

Karasal ve Deniz Üstü Rüzgâr Çiftliklerinin Ekonomik ve Çevresel Etkilerinin İncelenmesi

Ayşe Eylül Şentürk¹, Elif Oğuz^{1,2*}

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye
senturk.eylul@metu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4847-6396

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye

² Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM), ODTÜ, Ankara, Türkiye

*Sorumlu yazar: elifoguz@metu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3574-9436

ÖZET

Çevreye zarar vermeden üretilecek enerji günümüz insanların en önem verdiği konular arasında yer almaktadır. Bu yüzden, yenilenebilir enerji sistemlerinin geleneksel enerji sistemlerinin yerini alması gerektiği görüşü öne çıkmaktadır. Hangi yenilenebilir enerji sisteminin bir bölge için daha sürdürülebilir olduğuna karar verebilmek için kullanılan en önemli yöntemlerden biri yaşam döngüsü analizleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD), enerji üretim süreçlerinin tüm çevresel etkilerini incelemek üzere yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem; üretim, inşaat, işletme-bakım ve tasfiye-geri dönüşüm evrelerinin incelenmesinden oluşmaktadır. Bu çalışmada, iki farklı yenilenebilir enerji sistemi konfigürasyonu YDD metodu ile karşılaştırılmış olup, incelenen yenilenebilir enerji sistemlerinin dört fazı ele alınacak şekilde yaşam döngüleri çevresel açıdan değerlendirilmiştir. Seçilen sistemlerden ilki karasal rüzgâr santrali, ikincisi ise deniz üstü rüzgâr santralidir. Bu amaçla, Bozcaada bölgesi, pilot bölge olarak seçilmiş; Bozcaada'da 2000 senesinden beri işletilen karasal rüzgâr çiftliği ile bu bölgenin rüzgâr potansiyelinden daha fazla faydalanabilmek adına aynı bölgede kurulması muhtemel deniz üstü rüzgâr santrali incelenmiştir. Her iki konfigürasyon için de, enerji üretim süreçlerinin beşikten mezara değerlendirilmesinde Gabi yazılımı kullanılmıştır. Ekonomik açıdan karşılaştırma yapabilmek adına ise, her iki sistemin yaşam döngüsü maliyeti (YDM) hesaplanmıştır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) ve Yaşam Döngüsü Maliyeti (YDM) analiz yöntemleri bir bölge için düşünülen farklı yenilenebilir enerji sistemlerinin uzun dönemdeki ekonomik ve çevresel etkilerini belirlemek açısından pratik yöntemler olabileceğinden her iki sistem için analizler yapılmış ve bu analizlerin kıyaslaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, deniz üstü rüzgâr çiftliğinin daha maliyetli bir teknoloji olmasına rağmen, (asitleştirme haricinde) daha çevre dostu bir sistem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak, deniz üstü rüzgâr santralinin Bozcaada bölgesi için çevresel olarak daha uygun olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deniz üstü rüzgâr çiftliği, karasal rüzgâr çiftliği, rüzgâr enerjisi, yaşam döngüsü değerlendirilmesi (YDD), yaşam döngüsü maliyeti (YDM)

Makale geçmişi: Geliş 17/01/2020 – Kabul 18/05/2020

Environmental and Economic Analysis of Onshore and Offshore Wind Farms

Ayşe Eylül Şentürk¹, Elif Oğuz^{1,2*}

¹ Department of Civil Engineering, Hydraulics Laboratory, Middle East Technical University, Ankara, Turkey
senturk.eylul@metu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4847-6396

¹ Department of Civil Engineering, Hydraulics Laboratory, Middle East Technical University, Ankara, Turkey

² Center for Wind Energy Research (METUWIND) METU, Ankara, Turkey

* Corresponding author: elifoguz@metu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3574-9436

ABSTRACT

Energy production without destroying the environment is faced as one of the most popular issues of the world. Hence, the notion that the shift from traditional energy systems to renewable energy systems have become popular recently. One of the most important methods to be able to decide which renewable energy systems are sustainable for a specific region is life cycle analysis. Life cycle assessment (LCA) is a widespread method to evaluate environmental impacts of energy generation processes. LCA of energy production have four phases- namely, production, construction, operation-maintenance and decommissioning and recycling or disposal. In this study, all phases are considered for each configuration. Throughout the study, two different renewable energy systems are assessed. The first configuration is selected as onshore wind farm and the second one is offshore wind farm. For this purpose, Bozcaada Island is selected as a pilot area for the study. A possible offshore wind farm (to yield more wind energy) and onshore wind farm which has been operated since 2000 are compared by means of life cycle assessment and life cycle cost (LCC). Cradle-to-grave approach is applied for both configurations by utilizing GaBi. In order to create awareness that LCA and LCC are a practical tool to determine the environmental and economic impacts of energy generation systems in a long-term for a specific region, each configuration is assessed and then compared. Findings indicate that offshore wind farm is more environmental-friendly than onshore wind farm apart from acidification potential although offshore wind farm is more expensive technology than onshore counterpart.

Keywords: Offshore wind farm, onshore wind farm, wind energy, life cycle assessment (LCA), life cycle cost (LCC), wind energy

Article history: Received 17/01/2020 – Accepted 18/05/2020

1. Giriş

Küresel ısınma, bugün dünyanın en önde gelen sorunlarından birini teşkil etmektedir. Sera gazı salınımları, küresel ısınmanın en büyük nedeni olarak gösterilmektedir. Bu sebeple, sera gazı salınımlarının azaltılması (Schanes ve diğ., 2016), küresel ısınmanın yıkıcı etkilerini önleyebilmek için en önemli adımlardan biri olarak görülmektedir.

Yapılan araştırmalar küresel ısınmaya sebep olan sera gazı salınımlarının oldukça büyük bir kısmının insan faaliyetlerinden kaynaklandığını (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014; USGCRP, 2017; Karl ve Trenberth, 2003) göstermektedir. Bu bağlamda, literatürde insan kaynaklı sera gazı salınımlarının azaltılmasını hedefleyen ve bu hedefe ulaşmak için hemen hemen her mühendislik alanı açısından çevre dostu çözümler öneren birçok çalışma yer almaktadır. Örneğin, denizcilik sektöründe, çevre dostu gemi tasarlamak amacıyla güneş paneli entegrasyonu ve gemiler için çevre dostu bakım stratejileri incelenmiştir (Jeong ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2018; Jeong ve diğ. 2018). Konut sektöründe ise sera gazı salınımlarının azaltılması için, Enerji Verimliliği İşbirliği Uluslararası Ortaklık (IPEEC) tarafından sıfır enerjili bina mevzuatının (IPEEC Building Energy Efficiency Taskgroup, 2018) yayınlanmasının ardından; sürdürülebilir bina tasarımları için kendi enerjisini yenilenebilir teknolojilerle üreten binalar fikri tüm dünyada (Li ve diğ., 2013; Yuan ve diğ., 2013; Vourdoubas, 2018) kabul görmüştür. Yenilenebilir enerji sistemlerinin binalara entegrasyonunun başarılı sonuçlar vermesi ile birlikte, entegrasyonun daha büyük ölçekte düşünülmesini temel alan ve kendi enerji ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanan akıllı şehir uygulamaları (Köseoğlu ve Demirci, 2018; Örselli ve Akbay, 2019; Eremia ve diğ., 2017), 21. yüzyılda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Akıllı şehir uygulamalarında, mevcut konut sektöründe olduğu gibi uzun iletim hattı gerektiren geleneksel enerji üretim metotları yerine, yerel üretim sağlayan enerji üretim yöntemleri öne çıkmaktadır. Sosyal yaşamın içerisinde veya en azından sosyal yaşamın çok yakınında enerji üretimi yapılması gerekliliği ise, seçilen enerji üretim yöntemlerinin daha az sera gazı salınımı yaptığı düşünülen (Hernández ve diğ., 2019; Santoyo-Castelazo ve Azapagic, 2014; Hanafi ve Raman, 2015) yenilenebilir enerji sistemlerinden tercih edilmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Örnek olarak, Güney Kore için Hong ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışmada güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygınlaştırılmasının fosil yakıtlı enerji santrallerinin ürettiği sera gazı salınımlarını engelleyeceği belirtilmiş olup; benzer bulgular Türkiye için, Keleş ve Bilgen (2012) tarafından yürütülen çalışmada (Keleş ve Bilgen, 2012) elde edilmiştir.

