

Açık Deniz Rüzgâr Sistemleri Üzerine Bir İnceleme ve Danimarka Modeli

Mustafa Ergin ŞAHİN

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize, Türkiye

Sorumlu Yazar/Corresponding Author

E-mail: mustafaerginsahin@yahoo.com

Orcid ID: 0000-0002-5121-6173

Derleme Makalesi / Review Article

Geliş tarihi/Received: 04.12.2019

Kabul tarihi/Accepted: 13.03.2020

ÖZET

Günümüzde dünyada artan enerji ihtiyacı ve buna bağlı yeni arayışlar açık deniz (offshore) rüzgâr türbini uygulamalarını başta Avrupa olmak üzere dünya üzerinde giderek yaygınlaşan bir yenilenebilir enerji kaynağı haline getirmektedir. Bu çalışmada açık deniz rüzgâr türbinleri ve buna bağlı elektriksel ve mekanik sistemler detaylı olarak incelenmiştir. Kapsamlı bir literatür taraması yapılarak bu konuda ki, tarihsel gelişim ve özellikle Avrupa’da yapılan çalışmalar karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Avrupa’da ki kurulu rüzgâr enerjisi kapasiteleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu konuda köklü bir altyapısı ve geçmişi olan aynı zamanda fiziksel ve coğrafi yapısı da Türkiye’ye benzeyen Danimarka’da açık deniz rüzgâr türbini sistemleri incelenmiş ve bu sistemlerin potansiyeli ve uygulanabilirliği karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Türkiye’nin potansiyeli ve durumu kapsamlı olarak incelenmiş ve rüzgâr enerjisi hesaplarının nasıl yapılacağı verilmiştir. Ayrıca, bu türbinlerin kurulum ve bağlantıları ve bu konudaki diğer sorunlar da incelenmiştir. Bu çalışmada Danimarka’da bu konuda yapılan çalışmalar incelenmiş ve ülkemizde bu konudaki yapılacak çalışmalara örnek olmasını amaçlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Enerjisi, Açık deniz (offshore) rüzgâr sistemleri, Rüzgâr enerjisi hesabı, Türkiye’nin açık deniz rüzgâr durumu, Danimarka açık deniz rüzgâr sistemleri.

A Review Study on Offshore Wind Systems and the Danish Model

ABSTRACT

The increasing energy demand in the world and the related new studies make offshore wind turbine applications a preferred renewable energy source nowadays, especially in Europe. In this study, offshore wind turbines and related electrical and mechanical systems are examined in detail. A comprehensive literature review is carried out comparatively with the historical development and especially the studies in Europe. The installed wind energy capacities in Europe are given comparatively. The physical and geographical structure of Denmark is similar to Turkey for offshore wind turbine systems, which are well-established infrastructure. The history of offshore wind turbine applications and the potential and applicability of these systems are discussed comparatively in this study. Turkey's status as offshore wind potential is examined extensively, and how to make wind energy calculations are elaborated. Besides, the installation and connections of offshore wind turbines and other related issues are investigated. Examining relevant studies on this subject in Denmark, the study aims to set an example for future research on this issue in our country.

Keywords: Wind Energy, Offshore wind systems, Wind energy calculations, Turkey's offshore wind potential, The Danish offshore wind systems.

Atf için;

Şahin, M.E. (2020). Açık Deniz Rüzgâr Sistemleri Üzerine Bir İnceleme ve Danimarka Modeli, *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 54-67.

1. Giriş

Dünyada artan enerji talebi ve fosil yakıtların ömürlerinin sınırlı olması, bu kaynakların sadece belirli ülkelerde yer alması ve karbon salınımı oluşturması gibi sebeplere bağlı olarak diğer gelişmiş ülkeler enerji ihtiyaçlarını karşılamak için diğer doğal ve yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanarak farklı yöntemler ve yeni arayışlarda bulunmaya başlamışlardır. Bunlardan biri de son yirmi yılda hızlı bir artış gösteren açık deniz (offshore) rüzgâr türbinleri ve buna bağlı teknolojilerdir.

Yapılan çalışma ve uygulamalara bakıldığında özellikle Avrupa kıtasının açık deniz rüzgâr uygulamalarında başı çektiği gözükmektedir. Rüzgâr enerjisinden ilk defa 1890 yılında elektrik üreten, sınırlı alanlara sahip küçük bir ülke olmasına rağmen Danimarka 1991 yılında ilk 5 MW, 11 adet 450 kW gücünde, Vindeby adında ilk deniz üstü rüzgâr çiftliğini kurarak dünyada bir ilki gerçekleştirmiştir. Bu süreç deneme amaçlı farklı projelerle devam etmiş, 160 MW ve 165 MW güçlerindeki Horns Rev 1 ve Nysted adlı iki büyük proje 2002 ve 2003 yıllarında sırasıyla hayata geçirilmiştir. Danimarka, günümüzde 1300 MW üzerindeki kurulu gücü ile dünyada ilk üçte yer almıştır (Danish Energy Agency, 2017). Bu durum, bu alanda ki teknolojik altyapıyı da güçlendirmiş ve dünyanın en önde gelen rüzgâr türbini üreticilerinden biri olan Vestas firmasının da başarısını tetiklemiştir ve 2018 yılı itibarıyla dünyadaki deniz üstü türbinlerinin %33'ü bu firma tarafından üretilmiş ve kurulmuştur (Wind Europa, 2019). Bu konulardaki diğer çalışma ve sayısal veriler ileriki bölümlerde daha detaylı olarak ele alınacaktır. Kopenhag (Danimarka) yakınlarında bir deniz üstü rüzgâr çiftliği örneği Şekil 1'de gösterilmiştir.

Günümüzde Avrupa'da ki açık deniz rüzgâr türbinlerinin hemen hemen tamamı şebeke ile bağlantılıdır (Sun vd., 2013). Bu durum ekstra yatırım ve teknolojilere ihtiyacı beraberinde getirmekte ve birim enerji maliyetlerini de artırmaktadır. Enerjinin, denizden karaya

taşındığı teknolojiler açısından düşünüldüğünde, bazı çalışmalarda açık deniz rüzgâr türbinleri, dalga enerjisinden elde edilen enerji ile aynı kategoride yer almış ve okyanus enerjisi olarak da değerlendirilmiştir (Esteban vd., 2012).

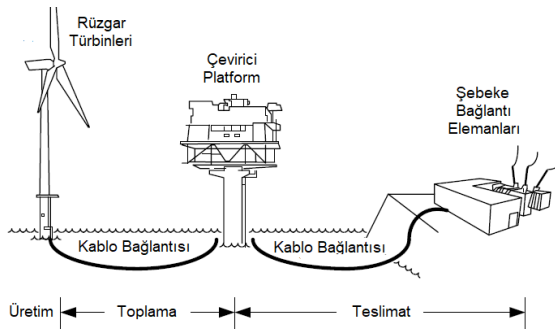


Şekil 1. Kopenhag (Danimarka) yakınlarında bir deniz üstü rüzgâr çiftliği (URL-4)
Figure 1. An offshore wind farm near Copenhagen (Denmark) (URL-4)

Günümüzde offshore rüzgâr sistemlerinde uzun mesafe iletimi, kayıpların az olması, kompanzasyon sorunları ve şebekeler arası uyum gibi nedenlerden dolayı yüksek gerilimli doğru akımlar (HVDC) kullanılmaya başlanmıştır (Torres-Olguin vd., 2012). HVDC uygulamalarında genel olarak hat komutasyonlu çeviriciler (LCC) yaygın olarak tercih edilmektedir. Açık deniz yenilenebilir uygulamaları gibi HVDC'ler de ise gerilim kaynaklı çeviriciler (VSC) en iyi çözüm seçeneği olarak gözükmektedir. Bu sistemler genel olarak kuruldukları yerde bir bara ile bir dönüştürücü sistem kullanılarak yüksek gerilimlere çıkartılır. Yüksek gerilimlere çıkartılan bu enerjiler deniz altından karaya taşınır ve burada tekrar alternatif gerilimlere dönüştürülür ve şebekeye bağlanır (Chen, 2019; Olimpa, 2014; Liu, 2019). Bir deniz üstü rüzgâr enerji sisteminin genel görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir (Daniel vd., 2014).

