, kablolama, kurulum) ayrı ayrı bakıldığında 2020 yılına gelindiğinde deniz üzeri rüzgar türbinleri için olan maliyetin araştırmanın yapıldığı 2005 yılına göre %40’a kadar düşebileceği yönündedir [34]. Belirtilen tarihteki anahtar teslim proje maliyeti 1.800 Euro/kW olarak alınırsa sonuç 2020 yılı için tahmini maliyetin 1.080 Euro/KW olacağı yönündedir. 2030 yılına kadar ihtiyatlı bir tahminle her yıl %1 maliyet düşüşü olacağı düşünülürse 2030 yılında anahtar teslim maliyetin 975 Euro/kW seviyesine ineceği öngörülebilir. Bu tahminlerin yapılması esnasında deniz üzeri rüzgâr enerjisi için kurulu kapasitenin 2020 yılına kadar yıllık %15–19 ve daha sonrasında %9 artacağı temel alınmıştır.

Geçmişte maliyetlerin düşmesi asıl olarak türbin anma kapasitesinin yükseltilmesi yoluyla gerçekleşmiş olsa da, gelecekteki düşüşlerin daha yüksek hacimli üretim ve daha iyi tasarımlar ile oluşması beklenmektedir [34]. Sektördeki tecrübe kazanımının ve yüksek adetli üretimin ana şebekeye bağlantı, temel kurulması ve planlama aşamasındaki maliyetleri de daha da düşürmesi beklenmektedir. Bu masraflar geçtiğimiz yıllarda hâlihazırda düşmüştür.

## 7.2.2 Kurulum Maliyeti

Deniz üzeri rüzgar çiftliğinin kurulum yeri kıyıdan uzaklaştıkça su derinliği artacaktır, bunun sonucunda türbinlerin temelleri için gereken harcama miktarı da artar. Derin sularda türbin temelleri için yapılacak harcamanın toplam maliyetin %30'una kadar ulaşabileceği belirtilmiştir (Nikolaos, 2004). Greenpeace'in (2000) araştırmasında 1 ile 1,5 MW kapasitesindeki deniz üzeri türbinler için temel masraflarının 8 metre derinlikte 317.000 Euro'dan 16 metre derinlikte 352.000 Euro'ya yükseldiği, yani %11 artış olduğu belirtilmiştir. Başka bir araştırmaya göre tek kazıklı temeller için masraflar 15 metre derinlik için MW başına 300.000 Euro'dan 40 metre derinlik için MW başına 1.000.000 Euro'ya kadar yükselebilir [35].

Çizelge 7. 3 Su derinliğine bağlı olarak deniz üstü kurulum maliyeti artışı (EEA, 2008)

		Su Derinliği (m)			
		10-20	20-30	30-40	40-50
Maliyet (Euro / kW)	Türbin	772	772	772	722
	Temel	352	466	625	900
	Kurulum	465	465	605	605
	Şebeke Bağlantısı	133	133	133	133
	Diğer	79	85	92	105
	Toplam maliyet (Euro / KW)	1.800	1.920	2.227	2.514
Artış oranı		1.000	1.067	1.237	1.396

Çizelge 7. 4 Su derinliği ve kıyıya mesafeye bağlı olarak maliyet artışı (EEA, 2008)

		Kıyıya Mesafe (km)							
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-100	100-200	> 200
Derinlik (m)	10-20	1	1,022	1,043	1,065	1,086	1,183	1,408	1,598
	20-30	1,067	1,090	1,113	1,136	1,159	1,262	1,501	1,705
	30-40	1,237	1,264	1,290	1,317	1,344	1,464	1,741	1,977
	40-50	1,396	1,427	1,457	1,487	1,517	1,653	1,966	2,232

Tabloda su derinliğine bağlı olarak kurulum masrafları en sığ sular için 1.800 Euro/kW baz alınarak verilmiştir. Kurulum masrafları hem kıyıya olan mesafeye, hem de su

derinliğine bağılı olarak artmaktadır. Masraf kalemlerinin farklı mesafe ve su derinlikleri için toplamları alınarak yaklaşık maliyetin öngörülebileceği bir “artış katsayısı” ortaya konulmuştur. Bu tablolar ışığında kıyıya yakın ve derinliğin az olduğu bir alanda kurulum için 1.800 Euro/kW değerinden açık denizde ve derin sularda kurulum için 4.000 Euro/kW'a kadar değişen maliyetler ortaya çıkmaktadır. Türbin ve kurulum teknolojisindeki gelişmeler, kurulum tekniklerinin gelişmesi, planlama ve kurulum aşamalarında tecrübe kazanılması ile bu aralığın 2030'a kadar 890-2.200 Euro/kW'a düşebileceği öngörülmektedir [10].

### **7.2.3 Bakım ve İşletme Maliyetleri**

Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği, Danimarka, Almanya, İspanya ve İngiltere'de kurulu türbinlerden elde edilen verilere dayanarak 2003b raporunda bakım ve işletme maliyetlerinin rüzgâr çiftliğinin ömrü boyunca toplam üretilen güç için yaklaşık 0,012–0,015 Euro/kWh olduğunu belirtmiştir. Bu bilgiler ışığında kara üzerinde kurulu türbinler için bakım ve işletme maliyetlerinin rüzgar çiftliğinin üretime başladığı ilk yıllarda toplam kurulum maliyetinin %2-3 değerine, türbinlerin verimli ömrünün sonuna yaklaşıldığında ise %5'ine yaklaştığını göstermektedir. Deniz üzeri kurulumlar için ise bu maliyetlerin rüzgar çiftliğinin anahtar teslim kurulum maliyetinin %2–4,4'ü arasında olduğu hesap edilmektedir (Junginger, 2005). Bakım ve işletme maliyetlerinin türbin kurulum maliyetlerine paralel olarak azalma göstereceği düşünülmektedir. Türbinlerin mekanik ve elektrikli parçalarının bakımı için gereken parça maliyetleri benzerdir. Bununla beraber deniz üzeri rüzgar türbinlerinde kurulum sonrası düzenli bakımlar, arızaların giderilmesi veya ekipmanda herhangi bir revizyon yapılması gerektiğinde kuleye deniz üzerinden erişilmesi gerekmesi büyük bir ek maliyet getirmektedir. Bu işlemleri yerine getirecek personelin deniz üzerindeki platformlarda çalışabilecek kalifikasyonda olması da işçilik giderlerinin artmasına yol açmaktadır.

