

## Açık Deniz Rüzgâr Çiftliklerinin Malî Açıdan İncelenmesi

Emre Çokyaşar<sup>1</sup>, Serdar Beji<sup>2</sup>

emrecokyasar@gmail.com<sup>1</sup>, sbeji@itu.edu.tr<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

### ÖZET

Yaklaşık son on yıldır yaygınlığı artan açık deniz rüzgâr çiftliklerinin genel bir tanıtımı ve özellikle malî açıdan güncel bir değerlendirmesi yapılmaktadır. Karada kurulan rüzgâr çiftliklerine kıyasla teknik açıdan kurulumu daha zor ve maliyeti daha yüksek olan açık deniz rüzgâr çiftliklerinin tercih edildiği durumlar kısaca belirtilerek, yatırım ve işletme harcamaları çeşitli etkenlere bağlı olarak incelenmektedir. Ekonomik öngörülere bağlı olarak, gelecekte açık deniz rüzgâr çiftliklerin daha da yaygınlaşmaları konusu tartışılmakta ve Türkiye’de kurulabilecek bir açık deniz rüzgâr çiftliği için tahmini bir yatırım maliyet çıkarımı verilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Açık deniz rüzgâr çiftlikleri, Yatırım maliyetleri, İşletme maliyetleri.

**Makale geçmişi:** Geliş 29/08/2019 – Kabul 25/11/2019

## Financial Aspects of Offshore Wind Farms

Emre Çokyaşar<sup>1</sup>, Serdar Beji<sup>2</sup>

emrecokyasar@gmail.com<sup>1</sup>, sbeji@itu.edu.tr<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

### ABSTRACT

A technical introduction and up-to-date financial evaluation of offshore wind farms, whose popularity has been increasing within the last decade, are presented. Capital and operational expenditures of offshore wind farms are examined from different perspectives and reasons of their preference over onshore wind farms are stated as these farms are technically and financially more demanding compared to onshore wind farms. Based on foreseeable economic estimates the potential of continuing increase in installation of offshore wind farms in the future is discussed and a capital expenditures estimate for an offshore wind farm in Turkish waters is given.

**Keywords:** Offshore wind farms, Capital expenditures, Operational expenditures.

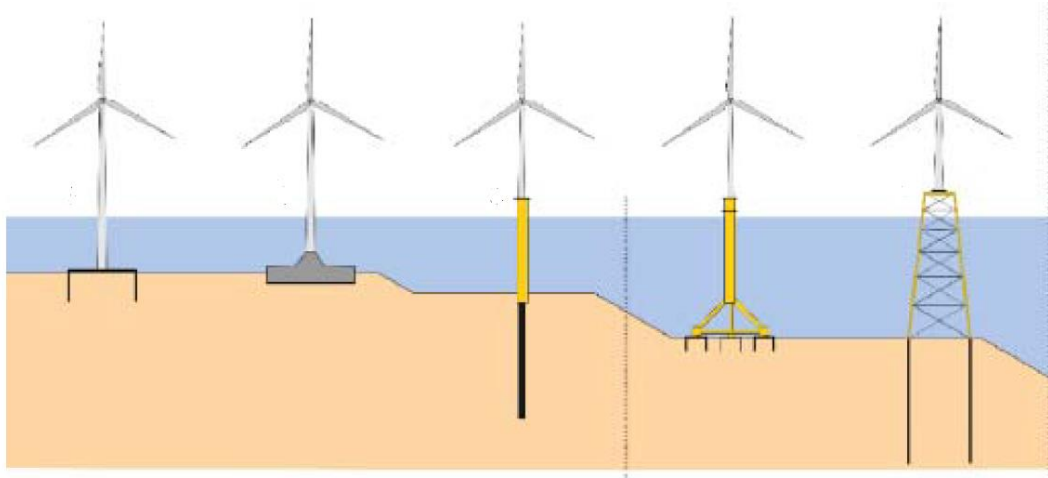
**Article history:** Received 29/08/2019 – Accepted 25/11/2019

### 1. Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri

Kıydan açıkta deniz içine kurulan rüzgâr türbinlerine genel bir tanımlama ile açık deniz rüzgâr türbinleri adı verilmektedir. Birden fazla sayıda türbin içeren grup veya gruplar şeklinde oluşturulan kurulumlar da açık deniz rüzgâr çiftlikleri olarak bilinir. Karadaki rüzgâr türbinlerine kıyasla denizde olan kurulumların tercih edilmesinin en önemli sebepleri, yerleşim bölgelerindeki yaşamı etkilememesi ve rüzgârın herhangi bir engelle karşılaşmadan ortalamada daha yüksek hızla ve türbülansın akımı bozucu etkilerinden daha az etkilenecek esmesi olarak sıralanabilir. Öte yandan, karadakilere kıyasla denizdeki rüzgâr çiftlikleri özellikle maliyet açısından dezavantajlı bir durumdadır ve bu nedenle herhangi bir açık deniz rüzgâr çiftliğinin kurulumuna karar verilirken, kârlılık hesaplamalarında kurulum ve bakım-tutum maliyetleri göz önüne alınması gereken en önemli noktadır. Ayrıca başta bölgenin rüzgâr iklimi olmak üzere, deniz ve hava canlılarının yaşam alanları, deniz yolları gibi konular mutlaka değerlendirilmelidir.

