

AÇIK DENİZ RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI İÇİN BİR YAKLAŞIM VE ÜLKEMİZ BOZCAADA SAHİLLERİNDE ÖRNEK UYGULAMASI

Merve Yılmaz¹, Muhammed İkbal Tortumluoğlu², Mustafa Doğan³

^{1, 2, 3} Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

¹merve.y@ogr.deu.edu.tr,

²muhammedikbal.tortumluoglu@deu.edu.tr, ³mustafa.dogan@deu.edu.tr

ÖZET

Günümüzde, fosil yakıtların çevreye verdiği zararların etkisinin yoğun şekilde hissedilmesi, enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar ve fosil kaynaklı yakıt rezervlerinin azalması yenilenebilir enerjiye olan talebin artmasına neden olmuştur. Bunun sonucunda, rüzgâr türbini uygulamaları, diğer yenilenebilir enerji sistemlerinde de olduğu gibi günden güne artış göstermektedir. Mevcut durum incelendiğinde, rüzgâr enerji santrallerinin yoğunluğunun karalar üzerinde bulunduğu, bununla birlikte son yıllarda araştırmaların açık deniz rüzgâr enerjisi üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Karalardaki kısıtlı alanlar, açık denizlerdeki nispeten yüksek rüzgâr hızları ve düzenli rüzgâr rejimleri ile rüzgâr türbini parçalarının kararlarda taşınmasında yaşanan zorluklar bu yoğunlaşmaya sebep olmuştur. Bu çalışma kapsamında öncelikle açık deniz rüzgâr türbinlerinin hakkında genel bilgiler ve dünya üzerindeki durumu hakkında bilgi verilmiştir. Ardından açık deniz rüzgâr türbinlerinin tasarım kriterlerinden bahsedilmiş ve Bozcaada meteoroloji istasyonundan alınan rüzgâr verileri analiz edilmiştir. Bozcaada kıyılarına uygulanabilecek tekil kazıklı açık deniz rüzgâr türbini için yapısal analizler yapılmıştır. Türbin tasarım yükleri ASCE 7-05'ten, EN 1991-1-4'ten ve ilgili şartnamelerden gerekli bölümler kullanılarak hesaplanmıştır. Rüzgâr türbinin bir yapısal analiz programında hesap modeli oluşturulup, yapısal analizi gerçekleştirilmiştir.

1. GİRİŞ

Artan nüfus, toplumların refah seviyelerinin yükselmesi ve teknolojik gelişmeler tüm dünyada enerji ihtiyacını her sene giderek artırmaktadır [1]. Sanayi devrimiyle beraber artan enerji ihtiyacı geçmiş yıllarda fosil yakıtlarla karşılanmaya çalışılmıştır. Ancak fosil yakıtların yanması ile enerji zincirindeki tüm halkalarda çok büyük miktarlarda karbondioksit atmosfere salınmakta, dolayısıyla fosil yakıt kullanımının küresel ısınmadaki rolü artmaktadır [2].

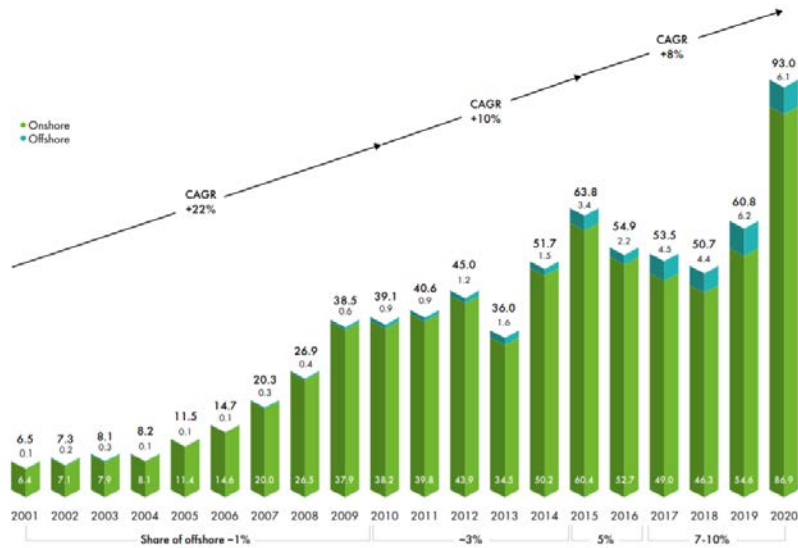
İklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik eylem stratejilerini ve yükümlülüklerini, İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi düzenlemektedir [3]. Sözleşmeye taraf olan ülkeler, sera gazları emisyonlarını 1990 yılı seviyesine indirmeye, gelişmekte olan ülkelere de teknolojik ve mali kaynak aktarmayı kabul etmektedirler [4]. Birleşmiş Milletlerin 2050 yılına kadar sıfır emisyona ulaşma hedefine Avrupa Birliği ve 110'dan fazla ülke taahhütte bulunmuştur [5].

Küresel iklim krizinin önüne geçmek için devletler son 20 yılda yenilenebilir enerji alanında yatırımlarını arttırmaya başlamışlardır. Yatırım maliyetlerinin yıllar içerisinde düşmesi, teknolojik gelişmelerle rüzgârın çok daha tahmin edilebilir ve ölçülebilir olması gibi etmenler rüzgâr enerjisine yönelimi arttırmıştır [6].

Dünya rüzgâr enerji potansiyelini belirleyebilmek amacıyla Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Uygulamaya dönük ve toplumsal kısıtlar nedeni ile kara üstü potansiyelin %4'ünün kullanılacağı öngörüsüne dayanarak, dünya kara üstü rüzgâr potansiyeli 53.000 TWsa/yıl olarak hesaplanmıştır. Açık deniz bölgelerinin potansiyeli ise 420.000 TWsa/yıl olarak öngörülmektedir [7].

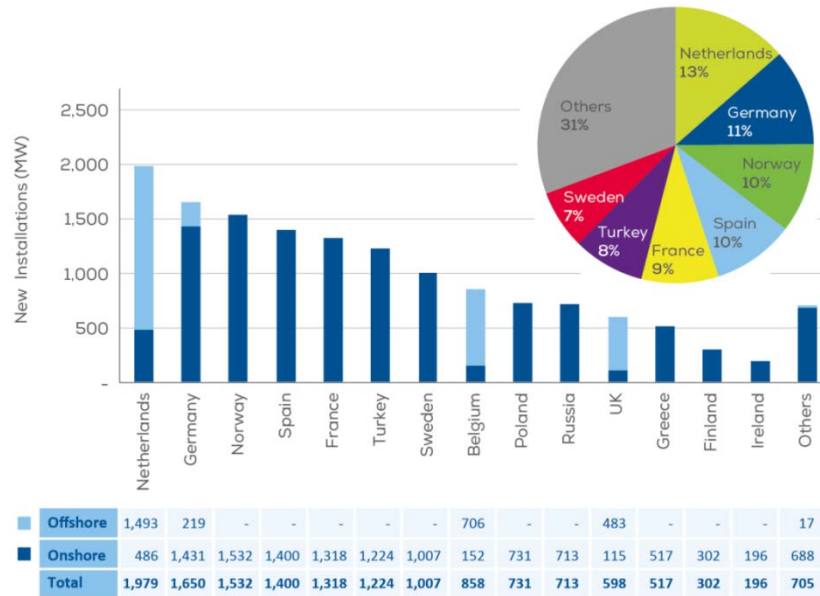
Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi (GWEC) rüzgâr enerjisiyle alakalı dünyadaki gelişmeleri 6 aylık ve yıllık periyotlarda raporlayan bir kuruluştur. Bir başka rüzgâr araştırmaları yapan kuruluş olan Wind Europe, 2020 raporunda Avrupa'da sektörün 2019'a göre 2020'de %6 düşüş yaşadığını belirtilmiştir. Fakat Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi'nin 2021 raporu incelendiğinde görülmektedir ki rüzgâr enerjisi sektörü global çapta, COVID-19 pandemisine rağmen gelişmeye devam eden nadir sektörlerden birisi olmuştur. 2020'de küresel yeni rüzgâr enerjisi kurulumları 90 GW'ı geçmiştir, 2019'a kıyasla %53 büyüme kaydetmiştir [8,9].

Şekil 1'deki grafik incelendiğinde görülmektedir ki global çapta rüzgâr santrallerinin kurulumu son 10 yılda bir ivme yakalanmıştır. Açık deniz rüzgâr türbini özelinde incelenecek olursa 2015 yılından itibaren bu alanda da yatırımlar artmıştır. Açık deniz rüzgâr enerjisinde en yüksek kurulu güce sahip olan ülke son yıllarda yatırımlarıyla öne çıkan Çin olmuştur. Çin'i ise Birleşik Krallık izlemektedir [9]. Rotor çaplarının son yıllardaki gelişimi, nominal güç miktarlarını arttırmış, yüksek ilk yatırım maliyetlerinin çok daha kısa sürede yerini kar etmeye bırakmasına olanak sağlamıştır. Böylece karalara kıyasla çok daha yüksek potansiyele sahip olan açık deniz denizler cazip hale gelmeye başlamıştır [10].