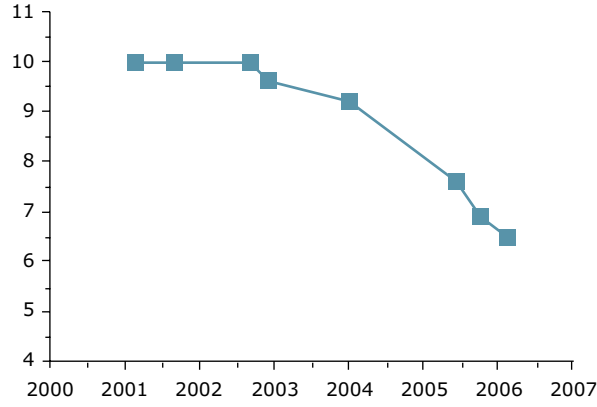
### **7.2.4 Şebekede Rüzgar Enerjisinin Payının Artmasının Etkileri**

Bölüm 2'de belirtildiği üzere, enerji nakil ağındaki toplam elektrik enerjisi içerisinde rüzgar enerjisinin payı arttıkça rüzgar enerjisinin doğasında olan üretim miktarı değişkenliğinin etkilerini azaltmak için önlemler almak gerekir.

Rüzgar türbinleri genellikle büyük miktarda enerji tüketilen merkezlerden uzakta kurulurlar. Bu sebeple üretilen elektriğin büyük kısmının uzak mesafelere taşınması gerekecektir. Mevcut altyapının zorlanmaması için aktarım ve dağıtım şebekelerine eklemeler veya geliştirmeler yapılması gerekebilir. Çeşitli ülkelerdeki çalışmaların incelenmesi sonucunda kara veya deniz üzerinde rüzgar enerjisi üretiminin toplam elektrik üretimindeki payının %30'u geçmesi durumunda şebekenin genişletilmesi veya desteklemeler yapılması için gereken masrafların 0,1-5 Euro/MWh olduğu hesaplanmıştır. Diğer kaynaklar şebekenin genişletilmesi için masrafları 1-10 eurocent/kWh veya belli ülkeler ve rüzgar enerjisi payı seviyeleri için 0-5 eurocent/kWh arasında belirtmişlerdir (GreenNet, 2004).

Elektrik üretim sisteminde güç akışı üretim ve tüketim arasında sürekli dengelenmek zorundadır. Bu dengeleme saniyeler içinde gerçekleşir ve çeşitli rezerv kapasiteler kullanılır. Rüzgar enerjisi için gereken ek rezerv miktarı şebeke toplamında %10 rüzgar enerjisi payı için bu payın %2-8'i kadardır. İhtiyaç miktarı şebekeye bağlantı şekline, üretim ve tüketim merkezlerinin coğrafi konumlarına ve rüzgar enerjisi üretim miktarının nasıl önceden tahmin edildiğine bağlıdır. Rüzgar enerjisinin toplam üretimdeki payı arttıkça gereken rezerv miktarı da artar.

Bu ek rezerv için gereken harcama , rüzgar enerjisi üretiminin önceden tahmininin doğru yapılması kaydıyla 2-4 eurocent/kWh seviyesindedir (EWEA, 2006c). Bu miktarların belirlenmesinde en önemli etkenler rüzgar enerjisinin toplam üretimdeki payı, önceden tahmin teknikleri, şebeke bağlantıları, coğrafi dağılımlar ve üretim sistemidir. Lange et al. (2006) Almanya için rüzgar enerjisinden elde edilebilecek üretim miktarının tahmini ile gerçekleşen üretim arasındaki farkı araştırmıştır. Tahmindeki hata payı Şekil 6.2'de gösterilmekte olup 2001'de %10 seviyesinde iken 2006'da %6'ya düşmüştür ve iyileştirme çalışmaları devam etmektedir.



Şekil 7. 2 Üretim tahmini ile gerçekleşen arasındaki yüzde fark (Lange et al. 2006)

### 7.2.5 Rüzgar Enerjisi için Özel Uygulamalar

Pek çok devlet, elektrik üretimi içerisinde yenilenebilir enerjinin payını artırmak için bu sektörde ilave teşvikler ve vergi indirimleri veya muafiyetleri sağlamaktadır. Rüzgar enerjisi için Avrupa'daki çoğu devlet ve Amerika Birleşik Devletleri'nde uzun vadeli ülkesel enerjideki pay hesaplamaları ve planları yapmış olup, rüzgar enerjisi kurulumları için aktif özendirici uygulamalar yürürlüğe koymuştur.

İngiltere, Danimarka, Almanya gibi Kuzey Avrupa ülkelerinde deniz üzeri kurulumlar bu plan içerisinde özel yere sahip olup ilave teşviklerden yararlanmaktadır.

### 7.3 Maliyet Hesaplama Formülleri

Kurulacak bir rüzgar çiftliğinden üretilecek elektriğin maliyeti türbin, kurulum, bakım ve işletme maliyetlerine, türbinden elde edilebilecek güce ve kapasite faktörüne, finansman için gerekli faiz oranına ve maliyetleri şimdiki zaman değerine çekmek için enflasyon oranına bağlıdır. Bu değişkenlerin katılabileceği ve türbin ömrü boyunca yapılan masrafların bugünkü değerinin görülebileceği bir denklem aşağıdaki gibi verilebilir [38]:

$$MBD = I + B \left[ \frac{1+i}{r-i} \right] * \left[ 1 - \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^t \right] - S \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^t \quad (7.1)$$

MBD değerinde I ilk yatırım maliyetini, yani türbin, inşaat ve bağlantı giderlerini göstermektedir. İnşaat ve bağlantı giderleri kara üzerindeki türbinler için ilk yatırım maliyetinin yıllara bölünmüş değerinin %20'si olarak alınabilir. B değeri yıllık işletme,

bakım ve onarım maliyetlerini göstermektedir.  $i$  enflasyon değerini,  $r$  faiz değerini,  $S$  hurda bedeli,  $t$  ise türbin ömrünü göstermektedir.  $B$  yıllık işletme, bakım ve onarım gideri türbin yatırımının yıl başına düşen masrafının %25'i olarak alındığında aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$B = \frac{I}{(t * 4)} \quad (7.2)$$

$S$  hurda bedeli ilk yatırım maliyetinin %10'u olarak alınabilir.

Elektrik enerjisi santrali yatırımında birim elektrik maliyeti yapılan yatırımın bugünkü değerinin üretilebilecek elektrik enerjisi miktarına bölümü sonucu elde edilebilir. Üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı türbinlerin anma gücü, kapasite faktörü ve türbinlerin ekonomik ömrünün çarpımı ile bulunabilir; dolayısıyla elektrik enerjisi için kWh değerinden maliyet aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [36]:

$$\text{Maliyet} = \frac{MBD}{P_R * C_f * t} \quad (7.3)$$

#### 7.4 Yabancı Kaynaklı Maliyet Hesaplamaları

Avrupa Enerji Ajansı, araştırmasında ekonomik potansiyelin araştırılması için rüzgar enerjisi üretim maliyetlerini 2005, 2020 ve 2030 yılları için Çizelge 7.5'teki gibi hesaplamıştır.