Türkiye'nin enerji salınım konusunda özele inildiğinde, insan faaliyetleri sonucu oluşan küresel ısınma sebeplerinin en büyüğünü %49'luk (Hekimci, 2012; Kadioğlu, 2001) bir oranla enerji üretimi aktivitelerinin oluşturduğu göze çarpmaktadır. Bu sebeple, enerji üretiminin sürdürülebilir ve çevre dostu bir hale getirilmesi akla gelen en yakın çözümlerden biri olmaktadır (Bayraç, 2010; Şanlı ve Özekicioğlu, 2007). Ancak, literatürde ülke gibi büyük alanlar açısından en uygulanabilir yenilenebilir enerji sisteminin hangisi olduğuna karar verebilmek adına Türkiye için geliştirilmiş karar verme yöntemleri (Özkale ve diğ., 2017; Yılan ve diğ., 2019) yer almasına rağmen, sınırları belirlenmiş küçük ölçekte bir yatırım bölgesi için en temiz ve sürdürülebilir enerji kaynağının hangisi olduğuna yönelik yapılmış sınırlı sayıda yayın bulunmaktadır (Schmidt ve diğ., 2017; Oğuz ve Şentürk, 2019). Seçilen bir bölgenin birden fazla yenilenebilir enerji kaynağına sahip olması durumu, tüm dünya düşünüldüğünde her ne kadar çok karşılaşılan bir durum olmasa da; Türkiye coğrafyası için bahsi geçen durum, örneğin, Çanakkale (Bozcaada (Kalinci, 2015) ve Gökçeada (Demirören ve Yılmaz, 2010)) ve Hatay (Bilgili ve diğ., 2004) gibi hem yüksek rüzgâr, hem de yüksek güneş potansiyeli barındıran bölgelerde (Şengüler ve Yumurtacı, 2019) söz konusu olmaktadır. Bu sebeple, Türkiye gibi birden fazla yenilenebilir enerji potansiyeline sahip bölgelerin yoğun olduğu yerlerde, küresel ısınmayı azaltmak için yapılması gereken

yatırımların her yönden incelenmesi gerekliliği aşikârdır. Bu konuya örnek teşkil edebilecek bir çalışmada (Oğuz ve Şentürk, 2019), hem güneş enerjisi potansiyeli, hem de rüzgâr enerjisi potansiyeli açısından zengin olan Bozcaada'da; kurulu karasal rüzgâr çiftliğinin (R.Ç), söz konusu çalışmada önerilen şebekeye bağlı (on-grid) açık alandaki fotovoltaik sistemden daha sürdürülebilir ve ekonomik olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buradan hareketle, Bozcaada'nın yüksek rüzgâr potansiyelinin (Oğulata, 2003; İlkiliç, 2012) daha iyi değerlendirilmesi açısından önerilen deniz üstü rüzgâr sistemi bu çalışmada ele alınarak; önerilen deniz üstü rüzgâr çiftliği ile 2000 yılından beri işletmede olan karasal rüzgâr sistemi yaşam ömürleri boyunca çevreye yaydıkları emisyonlar bakımından ve ekonomik olarak karşılaştırılmıştır. Kıyaslama yapılırken, çevresel açıdan daha temiz sistemi belirlemek için, daha önce Atılğan ve Azapagic (2016) tarafından Türkiye'nin ulusal elektrik sisteminin çevresel etkilerini değerlendirmek üzere ve Polonya bölgesinde (Piasecka ve diğ., 2019) önerilen karasal ve deniz üstü rüzgâr çiftliklerinin karşılaştırılmasında kullanılan "Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)" yöntemi uygulanmıştır. Yaşam döngüsü değerlendirmesinin modellemelerinde, her iki sistem için GaBi yazılımı kullanılmıştır.

Çevresel açıdan inceleme ölçütleri; sera gazı salınımı (SGS), asitleştirme (asidifikasyon) potansiyeli (AP) ve ötrafikasyon potansiyeli (ÖP) olarak seçilmiştir. Kümülatif enerji talebi (KET) ve enerji geri ödeme süresi (EGÖS), çalışmada kullanılacak olan fonksiyonel birim MWh olacak şekilde seçilerek hesaplanmıştır. Bu arada, bahsi geçen terimlerin sonuçlar kısmında tanımlamaları yapıldıktan sonra, çalışmada elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Sonuçların elde edilmesinde ise CML 2001-Jan 2016 ölçütleri kullanılmıştır. Yapılan modellemeler sonucunda CML 2001-Jan 2016 ölçütleri ile değerlendirilen sonuçlar, fonksiyonel birime bölünerek Tablo 9'da özetlenmiştir.

Ekonomik olarak hangi sistemin avantajlı olduğunu belirlemek amacıyla, her iki sistem için de (Ristimäki ve diğ., 2013) "Yaşam Döngüsü Maliyeti (YDM)" hesaplanmıştır. Yaşam döngüsü maliyet hesabı için literatürden elde edilen bilgiler ışığında geliştirilen formüller kullanılmıştır. Kıyaslama esnasında ise, üretilen elektriğin birim maliyeti enerji birim maliyeti (EBM) olarak tanımlanmış ve fonksiyonel birim 'MWh' başına maliyet elde edebilmek adına tahmini üretim elektrik üretimine bölünmüştür. Böylece her iki sistem için enerji birim maliyeti (EBM) '\$/MWh' bulunarak, sistemler arasında kıyaslama yapılmasına olanak tanınmıştır.

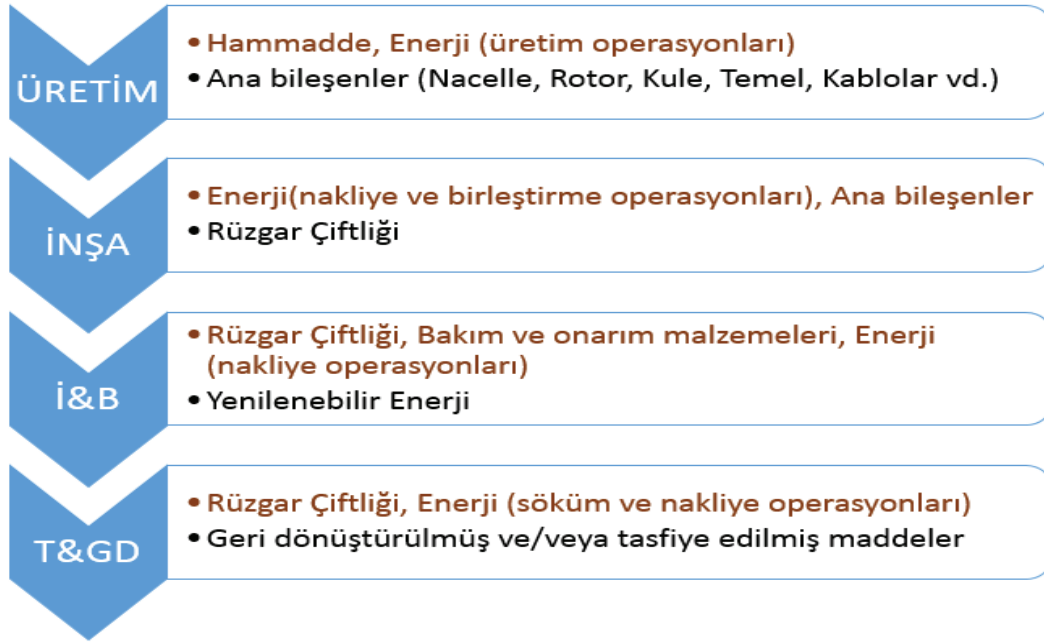
İkinci bölümde, ilk olarak YDD yöntemi açıklanmış ve daha sonra yöntemin uygulanacağı sistemlerin genel kabulleri ve özellikleri sunulmuştur. Bir diğer deyişle, yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) yönteminin anlatılmasını, rüzgâr çiftliği tanımları izlemiştir. Rüzgâr çiftlikleri için yapılması gereken özel kabuller ve özellikler karasal ve deniz üstü rüzgâr çiftliği bölümleri olarak ayrılan kısımlarda ilgili tablolarda gösterilmiştir. Üçüncü bölümde ise, yaşam döngüsü maliyeti (YDM) analizi açıklanmış ve gerekli formüller geliştirilerek her iki sistemin maliyet hesabı kıyaslamaya olanak sağlayacak bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Dördüncü bölüm değerlendirmeler kısmına ayrılırken, sonuçlar beşinci bölümde yer almıştır.