Üç tarafı denizlerle çevrili olan ve azımsanmayacak bir deniz üstü rüzgâr potansiyeline sahip ülkemizde diğer benzer imkânlarla sahip durumdaki Avrupa ülkeleri ile karşılaştırıldığında durum pek iç acıcı değildir.

Ülkemizin deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyelinin 11.000 MW olduğu tahmin edilmektedir. Ülkemizde bu konuda bazı girişimler olsada bu girişimlerden henüz bir sonuç alınmamıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 1.200 MW kapasiteyle kurulacak Türkiye'nin ilk deniz üstü (offshore) rüzgâr enerjisi santrali ihalesi için son başvuru tarihi 23 Ekim 2018 olarak açıklanırken mali ve teknik şartları sağlayan yerli firma başvuramaması dolayısıyla sonuç alınamamış ve ileri bir tarihe ertelenmiştir (URL-3). Bu aşamadan sonra Danimarka Enerji, İklim ve Kamu Hizmetleri Bakanlığı ile Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı arasında imzalanan anlaşma ile Türkiye'nin yakın dönemde açık deniz rüzgâr enerjisine odaklanması amaçlanmıştır (Küçükkaya, 2019). Ülkemiz kendi kaynaklarının neredeyse tamamını verimli şekilde kullanan Danimarka gibi ülkeler, buradaki yatırımcılar ve firmalar için yeni bir pazar konumundadır. Ancak bu pazar imkânları da bürokratik ve yasal düzenlemeler ve teknik altyapının yetersiz olması gibi nedenlerle uzun yıllar alacak gibi gözükmektedir.



Şekil 2. Deniz üstü rüzgâr enerji sistemi genel görüntüsü (Daniel vd., 2014)

Figure 2. General view of the offshore wind energy system (Daniel vd., 2014)

Ülkemizde bu konuda yapılan bilimsel çalışmalara bakıldığında dünyadaki ve Türkiye'de rüzgâr enerjisi, açık deniz rüzgâr enerjisi potansiyelini, yapılan yatırım ve çalışmaları karşılaştıran ve inceleyen ancak çok kapsamlı olmayan birkaç çalışmaya rastlanmaktadır (Altınok vd., 2017; Öztürk vd., 2016; Taner vd., 2014; Şenel vd., 2015).

Yapılan bir çalışmada, Türkiye'de kurulabilecek deniz üstü rüzgâr santralinin teknik ve ekonomik analizi incelenmiş Türkiye'nin deniz üstü rüzgâr analizini yapmak için 43 farklı deniz üstü gözlem istasyonuna ait rüzgâr verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Bozcaada 9,7 m/s rüzgâr hızı ile deniz üstü rüzgâr santrali kurulması için en uygun bölge olarak seçilmiş ve burası bir modelleme çalışması yapılmıştır (Yumurtacı vd., 2018). Bir başka çalışmada ise Antakya körfezi deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyeli araştırılmıştır. Bu adımlar ışığında, deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyeli en yüksek illerimizden Hatay'da bulunan Antakya körfezi için WASP (Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Programı) yazılımından yararlanılarak deniz üstü rüzgâr çiftlikleri için bir çalışma yapılmıştır. Ayrıca, seçilen bölgeye deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali kurulumu benzetimi yapılmış ve elde edilen güç doğrultusunda bir fizibilite çalışması yapılarak bölgenin deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali kurulumuna uygunluğu araştırılmıştır (Öksel vd., 2016).

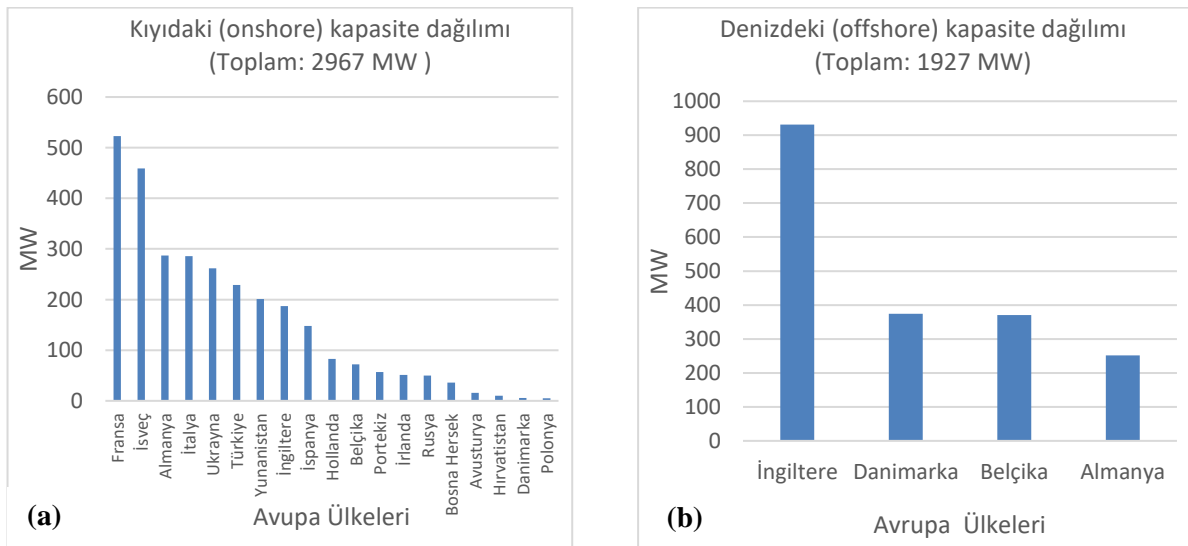
Bunun dışında bu konu ile ilgili farklı sorunları, avantaj ve dezavantajlarını inceleyen farklı çalışmalarda yapılmıştır. Bunlardan biri de yakın mesafedeki rüzgâr türbinlerinin etkileşiminden kaynaklanan ve yakınlık etkisi (wake effect) olarak da bilinen etkidir. Bu etkiyi inceleyen ve bu etkiyi azaltmaya yönelik optimizasyon çalışmaları da yapılmaktadır (Barthelmie vd., 2010; Chen vd., 2018). Yine rüzgâr türbinleri ve deniz üstü rüzgâr türbinlerinin şebeke bağlantıları ve bunlara ait yasal düzenlemeleri içeren çok sayıda yasal düzenleme ve yönetmelik yayınlamış ve yayınlamaya devam etmektedir (Liu, 2014; Ackerman, 2005). Yine çevresel ekonomik ve sosyoekonomik etkileri ve riskleri üzerine de çalışmalar yapılmakta olup bu çalışmalar Amerika'daki ulusal yenilenebilir enerji laboratuvarı (NREL) tarafından yayınlanan kapsamlı bir raporda detaylı ele alınmıştır (Chen, 2018).

Bu çalışmada açık deniz rüzgâr türbinleri hakkında genel bilgiler verilmiş olup dünyada ve ülkemizde ki durumu ve bu konuda yapılan çalışmalar kapsamlı olarak ele alınmıştır. Bu konuda ilk çalışmaların yapıldığı ve coğrafi ve fiziki koşulları ülkemize benzeyen Danimarka modeli detaylı olarak ele alınmıştır. Rüzgâr türbinlerin şebeke bağlantıları üzerinde durulmuş ve bu konu detaylı olarak incelenmiştir. Ülkemizin açık deniz rüzgâr potansiyeli ve ülkemizde bu konuda yapılan ve yapılabilecek çalışmalar ele alınmış ve Danimarka ile karşılaştırılmıştır. Bunun dışında rüzgâr türbinleri ile ilgili diğer çalışmalar, problemler ve çözüm önerileri ele alınmıştır. Rüzgâr türbinlerini çevresel ve sosyoekonomik etkilerine değinilmiştir. Bu çalışma ile ülkemizde henüz yeni olan bu kapsamlı konuda araştırmacılara bir öngörü ve yol gösterme amaçlanmıştır.