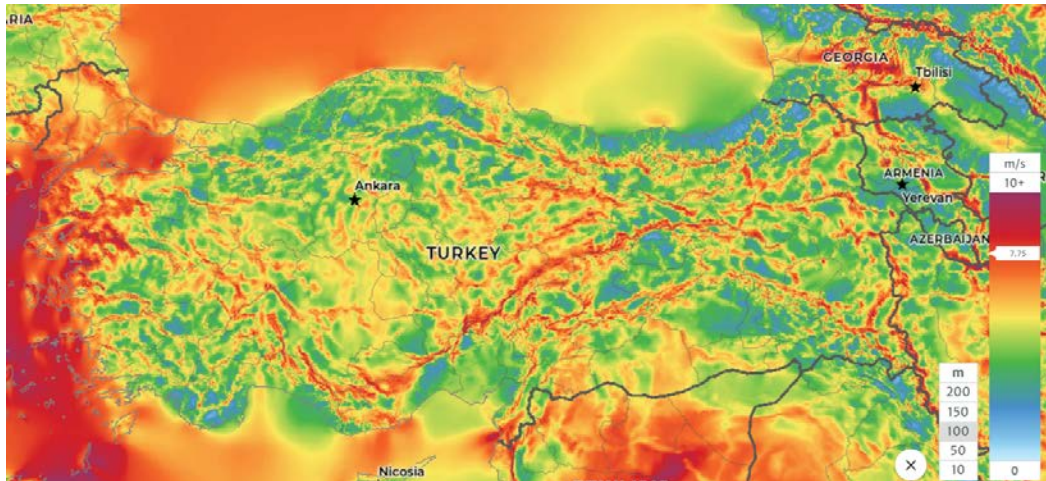


Şekil 1. Global Çapta Toplam Kurulumların Tarihi Gelişimi [9]

Wind Europe'un 2020 yılı raporuna göre, Şekil 2'deki grafikte görüleceği üzere 2020 yılında Avrupada yeni kurulan kara rüzgâr türbinlerinin %8'i Türkiye'de kurulmuştur. Fakat Türkiye açık denizinde yüksek rüzgâr potansiyeli olmasına rağmen, henüz kurulan bir açık deniz rüzgâr türbini olmadığı da görülmektedir [8].



Şekil 3'teki, Danimarka Teknik Üniversitesi ve birçok kurumun iş birliğiyle oluşturulan küresel rüzgâr atlası incelendiğinde 100 m yükseklik için Ege Bölgesi açıklarının ortalama 8-9 m/s rüzgâr hızına sahip olması, bölgenin rüzgâr enerji potansiyelinin yüksek olduğuna işaret etmektedir [11].



2. AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNLERİ

2.1 AÇIK DENİZ VE KARA ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin kara türbinlerine kıyasla ilk kurulum ve işletme maliyetlerinin yüksektir. Fakat açık denizde rüzgâr karaya oranla çok daha hızlı ve düzenli rejime sahiptir. Ayrıca deniz üzerinde inşa edilen rüzgâr türbinleri kara parsellerini işgal etmemekle beraber, yaşam alanlarından yeterince uzakta bulunmaları sebebiyle rahatsız edici türbin sesinin çevreye

olan zararını asgari seviyede tutar [12]. Açık denizlerde, karadaki rüzgâr türbinlerine kıyasla çok daha büyük rotor çapına sahip rüzgâr türbinleri kurmak mümkün olduğundan türbinlerden elde edilecek nominal güç artmakta ve finansal verim sağlanmaktadır.

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin tüm bu avantajlarına rağmen göz önünde bulundurulması gereken bazı dezavantajları mevcuttur [12]:

- Deniz içerisindeki inşaat, karaya kıyasla daha zahmetlidir.
- Denizdeki korozyon koşullardan dolayı alınması gereken korozyon önlemleri artmaktadır.
- Kablo iletim hatları karaya kıyasla 1,5-2 kat daha pahalıdır.
- Deniz içi trafiğini minimal bir mertebede olumsuz yönde etkileyebilmektedir.
- Açık denizlerde meydana gelebilecek olağan dışı hava koşulları sonucunda oluşabilecek arızaların onarım süreleri karadakilere kıyasla daha uzun ve maliyetlidir [13].

2.2 AÇIK DENİZ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN UYGUN YER SEÇİM KRİTERLERİ

2.2.1 BÖLGENİN RÜZGÂR POTANSİYELİ

Kinetik enerjiden rotoru döndüren mekanik enerjiye maksimum teorik dönüşüm verimi, ‘Betz Limiti’ olarak adlandırılır. Rüzgardaki mekanik enerjiye dönüştürülebilen enerjinin %59,3’ü kadar teorik bir sınır vardır [14]. Dolayısıyla Betz Faktörü açık deniz rüzgâr türbinlerinden elde edilecek verimi kısıtlamaktadır. Bu sebeple açık deniz rüzgâr türbininden istenilen verimin alınabilmesi için bölgenin rüzgâr potansiyelinin bilinmesinin, potansiyele uygun türbin seçilmesinin önemi büyüktür.

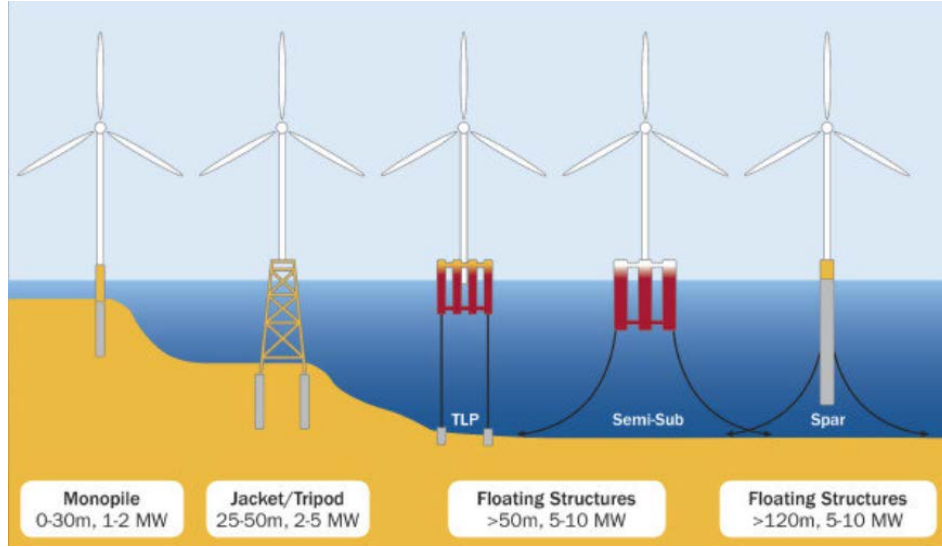
2.2.2 DERİNLİK VE DENİZ TABANI KOŞULLARI

Açık denizlerde ani derinlik artışları ve azalışları, deniz tabanında bulunan çukurlar, deniz tabanı yapısının değişmesi gibi değişiklikler mevcuttur. Bunların tespiti için batimetri haritaları incelenmesi, deniz tabanı sonar araştırmalarına bakılması gerekmektedir. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin temel yapısı, belli derinlikler için farklılıklar arz etmektedir. Açık denizlere yapılabilen temel sistemleri ağırlık tipi, tekil kazıklı, tripod, jacket (kafesli sistemli kazıklı temeller) tipi, vakumlu kova keson tipi ve yüzer temeller olarak değişmektedir [15]. Şekil 4’te su derinliklere göre uygulanan açık deniz rüzgar türbini temellerinin çeşitleri görülmektedir.

2.2.2.1 TEKİL KAZIKLI TEMELLER

Tekil temeller; uygulama kolaylığı, üretim maliyetinin nispeten düşük oluşu gibi etkenler nedeniyle açık deniz rüzgâr enerjisinde, %65 gibi önemli bir oranla, en çok tercih edilen temel türüdür [16]. Çalışma bölgesindeki ortalama su seviyesi derinliği ve deniz koşulları sebebiyle bu çalışmada da tekil temel tercih edilmiştir.

Tekil kazıklı temeller, deniz tabanına çakılan geniş çaplı tek bir çelik borudan oluşurlar. Rüzgar türbinin kulesiyle kazığın bağlantısını sağlamak için bir geçiş parçası kullanılır. Gerekli tekil temel uzunluğu ve çapı, öncelikle, uygulanan yükün dolaylı bir ölçüsü olan türbinin enerji üretim kapasitesine bağlıdır. Diğer önemli faktörler arasında zemin durumu ve çevresel yüklerin şiddetleri yer alır.



Şekil 4. Su Derinliklere Göre Uygulanan Açık Deniz Rüzgar Türbini Temelleri [17]

2.2.3 YASAK SAHALAR

2.2.3.1 KARASULARI VE ASKERİ SINIRLAR

1982 tarihli Birleşmiş Milletler Deniz Hukuk Sözleşmesine göre ülkelerin karasularının genişliği 12 deniz milini geçemez [18]. 20 Mayıs 1982 tarih ve 2674 sayılı Kara Suları Kanunuyla Türkiye'nin Ege'deki kara suları 6 mil, Ege'deki durum daha fazlasına izin verir nitelikte değildir, Karadeniz ve Akdeniz'de ise 12 mil olarak belirlenmiştir [19]. Öte yandan devletlerin denizlerde kullandıkları askeri alanlara uygun yer seçiminde dikkat edilmelidir. Yapılması planlanan rüzgâr türbini tarlaları askeriye'nin kullandığı alanlara girmemelidir.

2.2.3.2 DENİZ TABANI BORU HATLARI VE DENİZ ULAŞIM HATLARI

Deniz trafiği ve deniz tabanında mevcut olan boru-elektrik hatlarının uygun yer seçimi aşamasında incelenmesi gerekir. Sadece mevcut hatlar değil, açık deniz rüzgâr türbin tarlasının kurulması halinde ortaya çıkacak elektrik hatları da dikkat edilmesi gereken bir diğer husustur [20].

