



Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için Uygun Yer Seçim Kriterlerinin İrdelenmesi ve Kuzey Ege Kıyılarına Uygulanması

Investigation of Suitable Site Selection Criteria for Offshore Wind Turbines and Application to North Aegean Shores

Muhammed İkbâl Tortumluoğlu^{1*}, Mustafa Doğan²

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye

² Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: muhammedikbal.tortumluoglu@ogr.deu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 07.07.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 24.08.2020

Araştırma makalesi/Research Article

DOI: 10.21205/deufmd.2021236703

Atıf şekli/ How to cite: TORTUMLUOĞLU, M.İ., DOĞAN, M. (2021). Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için Uygun Yer Seçim Kriterlerinin İrdelenmesi ve Kuzey Ege Kıyılarına Uygulanması. DEUFMD, 23(67), 25-42.

Öz

Rüzgar enerjisi insanoğlu tarafından, yaklaşık 2000 yıldır çeşitli amaçlarda kullanılmıştır. Rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çeviren yel değirmenleriyle başlayan gelişim süreci, 21. yüzyılda açık deniz rüzgar türbinleriyle devam etmektedir. Bu çalışmada, açık deniz rüzgar türbinlerinin tasarım sürecinin en önemli basamağını oluşturan uygun yer seçim kriterleri detaylı şekilde incelenmiştir. Uygun yer seçiminde kullanılan yöntemler ve mühendislik çözümleri değerlendirilmiştir. Kuzey Ege kıyılarında bulunan Gökçeada, Bozcaada, Çanakkale ve Ayvıcık bölgeleri için WAsP paket programı kullanılarak uygulama yapılmıştır. Rüzgar hızı ve potansiyeli, derinlik koşulları, yasak sahalara, deniz ulaşım ve kablo hatları türbin yerleşiminde belirleyici kriterler olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak Bozcaada ve Gökçeada kıyıları açık deniz rüzgar türbinleri için uygun alanlar olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerjisi, Açık deniz rüzgar türbinleri, Açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yer seçimi

Abstract

Wind energy has been used by humanity for various purposes for nearly 2000 years. The development process has started with windmills that convert wind energy into mechanical energy and then continues with offshore wind turbines in the 21st century. In this study, suitable site selection criteria, which are the most important step in the design process of offshore wind turbines, have been examined in details. The methods and engineering solutions used in the suitable site selection were evaluated. Application was made using the WAsP package program for Gökçeada, Bozcaada, Çanakkale and Ayvıcık regions on the North Aegean coasts. Wind speed and potential, depth conditions, restricted areas, marine transportation and cable lines have been recognized as determining criteria in turbine placement. As a result, Bozcaada and Gökçeada coasts have been identified as suitable areas for offshore wind turbines.

Keywords: Wind energy, Offshore wind turbines, Suitable site selection for offshore wind turbines

1. Giriş

Fosil enerji kaynaklarının azalması, küresel ölçekte oluşan krizler sonucunda enerji fiyatlarının yükselmesi ve özellikle bu kaynakların çevreye verdiği tahribatların ciddi şekilde artması, insanoğlunu son 20 yıl içerisinde alternatif enerji kaynaklarını araştırmaya yönlendirmiştir [1]. Fosil kaynakların tüketimi sonucunda sera gazları açığa çıkmaktadır. Dünya üzerindeki toplam sera gazının üçte ikisi fosil yakıt kaynaklıdır. Dünyamızdan yansıyan güneş ışınları bu gazlar tarafından tutulmakta ve küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Bu durumun ciddiyetini fark eden devletler 1997 yılında Kyoto protokolü ve 2015 yılında Paris İklim Antlaşması'nı imzalamışlardır. Bu adımlarla atmosfere bırakılan metan ve karbon dioksit miktarının azalması için alternatif enerji kaynaklarına (rüzgar, güneş v.b.) yönelim hedeflenmiştir [2].

Rüzgar enerjisi, son 20 yıl içerisinde uygulamaları ciddi şekilde artan bir kaynaktır. Günümüzde rüzgar enerjisi rüzgar türbinleri vasıtasıyla elektrik enerjisi üretmek için kullanılmaktadır. Rüzgar enerjisinin mevcut olarak karalara kurulan (onshore) ve açık denizlere kurulan (offshore) rüzgar türbinleri olarak iki uygulaması vardır. *Global Wind Energy Council* (GWEC) kuruluşunun 2019 yılı sonunda oluşturduğu rapora göre rüzgar enerjisinde toplam kurulu gücü 2001 yılında kara üstünde 24 GW, açık denizde 0 GW iken, 2019 yılındaki kara üstünde 621 GW, açık denizde 29 GW değerlerine ulaşmıştır. Rüzgar enerjisi kurulu gücünün 2001-2019 yılları arasında neredeyse 30 kat arttığı görülmektedir. Bu kurulu güçte, açık deniz rüzgar türbinlerinin oranı, 2001 yılında yüzde %0 iken bu oran 2019 yılında yüzde %5 değerlerine yaklaşmıştır. Açık deniz rüzgar türbinleri son yıllarda, yeni bir uygulama alanı olarak ortaya çıkmaya başlamıştır [3].

Açık deniz rüzgar türbinleri, karadaki türbinlere kıyasla 1,5-2 kat daha maliyetli projelerdir. Ekonomik ömürleri ortalama 20 yıl kadardır. Ekonomik ömürleri süresince maksimum verim alabilmek ve maliyetleri en minimum seviyede tutabilmek için uygun yer seçimi büyük önem arz etmektedir. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* kuruluşunun 2018 yılı rüzgar türbinleri maliyet raporuna göre maliyetlerin yaklaşık olarak %37,1'lik kısmını oluşturan temel, kurulum ve altyapı ve %34'lük kısmını oluşturan bakım onarım çalışmaları uygun yer seçimiyle doğrudan bağlantılı hususlardır [4]. Açık deniz rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji

kaynakları arasında son 20 yıl içerisinde ön plana çıkmış olan bir kaynaktır. Açık deniz rüzgar tarlaları kurmak için ilk adım olarak uygun yerin seçimi yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yer seçim kriterleri irdelenmiş, rüzgar potansiyeli açısından yüksek bir bölge olan Kuzey Ege kıyılarının açık deniz rüzgar türbinleri için uygun alanların tespit edilmesi hedeflenmiştir. Kuzey Ege kıyıları için örnek bir çalışma ortaya koyulmuştur.

Açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yer seçimiyle alakalı çalışmalar kısıtlıdır. Manwell ve diğer. (2002) çalışmalarında karadan alınan rüzgar verileri ile deniz üzerine kurulan istasyondan alınan rüzgar verilerini kıyaslamışlardır. Rüzgar verilerinin güvenilirliğinin uygun yer seçimine etkilerinden bahsetmişlerdir[5]. 2007 yılında yapılan bir çalışmada Amerika'nın kuzeydoğu kıyılarında yapılabilecek açık deniz rüzgar tarlaları tasarımı için bölgenin uygunluğu irdelenmiştir. Bölgeye özgü özelliklerin tasarımda dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [6]. Avrupa ve Kuzey Amerika'da bulunan açık deniz rüzgar türbinlerini konu alan bir başka çalışmada, rüzgar tarlalarında verimliliği düşüren etmenler incelenmiş ve bu bölgelere yapılacak yeni projelerde kullanılacak yenilikçi çözümlerden bahsedilmiştir [7]. Manwell ve McGowan (2010) çalışmalarında rüzgar türbini teknolojisini kapsamlı şekilde anlatmışlar, açık deniz rüzgar enerjisi bir bölüm olarak ele almışlardır [8]. Amasra kıyılarından alınan rüzgar verilerinin istatistiksel analizlerinin yapıldığı bir çalışmada ise bölgenin uygun rüzgar potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir [9]. Malhotra (2011) çalışmasında açık deniz rüzgar türbini tasarım ve yapım aşamasındaki fizibilite çalışmalarını adım adım sıralamıştır. Özellikle yer seçimi ve temel seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar kapsamlı şekilde anlatılmıştır [10]. Bozcada ve Gökçeada kıyılarının açık deniz rüzgar enerjisi açısından uygunluğunun incelendiği çalışmada, bölgeler için WAsP programı ile analiz yapılmıştır [11]. Orta ve Doğu Karadeniz kıyılarında bulunan 6 şehirden alınan rüzgar verilerinin analizinin yapıldığı bir çalışmada, Sinop kıyılarının yıllık potansiyel açısından en verimli bölge olduğu belirtilmiştir [12]. Argın ve Yerci (2015) Türkiye kıyılarında açık deniz rüzgar türbini yapılabilecek 40'dan fazla bölgeyi incelemişlerdir. Yer seçimi fizibilite adımlarında açık deniz rüzgar türbini yapılacak alanlardaki sivil havacılık uçuş alanları, deniz tabanı petrol boru hatları, askeri alanlar,

balıkçıların seyir güzergahları gibi başlıklardan bahsetmişlerdir [13]. Argin ve diğer. (2019) yapmış oldukları çalışmada, Karadeniz, Ege ve Marmara'da bulunan kıyıya yakın meteoroloji istasyonundan almış oldukları rüzgar verilerinin istatistiksel analizlerini WAsP paket programı ile yapmışlardır. Türkiye kıyıları için genel bir projeksiyon vermeye çalışmışlardır [14]. Huvaj ve diğer. (2019) çalışmalarında açık deniz rüzgar türbinleri için kullanılan temel tiplerini incelemiş, bu alandaki yeni teknolojilerden bahsetmişlerdir [15]. Wu ve diğer (2019) açık deniz rüzgar enerjisi uygulamalarında deniz derinliğinin ve deniz tabanı yapısının öneminden bahsetmişlerdir. Temel tipleri kapsamlı bir şekilde anlatılmış, özellikle yüzer temeller incelenmiştir [16]. Ucar ve Balo (2020) Türkiye kıyılarında bulunan 12 adet ilden alınan rüzgar verilerini incelemişlerdir. Açık deniz rüzgar enerjisi bakımından İzmir ile Çanakkale arasında uygun bölgeler olduğunu belirtmişlerdir [17].