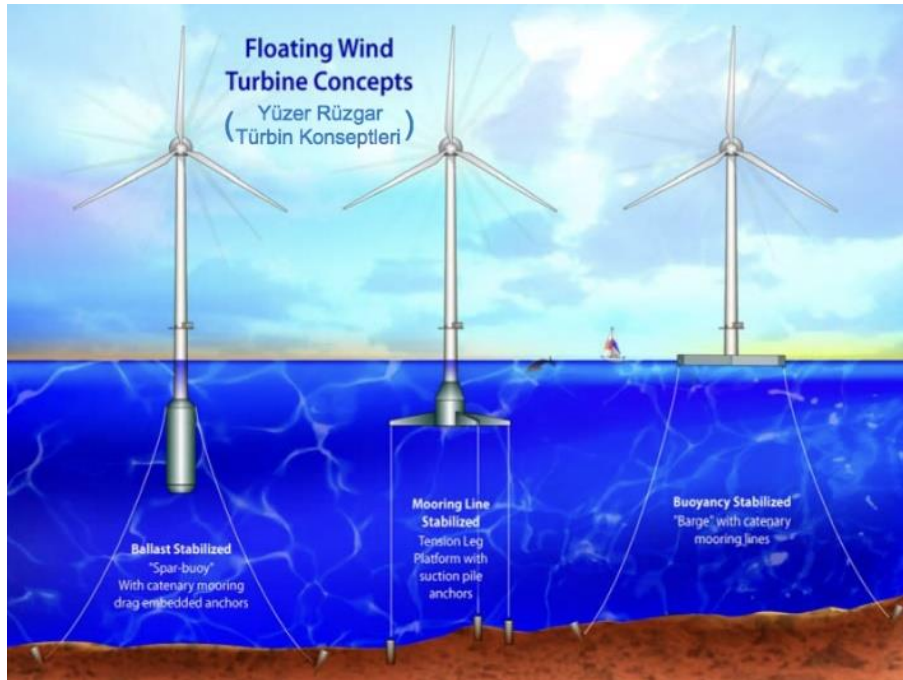
Kurulumun yapılacağı derinliğe bağlı olarak açık deniz rüzgâr türbinleri, deniz yatağına sabitlenen veya yüzer olmak üzere başlıca iki farklı tipe ayrılır. Sabit veya yüzer olsun, türbinin belirlenen konumuna yerleştirme işlemi toplam maliyetin yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır. Mevsimsel kurulma kolaylığı, zemin uygunluğu, gerekli kurulum makinaları, çevreye ilişkin hassasiyetler gibi önemli noktalar türbinin yerleştirme süre ve maliyetini belirlemektedir.

Sabit temel ile yerleştirilmiş açık deniz rüzgâr türbinlerine ilişkin örnekler Şekil 1’de gösterilmektedir. Türbin büyüklüğü, su derinliği, deniz tabanı yapısı gibi özellikler seçilecek temel tipini belirleyen önemli etkenlerdir.



Şekil 1. Zemine sabitlenen temel tiplerine örnekler (Bhattacharya, 2019).

Yüzer tip rüzgâr türbinlerinin konumlandırılmasına ilişkin örnekler ise Şekil 2’de gösterilmektedir.

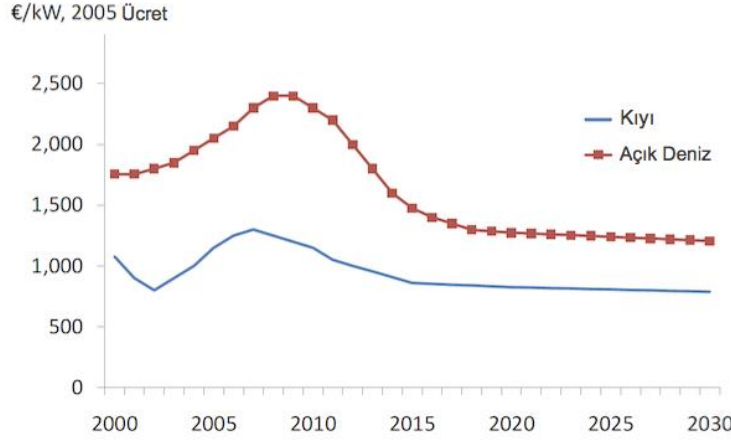


Şekil 2. Yüzer tip rüzgâr türbinlerinin sabitlenmesine ilişkin örnek tasarımlar (Butterfield ve diğ., 2005).

## 2. Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi Yatırım Maliyetleri

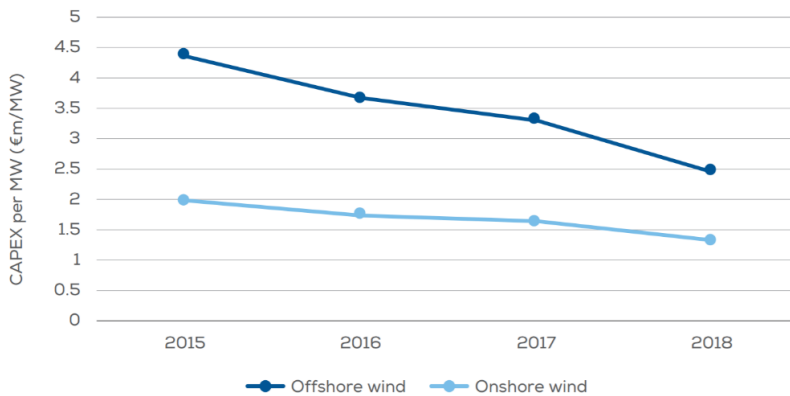
Yeni teknolojilerin çoğunda olduğu gibi kullanım yaygınlığını belirleyen en önemli etkenlerin başında maliyet gelmektedir. Açık deniz rüzgâr enerjisinin maliyeti karadaki kurulumlara kıyasla fazladır. Bu nedenle, öncelikle açık deniz rüzgâr çiftliklerinin yer seçiminde karadakilere kıyasla ortalama rüzgâr hızının daha yüksek olması beklenir. Kârlılık açısından gerekli ortalama rüzgâr hızı alt değerin 7 m/s düzeyinde olması gerektiği söylenebilir. Öte yandan günümüz türbin teknolojisindeki gelişmeler sonucunda daha büyük kapasiteli ve yüksek verimli türbinlerin üretilebiliyor olması maliyetlerin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Özellikle büyük türbinlerin kurulumuna çok daha elverişli bir ortam olan denizdeki kurulumlar için bu önemli bir avantajdır. Nitekim, açık deniz enerji çiftliklerinde