2.2.4 ÇEVRESEL HUSUSLAR VE CANLILARA OLAN ETKİSİ

Açık deniz rüzgâr türbinleri hem hub boyları hem de büyük rotor çapları nedeniyle çevresel hususlarda dikkat edilmesi gereken yapılardır. Deniz kuşlarının yuvalarına yakın yere yapmak ekolojik denge için sorun teşkil etmektedir. Aynı zamanda göç güzergahı üzerine yapılan rüzgâr türbinleri bu kuşlar için tehlikeli olabilir. Proje planlama aşamasında bu hususlara dikkat edilmelidir [21]. Tekil kazıklı temellerde, kazık çakımı sırasında çıkacak olan gürültü deniz canlılarında kalıcı hasarlar bırakabilmektedir. Son yıllarda denizlerdeki ekolojik dengenin bozulmaması için çakım öncesinde sonar aletlerle su altına ses dalgaları vererek deniz canlılarının çakım sırasında bölgeden uzaklaşmaları sağlanmaktadır. Kuzey Denizi'ndeki Gemini açık deniz rüzgâr tarlası, bu uygulamanın güzel örneklerinden birisidir [22].

3. BOZCAADA İÇİN AÇIK DENİZ RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI

3.1 KAPSAM VE METODOLOJİ

Rüzgâr türbinlerinin yapımı sırasında temel unsur, sahaya etki edecek rüzgârların doğru bir şekilde analiz edilmesidir. Mevcut rüzgâr atlasları incelenmesi sonucunda rüzgâr enerji potansiyeli yüksek olan ve sığ sahillere sahip olan Bozcaada kuzey açıkları bu çalışma kapsamında aday bölge seçilerek rüzgâr analizleri yapılmıştır [11].

Rüzgâr gülü, hâkim rüzgâr yönünü belirlemek için kullanılan; kutupsal koordinatlarda histogram biçiminde çizilen, belirli bir alanda her yöndeki rüzgâr frekansının grafiksel gösterimidir. Bir daire içindeki her çizgi, rüzgârların frekansını belirli bir yönde gösterir ve her eş merkezli daire, belirli bir frekansa karşılık gelir [23].

Bölgenin rüzgâr potansiyelinin analizi için rüzgâr gülünün yanı sıra, hız histogramı ve esme süresi histogramlarına da ihtiyaç duyulur. Rüzgâr hızının histogramı, esme eyleminin hangi hız değerinde daha çok tekrarlandığını söyler.

Rüzgâr iklim analizinin bir diğer önemli parçası olan esme süresi histogramı ise, fırtınaların süreleri hakkında bilgi vermektedir. Esme süresi hesabında, komşu yönlerde fırtınanın devam ettiği de göz önünde bulundurulmuştur. Örneğin kuzey kuzeydoğu (NNE) yönünde esen bir rüzgârın kuzey (N) ya da kuzey doğu (NE) yönlerinde esmeye devam etmesi durumunda fırtınanın esme süresinde kesinti olmadığı kabul edilmiştir.

Türbinlere etkiyecek önemli bir dinamik kuvvet olan rüzgâr dalgası kuvvetlerini bulmak için rüzgâr verilerinin analizlerinden yararlanılır. Rüzgâr dalgalarının oluşumunda belirleyici faktörler rüzgâr hızı, rüzgâr esme süresi ve feç uzunluğu yani rüzgâr etki mesafesidir. Feç uzunluğu, belli yönde esen bir rüzgârın açık sularda karalarla engellenmeden erişebileceği mesafedir [24].

Feç uzunluklarının belirlenebilmesi için literatürde farklı yöntemler mevcuttur, en çok kullanılan yöntem ise etkili feç uzunluğu yöntemidir. Etkili feç uzunluğu yöntemi esas alınarak X yönü ana doğrultu olarak kabul edilip, her iki tarafta $\pm 45^\circ$ lik aralıkta inceleme yapılmıştır. X noktasından saat yönü ve saat yönünün tersi yönünde 5 derece ara ile 8'er tali doğrultu belirlenmiştir. Bu tali doğrultular herhangi bir kara engeline çarpmadığı sürece kesilmemiştir.

Belirgin dalga yüksekliğini ve periyodunu tahmin etmek amacıyla dalga tahmin yöntemlerinden birisi olan Shore Protection Manual (SPM) yöntemi kullanılmıştır. SPM yönteminde; nomograma feç boyu, rüzgâr gerilme faktörü ve rüzgâr esme süresi ile girilir. Gelişmekte olan deniz bölgesinde dalga gelişimini feç boyu kısıtlıyorsa feç boyu sınırlı dalga; esme süresi kısıtlıyorsa esme süresi kısıtlı dalga olarak nitelendirilir.

Bölgenin rüzgâr potansiyeline uygun bir türbin seçimi yapılmıştır. Türbin tasarım yükleri ASCE 7-05'ten, EN 1991-1-4'ten ve ilgili şartnamelerden gerekli bölümler kullanılarak hesaplanmıştır. Rüzgâr türbinin bir yapısal analiz programında hesap modeli oluşturulup, yapısal analizi gerçekleştirilmiştir.

3.2 BOZCAADA DENİZİ İÇİN BÖLGE SEÇİMİ

Mevcut çalışmalar ve rüzgâr atlasları incelendiğinde, Bozcaada kıyılarının yüksek rüzgâr potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Batimetri haritaları incelendiğinde, Bozcaada'nın kuzey açıklarında yer alan Şimal Sığılığı Şekil 5'te görüldüğü üzere geniş sığ alanlara sahip olması nedeniyle açık deniz rüzgâr enerjisi için potansiyel barındırdığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda bölge için rüzgâr analizleri yapılmıştır [11,20,25].



Şekil 5. Şimal Sığlığı ve Bozcaada Sınırları [26]

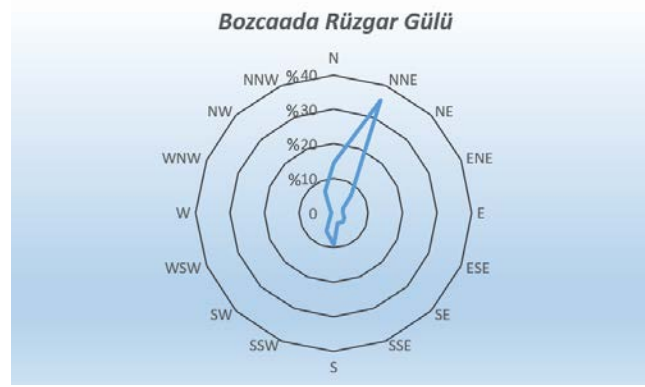
3.3 RÜZGÂR VERİLERİNİN ELDE EDİLMESİ VE ANALİZİ

Rüzgâr verilerin elde edilmesi için çalışma bölgesinin yakınlarındaki istasyonlar incelenmiştir. 17111 istasyon numaralı, 39.8326 enlem 26.0728 boylam koordinatlarına sahip Bozcaada meteoroloji istasyonu uygun istasyon olarak seçilmiştir. Veriler Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınmıştır, Ocak 2014'ten Nisan 2019'a kadar 5 yıl 3 aylık süreçte, saat başı esen rüzgâr hızı ve yönü yer almaktadır. Verilerden yararlanılarak bölgenin rüzgar analizleri yapılmıştır.

Tablo 1. Rüzgâr Yönlerinin ve Hız Toplamlarının Frekansları

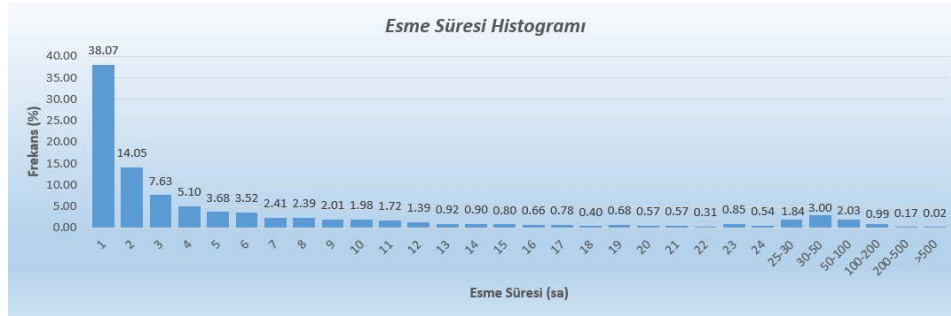
Yönler	Sayım	Yüzde	Hız Toplamı	Yüzde
N	6141	14.49	34878.8	17.21
NNE	14979	35.35	79982.9	39.48
NE	3083	7.28	15680.4	7.74
ENE	1259	2.97	4056.8	2
E	1113	2.63	2590.9	1.28
ESE	1435	3.39	3549.2	1.75
SE	1576	3.72	3855.2	1.9
SSE	1328	3.13	5838.7	2.88
S	3896	9.19	21253.6	10.49
SSW	2410	5.69	9288.3	4.58
SW	676	1.6	2270.4	1.12
WSW	330	0.78	970.2	0.48
W	250	0.59	655.4	0.32
WNW	391	0.92	1227.5	0.61
NW	668	1.58	2662.6	1.31
NNW	2840	6.7	13847.5	6.83
Σ	42375		202608.4	

Belirli bir yön veya aralığın rüzgâr frekansı, diğer yönlerdeki rüzgâr frekansını önemli ölçüde aşarsa, bu alanda hâkim rüzgârların olduğu söylenebilir. Bu çalışmada Bozcaada sahillerindeki yerden 10 metre yükseklikten ölçülen rüzgâr verilerinin analizi yapılmıştır, Tablo 1'de analiz sonucu verilmiş ve Şekil 6'da verilen rüzgar gülü elde edilmiştir. Rüzgâr gülündeki toplam sayımın %35,35'ine ve hız toplamlarının ise %39,48'ine sahip olan Kuzey Kuzeydoğu (NNE) hakim yön olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. Bozcaada Rüzgâr Güllü

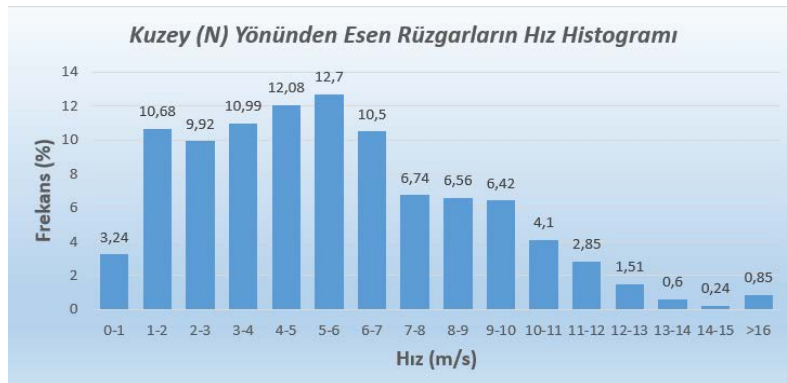
Bölge için elde edilen Şekil 7’de verilen esme süresi histogramında görülmektedir ki bölge, uzun süreli fırtınalara maruz kalmaktadır. Bu da açık deniz rüzgâr türbinlerinin fizibilite analizlerinde göz önüne alınan önemli bir parametre olan, rüzgâr hızı sürekliliğinin Bozcaada kuzey sahillerinde mevcut olduğunu göstermektedir.