1.1 Gereçler ve Yöntem

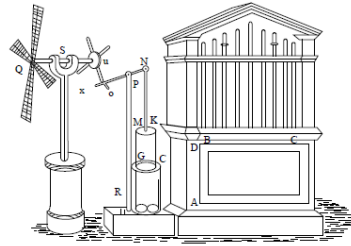
Bu çalışma kapsamında açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yer seçim kriterleri detaylı şekilde irdelenmiş ve Kuzey Ege kıyılarında uygun yer seçimi uygulaması yapılmıştır. Gökçeada, Bozcaada, Çanakkale ve Ayvacı meteoroloji istasyonlarından 2014-2019 yılları arasında saatlik olarak ölçülen rüzgar verilerinin analizleri WAsP Climate Analyst 3.1 programı ile yapılmış ve bölgelerin gözlenmiş ortalama rüzgar iklimleri elde edilmiştir. Açık deniz rüzgar türbinlerinin kurulacakları bölgenin derinlik koşullarına göre temel türü değişmektedir. Bu çalışma kapsamında 40 m deniz derinliklerine kadar uygun olan tekil temel açık deniz rüzgar türbinleri kurulabilecek alanlar tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda internet üzerinden ücretsiz erişilebilen GMRT(Global Multi-Resolution Topography Data) dijital haritaları kullanılmıştır. Global Mapper programı ile eş yükselti eğrileri ve derinlik çizgileri türetilmiştir. WAsP Map Editor vasıtasıyla bölgenin pürüzlülük koşulları işlenmiştir. Gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi ve derinlik koşullarının bulunduğu haritalar WAsP ana programına veri olarak girilerek bölgenin rüzgar atlası elde edilmiştir. Askeri eğitim ve atış sahaları, dalışa yasak sahalar Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'nın yayınlamış olduğu denizcilere ilan yıllıkları kullanılarak belirlenmiştir. Deniz tabanı kablo hatları

Navionics haritaları incelenerek belirlenmiştir. Uygun alanlar için açık deniz rüzgar türbin konuşlandırılması yapılmıştır.

2. Yel Değirmenlerinden Açık Deniz Rüzgar Türbinlerine Gelişim

Hava kütlelerinin hareketi rüzgar olarak adlandırılmaktadır. Hava, bu hareketinden dolayı bir kinetik enerjiye haizdir. Rüzgarın sahip olduğu enerji, mekanik ve elektrik enerjisi gibi başka bir enerjiye dönüştürülerek kullanılmaktadır. Antik çağlardan itibaren rüzgar enerjisinden faydalanılmıştır [1]. Rüzgar enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü ilkel kullanım yöntemlerindedir. Yelkenli gemilerin hareket ettirilmesi, yel değirmenleri vasıtasıyla tarım ürünlerinin öğütülmesi ve suların çekilmesi mekanik enerji dönüşümüne örnek olarak gösterilebilir [18]. Bugünkü Mısır topraklarında yaşamış İskenderiyeli Heron olarak bilinen Yunan matematikçinin *Pnömatika* adlı kitabında yel değirmeni tasviri yapılmıştır. İskenderiyeli Heron'un yaşadığı tarihler tam olarak bilinmemekle beraber, M.Ö 10 ile M.S 70 yılları arasında yaşamış olduğu tarihçiler tarafından belirtilmektedir. Rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çevirerek kuyudan su çekilmesini sağlayan bu tasvirin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir [8].

Yel değirmenleri 19. yüzyıla kadar insanlığa hizmet etmiş makinelerdir. Yel değirmenleri çoğunlukla kırsal alanlarda kullanılmaktaydı. Kırsal alanlara elektrik ulaştırabilmek için uzun hatlar gerekmesi, araştırmacıları yel değirmeninden elektrik üretebilen bir sistem arayışına yönlendirmiştir.



Şekil 1. Heron'un yel değirmeni

Nitekim, Amerika'da su pompalamak için kullanılan yel değirmenlerine dinamo yerleştirilerek elektrik üretme denemeleri gerçekleştirilmiştir; ama ilk sistematik anlamda rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çeviren rüzgar türbini, 1891 yılında Paul La Cour

tarafından Danimarka'da uygulanmıştır. 1900'lü yıllarda elektriğin kullanımının artması sonucunda modern anlamda rüzgar türbinleri yaygınlaşmaya başlamıştır [19].

Açık deniz rüzgar türbinleri fikri 1970'li yıllarda ortaya atılmıştır. Birçok araştırmacı kuramsal çalışmalar ortaya koymuşlardır. İlk ticari açık deniz rüzgar tarlası, Danimarka Vindeby'de 1991 yılında yapılmıştır. 11 adet rüzgar türbinine ve 4,95 MW kurulu güce sahiptir. 2016 yılında ekonomik ömrünün bitmesiyle tesis durmuştur. Şekil 2'de Vindeby Rüzgar tarlasının havadan görüntüsü verilmiştir [20].



Şekil 2. Danimarka, Vindeby rüzgar tarlası

Avrupa, açık deniz rüzgar enerjisinde Dünya'da lider konumdadır. Tablo 1'de ülkelerin sahip oldukları kurulu güçleri verilmiştir [21]. Türkiye'de mevcut durumda açık deniz rüzgar türbini bulunmamaktadır. 2018 yılında, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Ege ve Marmara kıyılarında 1200 MW kurulu güce sahip rüzgar tarlası için ihale yapılacağını belirtmiştir. Bu iki bölge rüzgar potansiyeli açısından uygun yerler olarak görülmektedir [22].

Tablo 1. Açık deniz rüzgar enerjisinin Dünya üzerindeki mevcut durumu [21]

Ülke	Toplam Kurulu Güç (MW)
Birleşik Krallık	9723
Almanya	7493
Belçika	1556
Danimarka	1703
Hollanda	1118
Diğer Avrupa Ülkeleri	310
Çin	6838
Güney Kore	292
Diğer Asya Ülkeleri	30
Amerika	30

3. Açık deniz ve Kara Üstü Rüzgar Türbinlerinin Karşılaştırılması

Açık deniz rüzgar türbinlerinin kara üstü rüzgar türbinlerine göre birçok avantajı vardır. Bunun yanında açık deniz rüzgar türbinlerinin uygulamasında bazı zorluklar da bulunmaktadır.

Açık denizlerdeki güçlü rüzgar potansiyeli, yüksek kurulum ve işletme maliyetlerini dengeleyebilecek düzeydedir. Rüzgar türbinlerinin gürültüsü 1,5 km den sonra duyulmayacak düzeye gelmektedir. Kıydan uzakta kurulması görsel etki ve gürültü gibi olumsuz etkilerin önüne geçmektedir. Karalarda engeller türbin önünde türbülanslar oluşturmakta ve enerji kayıplarına sebep olmaktadır. Açık denizler geniş ve engelsiz alanlar olduğu için türbülanslar minimum seviyededir. Karada, özellikle büyük rotor çapına sahip türbin parçalarının kurulum yerine taşınması problem teşkil etmektedir. Açık denizlerde gemiler sayesinde çok daha büyük rotor çapına sahip rüzgar türbinleri taşınabilmektedir [23].

Açık deniz rüzgar türbinlerinin sağladığı avantajların yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Kurulum öncesi planlama aşaması karadakilere göre daha uzun sürmektedir. Deniz tabanı ve derinlik araştırmaları zahmetli ve masraflı operasyonlardır. Bir başka dezavantaj türbinlerin bakım ve onarım çalışmalarıdır. Açık denizlerde meydana gelebilecek olağan dışı hava koşulları sonucunda oluşabilecek arızaların onarım süreleri karadakilere kıyasla daha uzun ve maliyetlidir. Bu onarım bakım sürecinde türbinlerin durması para kaybı demektir [23]. Açık deniz rüzgar türbinlerinin dezavantajları genel olarak maliyetleridir. Tasarım aşamasında karşılaşılan zorluklar mühendislik çözümleriyle aşılabilmektedir; ancak bunlar da maliyeti arttırmaktadır. Genel anlamda ticari amaçlarla yapıldıkları için ekonomik açıdan fizibil olmaları gerekmektedir [24].

4. Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için Uygun Yer Seçim Kriterleri

Açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yer tespiti aşamasında göz önünde bulundurulacak ana kriterler ve birçok alt kriter bulunmaktadır. Seçim kriterleri mekansal, ekonomik, çevresel ve teknik hususlar gibi gruplar halinde düşünülebilir. Bu grupları oluşturan kriterler çok çeşitli olmakla beraber literatürde yapılan çalışmalarda yaygın kullanılan kriterler Tablo

2’de verilmiştir. Proje yapılacak alana göre bu kriterler değişip çeşitlenebilmektedir. Kriter sayısının artması karar verme mekanizmasını güçleştirirken, güvenilirliği arttırmaktadır [14].

Tablo 2. Uygun yer seçiminde yaygın olarak kullanılan kriterler

Kriterler	Kriterin grubu	Referans
Rüzgar hızı	Mekansal/ Teknik Ekonomik	[14, 25, 26, 27]
Yıllık enerji miktarı	Ekonomik	[28, 29]
Elektrik dağıtım sistemleri	Ekonomik Mekansal	[26, 25]
Kıydan uzaklık	Ekonomik Mekansal	[30,31,32]
Deniz tabanı koşulları	Ekonomik Mekansal	[26, 25, 32]
Deniz Derinlik koşulları	Ekonomik Mekansal	[14,26, 25 32]
Çevresel etmenler	Çevresel	[26, 30]
Yatırım Maliyeti	Ekonomik	[26, 25, 32]
Yasak alanlar	Mekansal Çevresel	[14, 25, 32]

4.1 Rüzgar Hızı ve Potansiyeli

Türbinin üreteceği güç rüzgar hızının kübü ile orantılı olarak artmaktadır. Denklem 1’de formülasyonu verilmiştir. Burada P (Watt) rüzgardan elde edilen güç, A (m²) rüzgar türbininin süpürdüğü alan, v (m/sn) rüzgar hızı ve ρ (kg/m³) ise havanın yoğunluğudur.