sürekli daha büyük kapasiteli türbinler kullanılmaktadır. Yalnız türbin konusunda değil diğer alanlarda da teknolojik gelişmelere bağlı olarak maliyetlerin düşmesi sonucunda daha yaygın bir şekilde açık deniz rüzgâr çiftliklerinin kurulduğu görülmektedir. WE (Wind Europe, 2019) verilerine göre açık deniz rüzgâr türbinin yatırım maliyeti 2008 yılında tepe noktası olan 2,300 €/kW iken maliyetlerin düşme eğiliminde olması nedeni ile gelecekte 1,300 €/kW düzeyinde bir seviyeye oturacağı öngörülmektedir (Şekil 3). Toplam yatırım maliyetinde en büyük payı türbin almakta ardından şebeke bağlantı ve yerine kurulum harcamaları gelmektedir.



**Şekil 3.** Rüzgâr türbini yatırım maliyetlerinin kara ve açık deniz için yıllara göre değişim öngörüsü (Wind Europe, 2019).

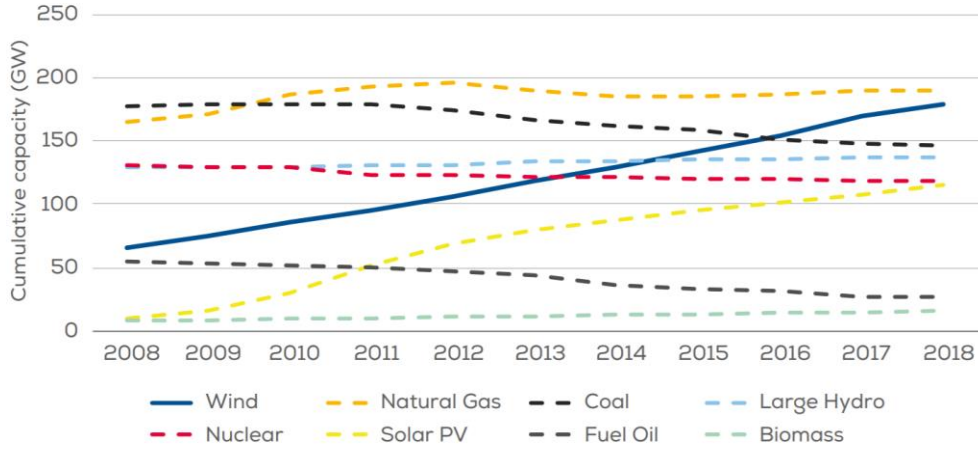
Ana yatırım maliyeti<sup>1</sup> ya da harcamaları olarak isimlendirebileceğimiz ve bir rüzgâr türbininin yaşam süresi boyunca işletme, bakım ve onarım hariç harcanan tüm masrafları içeren kısmı önemli bir yüzdeyi oluşturur. Ana yatırım maliyetleri de diğer maliyetler gibi teknolojik gelişmelere bağlı olarak düşme eğilimindedir. Wind Europe verilerine göre, 2015 yılında MW başına düşen ana yatırım harcamaları 4.5 m€ iken, 2018 yılında bu rakam 2.5 m€ seviyesine inmiştir (Şekil 4). Bu masrafların düşmesi sonucu ve türbin kapasitelerinin artmasıyla beraber rüzgâr enerjisinin kârlılık açısından yenilebilir enerji kaynakları arasındaki yeri sağlamış ve diğer enerji kaynaklarına kıyasla iyi bir seçenek olarak benimsenmeye başlamıştır. Şekil 5'te 2008-2018 yılları arası Avrupa Birliği ülkelerinin toplam elektrik üretme kapasitesinin üretim kaynaklarına göre dağılımı gösterilmektedir. Rüzgâr enerjisinden üretilen elektriğin payı diğer enerji kaynaklarına kıyasla açık bir farkla sürekli artış yönündedir.



Source: WindEurope

**Şekil 4.** Rüzgâr türbinlerinin ana yatırım maliyetinde 2015-2018 yılları arasındaki değişim (Wind Europe, 2019).

<sup>1</sup> İngilizcesi, capital expenditure veya kısaca CAPEX. <sup>2</sup> İngilizcesi, operational expenditure ya da kısaca OPEX.



**Şekil 5.** 2008-2018 yılları arası Avrupa Birliği ülkelerinin toplam elektrik üretme kapasitesinin enerji kaynaklarına göre dağılımı (Wind Europe 2019).

### 3. İşletme Giderleri

Yatırım maliyetlerinin yanı sıra açık deniz rüzgâr türbinlerinin işletme giderleri de küçümsenemeyecek bir paya sahiptir. Deniz ortamındaki bir türbinin işletme giderlerinin tipik olarak kW-saat başına toplam maliyetin %25-30'u olduğu söylenebilir. Türbin imalatçıları daha az düzenli bakım gerektiren ve daha az arıza çıkaran ürenler geliştirmek için çalışmalarını sürdürmektedir. Yeni tasarımlara uzaktan kontrol ve takip sistemleri eklenerek giderlerin düşürülmesi hedeflenmektedir. Tablo 1'de farklı kaynaklardan alınan işletme giderleri MW-saat başına Euro olarak verilmektedir.