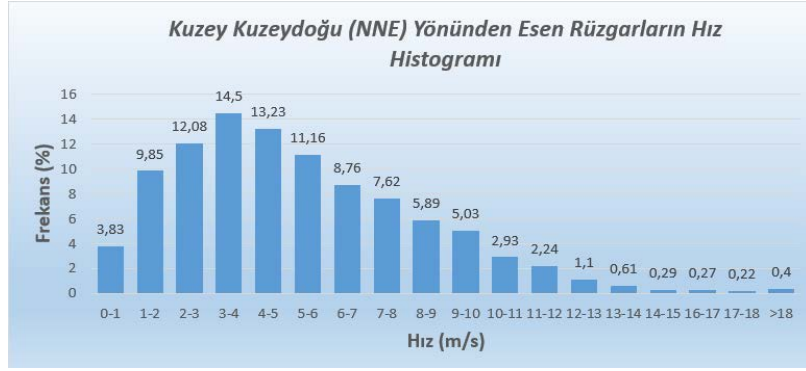
Şekil 7. Esmeye Süresi Histogramı

Yüzde 99 aşılıma olasılığına denk gelen hızlar belirlenmiştir. Her iki yön için de 14.50 m/s olarak kabul edilmiştir. Yine bu yönlerden esen kritik bir fırtına olup olmadığı incelenmiştir. Kuzey (N) ve Kuzey Kuzeydoğu (NNE) yönleri ayrı ayrı ana doğrultu kabul edilerek iki farklı feç boyu hesaplaması yapılmıştır.

Bölge için çıkartılan rüzgâr gülünde ve hız histogramında kuvvetli rüzgârların çoğunun Kuzey (N) ve Kuzey Kuzeydoğu (NNE) yönünden estiği görülmüştür. Kuzey (N) ve Kuzey Kuzeydoğu (NNE) yönünden esen rüzgârların daha iyi analiz edilebilmesi amacıyla, Şekil 8 ve Şekil 9’da görüleceği üzere o yönlerden esen rüzgârların hız histogramları çıkartılmıştır.



Şekil 8. Kuzey (N) Yönünden Esen Rüzgârların Hız Histogramı



Şekil 9. Kuzey Kuzeydoğu (NNE) Yönünden Esen Rüzgârların Hız Histogramı

3.4 FEÇ BOYLARININ HESAPLANMASI

Kuzey (N) yönünün ana doğrultu olması durumunda, Şekil 10'da Bozcaada kuzey açıklarındaki bir noktadan feç boyları bulunmuştur.



Şekil 10. Kuzey (N) Yönünün Ana Doğrultu Olması Durumunda Feç Boyları

Çizilen doğrultuların uzunlukları, ana doğrultu olan Kuzey (N) doğrultusu ile yaptıkları açının cosinüs değeri ile çarpılmıştır ve toplanmıştır. Bu değer, açılarının cosinüs değerlerinin toplamına bölünerek etkili feç kabarma boyu (F_{etk}) (1) no'lu denklem ile hesaplanmıştır.

$$F_{etk} = (\sum l_i \cdot \cos \beta_i) / \sum \cos \beta_i = 742,475 / 16,903 = 43,92 \text{ km} \quad (1)$$

Rüzgâr gerilme faktörü ise (2) no'lu denklem ile hesaplanmıştır.

$$U_A = 0,71 \cdot U^{1.23} = 0,71 \cdot 14,50^{1.23} = 19,04 \text{ m/s} \quad (2)$$

Çalışmada sınır koşul kabul edilen %99 aşılma olasılığı 30 saat üzerine denk geldiğinden, dalgalar feç boyu sınırlı dalga olarak nitelendirilebilir. Buna göre Şekil 11'deki nomogramdan belirgin dalga periyodu (T_p) 5,90 sn ve dalga yüksekliği (H_s) ise 2 m olarak okunmuştur.

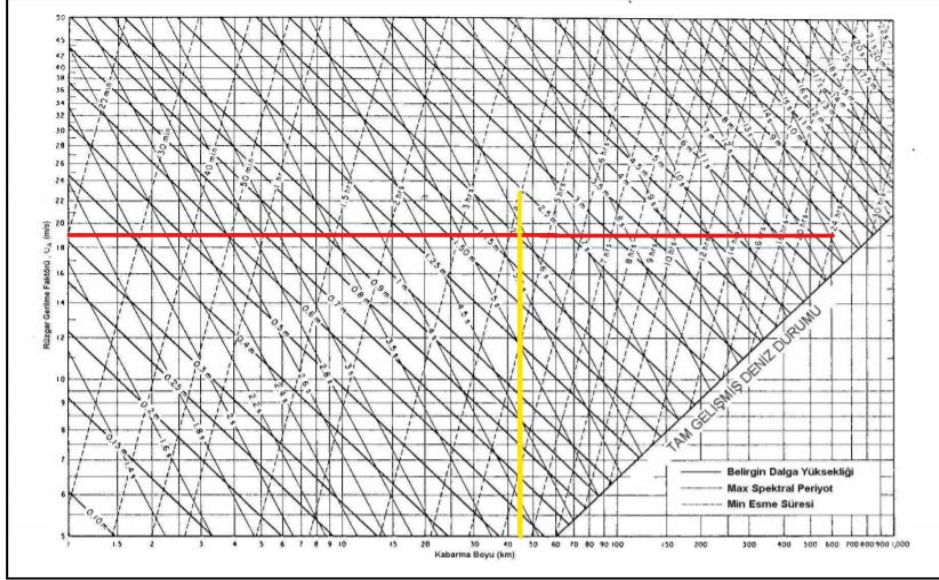
Kuzey Kuzeydoğu (NNE) yönünün ana doğrultu olması durumunda, Şekil 12'de Bozcaada açıklarındaki bir noktadan feç boyları bulunmuştur.

Etkili feç boyunun (1) numaralı denklem ile hesaplanmıştır:

$$F_{etk} = (\Sigma l_i \cdot \cos \beta_i) / \Sigma \cos \beta_i = 545,461 / 16,903 = 32,271 \text{ km}$$

Rüzgâr gerilme faktörünün (2) numaralı denklem ile hesaplanmıştır:

$$U_A = 0,71 U^{1.23} = 0,71 \cdot 14,50^{1.23} = 19,04 \text{ m/s}$$

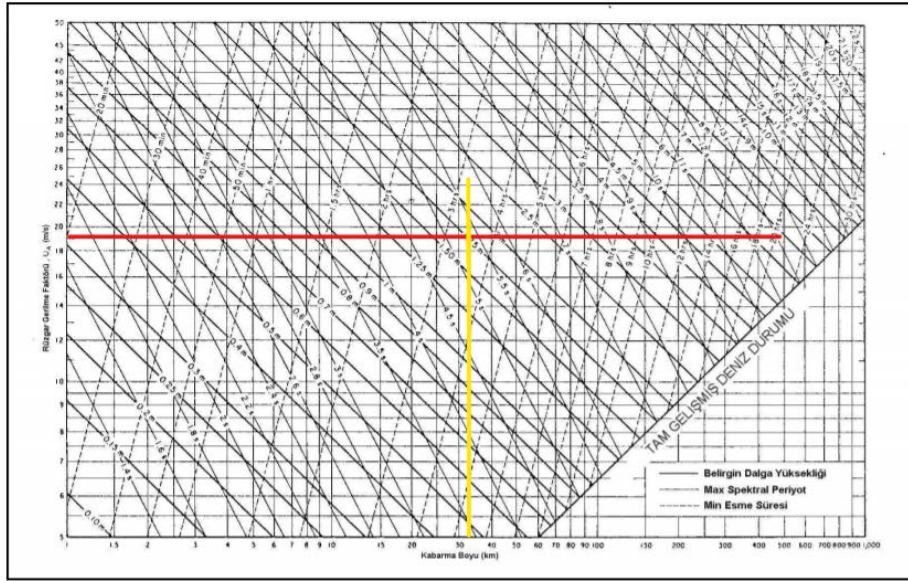


Şekil 11. Kuzey (N) Yönünün Ana Doğrultu Olması Durumunda SPM Yöntemi ile Dalga Tahmini Yapılması[27]



Şekil 12. Kuzey Kuzeydoğu (NNE) Yönünün Ana Doğrultu Olması Durumunda Feç Boyları

Çalışmada sınır koşul kabul edilen %99 aşılıma olasılığı 30 saat ve üzerine denk geldiğinden, dalgalar feç boyu sınırlı dalga olarak nitelendirilebilir. Buna göre Şekil 13'teki nomogramdan belirgin dalga periyodu (T_p) 5,45 sn ve dalga yüksekliği (H_s) ise 1,75 m olarak okunmuştur. Dalga yüksekliği ve periyodu görece büyük olan N (Kuzey) yönü çalışma devamında ana yön olarak kabul edilmiştir.