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

Rüzgar türbinlerinden elde edilebilecek maksimum verim sınırlıdır. Bu sınır Alman Fizikçi Betz tarafından tanımlanmıştır ve Betz Faktörü olarak bilinmektedir. Bu sınır ‘c_p= 0,593’ değeridir. Yani rüzgardan elde edilebilecek maksimum verimi ifade etmektedir. Kapasite faktörü, bir rüzgar türbininin bir yıllık net güç çıkışının tam kapasite çalışması halinde elde edilebilecek güce oranını ifade etmektedir. Betz limiti gereği rüzgar türbininin kapasite faktörü Betz faktörünün üzerine çıkamamaktadır. Modern rüzgar türbinlerini %50 kapasite faktörüne kadar ulaşmaktadır. Kapasite faktörünün ideal değere yaklaşması enerji üretiminin artması anlamına gelmektedir. Bu da yapılan yatırımların daha hızlı sürede geri dönmesi demektir. Rüzgar hızı, kapasite faktörünü etkilemektedir. Rüzgar hızı arttıkça kapasite faktörü artmaktadır. Dolayısıyla enerji

üretimi artmaktadır. Bu durum ekonomik açıdan pozitif anlam ifade etmektedir [19].

Rüzgar hızları bölgenin rüzgar potansiyelini belirlemek için kullanılır. Rüzgar hızları istatistiksel olarak analiz edilerek uzun dönem rüzgar tahminleri yapılabilmektedir. Açık deniz rüzgar tarlalarının ortalama ekonomik ömürleri 20 yıldır. Ekonomik ömürleri boyunca maksimum verimi alabilmek için uzun dönem tahminleri güvenilir olmalıdır. Bu tahminler için en çok kullanılan iki metod *Weibull* ve *Rayleigh* olasılık dağılım fonksiyonlarıdır [8]. Bu analizleri yapan ticari birçok paket program da mevcuttur. WASP, WindPro ve Openwind çokça tercih edilen programlardır. Bu programlara rüzgar verileri, bölgenin topografik haritaları yüklenip bölge için rüzgar atlası elde etmek mümkündür.

Rüzgar hızı yükseklikle artmaktadır. Rüzgar hızının konumsal değişimi teorik olarak ve matematiksel modeller kullanılarak ortalama rüzgar hızı biçiminde gösterilse de, doğadaki çevresel etmenlerden dolayı rüzgar hızı ortalama çevresinde değişen bir profil izlemektedir. Bunun temel sebepleri yer yüzündeki sürtünme kuvvetleri ve yüzeydeki engellerden kaynaklanan türbülansdır. Rüzgar hızının yükseklikle değişiminin genel formülasyonu Denklem 2’de verilmiştir [19].

$$V = V_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^{z_o} \quad (2)$$

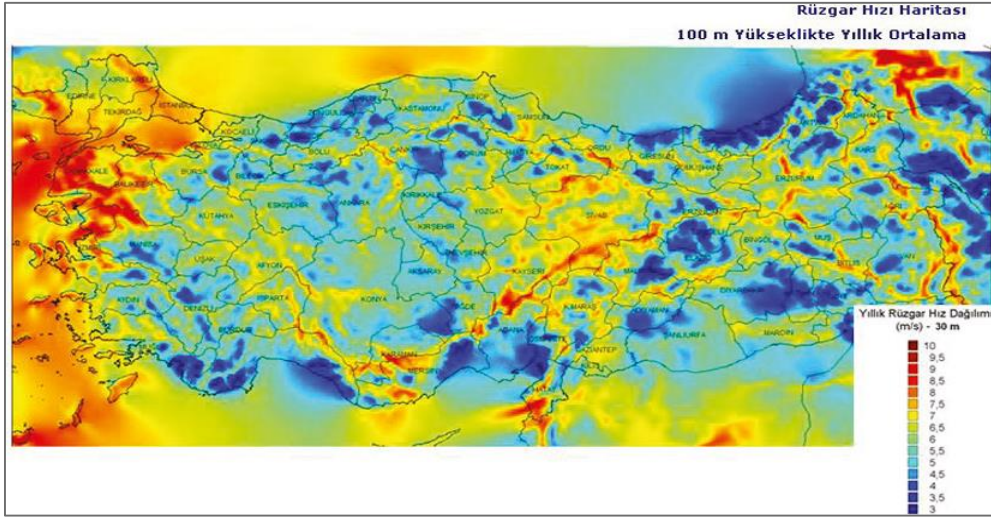
Burada; V(m/sn) yerden h yüksekliğindeki hız değeri, V_o yerden 10 m yükseklikteki hız değeri, z_o ise zemin yüzeyi pürüzlülük uzunluğudur. WASP programının kullandığı yüzey pürüzlülük uzunluğu değerleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Zeminlere ait pürüzlülük uzunlukları

Alan tanımı	z _o (mm)
Su yüzeyi	0.20
Çim	8.00
Seyrek bitki örtüsüne sahip düz araziler	30.00
Seyrek ağaçlık alanlar	100.00
Ağaçlık alan veya seyrek yerleşim	250.00
Ormanlık alanlar	500.000
Yüksek binaların olduğu şehir merkezi	3000.000

Uygun yer seçiminde olası bölgeleri belirleyebilmek için yapılmış olan rüzgar atlaslarından faydalanmak tasarım aşamasını kolaylaştıracaktır. Bu atlaslar genellikle ülkelerin resmi kurumları ve üniversiteler tarafından oluşturulduğu gibi ticari faaliyet yürüten kuruluşlar tarafından da oluşturulmaktadır. T.C. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından oluşturulmuş rüzgar enerjisi potansiyel atlası Türkiye kıyılarındaki rüzgar enerjisi hakkında başvurulabilecek bir kaynaktır. 50 m ve 100 m yükseklikleri rüzgar hızı ve rüzgar güç yoğunluğu haritalarına buradan ulaşılabilir. Şekil 3'te 100 m yükseklik için Türkiye rüzgar atlası verilmiştir [33]. Bir başka rüzgar atlası ise

Danimarka Teknik Üniversitesi tarafından oluşturulmuş olan dijital küresel rüzgar atlasıdır. İstenilen bölgenin rüzgar atlası, coğrafi bilgi sistemi programlarında veri işlemeye izin veren dijital formatlarda indirilebilmektedir [34]. Bu rüzgar atlasları kaynakları ön fikir edinme açısından faydalıdır ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. Açık deniz rüzgar türbini yapılacak bölgeden 30 m yükseklikten alınan en az 12 aylık rüzgar verilerinin analiz edilmesi literatürde belirtilmektedir [5-10]. 2015 yılında yapılan çalışmada Türkiye rüzgar atlasının tam güvenilir bir kaynak olmadığı, açık deniz rüzgar türbini yapılacak bölge için uzun dönem veri toplamanın gerekliliği vurgulanmıştır [11].



Şekil 3. Türkiye Rüzgar Atlası [33]

Uygun yer seçiminde bölgenin sahip olduğu rüzgar hızı en önemli konulardan biridir. Yapılan birçok çalışma incelendiğinde rüzgar hızının ilk belirleyici kriter olduğu görülmektedir. Türkiye kıyıları için uygun yer seçimiyle ilgili yapılan çalışmada rüzgar verisi alınan bölgeler ilk olarak ortalama rüzgar hızına göre sıralanmıştır. Rüzgar hızı 3 m/sn'den küçük olan bölgeler elenmiştir [14]. Bir başka çalışmada da aday bölgeler ortalama rüzgar hızlarına göre sıralanmış ve rüzgar hızı 30 m için 6 m/sn'nin altında olan bölgeler elenmiştir [35]. Genel anlamda piyasadaki rüzgar türbinleri 3-4 m/sn hızlarda aktif olup enerji üretmeye başlamaktadır. Literatürde bu eşik *cut-in* olarak adlandırılmaktadır. Aynı zamanda 25-30 m/sn rüzgar hızlarında da türbin parçalarının zarar

görmemesi için rüzgar türbinleri devre dışı kalmaktadır. Bu sınırlar belirleyici kriter olarak kullanılmaktadır [36].

4.2 Derinlik Durumu

Açık deniz rüzgar türbinlerini kara üstü rüzgar türbinlerinden ayıran en temel nitelik yapının temel kısmıdır. Açık denizlerde türbinler rüzgar, akıntı ve dalga gibi dinamik yüklere, ağır statik yüklere ve tuzlu su gibi kimyasal etmenlere maruz kalmaktadır. Yapılacak olan temel tasarımları bu yüklere dayanabilecek seviyede olmalıdır [37].

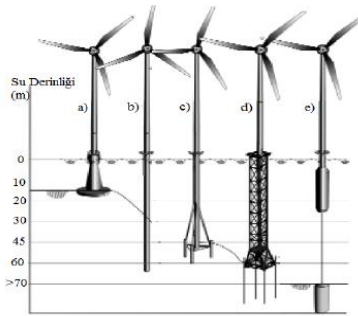
Karada yapılan rüzgar türbinlerinde temel maliyetleri toplam maliyetin ortalama %5-7'lik kısmının oluştururken, açık denizlerde yapılan rüzgar türbinlerinde bu oran %25 seviyelerine gelmektedir. Danimarka'daki Horns Rev rüzgar

çiftliği, 80 adet 2 MW tekil kazıklı temelli rüzgar türbininden oluşmaktadır. Bu projede toplam maliyetin yaklaşık % 22'lik kısmını temel ve zemin araştırmaları oluşturmaktadır. Bu ciddi bir maliyet kalemi anlamına gelmektedir. Uygun bölgenin doğru seçilmesi bu maliyet kalemini düşürecektir [38-39].

Açık denizlerde uygulanacak temel tipini belirleyecek en temel unsur derinlik koşuludur. Derinlik durumunun tespiti için batimetri haritaları incelenmelidir. Derinlik arttıkça uygulanan temel tipi de değişmektedir. 2018 yılında yayınlanan rapora göre, 2007 yıllarında açık deniz rüzgar tarlalarında ortalama derinlikler 20 m civarındayken bu değer 2018 yıllarında 30-35 m derinliklere ulaşmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde 2022 yılında uygulama derinliklerinin 40 m dolaylarına çıkacağı öngörülmektedir [40].