Bu çalışmada, rüzgâr enerjisi açısından hem karasal hem deniz üstü kurulumu yapılabilecek potansiyeli olan yatırım bölgelerinden biri olan Bozcaada'da, hangi tip kurulumun seçilmesi gerektiğine karar verebilmek için bahsi geçen sistemlerin çevresel ve ekonomik özelliklerinin incelenmesi ve kıyaslanması yaşam döngüsü değerlendirme ve yaşam döngüsü maliyet analizi ile gerçekleştirilmiştir. Deniz üstü rüzgâr çiftliği yatırımı konusunda başlangıç seviyesinde bulunan ülkemiz açısından, yapılacak yatırımlarda çevresel ve ekonomik olarak hangi adımlarda daha dikkatli olunması gerekeceğini göstermek açısından bu çalışmanın yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)

Yaşam döngüsü değerlendirme bir sistemin, ürünün veya sürecin çevresel özelliklerini incelemek amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

Yaşam döngüsü değerlendirme; üretim, inşaat, işletme ve bakım, işletmeden çıkartma (tasfiye) ve geri dönüşüm olarak Şekil 1'den de görüldüğü üzere 4 evrede incelenmiştir (Nugent ve Sovacool, 2014; Remimers ve diğ., 2014).



Şekil 1. Rüzgâr çiftliğinde yaşam döngüsü değerlendirme evreleri

Üretim Evresi

Ham madde çıkarımı ile başlayan bu faz altyapı malzemeleri ve bağlantı noktasına kadar kullanılacak tüm malzemelerin üretilmesi sürecini kapsamaktadır.

İnşa evresi

Gerekli tüm donanımların inşaat alanına nakliyesi ile başlayan bu evre, devreye alma işlemleri için yapılan test çalışmaları ile devam etmektedir. Tüm sistemin destekleme elemanları yardımıyla temel ile birleştirilmesini de kapsar. Diğer bir deyişle, sistemin işletmeye alınması ile sona erer.

İşletme ve bakım (İ&B) evresi

Elektrik üretimi ile başlayan, periyodik bakım ve kontrol işlemleri ve arıza onarım süreçlerini kapsayan yaşam döngüsü evresidir. (Kısaltma olarak İ&B, bu evreyi tanımlamak için tablo ve şekillerde kullanılmıştır).

İşletmeden çıkartma (ya da tasfiye) ve geri dönüşüm (T&GD) evresi

Enerji santralinin sökümü ile başlayan; parçaların geri dönüşüm ve tasfiye edilecekler olarak ayrılmasını içeren evredir. (Bu evrenin kısaltması olarak özellikle tablo ve şekillerde T&GD ifadesi kullanılmıştır).

Bu çalışmanın modellenmesinde GaBi Education sürümü ve dolayısıyla GaBi Education veri tabanı kullanılmıştır.

2.1. Rüzgâr Çiftliği Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Rüzgâr çiftlikleri, rüzgârın kinetik enerjisini türbinler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürürler. Türbinlerin konumlandığı saha açısından temelde ikiye ayrılır. Karasal rüzgâr çiftliklerinde, rüzgâr türbinleri kara üzerinde konumlandırılırken; açık deniz rüzgâr çiftliklerinde, rüzgâr türbinleri deniz kıyısı, göl gibi yerlere konumlandırılmaktadır. Literatürde kıyıda 10 kilometre mesafede kurulan deniz üstü türbinleri yakın kıyı (near-shore) olarak adlandırılırken; 10 kilometreden daha uzağa kurulan rüzgâr çiftlikleri uzak kıyı (farshore) olarak adlandırılmaktadır (Güzel, 2012). Bu çalışmada, Bozcaada'da hâli hazırda işletilen karasal rüzgâr çiftliği ile olası yakın kıyı deniz üstü rüzgâr çiftliği kıyaslaması yapılmıştır. Yakın kıyı rüzgâr çiftliği önerisinin en temel sebebi ise henüz Türkiye'de hiçbir deniz üstü yatırımının bulunmamasıdır.

Rüzgâr çiftliği için gerekli donanımlar; rüzgâr türbinleri, kule, temel inşaatı ile karasal rüzgâr çiftliği için bağlantı yolları ve deniz üstü rüzgâr çiftliği için denizaltı kabloları olarak sayılabilir. Kule her iki sistem için de en yakın özellikleri gösteren donanımdır. Çünkü deniz üstü rüzgâr çiftliğindeki kule tasarımı için tek farklılık deniz kaynaklı korozyona karşı alınması gereken önlemlerdir. Bunun dışında, her iki sistemin benzer özellikler gösteren ortak parçaları olmasına rağmen; yapılan bu çalışmada, seçilen türbinler mekanizmaları açısından farklılık göstermektedir. Her iki sistemde ortak olarak yer alan rüzgâr türbini parçaları ise, hareketli parçalar olarak da tanımlanan nacelle ve rotor olarak sayılabilir. Kule ve temel ise rüzgâr çiftliğinin sabit parçaları olarak literatürde yer almaktadır. Rüzgâr çiftliğinin her iki sistemde ortak bileşenleri olan kule, temel inşaatı, nacelle ve rotor tanımlaması yapıldıktan sonra sistemler, model tanımlamaları ve kabulleri için karışıklığa yol açmamak ve yaşam döngüsü envanterlerinin (YDE) doğru bir şekilde anlatılabilmesi adına karasal ve deniz üstü rüzgâr çiftliği olarak iki ayrı başlıkta ele alınmıştır.

Hareketli parçalar

Yukarıda da bahsedildiği üzere rotor ve nacelle bir rüzgâr çiftliğinin hareketli parçalarını oluşturmaktadır.

Nacelle

Rüzgâr jeneratörü, dişli kutusu ve frenlere yatak görevi yapan kısımdır. Üretiminde dökme demir, paslanmaz çelik ve alüminyum kullanılmaktadır. Bu çalışma özelinde hâlihazırda işletmede olan rüzgâr çiftliğini oluşturan Enercon E-40 rüzgâr türbininde direkt tahrik mekanizması kullanılması sebebiyle dişli kutusu yer almamaktadır (Owens, 2019).

Rotor

Türbin kanatları ve bu kanatların birleştirilmesi için gerekli olan pervane göbeğinden oluşan kısımdır. Üretimi için dökme demir, fiberglas ve epoksi kullanılır.

Sabit parçalar

Yukarıda da bahsedildiği üzere kule ve türbin temeli rüzgâr çiftliğinin hareketsiz (sabit) parçaları olarak tanımlanmaktadır.

Kule

Ana fonksiyonu, rüzgâr türbinini oluşturan hareketli parçaları (nacelle ve rotoru) taşımaktır. Üretiminde kullanılan başlıca malzeme olarak; düşük alaşımlı çelik ve beton sayılabilir. Deniz üstü rüzgâr çiftliğinde kullanılacak kule tasarımları, tuzlu suyun yaratacağı korozyon etkiye karşı ekstra önlemler alınmasını gerektirir.