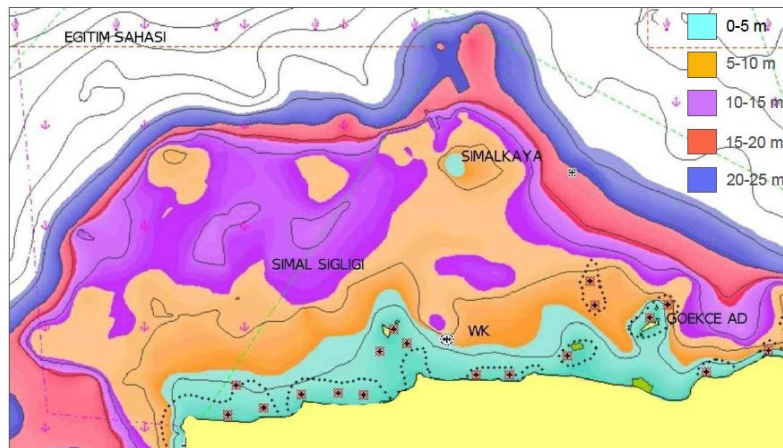
Şekil 13. Kuzey Kuzeydoğu (NNE) Yönünün Ana Doğrultu Olması Durumunda SPM Yöntemi ile Dalga Tahmini Yapılması[27]

Tablo 2. Yönlere Göre Pik Periyot ve Belirgin Dalga Yükseklikleri

ANA YÖN	F(km)	U(m/s)	Ua(m/s)	Tp(sn)	Hs(m)
N	43,927	14,500	19,043	5,900	2,000
NNE	32,271	14,500	19,043	5,450	1,750

3.5 BÖLGENİN BATİMETRİ HARİTASININ ÇIKARTILMASI

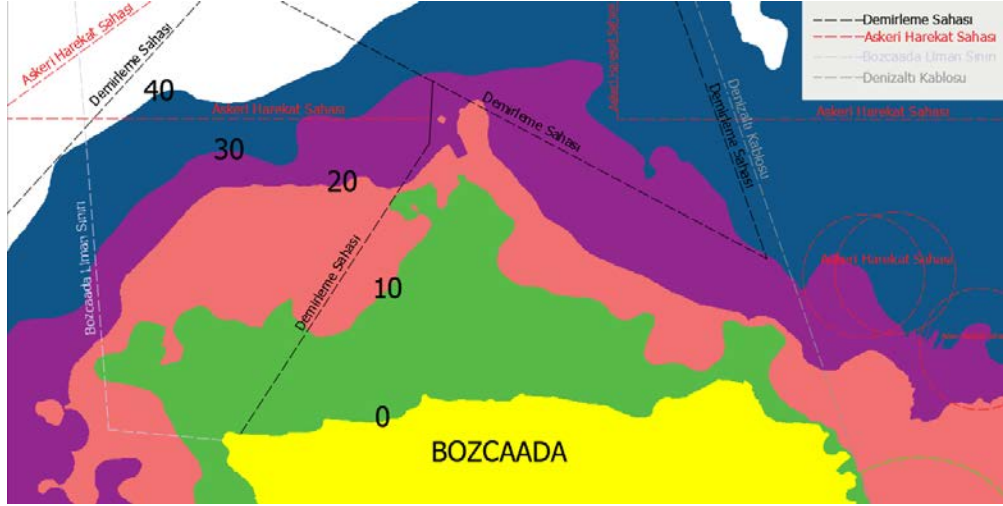
Çalışmada kullanılan tekil temeller 30-40 m derinliklere kadar uygulanabilmektedirler. Bozcaada Şimal Sığlığında kıta sahanlığı ve askeri bölge kısıtları sebebiyle türbin kurulumunun yapılabileceği maksimum derinlik 25 metredir. Şekil 14'teki batimetri haritasında da görülmektedir ki çalışmanın yapıldığı Bozcaada Kuzeybatı sahilleri ada genelindeki en sığ bölgedir.



Şekil 14. Şimal Sığlığı Bölgesi ve Bozcaada Kıta Sahanlığı Sınırları [28]

3.6 ASKERİ VE MİLLİ SINIRLAR, DENİZ ULAŞIM HATLARININ BELİRTİLMESİ

Şekil 15'te askerî harekât sahaları, Bozcaada liman sınırı, demirleme sahası, denizaltı kabloları batimetri haritası üzerinde gösterilmiştir. Milli sınır ise 25 metre derinlikle kısıtlıdır.



Şekil 15. Bozcaada Çevresindeki Askeri ve Milli Sınırlar, Deniz Ulaşım Hatları

3.7 BOZCAADAYI TEMSİL EDEN AKINTI HIZI VE YÖNÜNÜN BELİRLENMESİ

Kokkini vd. (2014) çalışmasında; Kuzey bölgesinde Gökçeada ve Limni adaları arasındaki boğazdan geçerek batı-kuzeybatıya dönen güçlü bir batıya doğru akıntının hâkim olduğu görülmüştür. Bölgenin güney alanına, nispeten zayıf Güney Batı yönündeki akımları hakimdir. Güney bölgedeki akışın sadece yaz sonlarında, zayıflayıp güneye dönmesi ve Çanakkale akıntısının Gökçeada sahilinden kopup güneydoğu yönüne dönmesiyle 0,5 m/s'yi aşacak şekilde yoğunlaşması dikkat çekicidir [29]. Bu bölgenin Bozcaadayı temsil ettiği düşünülebilir.

3.8 TÜRBİN SEÇİMİ

Mevcut çalışmalar ve rüzgâr atlasları incelendiğinde deniz seviyesinden 100 m yükseklikte Bozcaada kuzey açıkları ortalama rüzgâr hızı 9-10 m/sn aralığında olduğu görülmüştür. [11,20,25] Bu kapsamda da nominal güce ulaşma hızı 12,5 m/sn ve 11-12 m/sn olan 112-120 metre rotor çapına sahip 2 farklı türbinin teknik verileri incelenmiştir. Türbinlere ait veriler aşağıda verilmiştir [30,31].

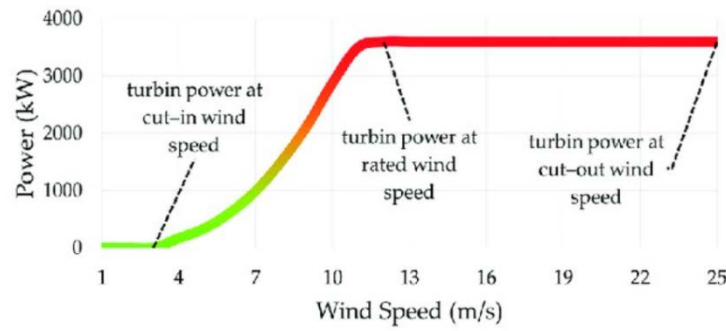
Siemens SWT-3.6-120 Açık Deniz Rüzgâr Türbini:

- Nominal Gücü: 3,6 MW
- Rotor Çapı: 120 m
- 3 Bıçaklı Yatay Eksenli
- Bıçak Uzunluğu: 58,5 m
- Cut-in Hızı (Rüzgâr Türbinin Devreye Girme Hızı) 3 m/s
- Cut-out Hızı (Rüzgâr Türbinin Devreden Çıkma Hızı): 25 m/s
- ReCut-in Hızı (Rüzgâr Türbinin Tekrar Devreye Girme Hızı): 23m/s
- Nominal Güce Ulaşılan Hız: 12-13 m/s
- Hub Yüksekliği: 90 m veya spesifik yüksekliklerde sipariş edilebilir.

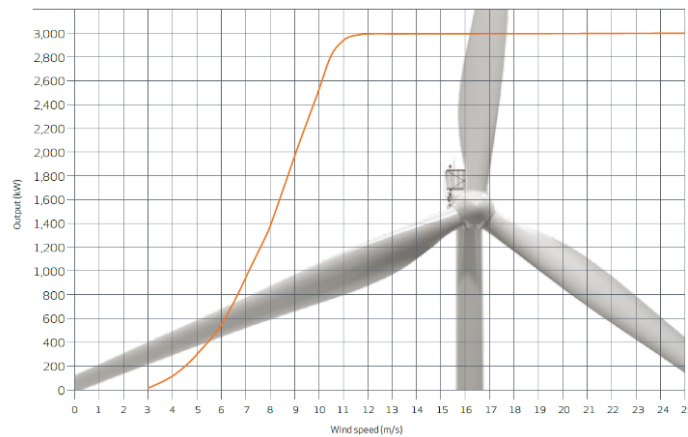
Vestas V112-3.0 MW Açık Deniz Rüzgâr Türbini:

- Nominal Gücü: 3,0 MW
- Rotor Çapı: 112 m
- 3 Bıçaklı Yatay Eksenli
- Bıçak Uzunluğu: 54,65 m
- Cut-in Hızı (Rüzgâr Türbinin Devreye Girme Hızı) 3 m/s
- Cut-out Hızı (Rüzgâr Türbinin Devreden Çıkma Hızı): 25 m/s
- ReCut-in Hızı (Rüzgâr Türbinin Tekrar Devreye Girme Hızı): 23m/s
- Nominal Güce Ulaşılan Hız: 12,5 m/s
- Hub Yüksekliği: Spesifik yüksekliklerde sipariş edilebilir

Şekil 16 ve Şekil 17’deki grafiklerden iki türbinin güç verileri ve nominal güce ulaşacağı rüzgar hızı değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bölgenin rüzgar ikliminin elde edilmesi, farklı yüksekliklerde oluşacak rüzgar hızlarının belirlenmesi, türbinler verim analizleri başlı başına bir araştırma konusu olup bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Bu çalışma kapsamında yapısal analizlere esas teşkil etmesi açısından türbin seçiminde için önceki çalışmalardan faydalanılmıştır. Siemens SWT-3.6-120 açık deniz rüzgâr türbini bölge için seçilmiştir.