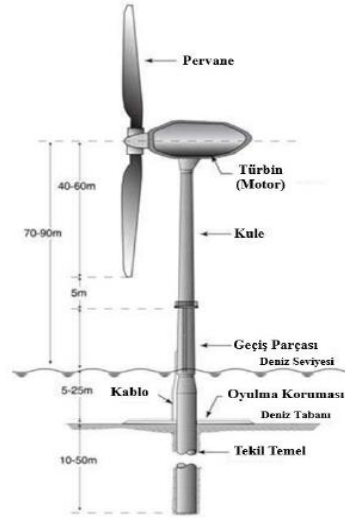
Temel tiplerinin derinliklere göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Yaklaşık olarak 40 m derinliklere kadar a) ağırlık ve b) tekil kazık temeller kullanılmaktadır. 40-50 m aralığında c) üç ayak ve d) jacket temel tipleri seçilmekte 50 m derinlikten sonra ise e) yüzer temeller ön plana çıkmaktadır. Bu temeller başlıca tiplerdir. Bunların modifiye edilmiş güçlendirilmiş biçimleri mevcuttur [10].

Ağırlık tipi temeller (Gravity base): Ağırlık tipi temeller, kendi ağırlıklarıyla, rüzgar türbinlerinin açık denizde maruz kaldıkları rüzgar yükü, dalga yükü ve statik yüklere ve momentlere karşı koyan temel tipidir. 15 m deniz derinliklerine kadar uygulanan bu temeller, diğer temellerle karşılaştırılınca yük taşıma kapasitesi daha azdır ama uygulanması daha kolaydır. Ağırlıkları 1500 ton civarındadır. Deniz taban zeminini olarak sıkıştırılmış kil, kumlu toprak ve kaya olan bölgelerde tercih edilmektedir [16]. İsveç'in kuzey kıyılarında bulunan Lillgrund rüzgar tarlasında bu temel türü kullanılmıştır [41].



Şekil 4. Açık deniz türbini temel tipleri [10]

Tekil Kazık Temeller (Monopile): Yapılan temel uygulamaları arasında en çok kullanılan temel türüdür. Açık deniz rüzgar türbini uygulamalarında %80 civarı tekil kazık temeller kullanılmaktadır. Ucuz olması ve kolay uygulanabilmesi kullanımının fazla olmasının nedenleridir. Deniz derinliği 30 m olan alanlarda kullanılmakla beraber 45-50 m derinliklere kadar halatlarla güçlendirilmiş türleri uygulanabilmektedir. Tekil kazıklar genellikle silindirik şeklinde, 4-6 m çapında, 150 mm et kalınlığında ağırlıkları 250 tonları bulabilen temel yapılarıdır. Çelik silindirler, titreşimli çekiçlerle zemine çakılmakta veya zemin yapısının sert olduğu bölgelerde silindirik çapından daha geniş delikler açılarak yerleştirilmektedir [10]. Deniz tabanı ile kazık birleşme bölgelerinde oluşabilecek oyulmaların önüne geçebilmek için oyulmaya karşı koruyucu tedbirler uygulanmaktadır. Şekil 5'te tekil kazık temel sisteminin şematik gösterimi verilmiştir [39].



Şekil 5. Tekil kazık şematik gösterimi [39]

Kafes Tipi Temel (Jacket): Bu temel tipleri, çelik elemanların karada kaynak vasıtasıyla birleştirilmesiyle meydana getirilir. Daha sonra rüzgar türbini yapılacak alana taşınır ve deniz tabanına çakılır. Üç ayak temellere göre daha kompleks yapıdadır. Deniz tabanına dört ayağı da sabitlenmektedir. 40-45 m derinliklerde yaygın kullanılan bu temeller 150-550 ton arasında değişen ağırlıklara sahiptir. İskoçya'nın Kuzey Doğusu'nda Kuzey Denizi'nde bulunan Beatrice rüzgar çiftliğinde derinliğin 45 m olduğu bölgelerde jacket tipi temeller

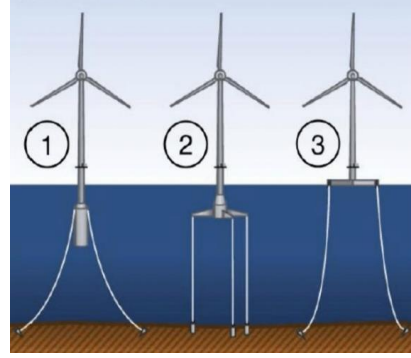
uygulanmıştır. Ormonde, Birleşik Krallık , Bohai Sea, Çin rüzgar çiftlikleri jacket temellerin kullanıldığı yerlerdir [16].

Üç Ayak (Tripod): Bu tür temeller aslında üç tekil temelin birleştirilmesiyle oluşturulmakta ve piramite benzer bir yapı teşkil edilmektedir. 40-50 m su derinliklerinde kullanılabilen bu temel sisteminin ağırlığı 100-500 ton arasındadır. Almanya’da bulunan *Alpha Ventus* (2009) ve İsveç, Nordersund açık deniz rüzgar çiftliklerinde bu temel sistemi kullanılmıştır. Şekil 6’da Alpha Ventus rüzgar çiftliğinin üç ayak temellerinin taşıma işlemi gösterilmiştir [16].



Şekil 6. Alpha Ventus türbinlerinin üç ayak temellerinin taşınması [42]

Yüzer Temeller: Derinliğin 60 m üstüne çıktığı bölgelerde yüzer temel çözümleri ön plana çıkmaktadır. Yüzer temelerde platformun statik dengesini sağlayabilmek için birkaç farklı model önerilmektedir. Şekil 7’de bu modeller verilmiştir. Türbin kulesinin altına koyulan balast yüklerle stabilize sağlanan (Buoy-spar System) (1), deniz tabanına halatlarla sabitlendiği (Mooring System) (2), kaldırma kuvvetinden faydalanan (Buoyancy Stabilised) (3) sistemleridir. Yüzer tip temellerin mevcut rüzgar türbinlerinde kullanımı sınırlıdır. Gelişen teknolojiyle derin denizlerde yüzer temellerin kullanımının artacağı tahmin edilmektedir [3]. 2007 yılında, İtalya kıyılarında 113 m derinlikte ticari olmayan açık deniz rüzgar türbininde ve daha sonra 2016 yılında İskoçya’da Hywind projesinde 220 m derinlikte yüzer temeller kullanılmıştır [43].



Şekil 7. Yüzer temel modelleri [43]

4.3 Yasak Sahalar

Karasuları sınırı: Uluslararası hukuka göre bir devletin kıyıları bitişik deniz alanlarında bölgesel yetkiye sahip olduğu sınıra denir. Uygun yer seçiminde bu sınırlar belirleyici nitelik taşımaktadır. Yapılan projelerde bu sınırların gözetilmesi gerekmektedir. 1982 tarihli Birleşmiş Milletler Deniz Hukuk Sözleşmesi, 12 deniz miline kadar devletlere kendi karasularını belirleyebilme yetkisi vermiştir. Bu sınır bazı ülkeler arasında anlaşmazlıklara sebebiyet vermektedir. Örneğin, Türkiye-Yunanistan arasında Ege sularında karasuları sınırı problemi yaşanmaktadır. Yunanistan karasuları sınırını 12 deniz miline çıkarmak istemiştir. Ege Denizi yarı açık deniz olduğu, çok sayıda ada ve adacık barındırdığı, karasularının 12 mil olmasıyla Yunanistan’ın hakimiyet alanının Türkiye kıyılarına kadar gelmesi gibi nedenlerden dolayı Türkiye tarafından kabul edilmemiştir [44].

Askeri sınırlar: Ülkelerin askeri güçleri açık denizlerdeki belirli alanları çeşitli amaçlar için kullanmaktadır. Uygun yer aranırken bu sınırlara dikkat etmek gerekmektedir [14].

Deniz ulaşım ve boru hatları: Deniz tabanında bulunan petrol-doğalgaz boru hatları, elektrik iletim hatları ve varsa başka amaçlarla kullanılan hatlar uygun yer seçiminde önem arz eden bir başka husustur. Sadece mevcut hatlara değil, açık deniz rüzgar türbin çiftliklerinin kurulması halinde ortaya çıkacak elektrik hatları da hesaba katılarak buna göre yer seçimi yapılmalıdır. Tasarım yapılacak bölgedeki deniz ulaşım hatlarını ve balıkçılık faaliyetlerine göz ardı etmemek gerekir. Gerekli izinler alınmalıdır.

4.4 Çevresel Etmenler

Rüzgar türbinlerinin kanat çapları 150 m değerlerine kadar çıkmaktadır. Bu durum görsel estetikle ilgili durumları ortaya çıkarmaktadır. Çalıştıklarında oluşturdukları gürültü sebebiyle ses kirliliği konusu da gündeme gelmektedir. Rüzgar türbinlerinin gürültüleri ortalama 1,5 km mesafeden sonra ortadan kalkmaktadır. Açık deniz rüzgar türbinleri kıyıda 1,5-2 km uzak mesafelere yapıldığında bu problem yerleşim yerleri için ortadan kalkacaktır. Karasal rüzgar türbinlerine göre ses ve görüntü kirliliği açısından daha makuldür. Amerika'da bulunan Cape Wind açık deniz rüzgar çiftliği projesi çevresel hususlarla alakalı gerekli izinleri alamadığı için uygulanamamıştır. Rüzgar türbinlerinin diğer canlı türlerine etkisiyle alakalı farklı görüşler mevcuttur. Özellikle kuş ölümlerine ve deniz yaşamına etkileri yüzünden eleştirel yaklaşan görüşler vardır. Fosil kaynakların tüketilmesinden kaynaklanan küresel ısınmanın daha fazla canlıyı olumsuz etkilediğini savunan görüşler de bulunmaktadır. Açık denizlerin temellerinde oluşan canlı yaşam alanlarının deniz çeşitliliğine katkı sağladığını öne süren çalışmalar da mevcuttur. Uygun yer seçiminde Cape Wind örneğindeki gibi problemlerle karşılaşmaması için bu kritere de dikkat edilmesi gerekmektedir [45].