**Tablo 1.** Farklı kaynaklara göre MW-saat başına Euro olarak işletme giderleri.

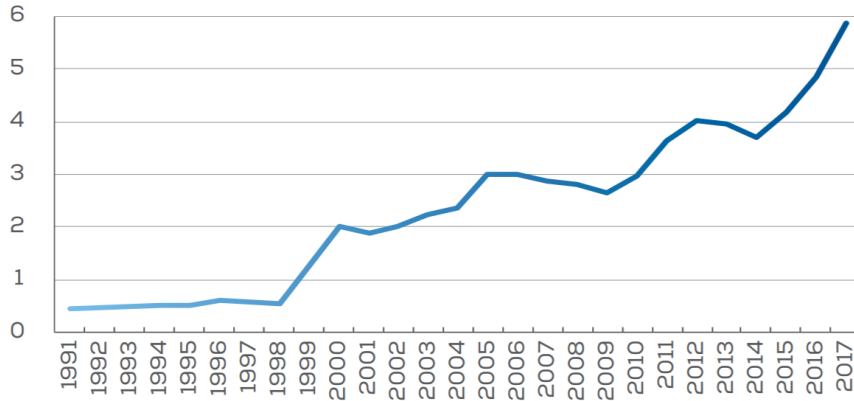
	Bakım & Onarım Maliyet (€/MWh)
Operating farms, EU, 2002-2009 (Morthorst et al., 2009)	18
Danish technology data catalogue, 2015 (DEA, 2014)	19
German Projects, 2010 (KPMG, 2010)	27
Offshore farms in Europe (IRENA, 2012)	25-49

### 4. Açık Deniz Rüzgâr Enerjisindeki Temel Ekonomik Etkenler

Yukarıda belirtildiği üzere açık deniz rüzgâr enerjisindeki toplam maliyetin iki temel unsuru ana yatırım maliyeti ve işletme giderleridir. Yakıt giderleri ya da karbon salınım maliyeti gibi kalemlerin rüzgâr enerjisi için söz konusu olmaması, açık deniz rüzgâr çiftliklerinin ekonomik açıdan değerlendirilmesini, fosil ya da nükleer yakıt kullanılan diğer enerji santrallerine kıyasla belirgin şekilde farklılaştırır. Açık deniz rüzgâr çiftliklerinin ekonomik değerlendirmesi yapılırken göz önüne alınan ana başlıklar, tasarlanan proje büyüklüğü, seçilecek konumun kıyıya olan mesafesi ve su derinliği, türbin büyüklüğü ve dayanım ömrü olarak sıralanabilir. Bu etkenler üretilen enerji maliyetini belirlemede esas unsurlar olarak projenin ana yatırım maliyetini ve izleyen işletme maliyetini doğrudan etkileyecektir.

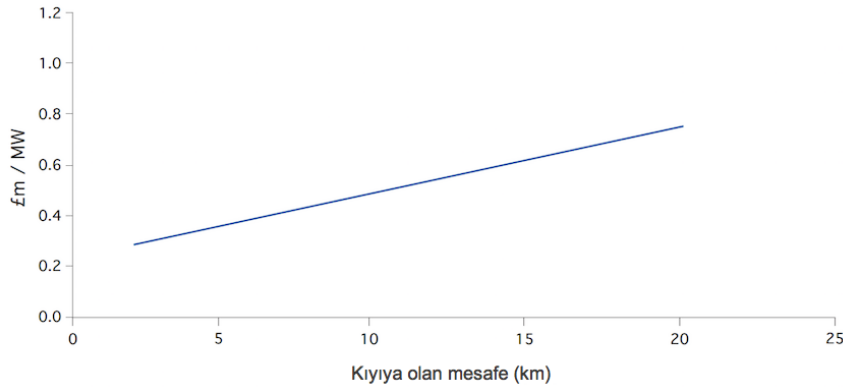
Proje büyüklüğü, ölçek ekonomisi olarak isimlendirilen kavramla ilişkilidir. Ölçek ekonomisi kısaca, üretim artarken maliyetin düşmesi olarak tanımlanabilir. Buna göre, gerçekleştirilen projelerin büyüklüğü arttıkça birim maliyeti azalmakta aynı zamanda enerji üretimi de artmaktadır. İki yönlü bir kazanım söz konusu olduğundan, proje büyüklüğü artışı ekonomik açıdan kazançlıdır. Gerçekten de

2000'li yılların başlarında 2 MW seviyesinde türbinler kullanılırken 2017 yılına gelindiğinde bu değer 6 MW düzeyine yükselmiştir (Şekil 6).



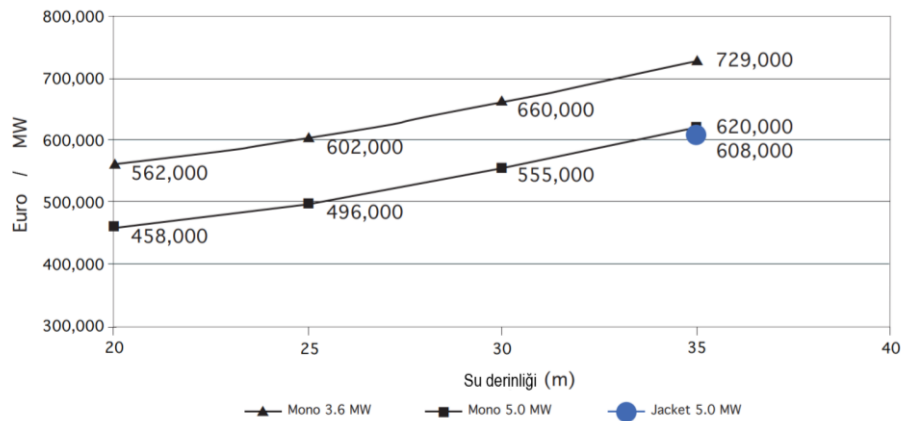
**Şekil 6.** 1991-2017 yılları arasında türbin kapasitelerindeki MW değişimi (Ramboll Offshore Wind, 2019).

Açık denizde inşa edilecek rüzgâr türbinlerinin gerek kurulum gerekse bakım onarım masraflarının karadakilere kıyasla yüksek olduğu daha önce belirtilmişti. Bu maliyetler, kurulacak çiftliğin kıydan uzaklaşmasına bağlı olarak daha da artmaktadır. Şekil 7'de kW başına m£ olarak maliyetin kıydan uzaklıkla doğru orantılı olarak arttığını göstermektedir.