Çizelge 7. 5 Rüzgar enerjisi üretimi için maliyet tahminleri [10]

	Birim	2005			2020			2030		
		Deniz	Kara	Dağlık	Deniz	Kara	Dağlık	Deniz	Kara	Dağlık
Anahtar teslim masraf	Euro / KW	1.800	1.000	1.100	1.080	720	792	975	576	632
İşletme ve bakım	%	4	4	5	4	4	5	4	4	5
Özel sermaye payı (%15 faiz oranı)	%	50	20	20	40	20	20	30	20	20
Kredi payı (%6 faiz oranı)	%	50	80	80	60	80	80	70	80	80
Ortalama faiz	%	10,5	7,8	7,8	9,6	7,8	7,8	8,7	7,8	7,8
1.600 yük saati	Euro/ kWh	0,175	0,097	0,12	0,10	0,07	0,082	0,099	0,065	
2.500 yük saati	Euro/ kWh	0,112	0,062	0,077	0,065	0,045	0,052	0,063	0,036	0,042
Mesafe katsayısı	Kıydan uzaklığa bağlı maliyet artış katsayısı: 0,00285 x mesafe (km) + 0,972									
Derinlik katsayısı	15-50 m derinlik için maliyet artış katsayısı: -0,0125 x derinlik + 0,812 (derinlik eksi bir sayı olarak)									

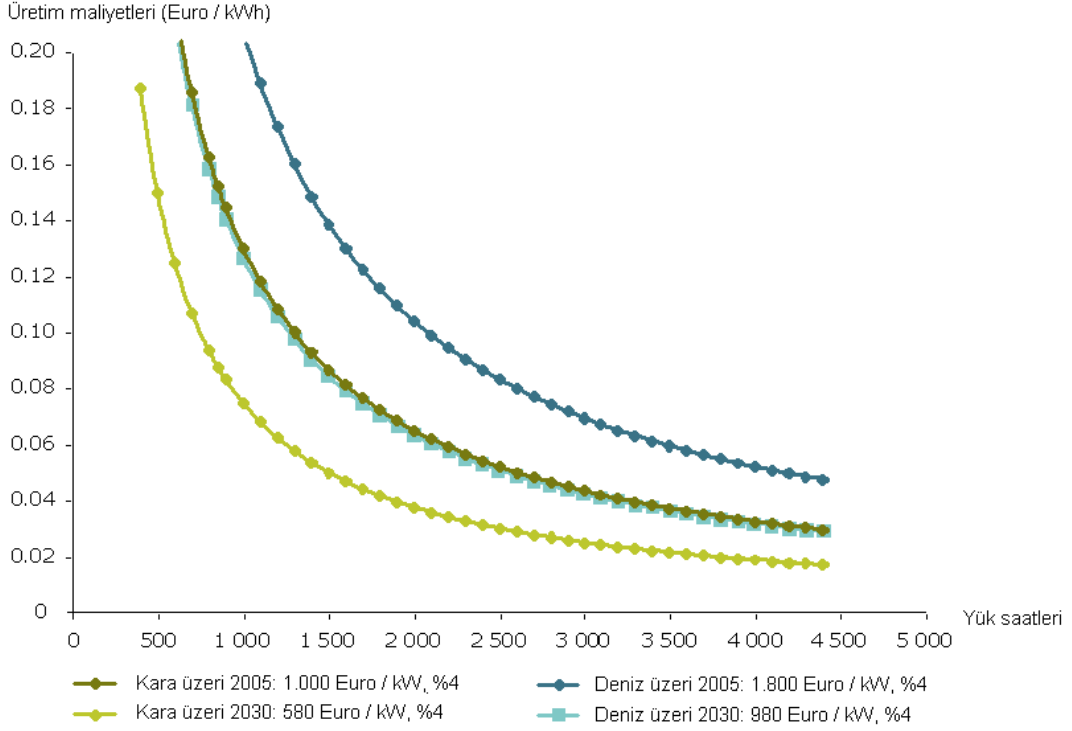
Elektrik enerjisinin türbinin anma kapasitesinde elde edilebildiği süre kara üzeri kurulumlar için 1.600 saat (%18 kapasite faktörü) ve deniz üzeri kurulumlar için 2.500 saat (%28 kapasite faktörü) olarak alınmıştır. Masraflar ortalama anahtar teslim

kurulum masrafları, işletme ve bakım maliyetleri ve gerekli yatırım anaparasının iki çeşitli finansmanı göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Ana paranın özel şirketler tarafından finanse edilmesi durumunda hesaplama yatırımın geri dönüşü ana paranın %15'inden az olacağı ve kredi maliyetinin %6 olduğu düşünülerek yapılmıştır. Kamu finansmanı hesaplamasında finansman maliyeti %4 olarak alınmıştır.

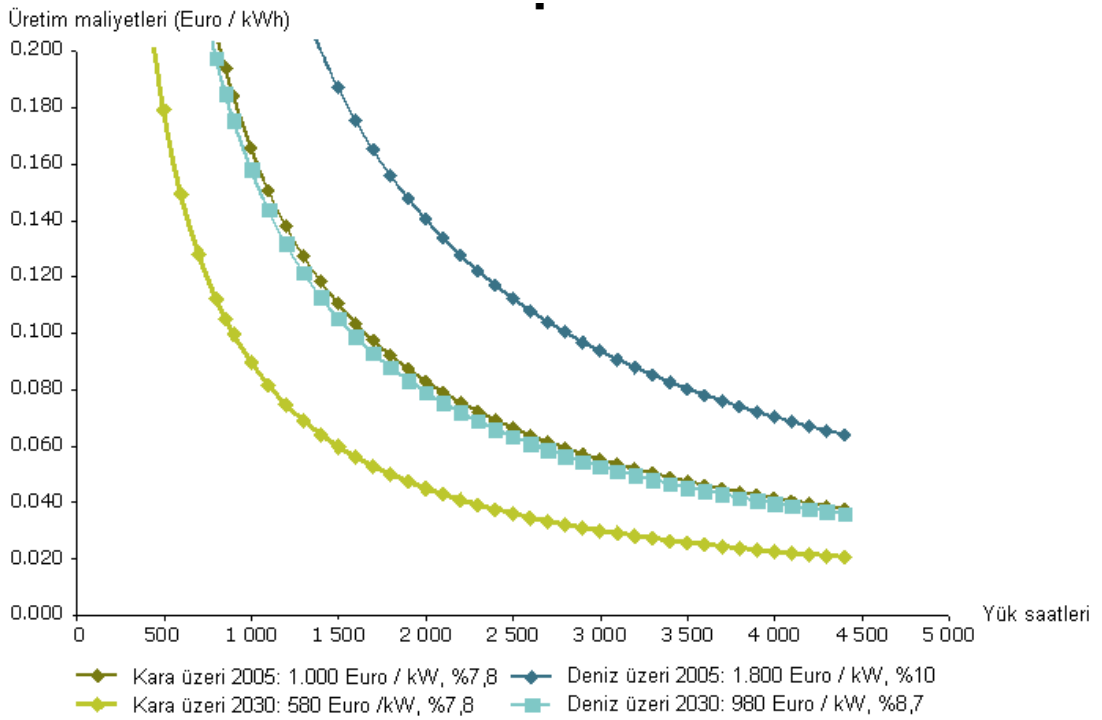
Hesaplama kullanılan deniz üzeri kurulum için maliyetler kıydan uzaklık ve deniz derinliğine göre değişebilmekte olup tabloda kıydan 10 km uzaklık ve 15 metre su derinliği temel alınmıştır. Örnek olarak kıydan uzaklık 30 km'ye, deniz derinliği 20 metre'ye çıkar ise anahtar teslim maliyetler 1.800 Euro/kW'tan 2.020 Euro/kW'a çıkmaktadır.