Şekil 16. Siemens SWT-3.6-120’nin Rüzgâr Hızına Bağlı Olarak Ulaştığı Güç Değerleri [32]



Şekil 17. Vestas V112-3.0 MW’nin Rüzgâr Hızına Bağlı Olarak Ulaştığı Güç Değerleri [31]

3.9 AÇIK DENİZ RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIM YÜKLERİNİN BELİRLENMESİ

3.9.1 ZATİ YÜKLER (G):

- Rotor (jeneratör, göbek ve bıçaklar): 100 ton
- Nacelle: 125 ton
- Geçiş Parçası Ağırlığı: 245 ton
- Kule Zati Ağırlığı: Analizde belirlenecektir.

3.9.2 RÜZGÂR YÜKLERİ

Rüzgâr türbinine gelen rüzgâr kuvvetleri aşağıda belirtilen ASCE 7-05 yönetmeliğine göre hesaplanmıştır. Ancak özellikle rüzgâr türbini işletme halindeyken gelen rüzgâr kuvveti; türbülans durumu, makine mühendisliği ve akışkanlar mekaniği prensiplerine bağlı olduğu için çok daha karmaşık durumlar söz konusu olabilir. Yapılacak olan bir rüzgâr türbini tasarımında türbine gelen rüzgâr kaynaklı kuvvetlerin imalatçı firma tarafından kesin olarak elde edilmesi en doğrusudur. Ancak bunun mümkün olmadığı durumlarda mertebe açısından aşağıda gösterildiği şekilde bu kuvvetler hesaplanabilir. Karmaşık formülasyonlara değinilmeden, rüzgâr kuvvetleri basit bir rüzgâr kuvveti hesabı ile örnek kuvvetler olarak ele alınmıştır.

ASCE 7-05 yönetmeliğine göre rüzgâr hızına bağlı rüzgâr yükleri belirlenirken EN 1991-1-4'te olduğu gibi 10 metredeki referans rüzgâr hızından (V) faydalanır [33,34].

Rüzgâr hızı basıncı (q_z) (3) no'lu denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$q_z = 0,613K_zK_dK_{zt}V^2I \quad (3)$$

Bu denklemde;

K_z : hız basıncı etki katsayısı;

$$K_z = 4,572 \text{ m} \leq z \leq z_g \text{ için } 2,01(z/z_g)^{2/\alpha}$$

$$K_z = z < 4,572 \text{ m için } 2,01(4,572/z)^{2/\alpha}$$

Formülasyonda geçen z_g ve α değerleri Tablo 3'teki arazi maruziyet kategorisine göre belirlenir. ASCE 7-05 Tablo 6-4'e göre topografya faktörü (K_{zt}) açık araziler için 1,0; rüzgâr yönlülüğü katsayısı (K_d) dairesel kesitli kule yüzeyi için 0,95 alınabilmektedir. V ise referans rüzgâr hızını ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında analiz edilen rüzgâr verilerinde esme süresi 30 saatin üzerinde olan en büyük rüzgâr hızı değeri 23 m/sn olarak belirlenmiştir. Referans rüzgâr hızı olarak bu değer kullanılmıştır.

Tablo 3. Arazi Maruziyet Kategorilerine Göre Parametreler [33]

<i>In metric</i>										
Exposure	α	z_g (m)	$\frac{1}{a}$	$\frac{1}{b}$	$\frac{1}{\alpha}$	$\frac{1}{b}$	c	ℓ (m)	$\frac{1}{\epsilon}$	z_{min} (m)*
B	7.0	365.76	1/7	0.84	1/4.0	0.45	0.30	97.54	1/3.0	9.14
C	9.5	274.32	1/9.5	1.00	1/6.5	0.65	0.20	152.4	1/5.0	4.57
D	11.5	213.36	1/11.5	1.07	1/9.0	0.80	0.15	198.12	1/8.0	2.13

Arazi maruziyet kategorisi yassı, engelsiz alanlar ve kasırga eğilimli bölgeler dışındaki su yüzeylerini içeren D kategorisi seçilmiştir. z_g : 213,36 m, α : 11,5 olarak bulunmuştur.

$Z_{hub}=90$ m için;

Hız basıncı etki katsayısı;

$$K_z = 2,01(z_{hub}/z_g)^{2/\alpha} = 2,01 * (90/213,36)^{2/11,5} = 1,73$$

Birim alana gelen rüzgâr kuvveti:

$$q_z = 0,613 K_z K_d K_{zt} V^2 I = 0,613 * 1,73 * 0,95 * 1,00 * 23^2 * 1 = 532,949 \text{ N/m}^2$$

Türbin bıçağı üçgen kabul edilerek, türbinin bir bıçağına etki eden rüzgâr yükü;

- Türbin Bıçağının Etki Alanı;

$$A_{bıçak} = 0,5 B h = 0,5 * 58,5 * 4,2 = 112,85 \text{ m}^2$$

$$F_{bıçak} = q_z A_{bıçak} = 532,949 * 112,85 = 60143,3 \text{ N} \approx 6,13 \text{ ton}$$

Türbin kulesi yamuk kabul edilerek, türbinin kulesine etki eden rüzgâr yükü;

- Türbin Kulesinin Etki Alanı;

$$A_{kule} = 0,5(B+b)h = 0,5 * (6+3) * 90 = 405 \text{ m}^2$$

$$F_{kule} = q_z A_{kule} = 532,949 * 405 = 215844,345 \text{ N} \approx 22,00 \text{ ton}$$

olarak hesaplanmıştır.

3.9.3 DALGA YÜKLERİ

Dalga yükleri deniz yapılarında ele alınan en önemli çevresel yüklerden biridir Dalga yükleri için çeşitli dalga teorileri kullanılmaktadır. Deniz yapılarında günümüzde en çok tercih edilen dalga teorisi lineer teoridir. Bu çalışma kapsamında dalga yükleri bu teoriye göre incelenecek ve elde edilecektir. Lineer dalga teorisi yaklaşımıyla elde edilen maksimum dalga kuvveti 3 no'lu denklemden hesaplanmaktadır.

$$F_M = \emptyset m p g C_D D H_s^2 \quad (3)$$

$\emptyset_m$ katsayısını bulmak için, (4) no'lu formülden elde edilecek W değerine göre Dean (1956) tarafından hazırlanan $\emptyset_m$ abakları kullanılmaktadır. Şekil 18'de $W \geq 1$ değeri için kullanılan abak verilmiştir. Dalga yükü hesaplamalarında kullanılan formülasyonlarda ve abak okumalarında kullanılan terimler; su derinliği (d) 20 metre, periyot (T) 5,90 s, belirgin dalga yüksekliği (H_s) 2 m, C_M katsayısı 1,5, C_D katsayısı 0,7, kazık çapı (D) 7 metre olarak dikkate alınmıştır.

$$W = \left(\frac{C_M * D}{C_D * H_s} \right) \quad (4)$$

Bu parametreler doğrultusunda dalga yükleri aşağıdaki aşamalar halinde hesaplanır;

$$\frac{1,5 * 7}{0,7 * 2}$$

$$W = \left(\frac{C_M * D}{C_D * H_s} \right) = 7.5 > 1$$

olduğundan Şekil 18'deki abak kullanılmıştır.

$$\frac{H_s}{g * T^2} = \frac{2}{9,81 * 5,90^2} = 0,0059$$

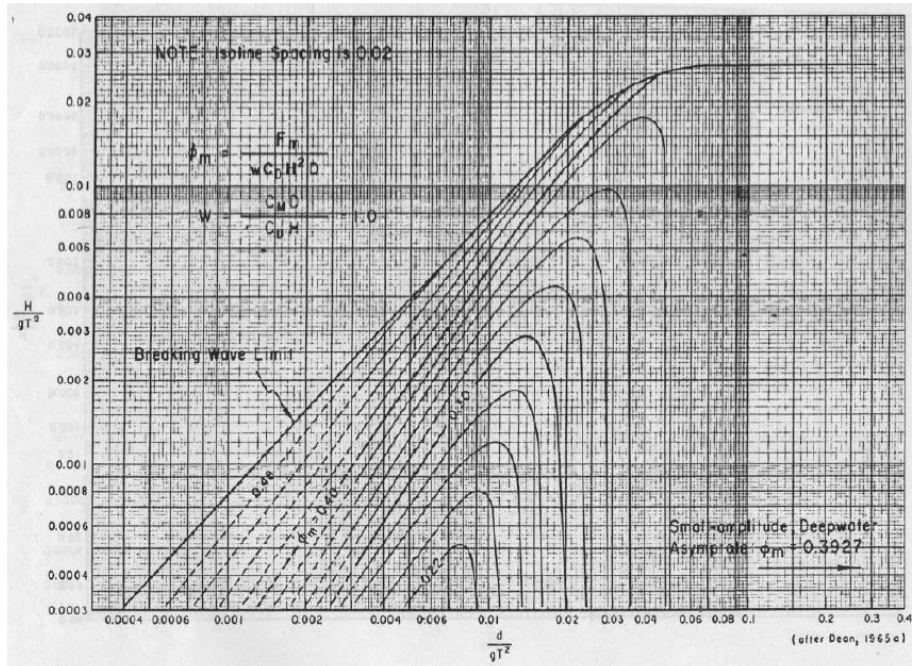
$$\frac{d}{g * T^2} = \frac{20}{9,81 * 5,90^2} = 0,059$$

$\phi_m = 0,3927$ değeri ilgili abaktan okunmuştur.