**Şekil 7.** Açık deniz rüzgâr çiftliklerinin kıydan uzaklaştıkça artan maliyeti (Ramboll Offshore Wind, 2019).

Benzer olarak, su derinliği ve buna bağlı olarak seçilmesi gereken temel tipine göre sabitleme giderlerindeki artış ta Şekil 8'de görüldüğü gibi hemen hemen doğrusaldır.



**Şekil 8.** Açık deniz rüzgâr çiftliklerinin kurulduğu su derinliğine ya da temel tipine bağlı olarak artan maliyeti (Ramboll Offshore Wind, 2019).

Son olarak, rüzgârın daha az türbülanslı olması nedeniyle açık denizde kurulan türbinlerin dayanım ömürlerinin daha yüksek ve 25-30 yıl civarında olduğu belirtilmelidir.

## 5. Açık Deniz Rüzgâr Enerjisinde Güncel Durum ve Geleceğe Yönelik Kestirimler

Açık deniz rüzgâr enerjisine yönelik yeni yatırımlar son 20 yılda özellikle Avrupa'da önemli bir artış göstermiştir. Avrupa'da toplam denizde kurulu kapasite, 2000 yılında 50 MW'ın altındayken, 2008 yılı sonuna kadar yaklaşık 1500 MW'a yükselmiştir (Wind Europe, 2019). Bu yatırımlar sonucunda yıllık ortalama %50'lik bir büyüme oranı söz konusudur. Her ne kadar faal olan açık deniz sistemlerinin büyük bir kısmı sınırlı sayıda Kuzey Avrupa ülkelerinde yoğunlaşsa da, açık deniz rüzgâr santrallerine olan ilgi dünya genelinde artmaktadır. Buna karşın, açık deniz rüzgâr çiftliklerinin mevcut payı karada faaliyet gösterenlere kıyasla düşüktür. Tablo 2, Avrupa Birliği ülkelerindeki rüzgâr enerjisi kapasitelerini ve rüzgâr enerjisinin toplam elektrik tüketimindeki payına ait 2008 değerleri ve 2020 öngörülere göstermektedir. Tablo 3 ise bu öngörülere ek olarak güncel 2018 verilerini göstermektedir.

**Tablo 2.** Avrupa Birliği ülkelerinde rüzgâr enerjisi kapasiteleri ve toplam enerjideki payları ve 2020 ön görüşü (Wind Europe, 2019).

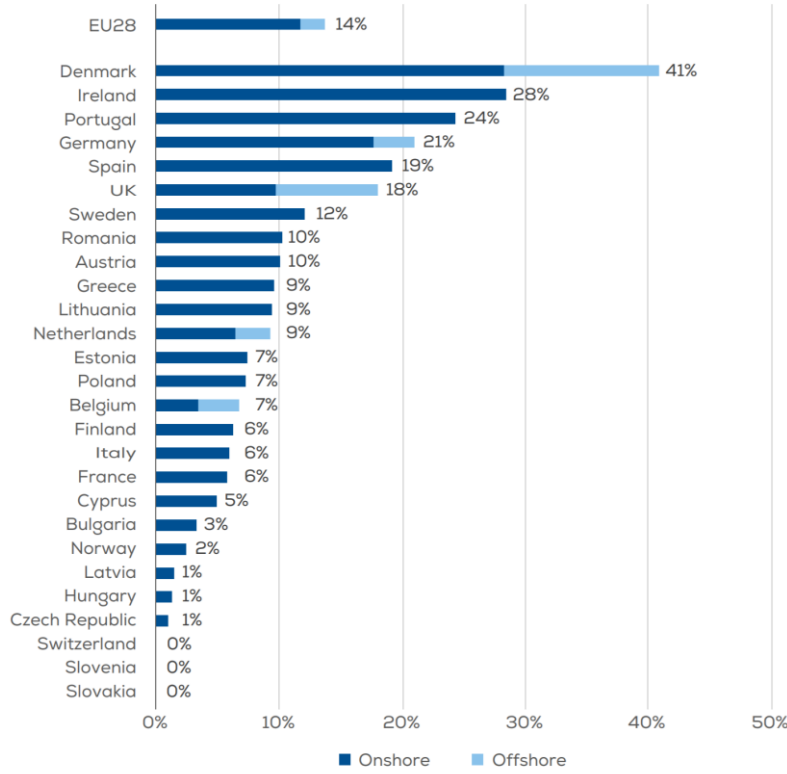
Ülke	2008 Kapasite (GW)		2020 Düşük Kapasite (GW)		2020 Yüksek Kapasite (GW)		Elektrik Tüketiminde Rüzgâr Enerjisinin Payı	
	Kıyı	Açık Deniz	Kıyı	Açık Deniz	Kıyı	Açık Deniz	2008	2020
İngiltere	2.1	0.59	13.0	13.0	14.0	20.0	2%	25%
Almanya	23.9	0.01	41.0	8.0	42.0	10.0	7%	17%
Fransa	3.4	-	19.0	4.0	20.0	6.0	2%	11%
Hollanda	2.0	0.25	5.0	4.5	5.4	6.0	4%	22%
İsveç	0.9	0.13	6.0	3.0	8.0	3.0	2%	16%
Danimarka	2.8	0.41	3.7	2.3	4.0	2.5	20%	46%
Belçika	0.4	0.03	2.1	1.8	2.5	2.0	1%	12%
İspanya	16.7	-	39.0	1.0	41.0	1.5	12%	26%
Finlandiya	0.1	0.02	1.5	0.4	2.0	1.0	0%	8%
İrlanda	1.0	0.03	5.0	1.0	6.0	1.0	9%	55%
İtalya	3.7	-	15.0	0.5	17.0	1.0	2%	9%
Polonya	0.5	-	10.0	0.5	12.0	0.5	1%	15%
Yunanistan	1.0	-	6.5	0.0	8.3	0.2	4%	29%
Estonya	0.1	-	0.5	0.0	0.5	0.1	2%	11%
Letonya	0.0	-	0.2	0.0	0.2	0.1	1%	9%
Litvanya	0.1	-	1.0	0.0	1.0	0.1	1%	13%
Diğerleri	4.3	-	21.5	0.0	26.1	-		
<b>EU-27</b>	<b>63.5</b>	<b>1.47</b>	<b>190.0</b>	<b>40.0</b>	<b>210.0</b>	<b>55.0</b>	<b>4%</b>	<b>17%</b>