Şekil 7. 3 finansman maliyetinin sabit %4 olması durumunda rüzgar enerjisinden elektrik üretim masraflarını, Şekil 7. 4 ise özel sektörün finansmanı sonucunda daha yüksek finansman maliyeti olması durumundaki masrafları gösterir. 2005'deki ortalama elektrik üretim maliyetinin 5,9 eurocent/kWh olduğu göz önüne alınırsa (a07, 18), kara üzerinde kurulmuş rüzgar türbinleri 2.300 tam yük saatinde (%26 kapasite faktörü) rekabet şansı yakalamaktadır. Deniz üzeri kurulumlar için bu değer 3.700 tam yük saati (%42 kapasite faktörü) olmaktadır.

2030 yılındaki maliyetler düşünüldüğünde rekabetin mantıklı olduğu noktanın yaklaşık 1.000 tam yük saati (%11 kapasite faktörü) azaldığını görebiliriz. 2030 yılında deniz üzeri kurulumlar için üretim maliyetinin 2005 yılında kara üzerindeki kurulumlara neredeyse eşit olacağını söyleyebiliriz.



Şekil 7. 3 Sabit %4 faizli finansman ile rüzgar enerjisi maliyetleri (EEA)



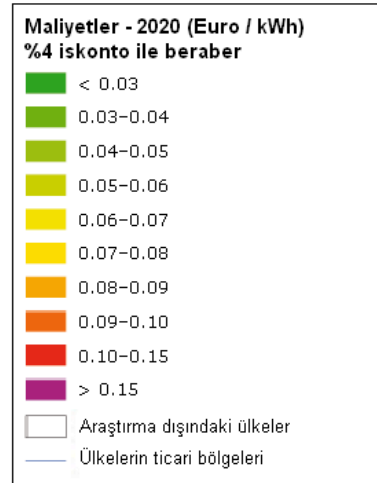
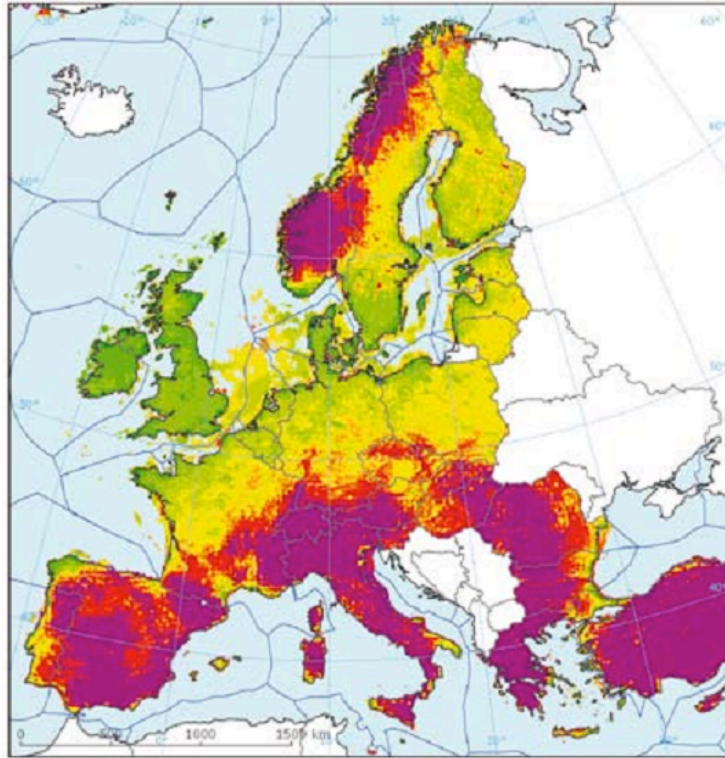
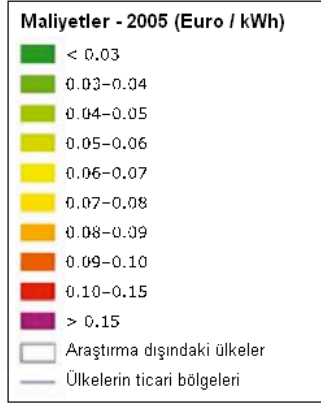
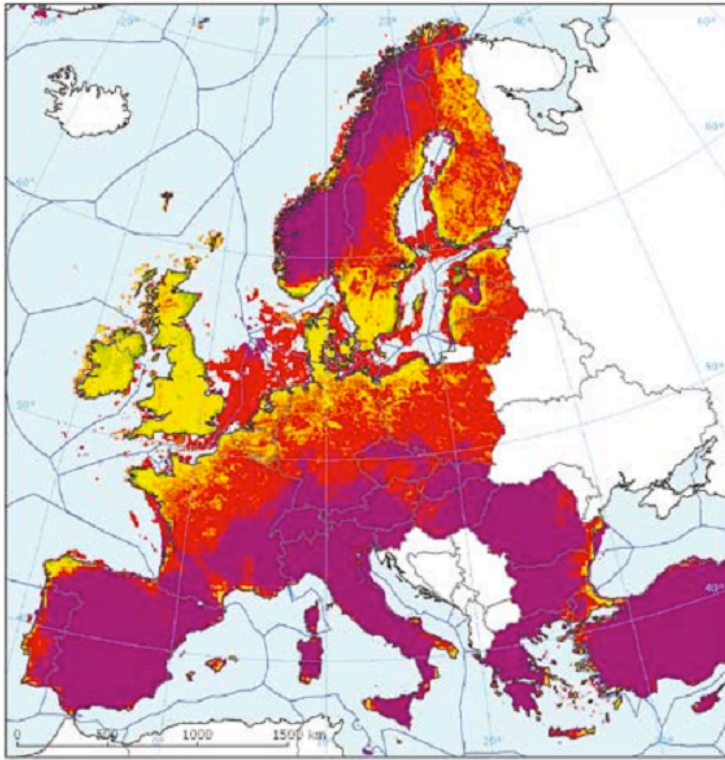
Şekil 7. 4 Özel teşebbüs kaynaklı finansman ile rüzgar enerjisi maliyetleri (EEA)