5. Analizler ve Bulgular

Kuzey Ege kıyılarında bulunan Gökçeada, Bozcaada, Çanakkale ve Ayvacık istasyonlarının konumlarıyla meteoroloji istasyonlarının kodları Şekil 8'de verilmiştir.

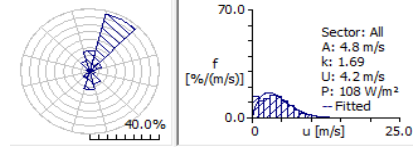


Şekil 8. İstasyonların konumu ve kodları

2014-2019 yılları arasında yer seviyesinden 10 m yükseklikten alınan rüzgar hızını ve yönünü içeren veriler, WASP Climate Analyst 3.1 programına girdi olarak girilerek analizler yapılmıştır.

Gökçeada istasyonunun gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi Şekil 9'da verilmiştir. Hakim rüzgar yönü 2. Sektör(30°) olan kuzeydoğudur. Ortalama rüzgar hızı 4,08 m/sn değerindedir.

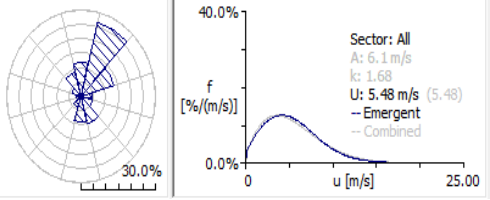
Sector #	a [°]	Wind climate			Power		Quality	
		f [%]	W-A	W-k	U	P	DU [%]	q [%]
1	0	12.8	4.5	1.53	4.02	106	0.201%	0.652%
2	30	37.3	5.5	2.33	4.87	118	1.014%	1.167%
3	60	6.9	3.7	1.63	3.30	53	4.552%	2.386%
4	90	2.0	1.3	1.15	1.22	5	2.339%	0.663%
5	120	3.0	1.5	0.82	1.71	32	0.964%	1.221%
6	150	8.9	4.4	1.37	4.03	125	2.587%	2.041%
7	180	11.6	6.5	1.95	5.80	234	3.073%	1.794%
8	210	4.7	5.0	1.79	4.48	118	7.194%	3.869%
9	240	1.6	2.1	1.03	2.12	33	1.181%	3.554%
10	270	1.1	1.3	0.85	1.40	16	9.803%	2.213%
11	300	2.4	2.0	1.51	1.80	10	2.944%	3.168%
12	330	7.5	2.9	2.67	2.59	16	4.749%	2.939%
All		4.8	1.69	4.24		108	3.544%	1.891%
Data				4.08		108		



Şekil 9. Gökçeada gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi

Gökçeada için WASP programında oluşturulmuş rüzgar atlası Şekil 10'da verilmiştir. Rüzgar atlasında R-class 1 (0,000 m) olarak gösterilen sütun deniz üzerinde oluşacak ortalama rüzgar hızını göstermektedir. Yerden farklı yüksekliklerde oluşacak rüzgar hızları da satırlarda verilmiştir. Yerden 10 m yükseklik için rüzgar hızı gözlenmiş ortalama rüzgar ikliminde 4,08 m/sn değerindeyken, rüzgar atlasında açık deniz için 5,48 m/sn değerine yükselmiştir. Rüzgar türbinleri 3-4 m/sn rüzgar hızında aktif olmaktadır. Gökçeada rüzgar atlası incelendiğinde ortalama rüzgar hızı açık deniz de 4 m/sn den yüksek olduğu için Gökçeada açıkları rüzgar hızı açısından uygundur.

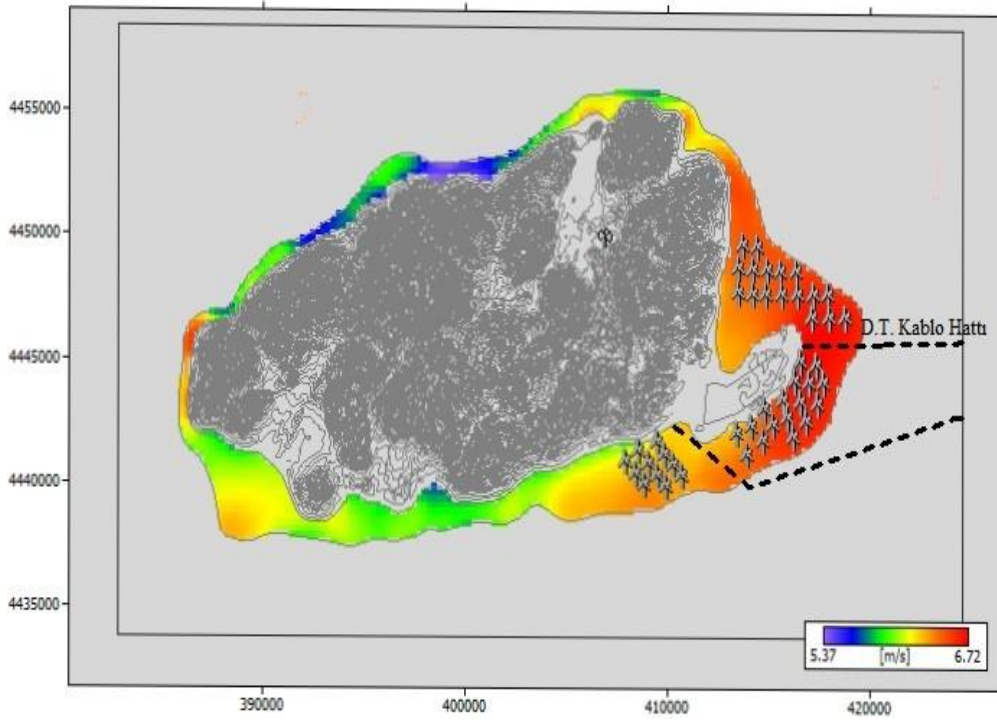
	R-class 1 (0.000 m)	R-class 2 (0.030 m)	R-class 3 (0.100 m)	R-class 4 (0.400 m)	R-class 5 (1.500 m)
Height 1 (10.0 m a.g.l.)	U = 5.48	4.02 m/s	3.54 m/s	2.82 m/s	1.90 m/s
Height 2 (25.0 m a.g.l.)	5.99 m/s	4.77 m/s	4.34 m/s	3.69 m/s	2.87 m/s
Height 3 (50.0 m a.g.l.)	6.43 m/s	5.46 m/s	5.04 m/s	4.42 m/s	3.66 m/s
Height 4 (100.0 m a.g.l.)	6.93 m/s	6.36 m/s	5.91 m/s	5.29 m/s	4.55 m/s
Height 5 (200.0 m a.g.l.)	7.55 m/s	7.60 m/s	7.07 m/s	6.38 m/s	5.62 m/s



Şekil 10. Gökçeada rüzgar atlası

Şekil 11'de Gökçeada açıklarının rüzgar hızı haritası verilmiştir. Deniz derinliğinin 40 m'den fazla olduğu alanlar elenmiştir. Deniz tabanı kablo hatlarının bulunduğu alanlar Navionics deniz haritaları incelenerek oluşturulmuştur [46]. Şekil 11'deki harita incelendiğinde rüzgar haritasının sağ alt köşesinde renklendirilmiş rüzgar hızı ölçeği verilmiştir. Bu ölçek, Gökçeada kıyılarında ortalama rüzgar hızının değişimini göstermektedir. Rüzgar hızı 5,37-6,72 m/sn değerleri arasında değişmektedir. Türbin yerleşimi yaparken Gökçeada güneydoğu kıyılarından tercih edilmesinin sebebi, rüzgar hızının Gökçeada'nın diğer kıyı bölgelerine göre daha yüksek olması ve kurulum alanının geniş olmasıdır. WAsP programına tanımlı farklı türbin modelleri kısıtlıdır. Türbin seçiminde cut

in hızı 4 m/sn olan 2 MW nominal güce sahip açık denizler için tasarlanmış Vestas V80 offshore modeli tercih edilmiştir. Vestas V80 offshore modeli 80 m rotor çapına sahiptir. Türbin yerleşimi yapılırken iz etkisi göz önüne alınmış ve yan yana türbinler için 7 rotor çapı mesafe, arka arkaya olan türbinler arasında da 10 rotor çapı kadar mesafe bırakılmıştır [8]. Türbin yerleşiminde haritadaki ağ hücrelerine olabildiğince yaklaşık rüzgar hızı yüksek noktalara yerleşim yapılmıştır. Deniz tabanı kablo hatlarının 500 m çevresinde bulunan alanlara türbin yerleşimi yapılmaktan kaçınılmıştır [47]. Bu kriterler göz önüne alınarak yapılan yerleşim sonucunda toplamda 45 adet rüzgar türbini konuşlandırılması yapılmıştır.

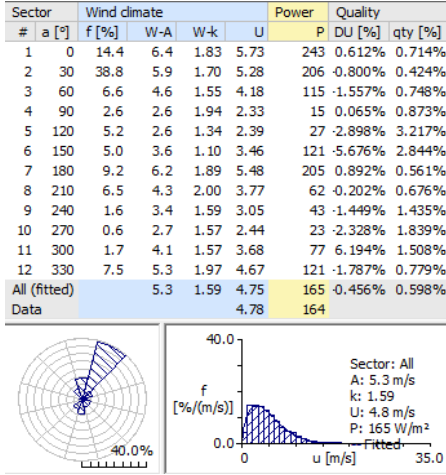


Şekil 11. Gökçeada türbin yerleşimi

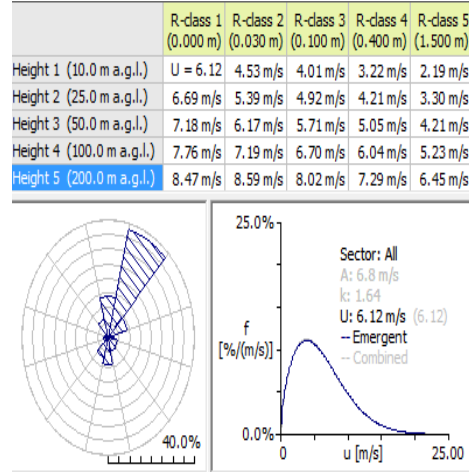
Bozcaada istasyonundan alınan rüzgar verilerinin analizi sonucunda elde edilen gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi Şekil 12'de verilmiştir. Hakim rüzgar yönü 2. Sektör (30°) olan kuzeydoğudur.