2. Genel Bilgiler

Rüzgâr enerjisinin insanlar tarafından kullanımı ve tarihsel gelişimi milattan önceki yıllara dayanmaktadır. M.Ö. 3000 yıllarında Mısırlılar tarafından deniz ulaşımında kullanılmaya

başlanmış, M.Ö. 2000 yıllarına ait ise yel değirmenlerine rastlanmıştır. İlk modern rüzgâr türbinlerine 16. yüzyıllarda Almanya’da rastlanmıştır. Elektrik amaçlı ilk rüzgâr türbinini ise 1900’lı yıllarda Amerika’da kurulmuştur. Deniz üstü rüzgâr türbinleri ile ilgili ilk teoriye 1977 yılında rastlanmıştır. Modern anlamda ilk rüzgâr türbinleri ise 1991 yılında 5 megawatt (MW) gücünde Danimarka’da kurulmuştur (Chen, 2019; URL-4). Yıllar içerisinde bunlara yenileri eklenmiştir. 2011 yılında 3.813 MW kurulu güç ile Avrupa’da kurulan deniz üstü rüzgâr çiftliği sayısı 53’e ulaşmıştır (Wilkes vd., 2012). Yıllar içerisinde bir ada ülkesi olan ve büyük bir potansiyele sahip olan İngiltere deniz üstü rüzgâr enerjisi yatırımlarını artırmış ve 2019 yılına gelindiğinde Danimarka’nın önüne geçerek Avrupa’da lider bir potansiyele ulaşmıştır. Avrupa’da 2019 yılının ilk yarısında, toplam 1.927 MW offshore rüzgâr enerjisi dâhil olmak üzere toplam 9,9 gigawatt (GW) yeni rüzgâr enerjisi kapasitesi kurulmuştur. Avrupa’da ki kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesi Şekil 3’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir (URL-1). Sayısal veriler ise Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 3. Avrupa’nın 2019 yılı için kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesi (URL-1).(a) Kıyıdaki kapasite dağılımı, (b) Denizdeki kapasite dağılımı

Figure 3. The installed wind energy capacity of Europe for 2019 (URL-1). (a) Capacity distribution on the shore, (b) Capacity distribution at sea

Tablo 1. Avrupa'nın 2019 yılı için kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesi (URL-1)
Table 1. The installed wind energy capacity of Europe for 2019 (URL-1)

Kıyıda (onshore)	MW	Denizde (offshore)	MW
Fransa	523	İngiltere	931
İsveç	459	Danimarka	374
Almanya	287	Belçika	370
İtalya	286	Almanya	252
Ukrayna	262		
Türkiye	229		
Yunanistan	201		
İngiltere	187		
İspanya	148	Toplam Kıyıda	
Hollanda	83	Kapasite	
Belçika	72	2.967 MW	
Portekiz	57		
İrlanda	51	Toplam Denizdeki	
Rusya	50	Kapasite	
Bosna Hersek	36	1.927 MW	
Avusturya	16		
Hırvatistan	10		
Danimarka	6		
Polonya	5		

Her ne kadar İngiltere bu grafikte deniz üstünde önde gözükse de Danimarka yeni projelerle bu sıralamayı değiştirme eğilimindedir. Kuzey denizinde 800 MW gücünde Thor adında Danimarka'nın en büyük deniz üstü rüzgâr çiftliği 2019 yılında ihale edilmiştir. Bu proje ile 800.000 evin elektrik ihtiyacı karşılanabilecek ve 8.000'den fazla kişiye istihdam oluşturulacaktır. Yine Baltık denizinde yapımı süren 600 MW gücündeki Vattenfall adlı projenin 2021 de şebekeye bağlanması planlanmaktadır. Enerjisinin %50 ye yakın kısmını rüzgârdan sağlayan Danimarka yeni deniz üstü rüzgâr türbinlerinin devreye girmesi ile önümüzdeki yıllarda bu oranı %60'lara çıkarmayı planlamaktadır (Chen, 2019; URL-4). Açık deniz rüzgâr enerjisi pazarı da burada dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir konudur. 2015 yılı sonunda Siemens firması rüzgâr türbinleri pazarının %63 ünü, Danimarka kökenli Vestas ise %19'unu, Senvion %8'ini, Adwen %6'sını temsil etmektedir (URL-4).

Danimarka'nın açık deniz rüzgâr türbini yatırımlarının bu kadar fazla olmasının temel politik gerekçeleri aşağıda sunulmuştur:

-Açık deniz ve karasal alanda iyi rüzgâr potansiyeline sahip olması

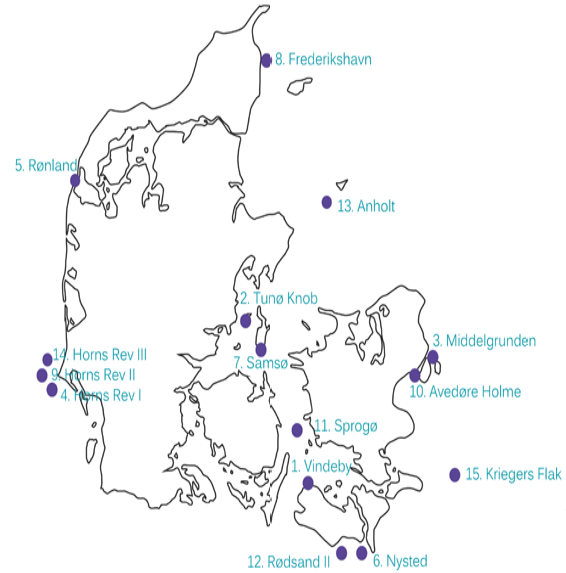
-Rüzgâr türbini dağılımının getirdiği avantajlar

-Önemli bir istihdam oluşturması ve rüzgâr türbini bileşenlerinin ihracata sağladığı katkı

-Danimarka'nın karasal alandaki rüzgâr çiftliği alanlarının az olması ve nispeten nüfusun buralarda yoğun olması

-Danimarka'nın 7300 km bir kıyı şeridinde sahip olması ve sığ sulardan oluşması.

Danimarka'daki mevcut açık deniz rüzgâr çiftlikleri ve projeleri kuruluş sıralamasına göre Şekil 4'de verilmiştir. Haritadan görüldüğü üzere rüzgâr çiftlikleri ülkenin tüm kıyılarına dağılmış ve genelde kıyıya yakın sığ sularda kurulmuştur.



Şekil 4. Danimarka'da mevcut açık deniz rüzgâr çiftlikleri (Danish Energy Agency, 2017)
Figure 4. Current offshore wind farms in Denmark (Danish Energy Agency, 2017)

Danimarka, 43.000 km²'lik yüz ölçümü ve yaklaşık 5,5 milyon nüfusu ile ülkemize ve diğer çoğu Avrupa ülkesine göre rüzgâr enerjisi

ve özelliklede açık deniz rüzgâr türbinleri ve çiftlikleri alanında çok ciddi başarılar elde etmiştir. Bunun altında Danimarka'da 100.000 den fazla kişinin bireysel yatırımlarını rüzgâr enerjisi sektörüne yapmasının büyük rolü vardır. Rüzgâr endüstrisi Danimarka'da ve Danimarka dışında ciddi bir istihdam oluşturmuş ve üretilen enerjinin tüketimdeki payı da her geçen gün artmaktadır (Öztürk, 2006).