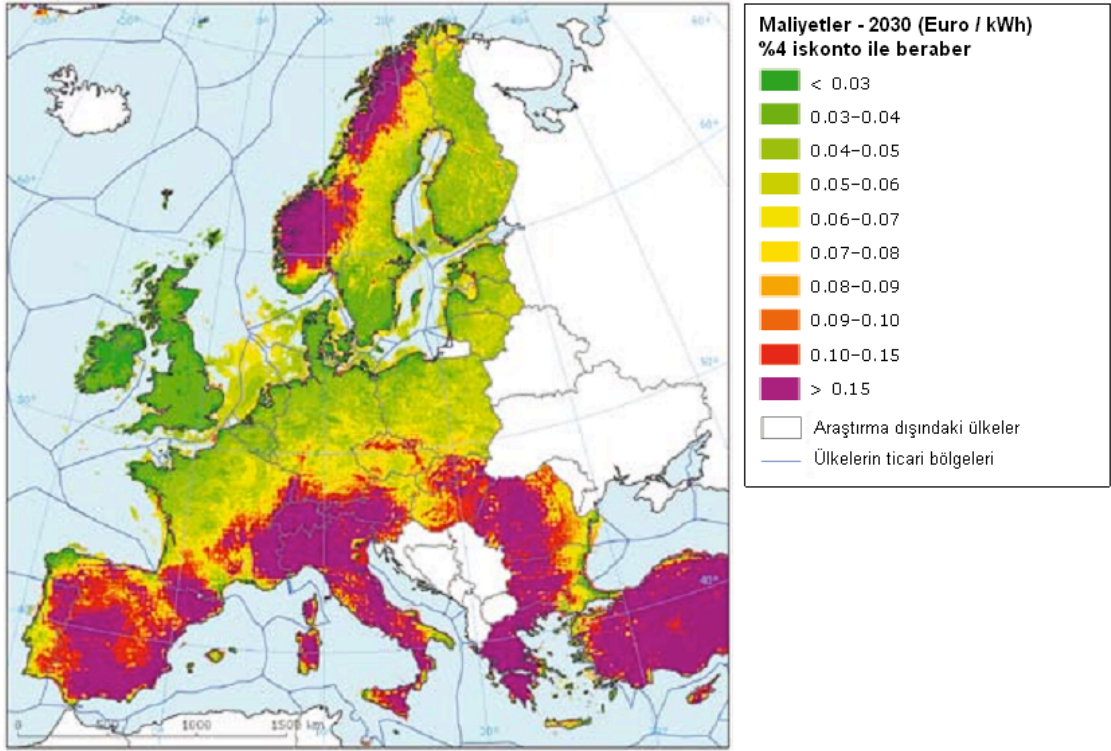
2020 ve 2030 yılındaki rekabet durumu karşılaştırmaları için Avrupa Komisyonu'nun anahat çalışması temel alınmıştır. Petrol fiyatlarındaki artışın ve karbondioksit salınım



kontrollerinin dikkate alındığı bu çalışmada ortalama elektrik üretim masrafları 2020 yılı için 6,3 eurocent/kWh ve 2030 yılı için 6,5 eurocent/kWh olarak belirlenmiştir.

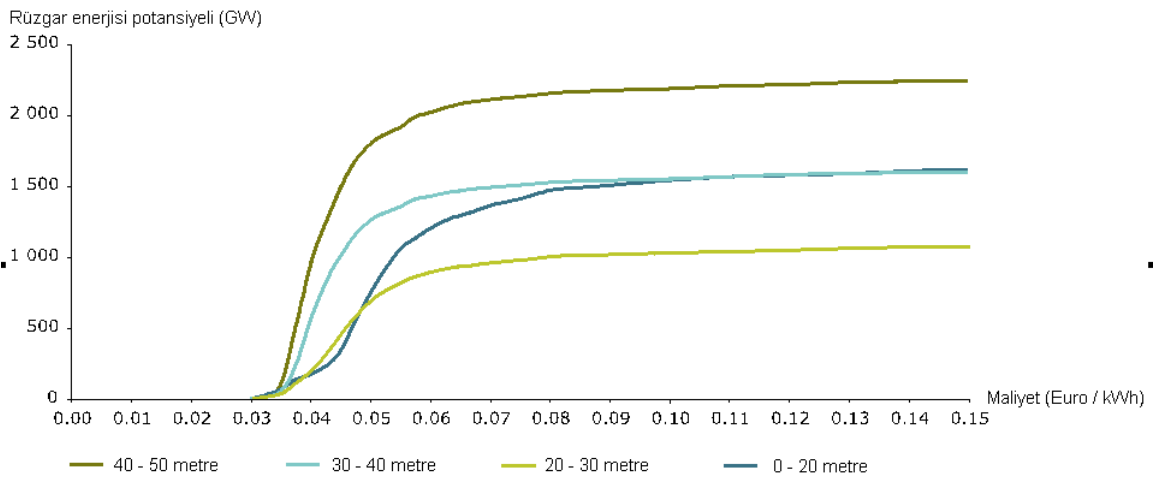
Avrupa genelinde yıl boyunca rüzgar hızları dikkate alınarak kapasite faktörünün öngörüldüğü araştırmada türbin, kurulum, bakım ve işletme maliyetleri sonucunda 2005 yılı için rüzgar enerjisinden elektrik üretimi maliyetinin 10 eurocent/kWh'dan düşük olduğu çok az yer vardır. Buna karşılık 2020 ve 2030 yılı için yapılan tahminlerde rüzgar enerjisi maliyet kalemlerinin ucuzlama miktarı hesaba katıldığı zaman büyük bir bölge için üretim maliyeti 10 eurocent/kWh'ın altına düşmektedir. Bununla beraber, rüzgar hızlarının düşük olduğu Güney Avrupa'da kWh başına üretim maliyetlerinin halen yüksek olacağı görülebilir. 2005, 2020 ve 2030 yılları için teşvik iskontosu dahil edilerek hesaplanmış rüzgar enerjisi üretim maliyetleri Şekil 7. 5'te görülebilir.