Bozcaada'nın rüzgar potansiyeli Gökçeada'ya göre daha yüksektir. Bozcaada için oluşturulmuş rüzgar atlası Şekil 13'te verilmiştir.

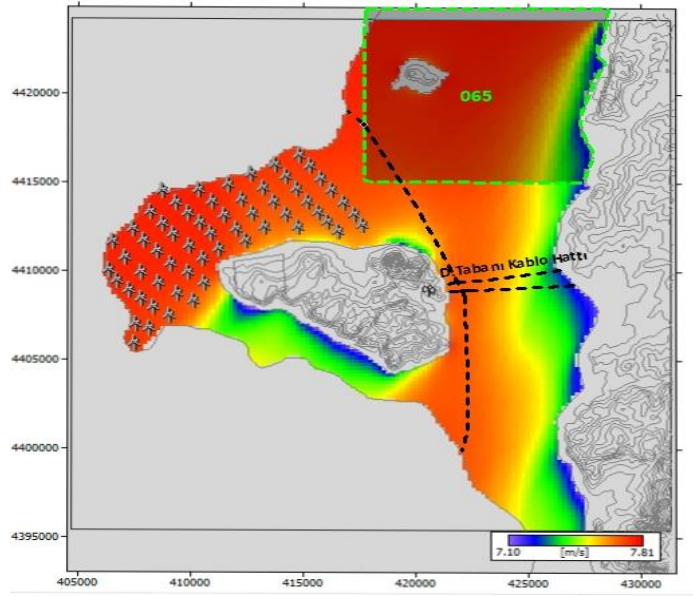
Türbin yerleşimi açık denize yapılacağı için rüzgar atlasında R-class 1 (0,000 m) olarak gösterilen sütundaki hız değerleri önem arz etmektedir. Yerden farklı yüksekliklerde hesaplanan ortalama rüzgar hızları rüzgar atlasında verilmiştir. Yerden 10 m yükseklik için rüzgar hızı gözlenmiş ortalama rüzgar ikliminde 4,78 m/sn değerindeyken, rüzgar atlasında açık deniz için 6,12 m/sn değerine yükselmiştir.



Şekil 12. Bozcaada gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi



Şekil 13. Bozcaada rüzgar atlası



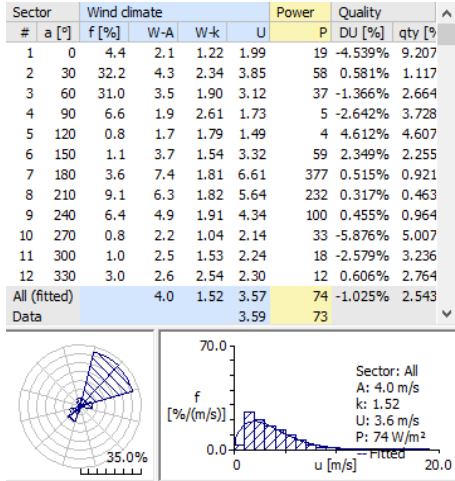
Şekil 14. Bozcaada türbin yerleşimi

Şekil 14'te Bozcaada açıklarının rüzgar hızı haritası ve türbin yerleşimi verilmiştir. Türbin seçiminde cut in hızı 4 m/sn olan 3 MW nominal güce sahip açık denizler için tasarlanmış Vestas V112 offshore modeli tercih edilmiştir. Vestas V112 offshore modeli 112 m rotor çapına sahiptir. Bozcaada'nın rüzgar potansiyeli Gökçeada'ya göre yüksek olduğu için daha fazla

enerji üretebilecek büyük rotor çapına sahip programda tanımlı bir türbin tercih edilmiştir. Bozcaada kıyıları için türbin yerleşimine uygun olmayan alanlar belirtilmiştir. Yeşil kesikli çizgiyle belirtilen 065 kodlu alan askeri eğitim ve atış sahasıdır. Bu saha, Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığının yayınlamış olduğu 2018 yılı denizcilere ilan yıllığı

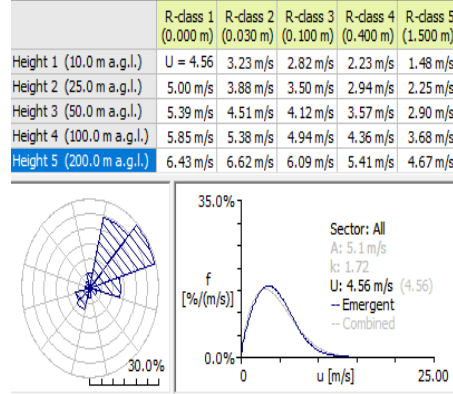
incelenerek oluşturulmuştur [47]. Türbin yerleşimi yapılırken 065 kodlu sahanın sol alt köşesinden 10 rotor çapı kadar mesafe bırakılarak yerleşim yapılmıştır. Rüzgar türbininin oluşturacağı türbülans etkisi, askeri eğitim ve atış sahasında yapılacak uçuşların güvenliğini etkileyebileceği için bu mesafe bırakılmıştır. Bozcaada'nın güneydoğu kıyılarında bulunan deniz tabanı kablo hatları Şekil 14'te gösterilmiştir. Deniz derinliğinin 40 m'de fazla olduğu alanlar elenmiştir. Adanın kuzeybatı kıyılarının yüksek rüzgar potansiyeline sahip olması ve deniz tabanı kablo hatlarının adanın güneydoğusunda bulunmasından dolayı türbin yerleşiminde kuzeybatı açıları tercih edilmiştir. Ayrıca kuzeybatı kıyısının sığ olması adanın bu kısmının tercih edilmesinde önemli bir unsurdur. Türbin yerleşimi yapılırken iz etkisi göz önüne alınmış ve yan yana türbinler için 7 rotor çapı mesafe, arka arkaya olan türbinler arasına 10 rotor çapı kadar mesafe bırakılmıştır. Bu kriterler göz önüne alınarak yapılan yerleşim sonucunda toplamda 60 adet rüzgar türbini konuşlandırılması yapılmıştır.

Çanakkale istasyonu Gökçeada'nın güneydoğusunda, Bozcaada'nın kuzeyindedir. 2014-2019 yılları arasında yerden 10 m yükseklikten ölçülmüş olan rüzgar hızı ve rüzgar yönü verilerinin analizi sonucunda elde edilmiş olan gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi Şekil 15'te verilmiştir. Hakim rüzgar yönü 2. Sektör(30°) kuzeydoğudur. Ortalama rüzgar hızı 3,59 m/sn değerindedir.



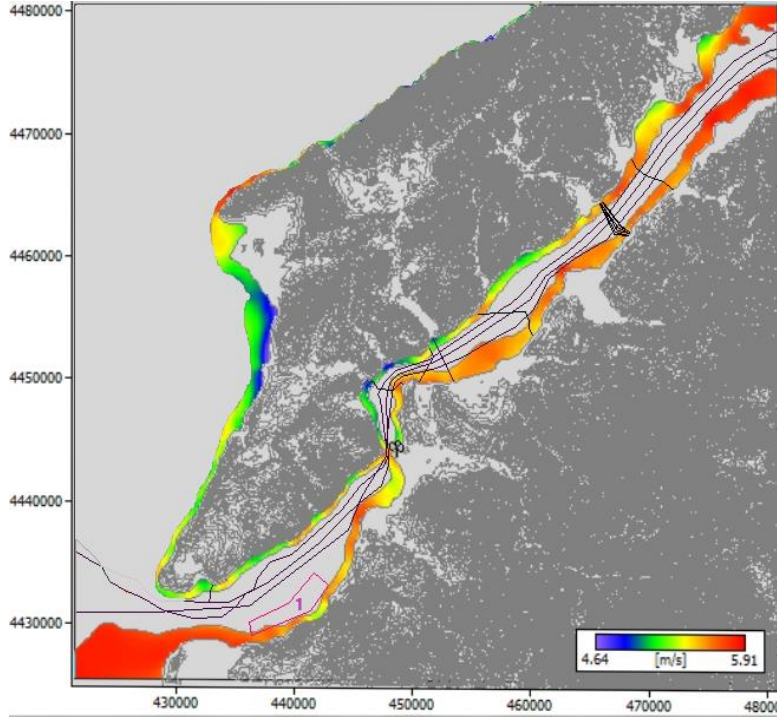
Şekil 15. Çanakkale gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi

Çanakkale için oluşturulmuş rüzgar atlası Şekil 16'da verilmiştir. Yerden 10 m yükseklik için ortalama rüzgar hızı meteoroloji istasyonun olduğu noktada 3,59 m/sn, Çanakkale kıyılarında, açık denizde 4,56 m/sn değerine ulaşmıştır. Yerden farklı yüksekliklerdeki rüzgar hızları ve farklı pürüzlülük uzunlukları için rüzgar hızları Şekil 16'da görülmektedir.