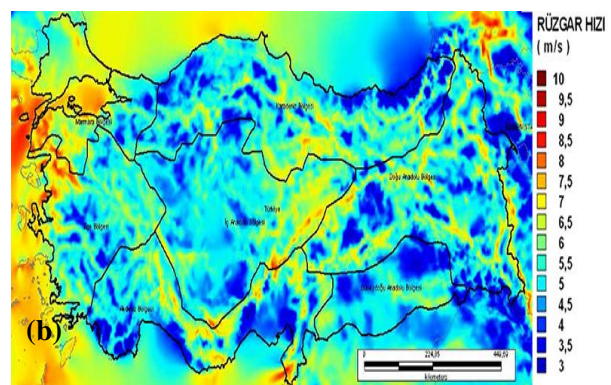
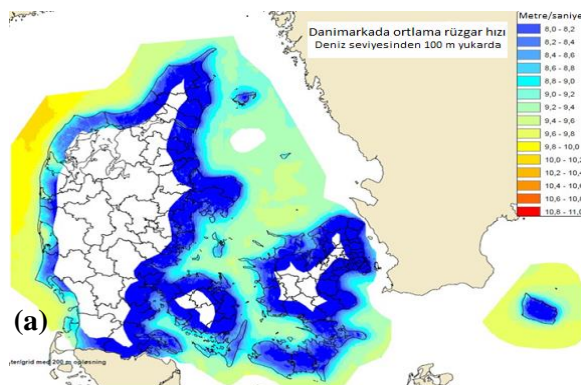
2.1. Rüzgâr Enerjisi Hesabı

Rüzgâr enerjisi genel olarak Eşitlik 1 ve 2 de verilen ifadeler kullanılarak hesaplanır. Burada havanın yoğunluğu (ρ) olup standart olarak $1,225 \text{ kg/m}^3$, rüzgâr türbini kanadının süpürdüğü alan ($A_D \text{ (m}^2\text{)})$ ve rüzgâr hızı $V \text{ (m/s)}$ 'dir. Bu eşitlik kinetik enerji denkleminde türetilmektedir.

$$P_{\text{rüzgar}} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho A_D V^3 \quad (1)$$

Buradaki bilinen bir rüzgâr hızı için belirli bir yükseklikte rüzgâr hızı Eşitlik 2'ye göre hesaplanır. Buradaki α katsayısı pürüzlülük katsayısı olup kara deniz ve ormanlık alanlar için farklılık göstermektedir. Deniz yüzeyinde bu katsayı 0,1 iken yerleşim yerlerinde 0,4'e kadar çıkmaktadır (Şahin vd., 2017). Buradan deniz yüzeyindeki rüzgâr enerjisi potansiyelinin çok daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

$$V_T = V_R \left(\frac{h_T}{h_R} \right)^\alpha \quad (2)$$



Şekil 5. (a) Danimarka ve (b) Türkiye rüzgâr haritaları (Danish Energy Agency, 2017; URL-6, 2018)
Figure 5. (a) Denmark and (b) Turkey wind maps (Danish Energy Agency, 2017; URL-6)

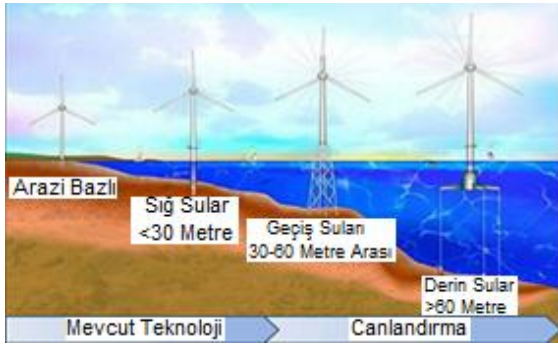
Yine, görüleceği üzere rüzgâr enerjisi üretiminde en önemli parametre yeterli rüzgâr hızının sağlanmasıdır. Bir rüzgâr türbinin verimli çalışabilmesi için ortalama rüzgâr hızının 7 m/s 'nin üstünde olması kabul edilmektedir. Danimarka için 100 metre yükseklikteki deniz seviyesindeki ortalama rüzgâr hızı atlası Şekil 5(a)'da ve Türkiye için 50 metre yükseklikteki rüzgâr hızı atlası karşılaştırma amaçlı olarak Şekil 5(b)'de verilmiştir. Türkiye rüzgâr enerjisi atlasına bakıldığında yer yer Danimarka'dan daha çok rüzgâr alan yerlere rastlanmaktadır. Türkiye için haritadaki veriler daha ayrıntılı olarak Tablo 2'de verilmiştir (Danish Energy Agency, 2017; Şenel, 2015; URL-6).

Haritalar ve tablolar incelendiğinde ülkemizin azımsanmayacak ciddi bir rüzgâr potansiyeli ve açık deniz rüzgâr potansiyeli olduğu açıktır. Öyle ki bu potansiyel şu an Avrupa'da kurulu tüm açık deniz santrallerden daha fazla güç üretebilecek bir kapasitededir. Rüzgâr türbinlerinin deniz seviyesinden yüksekliği kadar deniz altındaki yere olan mesafede kurulum için oldukça önemlidir. Genel olarak derinliği 50-60 m'nin altında olan sığ sular kurlumu daha kolay olduğu için tercih edilir (URL-4). Şekil 6'da görüldüğü gibi yere sabitlenmiş özellikle rüzgâr türbinleri varken yüzen rüzgâr türbinleri de bulunmaktadır.

Tablo 2. Türkiye'nin 50 metre yüksekte ki kara ve deniz potansiyeli (Şenel, 2015; URL-6)
Table 2. Turkey's 50 meters high potential of land and sea (Şenel, 2015; URL-6)

Ortalama yıllık rüzgâr hızı (m/s)	Toplam kara potansiyeli (MW)	Toplam deniz potansiyeli (MW)
6,5-7,0	83906,96	6929,92
7,0-7,5	29259,36	5133,20
7,5-8,0	12994,32	3444,80
8,0-9,0	5399,92	1742,56
>9,0	195,84	142,72
Toplam	131756,40	17393,20

Su altı yapılarına göre tek direkli (monopole) yapılar, üçayaklı ve ceket tipinde olabilmektedir. Yerçekimi tabanlı ve dubalar üzerine kurulan türlerde vardır. Tek direkli olanlar 30 metre altındaki sığ sularda tercih edilirler. Yerçekimi tabanlı olanlar 80 metre derinliğe kadar inebilmektedir. Dubalar üzerine kurulanlar yüzen özellikte olup derinlikleri 80 metreye kadar çıkabilmektedir. Deniz üstünde daha az etkilenmeden ayakta kalabilen dikey eksenli rüzgâr türbinleri de mevcuttur. Genelde yüksek güçler için tercih edilirler (URL-4).



Şekil 6. Derinliklerine göre rüzgâr türbini direkleri (URL-4)

Figure 6. Wind turbine poles according to their depth (URL-4)

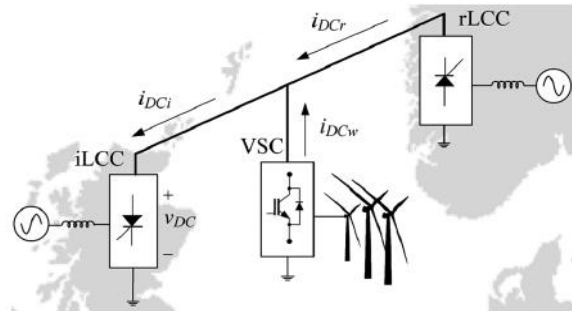
2.2. Şebeke Bağlantıları

Açık deniz rüzgâr çiftlikleri için yüksek güç kapasitesi ve uzun iletim hattı ihtiyacı vardır. Şarj akımının miktarı mesafe ile artar HVAC kablodan kaynaklanan aktif güç iletim kapasitesi düşer ve ilave kayıplar oluşur. Sonuç olarak hattın her iki yanı reaktif güç kompozisyonuna ihtiyaç duyar ve kablo boyunca yerleştirilecek kompanzasyon üniteleri

çok ekonomik değildir. Yine kara kısmında her zaman yeterince güçlü bir iletim sistemi bulmak mümkün değildir. Bu yüzden HVDC diğerlerine göre pahalı bir çözüm olsa da rüzgâr çiftliğinin farklı frekanslarda çalışabilmesi, kara tarafındaki çeviricilerin bağımsız olarak reaktif güç kontrolü yapabilmesi ve bu sayede kolaylıkla şebekeye bağlanabilmesi gibi nedenlerle daha çok tercih edilmektedir (Ackermann, 2005).