Türbin temeli

Türbinin sabitlenmesi için gerekli olan, çelik ve/veya betondan üretilen kısımdır. Karasal rüzgâr türbinlerinde zemin yapısına göre temel malzemesi seçimi farklılık göstermektedir. Açık deniz veya deniz üstü rüzgâr çiftliklerinde ise, su derinliğine bağlı olarak tekil kazık temel (monopile) (Velarde ve Bachynski, 2017), ağırlık temel (gravity-based), üç kazıklı temel (tripod) (Kaldellis ve Apostolou, 2017), vakumlu kova keson temel (suction caisson), çok kazıklı temel yapılarından kazıklı temel ve kafes tipi temel (multipod (tripod and jacket)) (Oh ve diğ., 2018) ve yüzer (floating) (Oğuz ve diğ., 2018) tipi temeller kullanılmaktadır. Bu çalışmada, deniz üstü rüzgâr santrali için uygun bulunan temel tipi, daha önce Bozcaada için yapılmış bir çalışmada da tavsiye edildiği gibi (Oğuz ve İncecik, 2014) tekil kazıklı temel (monopile) olmuştur.

2.2. Karasal rüzgâr çiftliği

Bozcaada'nın batı yakasında yer alan işletmedeki karasal rüzgâr çiftliği Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu rüzgâr çiftliği 2000 yılında işletmeye alınmış olup, 17 adet çizgisel olarak dizilen Enercon E-40 (600 kW) rüzgâr türbininden (Turkish Wind Energy Association, 2018; Bilgili, 2009) oluşmaktadır. Kapladığı alan 20.560 m² olup, kurulu gücü 10,2 MW'tır. İşletmeci firma uzmanlarından alınan bilgiye göre türbinlerin kule yükseklikleri 44 m'dir. Sistemin merkez trafoya bağlantısı ise 9 km'lik yeraltı kabloları ile sağlanmıştır.



Şekil 2. BORES rüzgâr enerji santrali, Bozcaada. (<http://www.demirer.com.tr/santral/bores/index.html>)

Yaşam döngüsü değerlendirmesi doğası gereği bazı kabuller yapmayı gerektirir. Bu çalışma için karasal rüzgâr çiftliği ile ilgili gerekli kabuller Tablo 1'de sıralanırken, karasal rüzgâr çiftliğinin temel özellikleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Karasal rüzgâr çiftliği, Enercon E-40 tipi türbinlerden oluşmakla birlikte; üretici firma Enercon'un web sitesinde türbin yüksekliği ile ilgili herhangi bir özel bilgi yer almamaktadır. Bu yüzden, gerekli malzemeler için kütle değerleri daha önce başka bir bölge için yapılmış ve Enercon E-40 türbinleri içeren diğer bir yaşam döngüsü çalışmasından (Lee ve Tzeng, 2008) elde edilmiştir. Bozcaada'daki, işletmedeki santralin türbinlerinin kule yüksekliğinin 44 m olması dolayısıyla bahsi geçen çalışmadakinden farklı olan kule yüksekliği farkından kaynaklanan gerekli ağırlık değişimleri doğrusal enterpolasyonla revize edilmiştir.

Tablo 1. Karasal rüzgâr çiftliği kabulleri

Karasal rüzgâr çiftliği özellikleri ve yapılan kabuller		Açıklamalar
Kurulu güç	10.2 MW	
Santral alanı	20.560 m ²	Kurulu santral ile ilgili genel bilgiler
Yıllık elektrik üretimi	34 GWh	
Yararlı ömür	20 yıl	(Chipindula ve diğ., 2018)
Yaşam döngüsü envanteri için yapılan kabuller		Açıklamalar
Rüzgâr türbinine kadar yapılan üretimler	Almanya’da	Dökme demirin üretimi dâhil edilirken nakliyesi hariç tutulmuştur.
Elektrik şebekesi	Alman şebekesi	Almanya’da gerçekleşen üretim aşamaları için
Rüzgâr türbini nakliyesi	Kamyon	2640 km (Google Haritalar)
Rüzgâr türbini haricinde kalan diğer parçalar	Türkiye’de	Beton, kablolar ve eviriciler
Elektrik şebekesi	Bulgar şebekesi	Kullanılan yazılımda Türk şebekesi özellikleri bulunmadığında Türkiye’de gerçekleşen üretimler için
Rüzgâr türbinleri dışında kalan malzemelerin nakliyesi	Kamyon	Beton için 305 km, kablo ve eviriciler için 441 km
Tüm malzemelerin santral alanına nakliyesi	Kamyon ve feribot	Feribotla Bozcaada’ya, tırla santral sahasına
Devreye alma	Yunan şebekesi	Türk şebekesinin bulunmaması
İşletme ve bakım	Kamyon	3400 kg yağ değişimi

Beton malzemenin nasıl elde edildiğine dair bir bilgi edinilememiş ve beton malzemeler için nakliye mesafesi 305 km’lik kamyon ve 8 km’lik feribot yolculuğu yaptığı kabul edilerek, hesaplamalara dâhil edilmiştir.

Yaşam döngüsü değerlendirmesinin inşa evresi ise, malzemelerin nakliyesi ile başlamaktadır. Karasal rüzgâr çiftliğinin işletmeye alındığı zamanda Türkiye’de henüz bu tip türbin üretimi için kurulmuş bir fabrika olmadığından hem YDD hem de YDM yöntemleri için rüzgâr türbinlerinin Almanya’dan getirildiği kabul edilmiştir. Almanya’da bulunan Enercon firması ve Bozcaada’da bulunan santral arasındaki nakliyenin, 2640 km’lik kamyon ve 8 km’lik feribot yolculuğu ile gerçekleştirildiği kabul edilmiştir. Bu kabullerin yapılmasında; mesafe ölçümleri için, Google Haritalar kullanılmıştır. Kablo ve eviricilerin işletmecisi firmanın Bilecik’teki kendi kablo fabrikasında üretilmiş olduğu kabulü ile birlikte; kablo ve eviriciler için gerekli nakliye mesafesi 441 km’lik kamyon ve 8 km’lik feribot yolculuğu olarak hesaplamalara dâhil edilmiştir.

Çalışma esnasında yapılan en genel kabul olarak; nakliye mesafeleri santrali oluşturan ana parçalar (rüzgâr türbini, rotor, nacelle, kule ve temel yapımında kullanılan beton malzemeler) için göz önünde bulundurulmuştur. Örnek vermek gerekirse, nacelle üretimi için kullanılacak olan dökme demirin kat ettiği nakliye mesafesi, üretimi için geçirdiği işlemler dikkate alınmasına rağmen, hem yaşam döngüsü değerlendirmesi için yapılan modellemeye, hem de yaşam döngüsü maliyet analizine dâhil edilmemiştir.

Tablo 2. Karasal rüzgâr çiftliğinin temel özellikleri

Karasal rüzgâr çiftliğinin konumu	Adanın batı yakasında
Türbin sayısı	17
Türbinin anma gücü	600 kW
Türbinler arası ve merkez trafoya kadar yer altı kablo mesafesi	9 km
Rotor çapı*	43,7 m
Kule yüksekliği	44 m

*<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/68-enercon-e-40-6.44>

2.2.1. Karasal rüzgâr çiftliği yaşam döngüsü envanteri (YDE)

Anma gücü -anma rüzgâr hızında tam yükte çalışan türbinin üretim kapasitesi- 600 kW olan 17 adet Enercon E-40 türbinin özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Yaşam döngüsü değerlendirmesinin ilk evresi olan üretim evresinde; rüzgâr çiftliği için gerekli olan bileşenler, Tablo 3'teki özellikleri taşıyacak şekilde ham maddelerinden üretilmiştir.

İkinci evre olan inşaat aşamasında ise; hareketli parçaların montajı için gerekli olan vinç, modellemede kullanılan yazılımda bulunmadığından, ağır iş makinesi olarak programda bulunan ekskavatör bu süreçteki modellemede temsili olarak kullanılmıştır. Santralin devreye alınması ile inşaat aşaması sona erdirilmiştir.