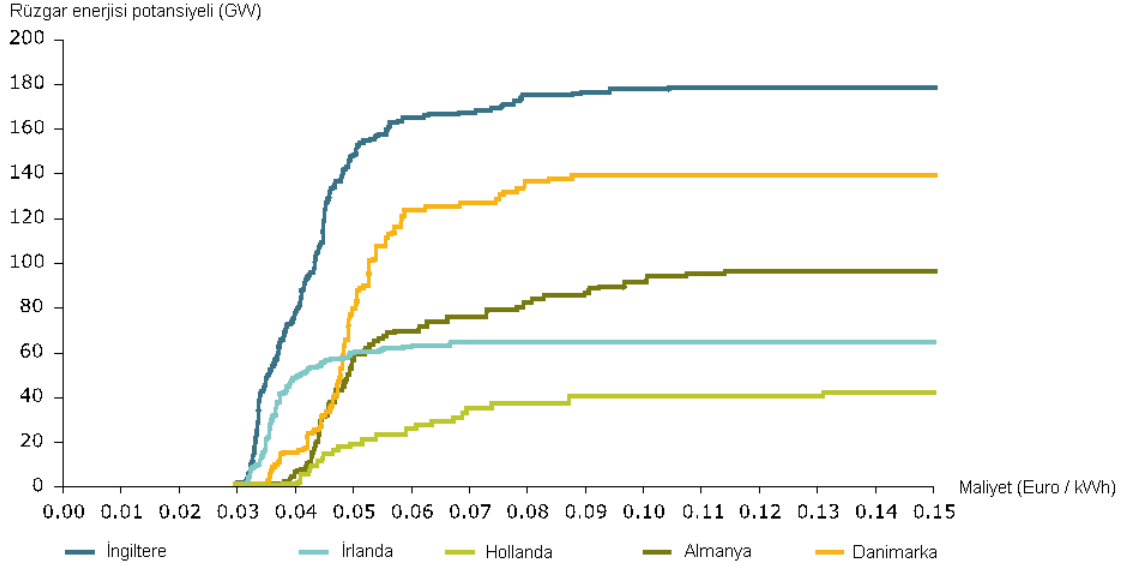
Şekil 7. 5 2005, 2020 ve 2030 yılları için üretim maliyetleri [10]

Deniz üzeri rüzgar türbini kurulumlarının enerji pazarında ne kadar rekabetçi olacağı benzer şekilde üretim maliyetinin diğer enerji kaynakları ile kıyaslanması ile öngörülebilir. EEA araştırmasında farklı su derinlikleri için artan maliyet sonucunda Avrupa genelindeki toplam deniz üzeri potansiyelin hangi kısmının ne kadar maliyet ile üretilebileceğini hesaplamıştır.



Şekil 7. 6 Deniz üstü potansiyelin derinliğe göre maliyet hesaplaması

Maliyetin az olacağı sığ sularda en büyük kurulum imkânı İngiltere ve İrlanda 'da bulunmakta olup bazı Kuzey Avrupa ülkelerinin denizlerindeki rüzgar enerjisi kapasitesinin ne kadarını hangi maliyetle kullanabileceği Şekil 7. 7'de verilmiştir.



Şekil 7. 7 Kuzey Avrupa ülkeleri için deniz üstü potansiyel kullanım maliyeti

## 7.5 Örnek Maliyet Hesaplaması

Akademik çalışma dahilinde [39] DMI rüzgar verileri kullanılarak Çanakkale bölgesi için Weibull analizi ile güç yoğunluğu ve kapasite faktörü hesaplanmış, maliyet analizi sonrasında çeşitli türbin tipleri arasında ekonomik açıdan en avantajlı olanı 2.300 kW anma gücüne sahip ve 80 metre rotor göbek yüksekliğine sahip bir model olarak hesaplanmıştır. Bu model için birim kWh enerji maliyeti ortalama 2.24 eurocent olarak hesaplanmış ve bu maliyetin fosil enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin maliyeti ile kıyaslanabilir olduğu belirtilmiştir.

Kıyaslama yapılacak kara üzerinde kurulmuş türbinin birim elektrik üretim maliyeti hesapları için ilk olarak yatırım, bakım, onarım ve finansman faizleri dikkate alınarak maliyet bugünkü değeri (MBD) bulunmuştur. MBD ve kWh başına üretim maliyeti Kısım 6.3'deki formüller yardımı ile hesaplanabilir.

Hesaplama sonucunda MBD 2.561.762 Euro, türbin fiyatı bu değerden çekilerek 1.930.007 Euro olarak bulunmuştur. Hesaplama inşaat ve bağlantı masrafları türbin maliyetinin %20'si, işletme, bakım ve onarım maliyeti yatırımın yıllık masrafının %25'i, hurda bedeli ilk yatırımın %10'u ve Euro bölgesi ekonomik koşulları dikkate alınarak enflasyon değeri %3,5 ve faiz değeri %4,5 olarak alınmıştır [38] [39]. Hesaplamalarda ölçümler sonucunda kapasite faktörü 0,28 ve kullanılabilirlik oranı 0,68 olarak hesaplanmıştır. Bunun sonucunda kWh başına üretim maliyeti 2,24 euro cent olarak bulunmuştur.

Hesaplamalar sonucu elde edilen bu maliyet aynı bölgedeki bir deniz üzeri rüzgar türbini ile kıyaslanarak maliyet açısından farklılıklar belirlenmeye çalışılacaktır. Bozcaada açıklarında kurulacak bir rüzgar tarlasını ele alalım. REPA verilerine göre bu bölgede 70 metre yükseklik için yıllık ortalama rüzgar hızı 9 m/sn, 50 metre yükseklik için güç yoğunluğu 800 W/m<sup>2</sup> ve kapasite faktörü %55 olarak belirlenmiştir.

Rüzgar gücü denklemlerinden 9 m/sn rüzgar hızı, 70 metre yükseklik ve günümüz ortalamasına yakın 100 m rotor çapı için için

$$\begin{aligned}
 P_T &= \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 7.850 \cdot 1,19 \cdot 9^3 (m^2 \cdot kg / m^3 \cdot (m / sn)^3) \\
 &= 3.404.977 W
 \end{aligned} \tag{7.4}$$

Rüzgar gücünden mekanik ve elektriksel kayıplar sonucunda faydalanabilme oranını %40 olarak alırsak anma gücü 1,4 MW olan bir rüzgar türbininin kurulabileceği görülmektedir. 10 adet 1,4 MW türbinden oluşan bir rüzgar tarlası kurulduğunu düşünelim.

Rüzgar tarlasının anma kapasitesi 14 MW olacaktır. Bu bölge için kapasite faktörü %55 olarak belirlenmiştir. Bunun sonucunda bir yıl içinde elde edilebilecek elektrik enerjisi

$$\begin{aligned}
 P_{y\u00fcl\u00fck} &= 365 \cdot 24 \cdot 14 \cdot 0,55 \\
 &= 67.452 MWh / y\u00fcl
 \end{aligned} \tag{7.5}$$

olacaktır.