Klasik HVDC çeviriciler akım kaynaklı olup, %50 reaktif kompanzasyona ihtiyaç duyarlar ve dönüşüm trafolarına sahiptirler. VSC-HVDC ise gerilim kaynaklı çeviriciler olup IGBT anahtarlar sağıtırler. Reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç duymazlar. Standart trafo kullanılmasına rağmen oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir (Olimpo 2014; Chen, 2019).

Görüldüğü gibi HVDC deniz üstü rüzgâr çiftliklerinin şebeke ile bağlantısı için iyi bir seçenektir. Kuzey denizinde İngiltere ve Norveç arasında yer alan bölgedeki bir açık deniz rüzgâr türbinine ait HVDC ve VSC uygulaması Şekil 7'de görülmektedir. HVDC gerilim kaynaklı çevirici (VSC) hat uyumlu çeviriciler (LCC) ile her iki taraftaki AC şebekeye bağlanmıştır (Torres-Olguin, 2012).



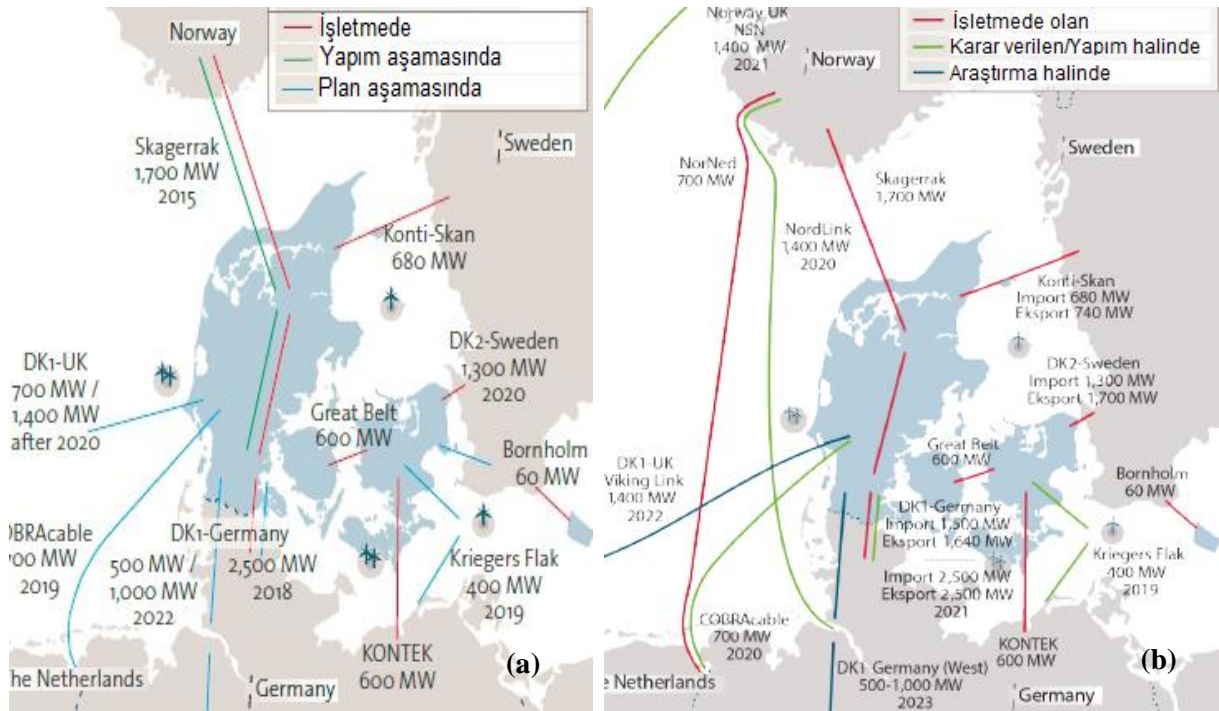
Şekil 7. Deniz üstü karma bir HVDC uygulaması (Torres-Olguin, 2012)

Figure 7. A mixed offshore HVDC application (Torres-Olguin, 2012)

Danimarka'nın elektrik şebekesi; Avrupa'ya uyumlu olan kısmı batı Danimarka (DK₁) ve diğer İskandinav ülkelerine uyumlu olan kısmı doğu Danimarka (DK₂) olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Bu şebeke bir geçiş noktasında olması nedeniyle çok farklı özelliklere sahip

karmaşık bir sistemdir. Şekil 8 (a) da uluslararası bağlantılar ve (b) de ise enerji değişim kapasiteleri gösterilmiştir. Burada kırmızı ile gösterilenler mevcut hatları, yeşiller yapım aşamasında olanları, maviler ise henüz araştırma aşamasında olanları göstermektedir. İlk şekilde şebekenin uluslararası bağlantıları gözükmektedir. Danimarka şebeke sistemi altı hatla diğer ülkelerin sistemlerine bağlanmıştır. Bu hatlardan İsveç, Norveç ve Almanya ile olanlar Energinet adlı kuruluş tarafından

düzenlenmektedir. Hollanda ile COBRA adında bir bağlantı İngiltere ile Viking adında bağlantı yapım aşamasındadır (Ruszel, 2016, Danish Energy Agency, 2019;). Ülkeler arasında bu kadar bağlantıya ihtiyaç duyulmasının sebebi şebekelerin farklı kaynaklardan beslenmesi ve burada arz ve talep enerji dengesini sağlayabilmektir. Bunun dışında sistem kararlılığı, frekans ve reaktif güç düzenlemesi ve enerji alışverişi içinde kullanılmaktadır.



Şekil 8. Danimarka elektrik şebekesi bağlantıları, (a) Uluslararası bağlantılar, (b) enerji değişim kapasiteleri (Ruszel, 2016; Danish Energy Agency, 2019)

Figure 8. Danish electricity grid connections, (a) International connections, (b) energy exchange capacities (Ruszel, 2016; Danish Energy Agency, 2019)

Bu durum bazen farklı ekonomik etkilere de yol açabilmektedir. Örneğin Almanya ve Danimarka arasındaki bu enerji bağlantısı ve alışverişi elektrik fiyatlarının diğer ülkelere göre düşük olmasına ve rüzgâr türbinlerinden üretilen fazla enerjinin de diğer ülkeler tarafından talep edilmesini ve fiyat istikrarını sağlamaktadır (Ruszel, 2016).

Danimarka'nın fiziki ve stratejik konumu ve elektrik şebeke bağlantıları incelendiğinde ülkemize oldukça benzediği gözükmektedir. Türkiye'nin konumu gereği ve sahip olduğu

kaynaklar açısından elektrik şebeke sistemleri yönünden kıtalar arasında bir geçiş noktası olması sebebiyle gelecekte bu tip bir rol üstlenmesi kaçınılmazdır.

2.3. Türkiye'nin Durumu

Teorik olarak rüzgâr enerjisi Tablo 3'de görüldüğü gibi tüm Avrupa'nın elektrik ihtiyacını sağlayabilecek düzeydedir. Avrupa'da kara ve deniz üzerindeki rüzgâr potansiyeli 2020 yılı için öngörülen elektrik talebinin %20'sinden fazlasını karşılamaya

yeteceği öngörülmektedir. Tabloda ülkemizin potansiyeline bakıldığında bu oranın çok daha yukarılara çıkabileceği gözükmektedir (Van Mijk vd., 1993; Öztürk vd., 2006).