Tablo 3. Enercon E-40 türbininin özellikleri*

Anma gücü	0,60 MW
Kule yüksekliği	44.00 m
Rotor ağırlığı	8.27 ton
Nacelle ağırlığı	19.77 ton
Kule ağırlığı	29.91 ton
Temel ağırlığı	220.00 ton
Toplam ağırlık	277,95 ton

*(Lee ve Tzeng, 2008)'ten uyarlanmıştır.

Kullanım evresi olarak da adlandırılan işletme ve bakım evresinde ise; yararlı ömür boyunca santralin ürettiği elektrik miktarı, (yıllık 34 GWh'lık elektrik üretimi dikkate alınarak) 680 GWh olarak hesaplanmıştır. Karasal rüzgâr çiftliğinde yapılan bakımlardan biri olan, periyodik bakım ve kontrollerinden biri olan göz muayenelerinde herhangi bir malzeme akışı gerçekleşmemektedir (Owens, 2019; Zeinali ve Keysan, 2019). Karasal rüzgâr çiftliğini oluşturan Enercon E-40 türbinlerinin, her ne kadar dişli kutusu içermemesi sebebiyle diğer rüzgâr türbinlerine göre yağlama ihtiyaçları daha az olsa da, yağlama bakımı; ikinci tip periyodik bakım olması açısından, bu tip santrallerde de önem taşımaktadır. Bu yüzden işletmedeki rüzgâr türbininin yararlı ömrü boyunca 3400 kg yağ kullanılacağı kabul edilmiş ve yağlama operasyonu için toplam 300 km'lik nakliye mesafesi öngörülmüştür. Üçüncü tip periyodik bakım ise, yılda iki kere (Owens, 2019; Chan ve Mo, 2017) olmak üzere mekanik parçaların kontrolünün yapıldığı mekanik bakımdır. Son olarak dördüncü tip periyodik bakımda ise, elektronik aksamlar kontrol edilmektedir. Üçüncü ve dördüncü tip periyodik bakımlar ile arıza onarım bakımları malzeme akışı açısından birlikte değerlendirilmiş ve yararlı ömrü boyunca rüzgâr türbininin hareketli parçalarında %1'lik bir değişim olacağı varsayılarak; işletme ve bakım evresinin malzeme akışları buna göre modellenmiştir. Bu parçaların üretim evresinde yedeklendiği kabul edilmiş; bu yüzden işletme ve bakım evresinde, bu parçaların sadece nakliyesi önemsenmiştir. Arıza onarım ve periyodik kontrol

bakımları için toplam 300 km'lik nakliye mesafesi öngörülmüştür. Bağlantı yollarının bakımı, bu çalışmada, tahribat oluşturacak trafik yoğunluğu olmadığı için dikkate alınmamıştır.

Dördüncü evre olan tasfiye veya geri dönüşüm evresinde, öncelikle rüzgâr çiftliği kule, nacelle, rotor, temel ile eviriciler ve kablolardan gelen elektronik parçalara bölünecek şekilde sökülülmüştür. Temel bileşeni, karasal rüzgâr türbininin sökümü sonrasında, gelecek yatırımlar adına (Andersen ve diğ., 2014) ve Haapala ve Prempreeda'nın çalışmasında da (Haapala ve Prempreeda, 2014) tavsiye edildiği gibi, inşa alanında bırakılmıştır. Diğer bileşenler ise hammaddelerine göre sınıflandırılmıştır. Sınıflandırılan bu maddeler hurda olarak değerlendirilmek veya imha edilmek üzere ayrılmıştır. Sürecin başında tüm rüzgâr çiftliğini oluşturan maddelerin ağırlığı teker teker hesaplanarak demir, kompozit, beton ve alüminyum malzemeler hurda olarak ayrıştırılmıştır. Uygulanan yaşam sonu işlemleri aşağıda yer alan Tablo 4'te özetlenmiştir. Modelleme aşamasında ise, yazılım içinden gerekli süreçlerin oluşturulması ile üretim aşamasına geri döndürülmeyecek şekilde, ayrıştırılan tüm malzemeler için ömür sonu işlemleri uygulanmıştır.

Tablo 4. Karasal rüzgâr çiftliğinde ömür sonu işlemleri

Bileşen ismi	Uygulanan işlem	Oran (%)	Ayrıştırılan malzeme	Bileşen kütlesi
Nacelle+kule	Katı atık	10	Demir	845 ton
	Geri dönüşüm	90		
Rotor	Katı atık	100	Kompozit	142 ton
Temel	Katı atık	100	Beton	3.740 ton
Elektronik parçalar	Katı atık	5	Alüminyum	132 ton
	Geri dönüşüm	95		

2.3. Deniz üstü rüzgâr çiftliği

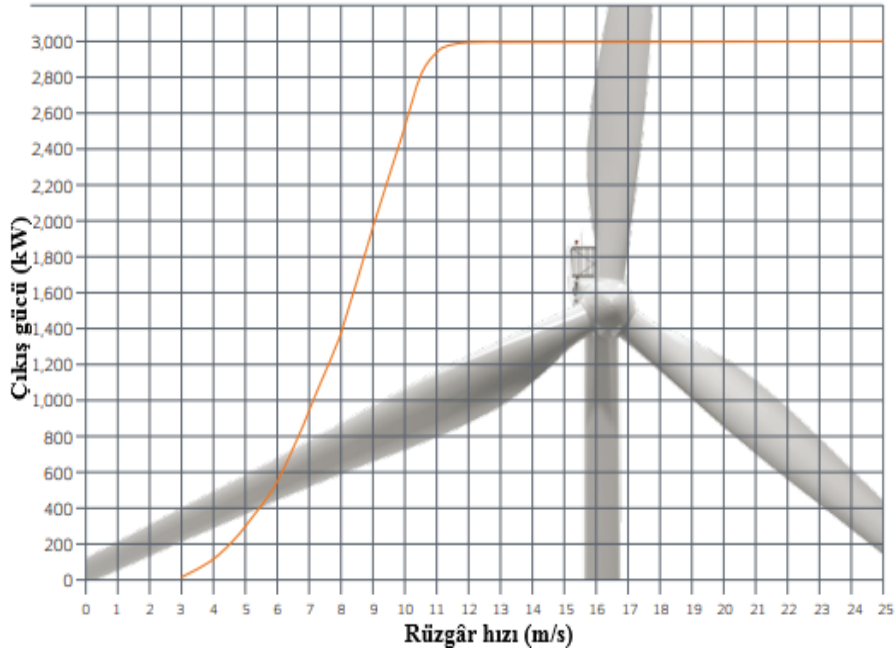
Deniz üstü rüzgâr çiftliği, Bozcaada'nın rüzgâr potansiyeli açısından (Argin ve diğ., 2019) değerlendirilmesi gerektiği düşünülen bir diğer elektrik enerjisi üretim yöntemidir. Daha önce de konu ile ilgili yapılan çalışmalar olmakla (Güzel, 2012; Satir ve diğ., 2018) beraber; Bozcaada çevresinde yapımı planlanan deniz üstü rüzgâr santralının çevresel olarak yararlı ömrü boyunca incelenmesi ilk kez bu çalışmada ele alınmış bulunmaktadır.

Çalışma esnasında deniz üstü rüzgâr enerji santralının yararlı ömür süresi karasal rüzgâr çiftliğinde olduğu gibi 20 yıl (Chipindula ve diğ., 2018) olarak öngörülmüştür. Çalışmanın sınırlarını belirleme amaçlı yapılan deniz üstü rüzgâr türbini ile ilgili diğer kabuller Tablo 5'te sıralanırken; çalışma için Vestas V112-3MW türbin modeli seçilmiş ve bu model türbinin temel özellikleri Tablo 7'de özetlenmiştir. Kule yüksekliği, (Satir ve diğ., 2018) 94 m yükseklikte konumlandırılacak olan türbinler için ortalama rüzgâr hızının 9,1 m/s olacağı bilgisi ışığında 94 m olarak kabul edilmiştir.