Açık deniz rüzgâr çiftliklerinin gelecekteki maliyet değişimlerine ilişkin öngörülerde bulunmak kolay olmasa da genel beklenti iyimserdir. Avrupa'da açık deniz enerji maliyetlerinin 2020 yılı itibarıyla önceki dönemlere kıyasla %23 oranında azalacağı tahmin edilmektedir. Sektör bu oranı, 2023 yılına kadar %40'a kadar çekmeyi hedeflemektedir.

Maliyet azalmasında en önemli katkı, teknolojik gelişmelere paralel olarak ölçek ekonomisindeki büyüme ve tedarik zincirindeki verimliliğin artması olacaktır. Yakın gelecekte inşa edilecek olan türbin kapasitelerinin 8 MW ile 10 MW düzeyinde olacağı beklenmektedir. Ayrıca, kurulum verimliliğinin artmasıyla kurulum maliyetlerinin azalacağı öngörülmektedir (Ports, 2014). Kurulum verimliliği artışına en çarpıcı örnek, kazık tipi temel kurulumlarının genelde beş gün olan süresinin yaklaşık 12 saate düşmüş olmasıdır. Bu ve benzeri teknolojik gelişmelerin maliyet azalmasında önemli etkileri olacağı düşünülmektedir. Yatırım maliyetlerinin ötesinde bakım, onarım ve işletme giderlerindeki iyileştirmelerin önemi de yadsınamaz. Teknolojik gelişmelerin bu harcama kalemlerini de düşüreceği tahmin edilebilir.

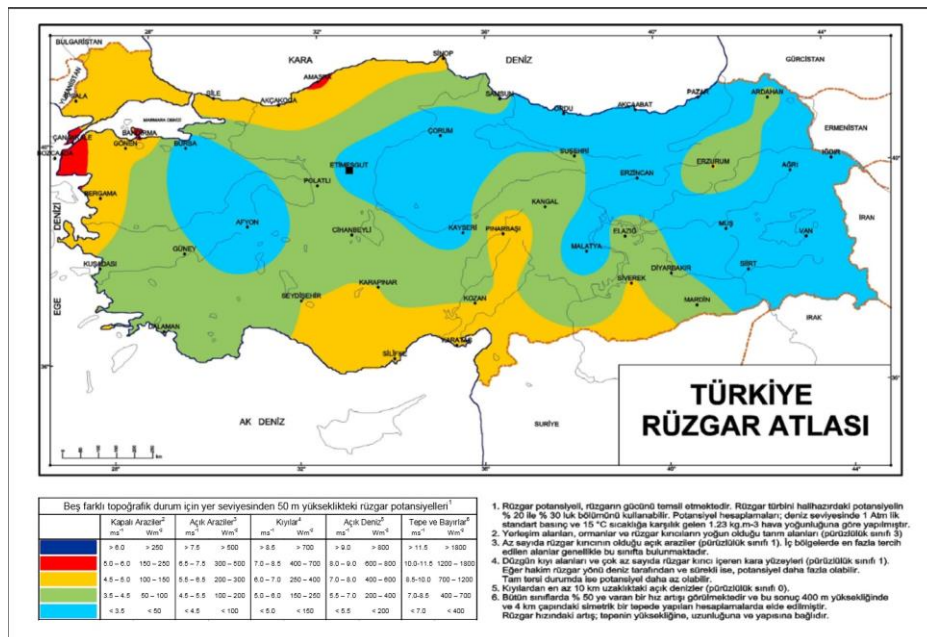


**Tablo 3.** Avrupa Birliği ülkelerinde 2018 yılı itibariyle rüzgâr enerji kapasiteleri ve toplam enerjideki payları (Wind Europe, 2019).



## 6. Türkiye’de Kurulabilecek Bir Açık Deniz Rüzgâr Çiftliği Yaklaşık Maliyeti

Kara sularımızda kurulabilecek bir rüzgâr çiftliğinin maliyeti konusunda yaklaşık bir değer belirlemeden önce kurulacak çiftliğin konumu ve bu konumun seçilme gerekçelerinin kısaca incelenmesi gerekir. Meteoroloji genel müdürlüğünün hazırladığı Türkiye rüzgâr haritasında (Şekil 9) ülkemizin yüksek rüzgâr potansiyeli olan en önemli kesimleri Gelibolu, Bozcaada, Kiyıköy, Lapseki civarlarındadır.



**Şekil 9.** Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün Türkiye rüzgâr atlası (MGM, 2010).



Rüzgâr durumu göz önüne alındığında Türkiye’de kurulacak olası bir açık deniz rüzgâr çiftliğinin tahmini ana yatırım maliyetini belirlemek için Bozcaada açıkları uygun bir konum olarak gözükmektedir. Bu seçimin diğer sebepleri arasında Bozcaada kıyılarının daha önce böyle bir yatırım için gündeme gelmesi ve bölge için rüzgâr ölçüm verileri de dâhil olmak üzere çeşitli ölçüm değerlerinin bulunmasıdır (Turhanlar, 2018). Örneğin, Bozcaada kıyılarında 1970-2016 yılları arasında 30 metre yükseklikteki rüzgâr hızı ölçümlerine göre yıllık ortalamanın 6.09 m/s ve maksimum rüzgâr hızı değerinin 31.2 m/s olduğu bilinmektedir. Ortalama 6 m/s rüzgâr hızı değeri genel itibarıyla yeterli görülen 7 m/s değerinin altında olsa da türbinleri taşıyan kazıkların deniz seviyesinden olan yükseklikleri artırılarak daha yüksek rüzgâr hızı değerlerine erişilebilir. Bozcaada civarı su derinlikleri açısından incelendiğinde, türbinlerinin kurulabileceği 15-20 m derinliğe sahip uygun bölgelerin mevcut olduğu görülmektedir ki bu da Şekil 1’de gösterilen en yaygın kullanımlı tek kazık tipinde kurulumun mümkün olduğuna işaret etmektedir.