Şekil 16. Çanakkale rüzgar atlası

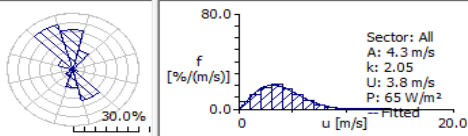
Piyasada bulunan rüzgar türbinleri genellikle 3-4 m/sn hızlarda aktif olup enerji üretmeye başlamaktadır. Ortalama rüzgar hızı 4 m/sn üzerinde olan bölgelerde rüzgar türbini enerji üretmeye başlayacaktır. Çanakkale kıyılarında 10 m yükseklikte, açık denizde ortalama rüzgar hızı 4,56 m/sn değerindedir. Yükseklik arttıkça hız değeri de artmaktadır. Çanakkale kıyılarına kurulacak olan açık deniz rüzgar türbinleri rahatlıkla aktif hale gelip enerji üretebilecektir. Çanakkale kıyıları rüzgar hızı açısından uygun olsa da deniz tabanı kablo hatları, yasaklı alanlar ve deniz ulaşım güzergahları gibi etmenlerden dolayı türbin yerleşimine uygun değildir. Şekil 17'de Çanakkale kıyıları için oluşturulmuş harita verilmiştir. Siyah çizgiler deniz tabanı kablo ve boru hatlarını göstermektedir. Çok sayıda kablo ve boru hattı mevcuttur. T.C Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın verilerine göre Çanakkale Boğazı'ndan 2018 yılında toplam 43.999 adet gemi geçiş yapmıştır [48]. Çanakkale ve İstanbul Boğazı Karadeniz'i Akdeniz'e bağlayan tek su yolu olduğu için gemi trafiği açısından yoğun bölgelerdir. Gemi trafiği bu kadar yoğun olduğu için demirleme sahaları ve yasaklı alanlar çoktur. Ayrıca, kıyıya yakın bölgelerden itibaren başlayan hızlı derinlik artışından dolayı Çanakkale kıyıları açık deniz rüzgar tarlaları kurmak için uygun değildir.



Şekil 17. Çanakkale Boğazı deniz tabanı boru ve kablo hatları

Yer seviyesinden 10 m yükseklikten ölçülmüş olan Ayvacık istasyonu rüzgar verilerinin analizi sonucunda elde edilen gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi Şekil 18'de verilmiştir. Hakim rüzgar yönü 12. Sektör(330°) kuzeybatıdır. Ortalama rüzgar hızı 3,81 m/sn değerindedir.

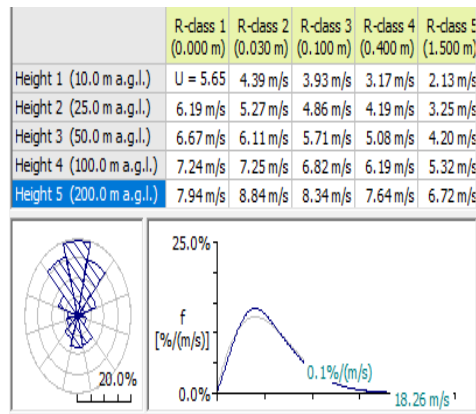
Sector #	Wind climate				Power		Quality	
	a [°]	f [%]	W-A	W-k	U	P	DU [%]	qty [%]
1	0	21.1	4.9	2.81	4.34	73	1.156%	0.739%
2	30	10.7	5.8	4.21	5.29	110	4.396%	1.871%
3	60	1.0	2.2	1.12	2.13	27	-5.564%	2.667%
4	90	0.5	0.9	1.17	0.86	2	-1.608%	0.879%
5	120	1.9	2.2	1.10	2.08	27	-3.057%	0.972%
6	150	16.8	5.2	2.10	4.62	110	3.200%	1.619%
7	180	9.7	3.6	1.45	3.26	61	-2.020%	1.389%
8	210	3.9	3.4	1.54	3.05	45	-2.522%	1.646%
9	240	1.7	3.8	1.88	3.40	49	4.605%	2.668%
10	270	0.9	2.7	1.54	2.42	23	1.897%	2.555%
11	300	6.8	3.1	2.40	2.79	22	-0.357%	1.375%
12	330	25.1	3.8	2.82	3.35	33	0.029%	1.044%
All (fitted)			4.3	2.05	3.85	65	0.814%	0.659%
Data					3.81	64		



Şekil 18. Ayvacık istasyonu gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi

Ayvacık için oluşturulmuş rüzgar atlası Şekil 19'da verilmiştir. Yerden 10 m yükseklik için ortalama rüzgar hızı meteoroloji istasyonun

olduğu noktada 3,81 m/sn iken açık denizde 5,65 m/sn değerindedir. Piyasada bulunan rüzgar türbinleri genellikle 3-4 m/sn hızlarda aktif olup enerji üretmeye başlamaktadır. Ortalama rüzgar hızı 4 m/sn üzerinde olan bölgelerde rüzgar türbini enerji üretmeye başlayacaktır. Ayvacık istasyonu rüzgar atlası incelendiğinde rüzgar hızı açısından uygun bir bölge olduğu görülmektedir.

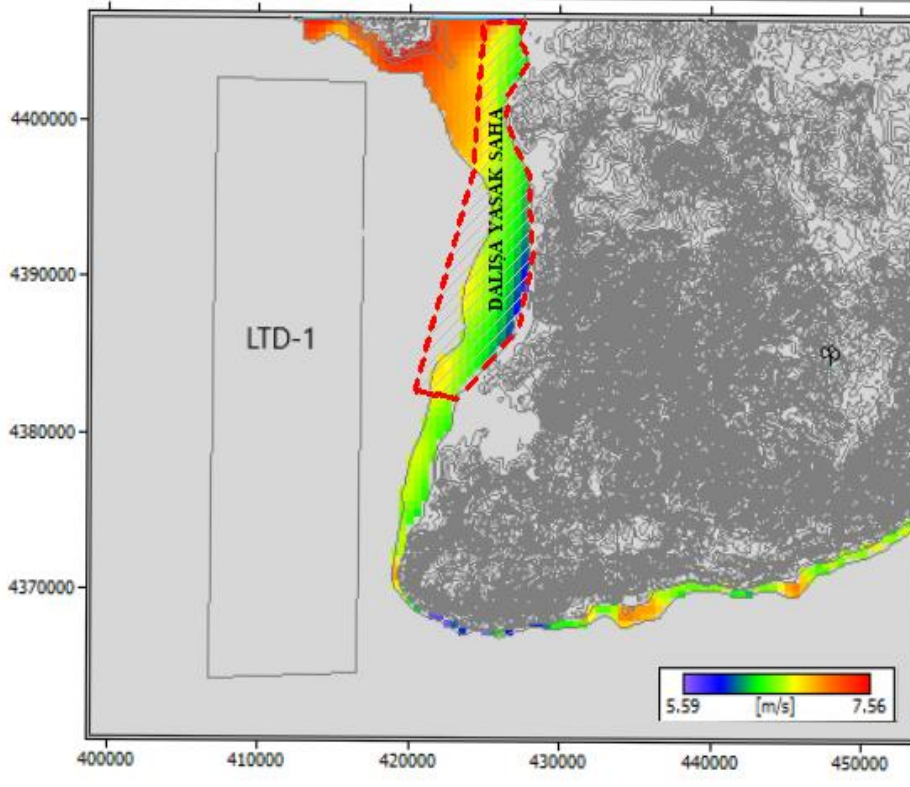


Şekil 19. Ayvacık rüzgar atlası

Şekil 20'de verilen rüzgar hızı ve yasaklı sahaları içeren harita incelendiğinde, Ayvacık

istasyonunun güneyinde bulunan kıyılarda deniz derinliği kıyıya yakın bölgelerde ani artış gösterdiği için türbin yerleşimi için uygun alanlar çok kısıtlıdır. Kuzeybatı tarafı türbin yerleşimi için uygun geniş alanlara ve yüksek rüzgar potansiyeline sahip olmasına karşın burada da dalışa yasak saha mevcuttur. Şekil 20'de LTD-1 olarak gösterilen alan askeri eğitim ve atış sahasıdır. 40 m derinlik sınırının dışında bulunsada türbin yerleşimi yapılabilecek alanlara yakınlığı söz konusudur. Açık deniz rüzgar türbinlerinin oluşturdukları türbülanslar

türbin arkasında türbin rotor çapının 10 katı kadar mesafelerde etkili olmaktadır. Bu türbülanslar, askeri eğitim ve atış sahalarında savaş uçaklarının düşük irtifada gerçekleştirdikleri uçuşların güvenliği açısından sorun teşkil edebilmektedir. Rüzgar türbinleri 100 m yüksekliklere varan gövde uzunlukları ve oluşturdukları türbülanslar sebebiyle hava, deniz taşıtlarını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu sebeplerden dolayı bu bölge için türbin konuşlandırılması yapılamamıştır.



Şekil 20. Ayvacık civarı yasak sahalar ve rüzgar hızı veri haritası

6. Tartışma ve Sonuç

Açık deniz rüzgar türbinleri son 20 yıl içerisinde ciddi gelişim göstermiştir. Bu gelişim mühendislik çözümleriyle birlikte hızlanacaktır. Karalardaki sınırlı alanlar, rüzgarın hızını azaltan ve kayıplara neden olan engeller, açık deniz rüzgar enerjisini cazibeli hale getirmektedir. Uygun yer seçimi, yapılacak projelerin fizibil olması açısından önem arz etmektedir. Uygun yer seçiminde gözetilmesi gereken kriterlerin iyi analiz edilmesi istenilen

verimi yakalamak için gereklidir. Özellikle rüzgar potansiyeli ve derinlik koşulları uygun bölge seçimi yaparken dikkat edilmesi gereken en önemli iki basamaktır. Rüzgar potansiyeli tesisten elde edilebilecek enerji miktarını etkilerken, deniz koşullarına uygun imalat, maliyetler kısmını etkilemektedir.

Tasarım aşamasında beklenmeyen durumlarla karşılaşmamak için de yasak alanlar, deniz tabanı kablo hatları ve deniz ulaşım hatlarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma

kapsamında uygun yer seçimini etkileyen kriterler detaylı şekilde incelenmiştir. Kuzey Ege kıyıları için yapılan uygulama sonucunda Bozcaada'nın yüksek rüzgar potansiyeline sahip olması, geniş sığ bölgelerin bulunması, deniz tabanı kablo hatları, askeri eğitim ve atış sahaları, dalışa yasak sahaların rüzgar potansiyeli yüksek ve sığ alanlardan uzakta olması nedeniyle açık deniz rüzgar türbinleri kurmak için en uygun bölge olduğu tespit edilmiştir. Bozcaada için uygun yer seçim kriterleri gözetilerek 60 türbin konuşlandırılması yapılmıştır. Gökçeada, Bozcaada'ya nispeten rüzgar hızı daha düşük ve sığ alanları daha az olan bir bölgedir; ama açık deniz rüzgar türbinleri kurmak için müsait alanlara sahiptir. Gökçeada için 45 adet rüzgar türbini yerleşimi yapılmıştır. Yerleşim yapılırken deniz tabanı kablo hatlarının bulunduğu alanlardan kaçınılmıştır.