Dalga kuvveti;

$$F_M = 0,3927 * 1.025 * 9,81 * 0.8 * 7.0 * 2.00^2 = 88,45 \text{ kN} = 9,02 \text{ ton}$$

olarak hesaplanmıştır.



Şekil 18. $W \geq 1$ için ϕ_M Abağı [35]

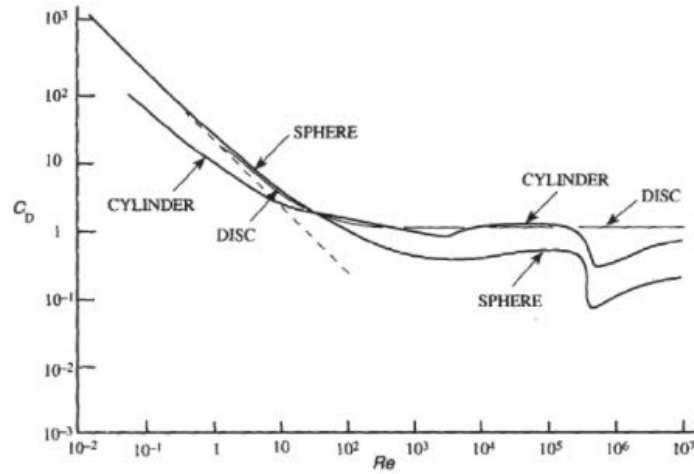
3.9.4 AKINTI YÜKÜ

Sığ sularda genellikle hidrodinamik yükün önemli bir bileşeni akımlardan gelmektedir. Dalga yükü hesaplamalarında (5) no'lu denklem kullanılarak hesaplanmıştır. (5) no'lu denklem'deki C_D (sürüklenme kuvveti sabiti) 0,55 olarak Şekil 19'daki abaktan Reynolds değeri ve silindirik tipte temel tipine göre okunmuştur.

$$F_{akıntı} = C_D \rho V^2 A \quad (5)$$

Akıntı yükü hesaplamalarında kullanılan formülasyonlarda kullanılan; etki alanı dikdörtgensel düşünülmüştür, kritik su derinliği (h) 20 m, kazık etkili genişliği (B) 7 m, akıntı hızı (V) 0,5 m/s

olarak dikkate alınmıştır. Kazığın görünen yüzünün alanı dikdörtgen kabulü yapılarak hesaplanmıştır.



Şekil 19. Sürüklenme Kuvveti Abağı[36]

İlgili parametreler kullanılarak elde edilen akıntı kuvveti:

$$F_{akıntı} = C_D \rho V^2 A = 0,55 * 1,025 * 0,5^2 * 140 = 19,73 \text{ kN} = 2,01 \text{ t} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

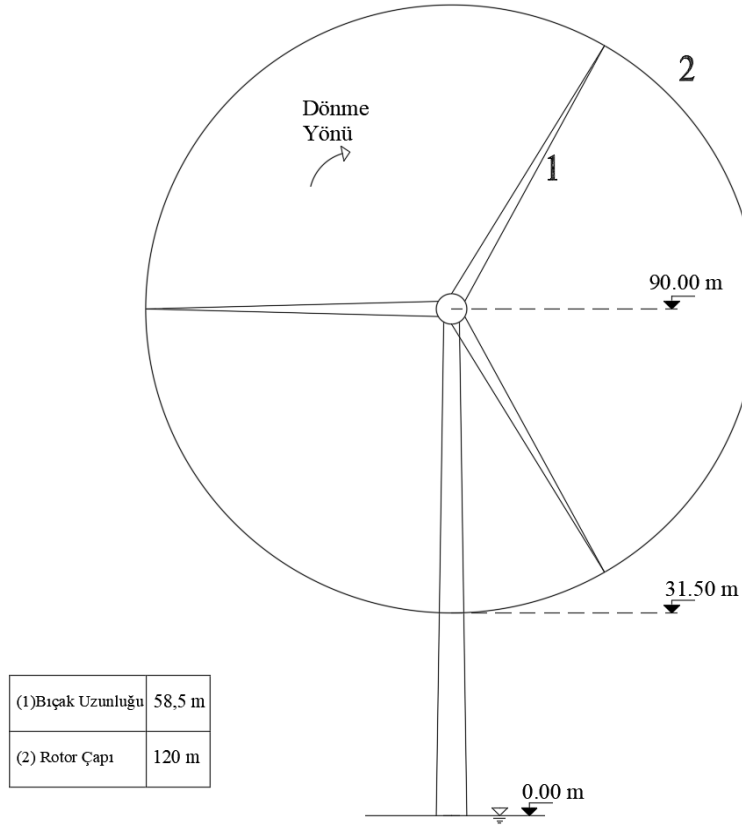
3.10 YAPISAL ANALİZ PROGRAMINDA STABİLİTE ANALİZLERİNİN YAPILMASI

Literatürdeki çalışmalara dayanılarak bölge için 40 metre gömülme derinliğinin uygun olacağına karar verilmiştir. [37,38] S355 türü çelik ile modelleme gerçekleştirilmiştir. Seçilen rüzgar türbinine uygun olarak 90 metre hub yüksekliği dikkate alınmıştır. Kazık çapı 7 metrelik içi boş dairesel eleman, kule çapı 6 metreden 3 metreye daralan içi boş konik eleman olarak modellenmiş ve et kalınlıkları 9 cm olarak alınmıştır. Türbin ön görünümü Şekil 20’de yer almaktadır. Çelik dizaynı AISC 360-10 yönetmeliği kapsamında ele alınmıştır [39]. Kanat ve rotor zati ağırlıkları tekil yük olarak etkililmiş, kule ağırlığı programda hesap edilmiştir.

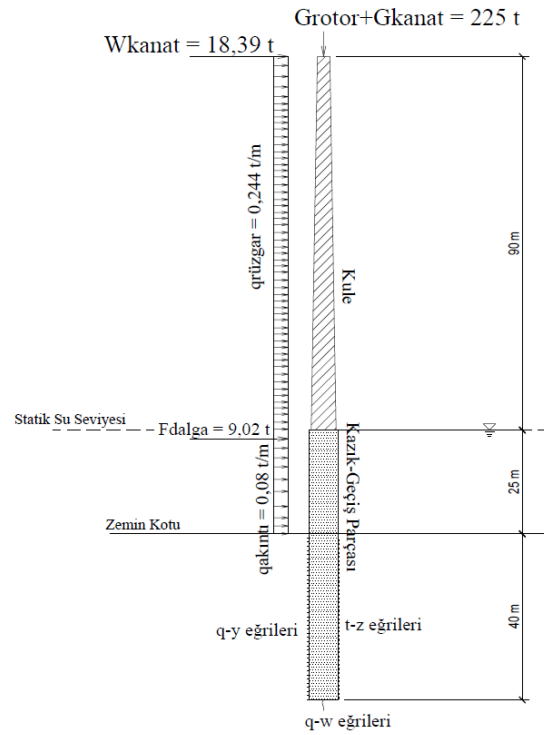
Zemin davranışını temsil etmek üzere q-y, t-z ve q-w eğrileri yatak katsayıları ile sisteme tanımlanmıştır. Zeminin gevşek kum olduğu kabulü ile hesaplamalar yapılmıştır. Ülkemiz özelinde dikkate alınması gereken deprem yükü, AFAD’ın Türkiye Deprem Tehlike Haritası üzerinden Bozcaada kıyıları için elde edilen deprem spektrumu ile modele etkilmiştir. Deprem etkileri TBDY 2018 yönetmeliği kapsamında ele alınmıştır [40].

Bölge batimetri haritasından faydalanılarak, askeri sınırlar dışında kalan, milli sınırları aşmayan maksimum derinlik değeri olan 25 metre su derinliği olarak kabul edilmiştir.

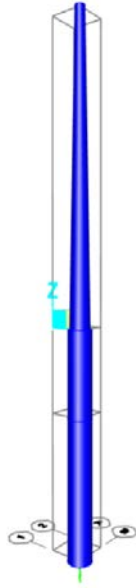
Şekil 21’de görüleceği üzere türbin modeline akıntı yükü, rüzgar yükü, dalga yükü, zati yük ve deprem yükleri etkilmiştir. Şekil 22’deki modelin çıktısı olarak moment, eksenel kuvvet ve kesme diyagramları elde edilmiştir. Şekil 23’te moment diyagramı bulunan türbinin, tekil temelinin zemine çakılı olan ve deniz suyu içerisinde kalan birleşim noktasında moment değerinin en yüksek olduğu belirlenmiş, bu bölgenin detaylı analizlerle tasarımının yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