Deniz üzeri kurulum için Bozcaada'dan uzaklık 0-10 km ve su derinliği 30-40 metre olarak alınırsa EEA hesaplamalarından yaklaşık anahtar teslim maliyet 2.227 Euro/kW olarak alınırsa 14 MW'lık deniz üzeri rüzgar tarlası için maliyet 31.178.000 Euro olarak görülmektedir. Yıllık bakım ve onarım gideri ise 20 yıllık türbin çalışma ömrü için 389.725 Euro olarak görülmektedir. Çalışma ömrü sonundaki hurda değeri ilk yatırım bedelinin %10'u olarak alınmıştır. Bunların sonucunda yatırımın MBD değeri 35.380.000 Euro olarak hesaplanmaktadır.

Kapasite faktörü 0,55 olarak alındığında deniz üzeri kurulum için kWh maliyeti [38]

$$kWh \text{ Maliyeti} = \frac{MBD}{P_R \cdot C_f \cdot t} \quad (7.6)$$

formülü ile hesaplandığında 4,24 eurocent olarak görülmüştür. Bu değer EEA'nın Bozcaada bölgesi için öngördüğü 0,04 – 0,05 Euro / kWh üretim bedeli ile uyumlu olup kara üzeri kurulum için karşılaştırma yapılan 2.24 euro cent/kWh değerinden hatırı sayılır ölçüde yüksektir.

Türkiye için Nisan 2012 itibarı ile uygulanan elektrik tarifelerinde [40] sanayi için kWh başına tüketim bedeli 17,306 kuruş, meskenler için 25.886 kuruş olarak belirlenmiştir. Bu değerler 7,42 ve 11,10 euro cent/kWh'a karşılık gelmektedir. Rüzgar enerjisinden elektrik elde etmenin maliyeti yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılması amaçlı teşvikler sürdüğü sürece kabul edilebilir olmakla beraber Türkiye için mevcut ekonomik ve teknik koşullarda kara üzerinde yapılacak kurulumlar deniz üzerinde yapılacak kurulumlara göre %40 seviyesinde daha ucuz birim elektrik üretim maliyetine sahip olmaktadır.

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Türbinlerdeki teknik gelişmeler, maliyetlerin düşmesi ve dünya ülkelerinin, özellikle Kuzey Avrupa'nın planları düşünüldüğünde deniz üzeri rüzgar türbinlerinin gelecekte daha yaygın kullanılacağı ve kurulu deniz üzeri rüzgar tarlası kapasitesinin hızla artacağı kesindir. Büyük bir deniz üzeri rüzgar potansiyeli olan İngiltere, Almanya, Danimarka gibi ülkeler 2020 veya 2030 yılına kadar elektrik üretimlerinin %25'e varan kısmını rüzgar enerjisinden karşılamak planlarına sahip olup bu üretimde deniz üzeri türbinler hem rüzgar çiftliği başına kurulu güç hem de toplam rüzgar enerjisinden üretim bakımından yüksek rakamlara sahip olacaklardır.

Yüzer tip deniz üzeri rüzgar türbinleri 2010'lu yıllarda en önemli teknik gelişmelerin yaşandığı türbin türü olmaktadır ve bu gelişmeler devam etmektedir, fakat maliyet açısından bakıldığında çoğu ülkenin öncelikli olarak deniz tabanına rijit biçimde sabitlenen türbinler ile elektrik enerjisine dönüştürülebilir potansiyeli değerlendireceği görülebilir.

Maliyetlerin türbin, temel desteği ve kurulum tekniklerindeki gelişmeler sonucu düşmesi ile 2020 yılında deniz üzeri rüzgar türbinleri günümüzdekinden çok daha mantıklı birer yatırım olacaklardır. Bununla beraber öngörülebilir gelecekte fosil yakıtlarla elektrik üretimi ile rekabet sağlanabilmesi için devlet teşviklerinin ve vergi indirimlerinin sürmesi gerektiği görülmektedir.

Türkiye açısından bakıldığında deniz üzeri rüzgar enerjisi tarlalarının kurulması için en uygun bölgelerin mevcut kara üzeri türbinlerin kurulmuş olduğu Bozcaada, İskenderun, Bandırma gibi bölgelerin kıyı şeritleri olduğu görülmektedir. Bu bölgelerde deniz üzerindeki rüzgar hızı ve kapasite faktörü kara üzerinde kurulmuş olan türbinlerden

daha büyük anma gücüne sahip deniz üzeri rüzgar türbinlerinin kurulmasına olanak vermektedir, fakat günümüz maliyetlerine bakıldığında deniz üzeri rüzgar türbinleri kara üzerindeki türbinler ile rekabetçi olamamaktadır. Ülkemiz denizleri Kuzey Avrupa veya Kuzey Amerika sahillerindeki kadar yüksek ortalama yıllık rüzgar hızlarına sahip olmadığı için maliyetin geri dönüşü bu ülkelerdeki deniz üzeri rüzgar tarlası yatırımları kadar çabuk olmamaktadır. Bu sebeplerle ülkemizde günümüz koşullarında rüzgar enerjisi santrallerinin öncelikle kara üzerindeki potansiyel değerlendirilecek şekilde ve mevcut elektrik üretimine destek olacak şekilde kurulması ekonomik açıdan daha mantıklıdır. Ana şebekenin elektrik üretimine destek olması bakımından ülkemizdeki güneş enerjisi potansiyelinden faydalanılması da yerinde olacaktır.

Bununla beraber, 2020 ve 2030 projeksiyonlarında görülen daha düşük kWh başına kurulum ve üretim maliyetleri ve ülkemizin 2023 yılı için yenilenebilir enerji planları göz önüne alındığında gelecekte ülkemizde deniz üzeri rüzgar tarlalarını öncelikli olarak Kuzey Ege, Bandırma ve İskenderun açıklarında görmemiz oldukça yüksek bir ihtimal olup bu bölgedeki yoğun rüzgar enerjisinden yararlanılabilmesi açısından düşen maliyetler sonucunda mantıklı birer yatırım haline gelecekleri görülebilir.