Deniz üstü rüzgâr çiftliği için de, karasal rüzgâr çiftliğinde olduğu gibi, çizgisel dizilim öngörülmüş olup, türbin yerleşiminin hakim rüzgâra karşı yanal dizilimde olacak şekilde yapıldığı varsayılmıştır. Bu yüzden, türbinler arası mesafenin, türbinlerin iz etkisinin minimize edilmesi amacıyla 5 rotor çapı (Öksel ve diğ., 2016) mesafeye konumlandırılması ve dolayısıyla türbinler arası kullanılacak olan kablolama mesafesinin 1120 m olacağı öngörülmüştür. Türbinler arası kablolama için 33 kV'lık kabloların tercih edildiği kabul edilmiştir.

Literatürde yer alan deniz üstü rüzgâr çiftliği çalışmasında (Huang ve diğ., 2017), enerji santrali kapasitesi 30 MW'tan küçük olduğunda deniz üstünde bir alt istasyon yapılması gerekliliği bulunmadığından bahsedilmektedir. Yine aynı çalışmada, santral kapasitesinin 30 MW ve 120 MW arasında değiştiği durumda bile, alt istasyon inşasının anlamlı olması için; açık deniz rüzgâr çiftliğinin karaya olan uzaklığının 10 kilometreden fazla olması, bir diğer deyişle; uzak kıyı olarak tasarlanması (Güzel, 2012) gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, kıydan uzaklık 10 kilometre olarak (Güzel, 2012; Huang ve diğ., 2017) sabitlenmiş olduğundan, denizde kurulacak alt istasyonun gerekliliği bu kabulde birlikte ortadan kaldırılmıştır.

Deniz üstü santrallerinde, elde edilen elektriğin karaya iletimi sırasında kullanılan kablolar dolayısıyla ortaya çıkan iletim kayıpları bulunmaktadır. Bu kayıpları önlemek için, literatürde geliştirilen 2 yol yer almaktadır. Bunlar; yüksek gerilimli alternatif akım (HVAC) ve yüksek gerilimli doğru akım (HVDC) iletim hatlarıdır. 100 km'den kısa iletim gerektiren (Kirby ve diğ., 2002) ve çok büyük olmayan rüzgâr santrallerinde (Torres Olguin R.E., 2014), kullanılan geleneksel yöntem olarak yüksek gerilimli alternatif akım (HVAC) tercih edilmesi sebebiyle ve daha önce aynı bölge için yapılmış çalışmada da tercih edildiği (Köroğlu ve Ülgen, 2018) gibi; bu çalışmada da, kablolama yöntemi HVAC olarak tercih edilmiştir.



Şekil 3. Vestas V112-3MW Deniz Üstü Türbininin Güç Diagramı *

* https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/v112-3_45_mw#!

Türbin yerleşimi için kabul yapılmış olduğundan; yıllık elektrik üretim miktarı, Vestas 112-3MW türbininin önerilip incelendiği bir çalışmadan (Güzel, 2012) türbin başına 14 GWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Seçilen kule yüksekliği için, ortalama rüzgâr hızının 9,1 m/s olduğu (Satir ve diğ., 2018) bilindiğinden, yıllık enerji üretim tahmininin, Şekil 3 ve Tablo 5'ten de anlaşılacağı üzere üretici firmanın öngördüğü değerlerden daha düşük bir değeri işaret etmesine dikkat edilmiştir.

Tablo 5. Vestas V112-3MW Deniz Üstü Türbini Yıllık Enerji Üretimi *

Rüzgâr hızı (m/s)	Yıllık Tahmini Enerji Üretimi (MWh)
8,5	13.402
9	14.311
9,5	15.119
10,0	15.826

*https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/v112-3_45_mw#!

Türbinlerden üretilen elektriğin toplanıp anakaraya iletilmesi için, 132 kV kablolardan oluşan kablolama mesafesi 10 kilometre olarak kabul edilmiştir (Tsai, 2013). Vestas rüzgâr türbinlerinin yağlama ihtiyacı ile ilgili bilgiler Türkiye’de bulunan ve bu marka türbinleri karada kullanan işletmeciler firmalardan elde edilmiştir.

2.3.1. Deniz üstü rüzgâr çiftliği yaşam döngüsü envanteri (YDE)

Deniz üstü rüzgâr çiftliğinin yaşam döngüsü değerlendirmesi amacıyla evrelerinin oluşturulmasında da karasal rüzgâr çiftliği için izlenen süreçler takip edilmiştir. Farklı olan basamaklara kısaca değinmek gerekirse; Vestas 112-3MW türbin için üretilen dişli kutusu, rüzgâr jeneratörü, rotor ve nacelle üretimi Avrupa’nın farklı bölgelerinde gerçekleştiği için, üretim evresi için yapılan modellemede Avrupa ortak elektrik şebekesi kullanılmıştır. Rotor kanatlarının İtalya’dan ve nacellelerin Danimarka’dan tedarik edilmesi; yani, farklı bölgelerden getirilen malzemelerin olması, nakliye masraflarının hesaplanabilmesi için nakliye mesafelerinin ayrıca not edilmesini gerektirmiştir. Karasal rüzgâr çiftliğinden farklı olarak, temel döküldükten sonra deniz dibine ilave edilmesi gereken çakıl literatürde deniz üstü rüzgâr çiftliğinin hareketli parçaları arasına eklenmiştir (Tsai, 2013).

Tablo 6. Deniz üstü rüzgâr çiftliği özellikleri ve yapılan kabuller

Deniz üstü rüzgâr çiftliği için kabuller		Açıklamalar
Yararlı ömür	20 yıl	(Chipindula ve diğ., 2018)
Kurulu güç	9 MW	Vestas V112-3MW
Türbin sayısı	3	Çizgisel dizilim
Türbin yerleşimi		Rüzgâra karşı yanal dizilim
Türbinler arası mesafe	5 rotor çapı (1120 m)	33 kV denizaltı kablo (Öksel ve diğ., 2016)
Türbinlerin kıydan uzaklığı	10 km	Alt istasyon yok (Huang ve diğ., 2017)
Kullanılan kablolama teknolojisi	Yüksek voltajlı alternatif akım (HVAC) (Köroğlu ve Ülgen, 2018)	
Anakaraya iletim hattı	10 km	132kV denizaltı kablo (Tsai, 2013)
Merkez trafoya iletim hattı	9 km	132 kV kablo (Oğuz ve Şentürk, 2019)
Su derinliği	30 m	(Satir ve diğ., 2018)
Yıllık elektrik üretimi	42 GWh	Türbin başına 14 GWh kabulüyle (Güzel, 2012)
Temel tipi seçimi	Tekil kazık temel	(Oğuz ve İncecik, 2014)
Yaşam döngüsü envanteri için yapılan kabuller		Açıklamalar
Santralin devreye alınmasına kadar olan üretimler (temel ve kule hariç)	Avrupa ortak elektrik şebekesi	Dökme demirin üretimi dâhil edilirken nakliyesi hariç tutulmuştur.
Türbinler arası kablolama	33 kV denizaltı kablo	29 t/km (Birkeland, 2011)
Anakaraya bağlantı kablolama	132 kV denizaltı kablo	88 t/km (Birkeland, 2011)
Devreye alma	Yunan şebekesi	Türk şebekesinin yazılımda yer almaması
İşletme ve bakım	Alt istasyon bulunmadığından karadan gemi ile ulaşım	
Yağ değişimi	Türbin başına ömür boyunca 3 kez	15.570 kg

İnşa safhası için kullanılan metot, programın sınırlılıkları nedeniyle deniz ulaşımı için gerekli olan feribot nakliyesi dışında aynen uygulanmıştır.