2018 yılsonu itibariyle Türkiye'nin rüzgâr kurulu gücü yaklaşık 7000 MW değere sahiptir ve toplam elektrik üretiminin yaklaşık %6'si rüzgâr enerjisinden sağlanmaktadır (TMOBB, 2018). Ülkemizde faaliyette olan tüm rüzgâr santralleri karasal rüzgâr santralleridir. Rüzgâr enerjisinin hızla gelişmekte olan uygulamalarından bir tanesi de deniz üstü rüzgâr enerjisidir. Fakat 2019 yılı itibariyle

Türkiye'de deniz üstü rüzgâr santrali bulunmamaktadır ve bununla ilgili kesin bir proje de halen mevcut değildir.

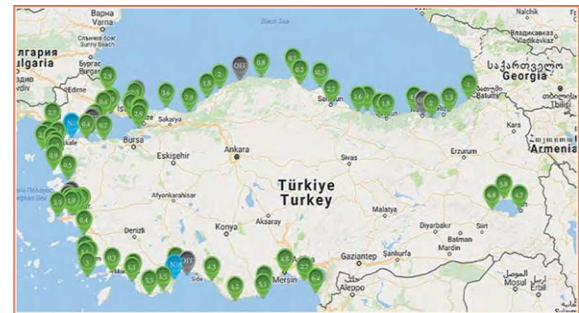
Santral kurulacak bölgenin teknik analizi sırasında rüzgâr hızı, deniz derinliği ve taban yapısı, çevresel ve sosyal faktörlerin hepsi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu konuda yapılan bir çalışmada, Türkiye'nin farklı bölgelerinde bulunan deniz üstü gözlem istasyonlarına ait rüzgâr verileri analiz edilmiş ve diğer etkenlerle birlikte değerlendirildikten sonra santral kurulumu için en uygun bölge seçilmiştir.

Tablo 3. Bazı Avrupa ülkelerinde rüzgâr için yöre ve teknik potansiyel (Van Mijk vd., 1993)

Table 3. Regional and technical potential for wind in some European countries (Van Mijk vd., 1993)

EİKT-Avrupa	Toplam Yüzölçümü 1000 km ²	Potansiyel Rüzgâr Sınıfı >3 1000 km ²	Yöre Potansiyeli km ²	Teknik Potansiyel	
				GW	TWh/yr
Danimarka	43	43	1720	14	29
Finlandiya	337	17	440	4	7
Fransa	547	216	5080	42	85
Almanya	357	39	1400	12	24
İngiltere	244	171	6840	57	114
Yunanistan	132	73	2640	22	44
İzlanda	103	103	2080	17	34
İrlanda	70	67	2680	22	44
İtalya	301	194	4160	35	69
Hollanda	41	10	400	3	7
Norveç	324	217	4560	38	76
Portekiz	92	31	880	7	15
İspanya	505	200	5160	43	86
İsveç	450	119	2440	20	41
Türkiye	781	418	9960	83	166

Türkiye'nin deniz üstü rüzgâr analizini yapmak için 43 farklı deniz üstü gözlem istasyonuna ait rüzgâr verileri Şekil 9'daki gibi Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir (URL-6). Yapılan analizlerde istasyonlara ait son bir yıldaki saatlik ortalama rüzgâr hız ve yön bilgileri kullanılmıştır. Tüm bölgelerin analizinde WASP isimli yazılımdan yararlanılarak her bölgeye ait yıllık ortalama rüzgâr hızı, hâkim rüzgâr yönü ve güç yoğunluğu parametreleri hesaplanmıştır (Yumurtacı, 2018).



Şekil 9. Türkiyedeki deniz üstü rüzgâr ölçümü otomatik gözlem istasyonları (Yumurtacı, 2018)

Figure 9. Offshore wind measurements automatic observation stations in Turkey (Yumurtacı, 2018)

Deniz üstü rüzgâr santrali kurulacak bölgenin askeri yasak bölge ve eğitim-atış sahası içerisinde bulunmaması, deniz trafiğini engellememesi ve kıta sahanlığı açısından sorun teşkil etmemesi gerekmektedir (Gasch vd., 2012). Bu faktörlere göre değerlendirme yapıldığında Akdeniz'de Alanya, Karadeniz'de Bartın, Ege Denizi'nde Enez, Gökçeada ve Bozcaada deniz üstü rüzgâr santrali kurulumu açısından uygun bölgeler olarak gözükmektedir. Türkiye'de henüz bu konu ile ilgili kanuni bir düzenleme yoktur. Üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemiz hem coğrafi açıdan hem de bu çalışmadan anlaşılacağı gibi teknik açıdan deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyeli yüksektir. Bu potansiyelden faydalanılabilmesi için gerekli düzenlemelerin yapılması şarttır.

Burada diğer bir konuda kıta sahanlığı sorunudur. Özellikle Ege bölgesi açık deniz rüzgâr türbinlerinin kolaylıkla kurulabileceği okyanuslara göre oldukça sığ sulara ve yüksek rüzgâr potansiyeline sahiptir. Ancak diğer taraftan bu durum komşu ülkeler ile kıta sahanlığı ile ilgili problemlere yol açabilecektir. Bu yüzden projeler hazırlanırken bu hususta dikkate alınmalıdır.

Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı deniz üstü rüzgâr türbinlerini gündemine almış ve bu konuda bazı ön çalışmalar yapılmış ve bir kamuoyu oluşmuştur. Bu habere göre, "enerji bakanlığından alınan bilgilere göre 20-50 metre derinlikte kurulan deniz üstü santrallerin ilk örneğinin, Türkiye'nin denizleri bu açıdan dikkate alındığında "yakın deniz" (near-shore) şeklinde gerçekleştirilmesi ağırlık kazanıyor. Daha önce deniz üstü rüzgâr santrali yapılmadığı için henüz bakir konumda bulunan Türkiye'deki denizlerin okyanus derinliğinde olmaması, maliyetleri düşürecek bir etken olarak değerlendiriliyor. Bu yıl ilkbahar aylarında ihale şartları netleşecek proje için, Ege'de özellikle Bozcaada'nın kıta sahanlığı içinde kalan bölgeler ve Gökçeada açıklarının, Çanakkale bölgesi ve Saros Körfezi ile Trakya'nın Karadeniz kıyılarının ciddi

potansiyel bulundurduğu belirtilmektedir." (URL-2).

Yine aynı habere göre; Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği (Wind Europe) Başkanı Giles Dickson şu anda Avrupa'da rüzgârdan üretilen elektriğin yüzde 13'ünün deniz üstü santrallerden sağlandığını aktarmıştır. Deniz üstü santrallerin kurulu gücü artarken maliyetlerinin de düştüğüne dikkati çeken Dickson, "Üç yıl önceki ihalelerde megawatt saat başına 150 Euro fiyat çıkarken, şimdi bu rakam 60 Euro'ya kadar indi. Yeni açık deniz rüzgâr çiftliklerinde kapasite faktörleri genellikle yüzde 50'nin üzerinde" dedi. Dickson, Türkiye'nin açık deniz rüzgâr potansiyelinin de oldukça yüksek olduğuna işaret etti (URL-2). Yine bir başka habere göre Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından sektördeki yatırım fırsatlarına yer verilen "Yatırım Rehberinden" derlenen bilgiye göre, yenilenebilir enerjide ekonomiye kazandırılmamış büyük bir potansiyel mevcut. Türkiye'nin karada yer alan rüzgâr enerjisi potansiyeli 37.000 MW iken deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyelinin ise 11.000 MW olduğu öngörülmektedir.