## KAYNAKLAR

---

- [1] BP, Statistical Review of World Energy 2011, [www.bp.com/statisticalreview](http://www.bp.com/statisticalreview), 28 Mayıs 2012.
- [2] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, Türkiye Elektrik Üretim – İletim İstatistikleri, [http://www.teias.gov.tr/istatistik2010/front%20page%202010-%C3%A7i%C3%A7ek%20kitap/kguc\(1-12\)/1.xls](http://www.teias.gov.tr/istatistik2010/front%20page%202010-%C3%A7i%C3%A7ek%20kitap/kguc(1-12)/1.xls), 28 Mayıs 2012.
- [3] Türkiye İstatistik Kurumu, İstatistiklerle Türkiye 2011, ISBN: 978-975-19-5134-2
- [4] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, Aylık Elektrik İstatistikleri, <http://www.teias.gov.tr/AylikElektrikIstatistikleri/AylikElektrikIstatistikleri.xls>, 28 Mayıs 2012.
- [5] U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook, <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/index.cfm>, 28 Mayıs 2012.
- [6] S. Dolan, G. Heath, (2010). "Unpublished Analysis of Offshore Wind Emissions Savings", Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- [7] Douglas, B. C., (1997). "Global Sea Rise: A Redetermination", Surveys in Geophysics, 18: 2–3.
- [8] White, N., (2011). "CSIRO Global Mean Sea Level Estimate", Commonwealth Scientific and Industrial.
- [9] U.S. Department of Energy, (2011). A National Offshore Wind Strategy: Creating an Offshore Wind Energy Industry in the United States.
- [10] EEA Technical Report, Europe's Onshore and Offshore Wind Energy Potential, ISSN 1725–2237
- [11] German Advisory Council on Global Change, (2003). World in Transition Towards Sustainable Energy Systems.
- [12] Global Wind Energy Council, Global Wind Report Annual Market Update 2011, [http://www.gwec.net/fileadmin/documents/NewsDocuments/Annual\\_report\\_2011\\_lowres.pdf](http://www.gwec.net/fileadmin/documents/NewsDocuments/Annual_report_2011_lowres.pdf), 28 Mayıs 2012.
- [13] World Wind Energy Association, World Wind Energy Report 2010.

- [14] The European Wind Energy Association, Wind Now Leads EU Power Sector, [http://www.ewea.org/index.php?id=60&no\\_cache=1&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=1441&tx\\_ttnews%5BbackPid%5D=1&cHash=fb7399a981](http://www.ewea.org/index.php?id=60&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=1441&tx_ttnews%5BbackPid%5D=1&cHash=fb7399a981), 28 Mayıs 2012.
- [15] European Wind Energy Association, (2007). Delivering Offshore Wind Power in Europe.
- [16] W. Musial et al. Large-Scale Offshore Wind Energy for the United States: Assessment of Opportunities and Barriers. CO, Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2010.
- [17] M. Schwartz et al., (2010). "Assessment of Offshore Wind Energy Resources for the United States", Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [18] European Renewable Energy Council, (2010). RE-thinking 2050.
- [19] Global Wind Energy Council, Global Wind Report Annual Market Update 2010.
- [20] Malkoç, Y., "Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Enerji Profilimizdeki Yeri", EİE İdaresi Genel Müdürlüğü.
- [21] Tavman, İ. H., "Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile Karşılanması", Türkiye 10. Enerji Kongresi.
- [22] Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, (2012). Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, [www.tureb.com.tr](http://www.tureb.com.tr), 17 Mayıs 2012.
- [23] Durak, M., (2000). Rüzgar Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye Uygulaması Akhisar Rüzgar Elektrik Santrali, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] Petersen, E.L., Troen, I., Frandsen, S ve Hedegaard K. (1981). "A Rational Method of Wind Energy Siting", Risø-R-428, 229, Risø National Laboratory, Roskilde.
- [25] Bekdemir, Ş., (2004). "Yenilenebilir Enerji Sistemleri Ders Notları", Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, İstanbul.
- [26] University of Massachusetts at Amherst; Wind Power: Capacity Factor, Intermittency, [http://www.umass.edu/windenergy/publications/published/communityWindFactSheets/RERL\\_Fact\\_Sheet\\_2a\\_Capacity\\_Factor.pdf](http://www.umass.edu/windenergy/publications/published/communityWindFactSheets/RERL_Fact_Sheet_2a_Capacity_Factor.pdf), 28 Mayıs 2012.
- [27] Nuclear Energy Institute, [http://www.nei.org/filefolder/US\\_Nuclear\\_Industry\\_Capacity\\_Factors.ppt](http://www.nei.org/filefolder/US_Nuclear_Industry_Capacity_Factors.ppt), 28 Mayıs 2012.
- [28] Hoogwijk, M., Vuuren, D. P., Vries, B. J. M. ve Turkenburg, W. C., (2007). "Exploring the impact on cost and electricity production of high penetration levels of intermittent electricity in OECD Europe and the USA, results for wind energy", Energy, 32(8).
- [29] Alberts, J., (2006). "Primer for Addressing Wind Turbine Noise", Lawrence Technological University.
- [30] van den Berg, (2003). "Effects of the Wind Profile at Night on Wind Turbine Sound", Science Shop for Physics, University of Groningen.

- [31] ENERGI E2, Environmental Impact Assessment and Monitoring Review Report 2003,  
[http://www.hornsrev.dk/Miljoeforhold/miljoerapporter/REVIEW\\_report\\_2003.pdf](http://www.hornsrev.dk/Miljoeforhold/miljoerapporter/REVIEW_report_2003.pdf), 28 Mayıs 2012.
- [32] Det Norske Veritas, Offshore Standard DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures, Ekim 2010.
- [33] Monahan, H., (2005). "The Probability Distribution of Sea Surface Wind Speeds", School of Earth and Ocean Sciences, University of Victoria.
- [34] Junginger, M., (2005). "Learning in Renewable Energy Technology Development", Utrecht University, Department of Science Technology and Society.
- [35] Papalexandrou, M. Economic analysis of offshore wind farms, Yüksek Lisans Tezi, KTH School of Energy and Environmental Technology, Stockholm.
- [36] Coulomb, L ve Neuhoff, K., (2006). "Learning Curves and Changing Product Attributes: the Case of Wind Turbines".
- [37] Neij, L. et al., "Experience Curves: A Tool for Energy Policy Programmes Assessment", Final Report Project ENG1-CT2000-001116, The European Commission within the Fifth Framework: Energy, Environment and Sustainable Development.
- [38] Bagiorgas H.S., Assimakopoulos M.N., Theoharopoulos D., Matthopoulos D. ve Mihalakakaou G.K., (2007). "Electricity Generation Using Wind Energy Conversion Systems in the Area of Western Greece", Energy Conversion and Management, 48: 1640-1655.
- [39] Akdağ, S.A., (2008). Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Ekonomik analizinde Weibull Dağılımının Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [40] TEDAŞ 2012 Yılı Elektrik Tarifeleri,  
[http://www.tedas.gov.tr/274,2012\\_Tarifeler.html](http://www.tedas.gov.tr/274,2012_Tarifeler.html), 29 Mayıs 2012.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Onur OTLU  
Doğum Tarihi ve Yeri : 04. 09. 1983, İstanbul  
Yabancı Dili : İngilizce, Fransızca ve Almanca

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lise		Adnan Menderes Anadolu Lisesi	2001

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2009 - 2012	Sİ-MA Makine Elektrik Ltd. Şti.	Makine Mühendisi
2003 – 2009	Sİ-MA Makine Elektrik Ltd. Şti.	Teknik Personel