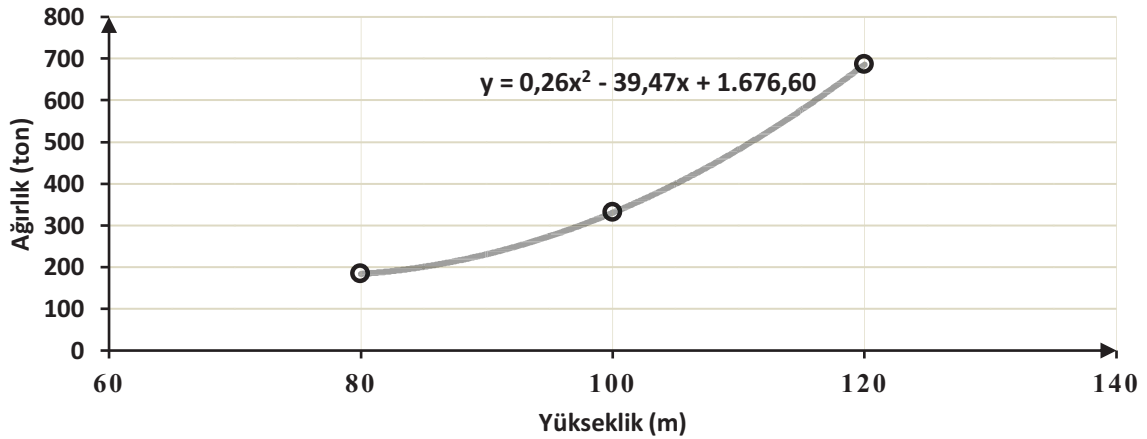
Tablo 7. Vestas V112-3MW türbin özellikleri ve nakliye mesafeleri

Anma gücü	3 MW
Rotor çapı	112 m
Kule yüksekliği*	94 m
Rotor ağırlığı (türbin başına)	49,18 ton
Nacelle ağırlığı (türbin başına)	92,63 ton
Kule ağırlığı (türbin başına)**	264,38 ton
Temel ağırlığı (türbin başına)	700,00 ton
Rotor nakliye mesafesi	259 km deniz & 889 km kara
Nacelle nakliye mesafesi	2887 km kara & 10 km deniz

*Kule yüksekliği ve ağırlığı hariç (Tsai, 2013)'ten uyarlanmıştır.

**Kule yüksekliğine göre ve Şekil 3'te yer alan grafik (Way ve Van Zijl, 2015) yardımıyla hesaplanmıştır.

İşletme ve bakım işlemleri için Tablo 6'da özetlenen bilgiler ışığında denizde bir alt istasyon ihtiyacı olmadığından, gerekli bakım ve arıza onarım işlemleri, malzemelerin karadan feribotla transferi haricinde karasal rüzgâr çiftliğinde olduğu gibi gerçekleştirilmiştir. Karasal rüzgâr çiftliğinden farklı olarak, parça değişim oranları, dişli kutularında ve rüzgâr jeneratörlerinde yararlı ömür boyunca tüm çiftlik için, %15 olarak kabul edilmiştir. Bahsi geçen her iki parça değişimi için tüm hayatları boyunca deniz üstünde kat edilecek mesafenin 40 km olduğu kabul edilmiştir. Yağlama operasyonu için deniz üstünde kat edilecek mesafe ise 200 km olarak öngörülmüştür.



Şekil 4. V112-3MW türbin için kule ağırlığının yüksekliğe göre değişim grafiği. (Way ve Van Zijl, 2015)

Dördüncü evre olarak tanımlanan tasfiye ve/veya geri dönüşüm safhasında ise; ayrıştırılan hurda ve geri dönüşüm malzemeleri için nakliye mesafeleri karasal rüzgâr çiftliğindeki gibi uygulanmıştır. Dördüncü aşamadaki en temel farklılık ise, malzemelerin sökülmesi esnasındaki feribot kullanımınıdır. Tablo 8'de deniz üstü rüzgâr santralinin sökülmesi sonrası ortaya çıkan hurda malzemelerin kütleleri ve geri dönüşüm oranları birlikte gösterilmiştir. Tasfiye edilen malzemelerden kompozit olanlar hariç, diğerlerinin, Ayvacık'ta kurulması düşünülen katı atık enerji tesisinde değerlendirilmesi öngörülmüştür. Modelleme aşamasında ise yazılım içinden gerekli süreçlerin oluşturulması ile üretim aşamasına geri döndürülmeyecek şekilde ayrıştırılan tüm malzemeler için ömür sonu işlemleri uygulanmıştır.

Tablo 8. Deniz üstü rüzgâr çiftliği hurda malzemeleri ve nakliye mesafeleri

Hurda malzeme		Oran		Nakliye mesafeleri
Adı	Kütlesi (kg)	Geri dönüşüm (%)	Tasfiye (%)	
Düşük alaşımlı çelik	2.343.715	90	10	8 km deniz & 270 km kara (Menemen)
Alüminyum	5.373	95	5	
Bakır	293.812	95	5	
Kurşun	220.000	90	10	8 km deniz & 50 km kara (Ayvacık)
Polietilen	135.240	-	100	
Polipropilen	77.120	-	100	
Polivinilklorür	5.260	-	100	
Epoksi	8.210	-	100	0 km
Kompozit	23.440	-	100	

3. Yaşam Döngüsü Maliyeti (YDM)

Yaşam döngüsü maliyeti (YDM), bir enerji santralının tüm yaşamı boyunca ortaya çıkan maliyetlerin hesaplanması için geliştirilmiş bir hesaplama yöntemidir (Lee D. , 2012). Bu çalışmada yaşam döngüsü değerlendirmesi ile yaşam döngüsü maliyeti birlikte ele alındığından; yaşam döngüsü maliyeti incelemesinde, enerji santralının kurulumu öncesinde ortaya çıkan maliyetler-örneğin fizibilite ve proje geliştirme maliyetleri vb.- hesaba katılmamıştır. Fizibilite maliyetleri açısından önerilen her iki sistemin maliyetlerinin yakın olacağı düşüncesi bu kabulde etkili olmuştur. Aynı sebeple, işçi maliyetleri yaşam döngüsü maliyetlerine; her iki sistemde de aynı etkiyi yaratacağı düşünülerek, hesaplamalara dâhil edilmemiştir. Bu kabulde ise her iki sistem için de nitelikli işçi çalıştırma gerekliliğinin, sistemlerin büyüklüğü ile doğru orantılı olarak değişeceği gerçeği göz önünde bulundurulmuştur. Diğer bir deyişle, yaşam döngüsü maliyet hesaplamasında her iki sistem için de sadece malzeme maliyetleri ve malzemelerin nakliyesi için katlanması gereken masraflar dikkate alınmıştır ve bu yüzden yaşam döngüsü maliyeti aşağıda açıklandığı gibi yaşam döngüsü değerlendirmesine paralel olacak şekilde üç kategoriye bölünerek incelenmiştir.

İlk yatırım maliyeti (İYM)

Enerji santrali kurulumu için gerekli tüm malzeme maliyetleri ve inşa süreci masrafları bu bölümde ele alınmıştır. Yatırım için gerekli olan altyapı maliyetleri, inşa süreci maliyeti olarak düşünüldüğünden; ilk yatırım maliyeti içinde ele alınmıştır. Tüm donanımların inşaat alanına nakliyesinin maliyeti de bu kalemin içine dâhil edilmiştir.

İşletme ve bakım maliyeti (İBM)

İşletme aşamasında gerekli olan yağ ve boya gibi malzemeler bu bölümün maliyetlerini oluşturmaktadır. Arıza onarımı için gerekli olan malzeme değişim maliyetleri de bu kapsamda değerlendirilmiştir. İlk yatırım maliyetinde yer alan nakliye masraflarına göre görece düşük kalan; gerek parça değişimi, gerekse periyodik bakım işlemi için gerekli ulaşım masrafları da işletme ve bakım maliyeti içinde değerlendirilmeye alınmıştır.