Çanakkale ve Ayvacıq bölgeleri rüzgar hızı açısından uygun olsa da deniz tabanı kablo hatları, yasak sahalar ve deniz ulaşım hatlarının bulunduğu alanlardan dolayı türbin yerleşimine uygun alanlar olmadığı tespit edilmiştir.

Ülkemizde mevcut durumda kurulu olan açık deniz rüzgar tarlası yoktur. Bu çalışma rüzgar potansiyeli yüksek olan Kuzey Ege bölgesinde yapılabilecek açık deniz rüzgar tarlaları için yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

- [1] Penna, A. N. 2019. A History of Energy Flows: From Human Labor to Renewable Power. Routledge, 264s.
- [2] Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, <https://iklim.csb.gov.tr/kyoto-protokolu-i-4363> (Erişim Tarihi; 01.06.2020).
- [3] Council-GWEC, GLOBAL WIND REPORT 2019, Global Wind Energy Council, Brussels.
- [4] Stehly, T. J., Beiter, P. C. 2020. 2018 Cost of Wind Energy Review (No. NREL/TP-5000-74598). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO United States.
- [5] Manwell, J. F., Rogers, A. L., McGowan, J. G., Bailey, B. H. 2002. An offshore wind resource assessment study for New England. Renewable Energy, Cilt. 27(2), s.175-187. DOI:10.1016/S0960-1481(01)00183-5
- [6] Manwell, J. F., Elkinton, C. N., Rogers, A. L., McGowan, J. G. 2007. Review of design conditions applicable to offshore wind energy systems in the United States. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Cilt. 11(2), s. 210-234. DOI: 10.1016/j.rser.2005.01.002
- [7] Breton, S. P., Moe, G. 2009. Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America. Renewable Energy, Cilt. 34(3), s.646-654. DOI:10.1016/j.renene.2008.05.040
- [8] Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. 2010. Wind energy explained: theory, design and application, 2nd, John Wiley & Sons, 675s.
- [9] Akdağ, S. A., Güler, Ö. 2010. Wind characteristics analyses and determination of appropriate wind turbine for Amasra—Black Sea region, Turkey. International Journal of Green Energy, Cilt. 7(4), s.422-433. DOI: 10.1080/15435075.2010.493819
- [10] Malhotra, S. 2011. Selection, design and construction of offshore wind turbine foundations. In Wind turbines. IntechOpen. DOI: 10.5772/15461
- [11] Güzel, B. 2012. Açık Deniz Rüzgar Enerjisi, Fizibilite Adımları ile Bozcaada ve Gökçeada Örnek Çalışması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, İstanbul.
- [12] Akpınar, A. 2013. Evaluation of wind energy potentiality at coastal locations along the north eastern coasts of Turkey. Energy, Cilt. 50, s. 395-405. DOI: 10.1016/j.energy.2012.11.019
- [13] Argın, M., Yerci, V. 2015, November. The assessment of offshore wind power potential of Turkey. In 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 966-970. IEEE.
- [14] Argın, M., Yerci, V., Erdogan, N., Kucuksari, S., Cali, U. 2019. Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multi-criteria site selection. Energy Strategy Reviews, Cilt. 23, s.33-46. DOI: 10.1016/j.esr.2018.12.005
- [15] Huvaj, N., Caceoğlu, E., Baidol, Y., 2019 «Deniz Üstü Rüzgar Türbinleri Temel Seçimi ve Deniz Tabanı Zemin Araştırmaları, 5. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, izmir, 197-210
- [16] Wu, X., Hu, Y., Li, Y., Yang, J., Duan, L., Wang, T., Borthwick, A. 2019. Foundations of offshore wind turbines: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Cilt. 104, s. 379-393. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.012
- [17] Ucar, A., Balo, F., 2020. Assessment of wind power potential for turbine installation in coastal areas of Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Cilt. 14 (7), s. 1901-1912. DOI: 10.1016/j.rser.2010.03.021
- [18] Shepherd, D. G. 1990. Historical development of the windmill, NASA.
- [19] Hau, E., 2013. Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics, 3rd, Springer Science & Business Media, 879s.
- [20] Ostachowicz, W., McGugan, M., Schröder-Hinrichs, J. U., Luczak, M. 2016. MARE-WINT: new materials and

- reliability in offshore wind turbine technology. Springer Nature, 432s.
- [21] WindEurope, 2020. Wind energy in Europe in 2019 Trends and statistics, WindEurope, Brussels.
- [22] TÜREB, 2019. Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Ankara.
- [23] Van Bussel, G. J. W., Zaaijer, M. B. 2001. Reliability, availability and maintenance aspects of large-scale offshore wind farms, a concepts study. MAREC 2001 Marine Renewable Energies Conference, Newcastle, 119-126.
- [24] Van Der Tempel, J. 2006. Design of support structures for offshore wind turbines. Delft University of Technology, Doktora Tezi, 209s, Delft.
- [25] Vasileiou, M., Loukogeorgaki, E., Vagiona, D. G. 2017. GIS-based multi-criteria decision analysis for site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in Greece. *Renewable and sustainable energy reviews*, Cilt. 73, s.745-757. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.161
- [26] Wu, Y., Zhang, J., Yuan, J., Geng, S., Zhang, H. 2016. Study of decision framework of offshore wind power station site selection based on ELECTRE-III under intuitionistic fuzzy environment: A case of China. *Energy Conversion and Management*, Cilt. 113, s.66-81. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.01.020
- [27] Cradden, L., Kalogeri, C., Barrios, I. M., Galanis, G., Ingram, D., Kallos, G. 2016. Multi-criteria site selection for offshore renewable energy platforms. *Renewable energy*, Cilt. 87, s.791-806. DOI: 10.1016/j.renene.2015.10.035
- [28] Wątróbski, J., Ziemia, P., & Wolski, W. 2015, September. Methodological aspects of decision support system for the location of renewable energy sources. In 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), s. 1451-1459). IEEE.
- [29] Bagočius, V., Zavadskas, E. K., Turskis, Z. 2014. Multi-person selection of the best wind turbine based on the multi-criteria integrated additive-multiplicative utility function. *Journal of civil engineering and management*, Cilt. 20(4), s.590-599. DOI: 10.3846/13923730.2014.932836
- [30] Fetanat, A., Khorasaninejad, E. 2015. A novel hybrid MCDM approach for offshore wind farm site selection: A case study of Iran. *Ocean & Coastal Management*, Cilt.109, s.17-28. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2015.02.005
- [31] Mekonnen, A. D., Gorsevski, P. V. 2015. A web-based participatory GIS (PGIS) for offshore wind farm suitability within Lake Erie, Ohio. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt. 41, s. 162-177. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.030
- [32] Sałabun, W., Wątróbski, J., & Piegat, A. 2016, Identification of a multi-criteria model of location assessment for renewable energy sources. In *International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing*, s. 321-332. Springer, Cham.
- [33] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası, http://www.yegm.gov.tr/YEKrepa/REPA-duyuru_01.html (Erişim tarihi: 23.05. 2020).
- [34] Global Wind Atlas, Global Wind Atlas 2020. <https://globalwindatlas.info/> (Erişim tarihi: 10.06.2020).
- [35] Loukogeorgaki, E., Vagiona, D. G., Vasileiou, M. 2018. Site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in Greece incorporating environmental impact assessment. *Energies*, Cilt. 11(8), 2095. DOI: 10.3390/en11082095
- [36] Bianchi, F. D., De Battista, H., & Mantz, R. J. 2006. Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design. Springer Science & Business Media. 218s.
- [37] Taşan, E., Akdağ, C. T., Savidis, S. 2010. Offshore Rüzgar Enerjisi Temel Sistemleri Tekil Kazık Temel Sisteminin Tekrarlı Yatay Yükler Altında Davranışı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi, İstanbul, 175-195.
- [38] European Wind Energy Association (EWEA), Wind Energy, The Facts 2009. <https://www.wind-energy-the-facts.org/development-and-investment-costs-of-offshore-wind-power.html> (Erişim Tarihi: 15.06.2020).
- [39] Kaya, B. Oğuz, E. 2019. Tekil Kazık Temelli Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin Avrupa'daki Gelişimi, 5. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, İzmir, 175-195
- [40] U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2018. Offshore Wind Technologies Market Report, Washington.
- [41] Langhamer, O., Holand, H., Rosenqvist, G. 2016. Effects of an offshore wind farm (OWF) on the common shore crab *Carcinus maenas*: Tagging pilot experiments in the Lillgrund offshore wind farm (Sweden). *PloS one*, Cilt.11(10), s.1-17. e0165096.
- [42] Oekler, J. 2008. German Offshore Wind Energy Foundation, Artist, TRANSPORT OF A TRIPOD. Foundation Offshore Wind Energy, <https://www.offshore-stiftung.de/en/media-library?filtercat=3&page=2> (Erişim Tarihi: 19.06.2020).
- [43] Serrano, J. M., Domínguez-Navarro, J. A., Sevil, J. A., & López, R. D. 2018. A case study of floating offshore wind park in the Mediterranean, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'18), Salamanca (Spain).
- [44] Birleşmiş Milletler, BİRLEŞMİŞ MİLLETLER DENİZ HUKUKU SÖZLEŞMESİ, 1982. <https://denizmevzuat.uab.gov.tr/uploads/pages/uluslararasi-sozlesmeler/denizhukuku.pdf> (Erişim Tarihi 19.06.2020).
- [45] Snyder, B., Kaiser, M. J. 2009. Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy. *Renewable Energy*, Cilt. 34(6), s.1567-1578.

- [46] A Garmin Brand, Naviaonics 2020.
<https://webapp.navionics.com/?lang=en#boating@6&key=%7BrfqFciw%60F> (Erişim tarihi: 15.06.2020).
- [47] Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı, 2018. Denizcilere İlanlar Yılığı, Ankara.
- [48] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı-Deniz Ticareti Genel Müdürlüğü, 2018. Deniz Ticareti İstatistiğı, Ankara.