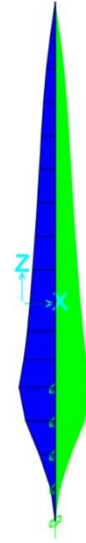
Şekil 20. Türbin Ön Görünümü



Şekil 21. Türbine Etkiyen Yükler



Şekil 22. Yapısal Analiz Modeli



Şekil 23. Türbinin Moment Diyagramı

4. SONUÇ

Açık deniz rüzgâr enerjisi, özellikle ülkemizin coğrafi özellikleri göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji açısından gelecek çalışmaların temelini oluşturmaktadır. Üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemizin, özellikle Ege Deniz'i rüzgâr potansiyeli açısından oldukça zengindir. Halihazırda ülkemizde mevcut durumda kurulu olan açık deniz rüzgâr türbini bulunmamaktadır. Çalışmamızın, Birleşmiş Milletlerin de öngördüğü gibi 2050 yılında zirveye ulaşacak olan enerji ihtiyacı probleminin çözümü için yol gösterici olacağı, ülkemizin dışa bağımlılığını azaltarak yenilenebilir enerji potansiyelini kullanmaya teşvik edeceği ve yapısal analizlerle de yatırımcılarda ön fikir oluşturabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında öncelikle açık deniz rüzgâr türbini hakkında genel ve çeşitli ülkeler ile Türkiye'deki rüzgâr türbinlerinin mevcut durumu hakkında bilgi verilmiştir. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin tasarımda izlenecek yol ve kriterler açıklanmıştır. Farklı kuruluşların yayımlamış olduğu rüzgâr atlasları ile konuyla alakalı yapılmış çalışmalar incelenmiş ve bu bağlamda tekil kazıklı açık deniz rüzgâr türbinleri için Bozcaada'nın kuzey kıyılarının uygun olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada yapısal tasarım ön planda tutulduğu için diğer türbinlerin eş zamanlı çalışmasından kaynaklanan iz etkileri gibi özel konular detaylı olarak ele alınmamıştır. Bu sebeple rüzgâr yükü tasarımı için konunun uzmanları veya türbin imalatçısı firmanın özel teknik şartnamesi veya özel yük tariflerinden elde edilen nihai rüzgâr kuvveti değerlerinin kullanılması nihai hesabın kesinliği açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada, özellikle yurtdışındaki şartnamelerden gerekli bölümler kullanılarak, türbine etkiyecek kuvvetler bulunmuş ve rüzgâr türbini bir yapısal analiz programında modellenerek bulunan kuvvetler uygulanmıştır.

Görece yeni bir kavram olan açık deniz rüzgâr enerjisi, Türkiye'de akademik araştırmalara son yıllarda konu olmaya başlamıştır. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin ülkemize uygulanabilirliği ve yapısal tasarımda göz önüne alınması gereken kriterlerle ilgili katılımcılara fikir vermek, bu alandaki yatırımların ve akademik araştırmaların artırılmasını teşvik etmek hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kaya, K. ve Şenel, M.C. ve Koç, E.,** (2018). Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi, *Technological Applied Sciences (NWSATAS)*, 13(3): 219- 234
- [2] **Papur, D., & Sohtaoğlu, N. H.** (2011). Fosil Yakıtların Tüketiminden Kaynaklanan Karbondioksit Salımlarındaki Eğilimler. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu* (s. 47-51). Elazığ: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası.
- [3] **Türkeş, M., Sümer, U. M. ve Çetiner, G.** 2000. Kyoto Protokolü Esneklik Mekanizmaları (Flexibility Mechanisms Under the Kyoto Protocol), *Tesisat Dergisi* 52: 84-100.
- [4] **Özmen, M. T.** (2009). Sera Gazı -Küresel Isınma ve Kyoto Protokolü. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 42-46.
- [5] **Guterres, A.** (2020, Aralık 16). Birleşmiş Milletler Türkiye . -: <https://turkey.un.org/tr/105318-dunyanin-en-acil-gorevi-2050-yilina-kadar-karbon-notr-olma-hedefine-ulasmak> adresinden alındı
- [6] (2016, Nisan 29). Blog, **GE Türkiye:** <https://geturkiyeblog.com/yenilenebilir-enerji-kaynaklari-cesitleri/> adresinden alındı
- [7] **Şenel, M. C., Koç, E.** 2015. “Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme,” *Mühendis Ve Makina*, Cilt 56, Sayı 663, S. 46-56
- [8] *Wind Energy in Europe 2020 Statistics And The Outlook For 2021-2025* (2021, Şubat 25). **Wind Europe:** <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-in-2020-trends-and-statistics/> adresinden alındı
- [9] **Global Wind Energy Council,** *Global Wind Report 2021:* <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf> adresinden alındı
- [10] **Iberdrola:**<https://www.iberdrola.com/label/wind-power> adresinden alındı
- [11] **Global Wind Atlas,** *Global Wind Atlas 2020.* <https://globalwindatlas.info/>
- [12] **Kutlu Y.** 2011. *Deniz Üstü Rüzgar Türbini Temel Tasarımı ve Türkiye’de Kazıklı Bir Uygulaması (Yüksek Lisans Tezi)*
- [13] **Van Bussel, G., & Zaayer, M.** (2001). Reliability, Availability and Maintenance aspects of large-scale offshore wind farms, a concepts study. *International Conference on Marine Renewable Energies*. Newcastle: Institute of Marine Engineers.
- [14] **Carriveau, R.** (2011). *Fundamental and Advanced Topics in Wind Powe* (s. 33). içinde *InTechOpen*.
- [15] **Huvaj, N., E. C., & Baidol, Y.** (2019). *Deniz Üstü Rüzgar Türbinleri: Temel Tipi Seçimi Ve Deniz Tabanı Zemin Araştırmaları*. 5. İzmir Rüzgâr Sempozyumu (s. 197-210). İzmir: TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- [16] **Kaya, B., & Oğuz, E.** (2019). *Tekil Kazık Temelli Açık Deniz Rüzgâr Türbinlerinin Avrupa’daki Gelişimi*. 5. İzmir Rüzgâr Sempozyumu (s. 175-196). İzmir: TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- [17] **Bailey, Helen & Brookes, Kate & Thompson, Paul.** (2014). *Assessing Environmental Impacts of Offshore Wind Farms: Lessons Learned and Recommendations for the Future*. Aquatic biosystems. 10. 8. 10.1186/2046-9063-10-8.
- [18] **BM Enformasyon Merkezi** UNIC-Ankara: <https://denizmevzuat.uab.gov.tr/uploads/pages/uluslararasi-sozlesmeler/denizhukuku.pdf> adresinden alındı
- [19] **Van Bussel, G. J. W., Zaaier, 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.
- [20] **Tortumluoğlu, M.İ., Doğan, M.** (2021). *Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri İçin Uygun Yer Seçim Kriterlerinin İrdelenmesi ve Kuzey Ege Kıyılarına Uygulanması*. *DEUFMD*, 23(67), 25-41.
- [21] **Snyder, Brian & Kaiser, Mark.** (2009). Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy. *Renewable Energy*. 34. 1567-1578. 10.1016/j.renene.2008.11.015.
- [22] *Gemini Wind Park:* <https://www.geminiwindpark.nl/details-mps.html#d1> adresinden alındı

- [23] **NVUTI-INFO**. (2019, Aralık 6). <https://nvuti-info.ru/tr/prazdniki/nazvaniya-postoyanno-deistvuyushchih-vetrov-skorost-sila-i-napravlenie-vetra/> adresinden alındı
- [24] **HYDROTAM 3D**. http://www.hydrotam.com/?page_id=782 adresinden alındı
- [25] **Güzel, B.** 2012. Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi, Fizibilite Adımları ile Bozcaada ve Gökçeada Örnek Çalışması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [26] **Bozal, Ö.** (2016). Navigasyona Hazırlık ve Geleneksel Navigasyon Yöntemleri. İstanbul: Yelkenci Makalesi.
- [27] **Dogan, Mustafa & Arisoy, Yalcin & Akyarli, Adnan.** (2007). Kıyı Mühendisliğinde Sayısal Uygulamalar.
- [28] A Garmin Brand, **Navionics** 2020. <https://webapp.navionics.com/?lang=en#boating@6&key=%7BrfqFciw%60F>
- [29] **Kokkını, Z., Potiris, M., Kalampokis, A., & Zervakis, V.** (2014). Hf Radar Observations Of The Dardanelles Outflow Current In North Eastern Aegean Using Validated Wera Hf Radar Data. *Mediterranean Marine Science*, 15(4), 753-768.
- [30] <https://pdf.archiexpo.com/pdf/siemens-gamesa/swt-36-120/88089-134487.html> adresinden alındı
- [31] **VESTAS**, https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/v112-3_45_mw#!facts adresinden alındı
- [32] **Ganea, Daniel & Amortila, Valentin & Mereuta, Elena & Rusu, Eugen.** (2017). A Joint Evaluation of the Wind and Wave Energy Resources Close to the Greek Islands. *Sustainability*. 9. 10.3390/su9061025.
- [33] **ASCE 7-05**, 2006. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers. / <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/003/asce.7.2002.pdf> adresinden alındı
- [34] **TS EN 1991-1-4** Yapılar Üzerindeki Etkiler - Bölüm 1-4: Genel Etkiler – Rüzgâr Etkileri TS No: TS EN 1991-1-4. Kabul Tarihi : 6.12.2007./ <https://dokumen.tips/engineering/ts-en-1991-1-4-eurocode-1-4.html> adresinden alındı
- [35] **Dean, R.** (1965). Stream function wave theory: Validity and application. *Santa Barbara Specialty Conference* (s. 269-299). ASCE.
- [36] **Caballero, Rony & Vega, Adan & Berbey-Alvarez, Aranzazu & Armada, Manuel.** (2014). Six Degree of Freedom Underwater Vehicle For Culvert Inspection.
- [37] **Njomo Wandji, W., Natarajan, A., Dimitrov, N. K., & Buhl, T.** (2015). Design of monopiles for multi-megawatt wind turbines at 50 m water depth. In European Wind Energy Association Annual Conference and Exhibition 2015, EWEA 2015 - Scientific Proceedings (pp. 8-12). European Wind Energy Association (EWEA).
- [38] **Basu, Dipanjan.** (2020). Offshore wind turbine monopile foundations: Design perspectives. *Ocean Engineering*. 213. 10.1016/j.oceaneng.2020.107514.
- [39] **AISC 360-10**, 2010. Specification for Structural Steel Buildings <https://www.aisc.org/globalassets/product-files-not-searched/historic-standards/a360-10r4w> adresinden alındı
- [40] **TBDY 2018**, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/89227ad223d3b7a_ek.pdf