Bu konuda ilk adım olan Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından resmî gazetede yayınlanan ihale duyurusuna göre; 1200 megawatt kapasiteyle kurulacak Türkiye'nin ilk deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali için son başvuru tarihi 23 Ekim 2018 olarak açıklanırken, kesin tarihi daha sonra belirlenecek ihalede, katılımcılar kilowatt saat başına tavan fiyat 8 dolar/sent üzerinden açık eksiltmeyle yarışacaktı (URL-5). Ancak mali ve teknik şartları sağlayan yerli firma başvuramaması dolayısıyla sonuç alınamamış ve ihale ileri bir tarihe ertelenmiştir (URL-3). Bu aşamadan sonra bu konudaki altyapı eksikliklerini gidermek için Danimarka Enerji, İklim ve Kamu Hizmetleri Bakanlığı ile Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı arasında imzalanan anlaşma ile Türkiye'nin yakın dönemde açık deniz rüzgâr enerjisine odaklanması amaçlanmıştır (Küçükçaya, 2019).

Çok sayıda deniz üstü rüzgâr enerji santraline sahip olan İngiltere, Danimarka, Almanya, Hollanda ve İspanya gibi Avrupa ülkelerinin rüzgâr enerjisinden daha fazla yararlanmak için bu alandaki yatırımları ve araştırma geliştirme faaliyetlerini önemli ölçüde destekledikleri bilinmektedir. Bir enerji politikasının ürünü olan bu yatırımlara acil olarak ülkemizde de yön verilmesi büyük önem arz etmektedir.

2.4. Diğer Problemler

Yukarıda bahsedilen konuların dışında açık deniz rüzgâr türbinleri ile ilgili farklı sorunları avantaj ve dezavantajlarını inceleyen farklı çalışmalarda yapılmıştır. Bunlardan biride yakın mesafedeki rüzgâr türbinlerinin etkileşiminden kaynaklanan ve “wake effect” olarak da bilinen yakınlık etkisidir. Bu etkiyi inceleyen ve bu etkiyi azaltmaya yönelik optimizasyon çalışmaları da yapılmaktadır (Barthelmie vd., 2010; Chen, 2018). Bunlardan biri Danimarka’da kurulu olan Nysted ve Horns Rev santralleri incelenmiş olup buradaki rüzgâr türbinlerinde yakınlık etkisi sonucu ortaya çıkan kayıplar incelenmiştir (Barthelmie vd., 2010). Rüzgâr türbinlerinde yakınlık etkisi rüzgâr türbinlerinin birbirine çok yakın yerleştirilmesi veya art arda yerleştirilmelerinden dolayı ortaya çıkan bir sorundur. Şekil 10’da Danimarka’da Horn Rew deniz üstü rüzgâr çiftliğinde yakınlık etkisi sonucu türbinlerin arkasındaki bulutların resmi görülmektedir (Sun vd., 2012).

Bu etkiyi azaltmak ve bağlantılardan kaynaklanan diğer kayıpları azaltmak için farklı iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda kuşların toplu hareketlerinden yola çıkılarak geliştirilen parçacık optimizasyonu yöntemi yaygın olarak kullanılmıştır. Bunun dışında kullanılan farklı iyileştirme yöntemleri de vardır. Rüzgâr çiftliklerinde kablo bağlantılarından kaynaklanan kayıpları en aza indirmek içinde optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır (Küçükaya, 2019; Chen, 2019; Hou vd., 2015).



Şekil 10. Deniz üstü rüzgâr çiftliğinde Wake etkisi (Horn Rew / Danimarka) (Sun vd., 2012)
Figure 10. Wake effect on the offshore wind farm (Horn Rew / Danimarka) (Sun vd., 2012)

Şebeke ile ilgili yasal düzenlemeler (grid codes) güç sisteminin çalışma koşullarını ve kullanım koşullarını iyileştiren teknik düzenlemelerdir. Bunlar iletim sistemi operatörü, jeneratör, diğer enerji sağlayıcıları, dağıtım sistemi, şebekeye bağlı tüketicilerin uyması gereken kurallardır. Deniz üstü rüzgâr türbinlerinin şebeke bağlantılarını düzenlemek için yapılan yasal düzenleme ve yönetmeliklerde burada ele alınması gereken konudur. Bu yasal düzenlemelerin birçoğu yaşanan sorunlar, arızalar ve arz talep ilişkisine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Örneğin 2014 yılında Danimarka’daki rüzgâr türbinleri tüm talebi karşılamış ve %39 fazla vermiştir. Bu fazla enerji ise enterkonnekte şebeke üzerinden Almanya Norveç ve İsveç gibi ülkelere satılmıştır. Ancak bu gibi uç durumlar şebekede oluşturacağı olumsuz etkilerden dolayı her zaman istenmeyen durumlardır. Bu yüzden Danimarka hükümeti ve diğer benzer durumdaki ülkeler sürekli yeni düzenleme ve yönetmeliklerle bu sorunları aşmaya çalışmaktadır (Liu, 2014; Danish Energy Agency, 2019; Ackermann, 2005). Ülkemizde bu konu ile ilgili herhangi bir yasal düzenleme yoktur. Karasal rüzgâr türbinleri ve bunların şebeke bağlantıları ile ilgili yasal düzenlemelerde yavaş ilerlemektedir.

Yine açık deniz rüzgâr türbinlerinin çevresel ekonomik ve sosyoekonomik etkileri ve riskleri üzerine de çalışmalar yapılmakta olup bu çalışmalar Amerika’daki ulusal yenilenebilir

enerji laboratuvarı (NREL) tarafından yayınlanan kapsamlı bir raporda detaylı olarak ele alınmıştır (Chen, 2018). Bu raporda Avrupa'daki deniz üstü rüzgâr çiftliklerinin çevresel etkileri ile ilgili geniş ölçekli disiplinler arası çalışmalar özetlenmiş ve burada da ilk sırayı Danimarka'nın üniversite, sanayi, hükümet ve diğer işbirlikçilerin yer aldığı Danimarka görüntüleme programının aldığı gözükmektedir. Bu çalışma deniz üstü rüzgâr türbinlerinin deniz ortamı memeliler dâhil, balık, kuşlar, sosyoekonomik, gürültü emisyonları, sıcaklık seviyeleri, hayvan varlığı, genel sorunlar, elektromanyetik alanlar gibi konulardaki etkileri üzerine incelemeler yürütmektedir (Chen, 2018). Yine Almanya'da da bu konuda Danimarka'da kine benzer çalışmalar yürütülmektedir.

Bunun dışında deniz üstü rüzgâr türbinlerinde bakım ve arızaları azaltmaya yönelik çalışmalarda mevcuttur. Bunlarda biride üzerinde çalışılan türbin sargılarında süper iletken malzeme kullanarak hem kayıpları azaltmak hem de aşırı ısınmalardan meydana gelebilecek arızaların önüne geçmektir (Keysan vd., 2015; Abrahamsen vd., 2010). Ancak bu pahalı bir yöntemdir.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada genel olarak deniz üstü rüzgâr türbinleri teknolojisi ile ilgili güncel gelişmeler ve sorunlar verilmiş; çözüm önerileri üzerinde durulmuştur. Örnek bir model olarak bu konuda ilkleri gerçekleştirmiş olan Danimarka'daki türbinler ele alınmış, diğer ülkeler ve ülkemiz ile kıyaslanmıştır. Ayrıca, ülkemizin rüzgâr ve deniz üstü rüzgâr potansiyeli araştırılmış ve bu konudaki çalışmalar sunulmuştur. Deniz üstü rüzgâr türbinlerinin şebeke bağlantıları ve bu konudaki gelişmeler ve HVDC şebeke yapıları, bu konudaki yasal düzenlemeler ve gelişmeler ve yine örnek bir model olarak Danimarka'nın bağlaşımlı şebeke yapısı ele alınmıştır. Ayrıca bu konudaki diğer problemler, yapılan çalışmalar ve çözüm önerileri de sunulmuştur.