Yaklaşık maliyet çıkarımı için Baltık Denizi’nde kurulmuş olan bir açık deniz rüzgâr çiftliği projesine ait verilerden yararlanılacaktır. Bu projenin Bozcaada açıkları için tasarlanabilecek bir proje ile en büyük benzerliği su derinliklerinden kaynaklanmaktadır ki bu da açık deniz rüzgâr çiftliklerinde maliyeti belirleyen en temel unsurdur. Öte yandan Bozcaada için bölgeye özel maliyetler, örneğin elektriksel altyapı maliyeti, proje geliştirme maliyeti, uzaktan kontrol ve gözlem maliyeti, lojistik ve ulaşım maliyetleri kesinlikle farklılık gösterecektir. Bu maliyet kalemlerindeki farklılıklara rağmen örnek alınan Baltık Denizi projesinin kabul edilebilir hata sınırları içinde bir yatırım maliyeti fikri vereceği varsayılabilir. Ortalama su derinliğinin 12-17 m aralığında kabul edildiği Baltık projesinde her biri 2.5 MW kapasitede olan 120 türbin olarak tasarlanmış toplamda 300 MW kapasitededir.

Baltık Denizi açık deniz rüzgâr çiftliğinde ortalama su derinliği yaklaşık 15 metre olup, kıyıya olan uzaklığı 30 km’dir. Su derinliğine uygun olarak türbinler zemine çakılı tekli kazıklar üzerine oturtulacağı için bunların maliyeti Bozcaada için tasarlanabilecek bir çiftlikten genel itibarıyla farklı olmayacaktır. Maliyet tablosunda da görülebileceği üzere maliyet dağılımında en büyük payı türbin maliyetleri almaktadır. Bunu izleyen maliyetler sırasıyla zemine oturtma/temel maliyeti, elektriksel altyapı maliyeti, lojistik ve proje geliştirme maliyeti olarak sıralanabilir. Toplam elektrik üretme kapasitesi 300 MW olan bu projenin toplam ana yatırım maliyetinin yaklaşık olarak 430 milyon dolar olduğu görülmektedir. Bozcaada açıklarında 120 türbinin kullanılabileceği bu denli yüksek kapasiteli bir çiftlik alan sınırlaması ve kullanım talebi gibi nedenlerle mümkün değildir dolayısıyla anlamlı olan birim kapasiteye karşı gelen yatırım maliyetidir. Toplam ana yatırım maliyetinin toplam üretim kapasitesine bölünmesiyle birim kapasite maliyeti 1,432,000 \$/MW ya da 1432 \$/kW olarak bulunur. Bu değer ifade ettiği anlam daha önce Şekil 4’te verilen birim MW için ana yatırım maliyetinin (CAPEX) karaya ve denize kurulan rüzgâr çiftlikleri için yıllara göre değişiminin verildiği grafik yardımıyla belirlenebilir. Şekil 4’ün grafiğine göre karada kurulan çiftlikler için 2018 yılı yatırım maliyeti yaklaşık 1,500,000 €/MW olarak öngörülürken denize kurulan çiftliklerde bu maliyet 2,500,000 €/MW seviyesindedir. Buna göre 1,432,000 \$/MW  $\approx$  1,300,000 €/MW maliyeti karaya kurulan çiftlikler için öngörülen değerden de düşüktür. Bunun sebebi eldeki verilerden tam olarak belirlenemese de Baltık Denizi projesinin nispeten sığ sularla gerçekleştirilmesi en önemli faktör gözükmektedir. Baltık projesi için hesaplanan 1,432,000 \$/MW birim kapasite maliyetini olabilecek en alt değer varsayarak, yine nispeten sığ bir bölgede kurulabilecek olası bir Bozcaada açık deniz rüzgâr çiftliği ana yatırım maliyetinin 1,400,000-1,500,000 \$/MW aralığında gerçekleşmesini beklemek oldukça gerçekçi bir çıkarım olacaktır.

Tablo 4’te ana yatırım maliyet kalemleri ve toplam ana yatırım maliyeti açıklamalarıyla verilmektedir.

**Tablo 4.** Baltık Denizi'nde kurulan bir açık deniz rüzgâr çiftliği yatırım maliyetleri.

	MALİYET \$US	DAĞILIM %
<b>Rüzgar Santrali</b>		
120 Rüzgar Türbini, Maksimum Güç	2.5 MW	
Rotor çapı	80 m	
Göbek Yüksekliği	70 m	
Karaya olan mesafe	approx. 30 km	
Su derinliği	12-17 m	
Göbek yüksekliğindeki ortalama hız	9.0 m/s	
<b>Rüzgar Santrali</b>		
Bir türbinin fabrika teslim fiyatı (montaj dahil)	1 950 000 \$US	
120 units	234 000 000	54.4
<b>Foundations</b> (tripod/ tekil kazık)		
Birim başına düşen üretim maliyeti	350 000 \$US	
Birim başına nakliye ve montaj maliyeti	350 000 \$US	
120 units	84 000 000	19.55
<b>Elektriksel Altyapı</b>		
Dahili güç sistemi ( 24 kV), 85 km kablo uzunluğu ( 260 \$US/m)	22 100 000	
Offshore trafo merkezi (24/110 kv), montaj dahil	18 000 000	
30 km 110 kV deniz kablosu (460 \$US/m)	13 000 000	
Karada 30 km 110 kV başüstü elektrik hattı (400 \$US/m)	12 000 000	
Karada inşa edilecek olan trafo merkezi (120 kV/ 220 kV)	6 000 000	
Total	71 000 000	16.73
<b>Kalan altyapı hizmetleri ve lojistik giderleri</b>		
Gemi, ponton gibi yapıların bakım ve onarım masrafları	5 000 000	
İşletme binası	1 000 000	
Uzaktan izleme, ölçme ve kontrol sistemleri	2 000 000	
Anemometre (70 metre uzunluğunda dört direk)	1 800 000	
Total	9 800 000	2.28
<b>Proje geliştirme</b>		
Planlama ve proje yönetimi	15 000 000	
Jeolojik, trafik kontrolü ve çevresel araştırmalar	10 000 000	
İzinler ve diğer araştırmalar	5 000 000	
Total	30 000 000	6.98
Yatırım maliyeti	429 700 000	100
Spesifik yatırım maliyeti	1432 \$US/kW	

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın verilerine göre Türkiye'nin elektrik tüketiminin 2023 yılında yaklaşık yıllık 375.8 TWh değerine ulaşması beklenmektedir. Bu enerji ihtiyacının yüzde 67.1'i kömür ve doğalgazdan sağlanmaktadır, rüzgâr enerjisinin payı ise sadece yüzde 6.6'dır. Bu veriler göz önüne alındığında gerek dünyadaki rüzgâr enerjisi kullanımına yönelim, gerekse kömür ve doğalgaz tüketiminin küresel ısınmaya olan etkisi göz önüne alındığında, Türkiye'nin elektrik üretiminde rüzgâr enerjisinin payını artırması beklenebilir. Türkiye İstatistik Kurumu'nun Ağustos 2019 verilerine göre Türkiye enerji ithalatına 3 milyar 284 milyon 697 bin dolar harcamıştır. Bozcaada açıkları için yapılan örnek yatırım maliyeti çıkarımı enerji ithalatına yapılan harcamalarla kıyaslandığında, özellikle birim maliyetin nispeten makul olması sebebiyle, oldukça kabul edilebilir düzeyde görünmektedir. Somut bir değer vermek gerekirse, 50 MW kapasiteli bir açık deniz rüzgâr çiftliğinin ana yatırım maliyeti 75 milyon dolar civarında olacaktır.

## 7. Sonuç

Fosil ve nükleer enerji kaynaklarının kullanımından kaynaklanan küresel ısınma ve sera gazı etkilerine sebep olmayan yenilenebilir enerji kaynakları gün geçtikçe daha yaygın kullanılır olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen rüzgâr enerjisi, özellikle Avrupa Birliği ülkelerinin enerji politikalarında öncelikli konumdadır. Uygulama açısından da rüzgâr enerjisi, üretim, montaj, işletme ve bakım giderleri ve verimlilik açısından yenilenebilir enerji kaynaklarına önderlik etmektedir.

Açık deniz rüzgâr enerjisi ise yüksek kapasitesi ve gelişen teknolojileri ile rüzgâr enerjisinin geleceği olma potansiyelindedir. Uluslararası rekabette, İngiltere'nin lider durumda, Almanya, Danimarka ve ABD'nin yakın takipte olduğu görülmektedir. Çin de rüzgâr enerjisini devşirme yarışında yerini almıştır. Ülkemizde de karadaki kurulumların yanı sıra denizlerimizde kurulması planlanan rüzgâr enerjisi çiftlikleri için çalışmalar başlamıştır. Bu konuda sağlanacak ilerlemelerin, ülkemizde temiz ve dışarıya bağımlı olmayan enerji üretimi açısından çok yararlı olacağı açıktır. Son olarak, ülkemizde kurulabilecek olası bir açık deniz rüzgâr çiftliği projesi için Baltık Denizi'nde bulunan bir rüzgâr çiftliğinin yatırım maliyeti örnek alınarak tahmini bir maliyet çıkarımı yapılmıştır. Bu tahmini maliyet değeri göstermektedir ki Türkiye'nin enerji ithalatına yaptığı harcamalar göz önüne alındığında, Türkiye'de kurulacak açık deniz rüzgâr çiftlikleri kabul edilebilir bir seçenek olmaktadır.

## 8. Referanslar

Bhattacharya, S. 2019. Design of Foundations for Offshore Turbines. Wiley, pp. 377.

Butterfield, S., Jonkman, J., & Sclavounos, P. P. 2005. Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines. In *The 2005 Copenhagen Offshore Wind Conference*.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2014.02.003>

Hau, E. 2005 Betz's elementary Momentum Theory. In *Wind turbines* (pp. 747–749).

Ports, P. 2014. *Offshore Wind Project Cost Outlook 2014 Edition*.  
[http://www.cleanenergypipeline.com/Resources/CE/ResearchReports/Offshore Wind Project Cost Outlook.pdf](http://www.cleanenergypipeline.com/Resources/CE/ResearchReports/Offshore%20Wind%20Project%20Cost%20Outlook.pdf)

Ramboll Offshore Wind 2019. <https://ramboll.com/services-and-sectors/energy/wind-energy>

Turhanlar, O. 2018. A potential offshore wind farm arrangement off the Bozcaada Shores. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, Açık Deniz Yapıları Mühendisliği Yüksek Lisans Programı.

Türkiye Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>

Türkiye İstatistik Kurumu. [http://www.tuik.gov.tr/VeriTabanlari.do?vt\\_id=28&ust\\_id=null](http://www.tuik.gov.tr/VeriTabanlari.do?vt_id=28&ust_id=null)

Wind Europe (2019) <https://windeurope.org/about-us/new-identity/> Eski ismiyle EWEA (The European Wind Energy Association).