Sonuç olarak;

-Deniz üstü rüzgâr türbinleri ile ilgili ülkemizdeki bilimsel çalışmalar çok azdır.

-Bu konudaki yapılan tüm çalışmalar karşılaştırmalı olarak burada ele alınmıştır.

-Ülkemizde projeler, yatırımlar ve yasal düzenlemeler nerdeyse yok denecek kadar azdır.

-Danimarka bu konuda ülkemiz açısından bir rol model oluşturacak özelliktedir.

-Bu çalışma ülkemizdeki bu konuda çalışacak kişiler için temel bir kaynak olacaktır.

-Yine bu konuda bir kamuoyu oluşturmak için bir adım olarak faydalı olacaktır.

-Bu çalışmanın genişletilerek uluslararası dergilerde yayınlanması iyi olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, yazarın TÜBİTAK 2219 doktora sonrası araştırma programı desteği ile bulunduğu Aalborg Üniversitesi'nde (Danimarka) gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın hazırlamasında bana ilham kaynağı olan, "Introduction to Wind Energy" başlıklı seminerine katıldığım ve ders notlarını bizle paylaşan Prof. Dr. Zhe CHEN'e (University of Aalborg, Denmark) teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Abrahamsen, A.B., Mijatovic, N., Seiler, E., Zirngibl, T., Træholt, C., Norgård, P.B., Ostergaard, J. (2010). Superconducting wind turbine generators, *Superconductor Science and Technology*, 23(3), 034019 (8 s).
- Ackermann, T. (2005). Wind power in power systems, John Wiley, ISBN 0-470-85508-8, England.
- Altınok, M.T., Emeksiz, C. (2017). Dünyada ve Türkiye'de deniz üstü rüzgâr santrallerinin durumu ve genel değerlendirmesi, 2. *Uluslararası mühendislik tasarım ve mimarlık kongresi*, Mayıs 2017, Kocaeli, Türkiye.

- Barthelmie, R.J., Pryor, S.C., Frandsen, S.T., Hansen, K.S., Schepers, J.G., Rados, K., Schles, W., Neubert, A., Jensen, L.E., Neckelmann, S. (2010). Quantifying the impact of wind turbine wakes on power output at offshore wind farms, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(8), 1302-1317.
- Chen Z. (2019). Overview of wind power development, Course Presentations, Aalborg University, Denmark.
- Chen Z. (2018). Wind power plant control, Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering, John & Wiley ISBN: 9780471346081, USA.
- Daniel, J., Liu, S., Ibanez, E., Pennock, K., Reed, G., Hanes, S. (2014). National Offshore Wind Energy Grid Interconnection Study Executive Summary, US, (38s).
- Danish Energy Agency, (2019). Security of electricity supply in Denmark, 1st edition 2015-translated 2016, Denmark.
- Esteban, M., Leary, D. (2012). Current developments and future prospects of offshore wind and ocean energy, *Applied Energy*, 90(1), 128-136.
- Gasch, R., Twele, J. (2012). Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation, Springer, ISBN: 978-3-642-22938-1, Berlin, Germany.
- Hou, P., Hu, W., Chen, Z. (2015). Offshore wind farm electrical system layout optimization using dynamic minimum spinning tree algorithm, *In 50th IEEE International Universities Power Engineering Conference*, September 2015, Stafford, UK.
- Keysan, O., Mueller, M. (2015). A modular and cost-effective superconducting generator design for offshore wind turbines, *Superconductor Science and Technology*, 28(3), 034004.
- Danish Energy Agency, (2017). Danish Experiences from Offshore Wind Development, Denmark, (35)
- Küçükaya, E. (2019). Türkiye Danimarka ile İşbirliği Yaparak Deniz Üstü RES Projelerine Başlıyor!, Enerji Portalı.
- Liu, D. (2019). Transmission system for offshore wind farms, Course Presentation, Aalborg University.
- Liu, H. (2014). Grid Integration of Offshore Wind Farms via VSC-HVDC – Dynamic Stability Study, Ph. D. Thesis, Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark.
- Olimpo, A.L., David, C.G., Edgar, M.G., Grain, A. (2014). Offshore Wind Energy Generation: Control, Protection, and Integration to Electrical Systems, First Edition, John Wiley&Sons, ISBN: 978-1-118-53962-0, US.
- Öksel, C., Koç, A., Koç, Y., Yağlı, H. (2016). Antakya körfezi deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyel araştırılması, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(1), 18-29, DOI: 10.15317/Scitech.2016116092.
- Öztürk, İ., Çelik, A. (2006). Dünya’da ve Türkiye’de rüzgâr enerjisi kullanım durumu ve geleceğe yönelik beklentiler, *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 37(2), 267-274.
- Ruszel, M. (2016). The political importance of energy cooperation between Germany and Denmark on the European Union energy market, *In E3S Web of Conferences* (Vol. 10, p. 00135). EDP Sciences.
- Sun, X., Huang, D., Wu, G. (2012). The current state of offshore wind energy technology development, *Energy*, 41(1), 298-312.
- Şahin, M.E., Okumuş, H.İ. (2017). The Design Steps of a Hybrid Energy System, *Acta Physica Polonica A.*, 132(3), 1160-1164.
- Şenel, M.C., Koç, E. (2015). Dünyada ve Türkiye’de rüzgâr enerjisi durumu-genel değerlendirme, *Engineer & The Machinery*, Magazine, 663.
- Taner, A.C., Odaş, F.M. (2014). İngiltere Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) Kökenli Açık Deniz (Offshore) ve Kıyılarına Yakın Kara Rüzgâr Elektrik Santrali (RES) Çiftlikleri (Onshore Wind Farms) Güç Üretimleri Profili, FMO Yayınları, Faydalı Bilgiler.
- TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası (2018). Yıllık Enerji Raporu, Ankara, Türkiye. MMO/691.
- Torres-Olguin, R.E., Molinas, M., Undeland, T. (2012). Offshore wind farm grid integration by VSC technology with LCC-based HVDC transmission, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3(4), 899-907.
- URL-1, (2019). <https://windeurope.org/about-wind/statistics/>, 1 Eylül 2019.

- URL-2, (2018). <https://www.sabah.com.tr/ekonomi/2018/02/26/deniz-ustu-ruzgr-enerjisi-icin-ege-onde>, 1.09.2019.
- URL-3, (2019). <https://www.yesilhaber.net/2019/04/02/offshore-ruzgar-enerjisinde-danimarka-tecrubesi/>, 1.09.2019.
- URL-4, (2019). https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power 06, 6.08.2019.
- URL-5, (2018). <http://www.hurriyet.com.tr/ekonomi/deniz-ustu-ruzgar-santrali-ihalesi-icin-son-basvuru-tarihi-belli-oldu-40873323>, 6.08.2019.
- URL-6, (2019), www.mgm.gov.tr, 1.10.2018.
- URL-7, (2015). https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2015/integration-variablen-erneuerbarer-energien-daenemark/06a_Broenmo_Presentation_24092015.pdf, 1.09.2019.
- Van Wijk, A.J.M., Coelingh, J.P. (1993). OECD ülkelerinde rüzgâr enerjisi potansiyeli, 93091. Utrecht, Hollanda: Utrecht Üniversitesi, 35 s.
- Wilkes, J., Moccia, J., Arapogianni, A., Ganachte, A-B., Guillet, J., Wilczek, P. (2012). Thumlu on a e European offshore wind industry key 2011 trends and statistics, *European Wind Energy Association*, January 2012.
- Wind Europe, (2019), Offshore wind in europe key trends and statistics 2018, Brussels, Belgium, (37s.)
- Yumurtacı, Z., Özdilim, A.M. (2018). Türkiye’de kurulabilecek deniz üstü rüzgâr santralının teknik ve ekonomik analizi, *Mülk Pazarı Gayrimenkul Dergisi*.