Tasfiye ve geri dönüşüm maliyetleri (TGM)

Enerji santralının sökümü için gereken masraflar ile söküm sonrası ortaya çıkan geri dönüşüm ve tasfiye malzemelerinin nakliye masrafları bu bölümde değerlendirilmiştir.

Yaşam döngüsü maliyeti hesabında, santral kurulumu öncesi ortaya çıkacak maliyetler her iki sistem için aynı bölgenin öneriliyor olmasından yola çıkılarak göz ardı edildiğinden; aşağıda yer alan denklem, bu çalışmada kullanılacak olan YDM denklemi (Abu-Rumman ve diğ., 2017) olarak geliştirilip, her iki sistem için uygulanmıştır.

$$YDM = M_Y + M_{I\&B} + M_{T\&G} \quad (1)$$

Daha önce yapılmış bir çalışmadan (Abu-Rumman ve diğ., 2017) esinlenilerek geliştirilen yukarıdaki denklemde; M_Y , ilk yatırım maliyetini, $M_{I\&B}$, işletme ve bakım maliyetini, $M_{T\&G}$ ise, tasfiye ve geri dönüşüm maliyetini temsil etmektedir.

Yukarıdaki denklem (1) ile tanımlanan yaşam döngüsü maliyeti rüzgâr çiftliği için detaylandırılarak;

$$YDM_{RC} = M_{\text{türbin}} + M_{\text{elek}} + M_{I\&B} + M_n \quad (2)$$

$$M_{I\&B} = M_{\text{türbin}} + M_{\text{altyapı}} + M_{\text{elek}} + M_{n1} \quad (3)$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} + M_{n3} \quad (4)$$

$$M_{I\&B} = M_B + M_{n2} \quad (5)$$

$$M_{TGM} = M_{n3} \quad (6)$$

denklemleri geliştirilmiş olup, kısaltmaların ifade ettiği maliyetler bulgular kısmında yer alan Tablo 10'da özetlenerek, karasal ve deniz üstü rüzgâr çiftliği için kıyaslamalı olarak sunulmuştur.

3.1. Karasal rüzgâr çiftliği yaşam boyu maliyeti

Bu bölümde karasal rüzgâr türbininin yaşam döngüsü maliyetinin hesaplamasında uygulanan işlemler detaylı olarak açıklanmıştır.

Denklem (6)'dan da anlaşılacağı üzere tasfiye ve geri dönüşüm evresinin maliyet hesabında malzemelerin sadece nakliye ve söküm masrafları dikkate alınmış olup, hurda satış işlemleri bu çalışmada tasfiye ve geri dönüşüm maliyetlerine dâhil edilmemiştir.

Literatür taraması sonucunda bağlantı yolları ve temel inşasının maliyeti, 2015'te yapılan bir çalışmadan (Erdem ve diğ., 2015) elde edilen bilgiler ışığında ve BORES rüzgâr çiftliğinin kapladığı alan da göz önünde bulundurularak yapılan hesaplamalar sonrasında 2019 yılı için gerekli artış oranlarının uygulanmasıyla; toplam altyapı maliyeti adı altında 271.638,0 \$ olarak elde edilmiştir. Bu tutara, bina ve çevre düzenleme maliyeti; 100 m² için 34.180 \$ alınarak, yukarıda bahsi geçen (Erdem ve diğ., 2015) makalede de olduğu gibi aynen eklenmiştir. 2019 yılı maliyetlerine ulaşmak amacıyla kullanılan artış oranı bu malzemelerin üretimlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi kısmında Türkiye'de yapıldığı varsayıldığından, Merkez Bankası tarafından yayınlanan Türk enflasyon oranı (Inflation Calculator) olarak belirlenmiştir.

2006 yılında yapılmış bir çalışmadan (Ozerdem ve diğ., 2006), doğrusal enterpolasyon ile elde edilen rüzgâr türbini fiyatı ile; 17 adet Enercon E-40 için toplam türbin maliyeti hesaplandıktan sonra; yaşam döngüsü değerlendirmesi kısmında türbin üretiminin Almanya'da yapılmış olduğu kabul edildiğinden; 2019 fiyatının tahmininde Alman üretici gösterge fiyatlarına (OECD) göre artış yapılmıştır. Bu çalışma için, tüm bu işlemlerden geçirilen toplam türbin maliyetinin son değeri 12.696.331,4 \$ olarak bulunmuştur.

İşletme ve bakım evresinin maliyet analizinde işçi maliyetleri göz ardı edildiği için, sadece arıza onarım durumunda gerekli olan yedek parça maliyeti ile bakım işlemlerinin maliyetinin karşılığı olarak uygulanan yağlama operasyonunun maliyeti ile bakım için katlanılması gereken nakliye masrafları

dikkate alınmıştır. Bir diğer deyişle, yedek parçaların yaşam döngüsü değerlendirmesi kısmında ilk yatırım esnasında alındığı kabul edildiğinden bu tutarlar; ilk yatırım maliyeti içinde değerlendirilmiş olup, yedek parça maliyeti, işletme ve bakım maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılmamıştır. Bu yüzden, yağ ve yağlama maliyeti için literatürde Enercon E-40 türbin için 2008 yılına ait bulunan bakım maliyeti (Fathiyah ve diğ., 2008) yine Alman üretici gösterge fiyatları ile güncelleştirilerek, 106.786,6 \$ olarak hesaplamalara dâhil edilmiştir.

Nakliye masraflarını hesaplamak amacıyla yaşam döngüsü değerlendirmesinde kullanılan yazılımdan (GaBi'den) her nakliye işlemi için dizel yakıt miktarı (lt) elde edilmiştir. Sonra bu miktarlar, British Petrol firmasının arşivlerinden 2019 Ocak ayı dizel fiyatı (BP Türkiye-Ürünler ve Servisler-Akaryakıt-Akaryakıt Pompa Satış Fiyatları) ile çarpılarak her bileşen için nakliye masrafı oluşturulmuştur.

Yukarıda elde edilen tüm maliyetler bulgular kısmında yer alan Tablo 10'da özetlenmiştir.

3.2. Deniz üstü rüzgâr çiftliği yaşam boyu maliyeti

Bu bölümde literatürde bulunan fiyatlar ile Bozcaada'da kurulması önerilen deniz üstü rüzgâr çiftliği bileşenlerinin maliyetleri detaylandırılmıştır.

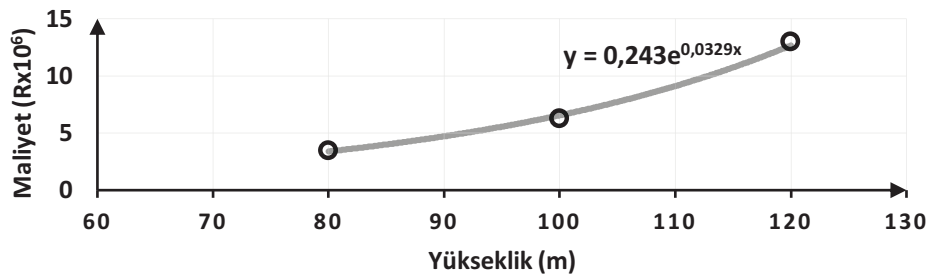
Karasal rüzgâr çiftliğinde bağlantı yolları ve altyapı maliyeti olarak karşımıza çıkan maliyet kalemi deniz üstü rüzgâr çiftliği için tekil kazık temel maliyetine dönüşmüş bulunmaktadır. Literatürden elde edilen tekil kazık tipi temel maliyetini ifade eden denklem (7) (Rosenauer, 2014) ile 30 m derinlik gerektiren tekil kazık temelinin, 2014 yılındaki maliyeti elde edildikten sonra; yaşam döngüsü değerlendirmesi kısmında kullanılan Avrupa ortak şebekesine paralellik teşkil edebilmek adına; Avrupa Birliği (AB) için yayınlanan üretici gösterge fiyat endeksi (OECD), bu sistem için; 2019 Ocak tekil kazık temel maliyetini hesaplamak için kullanılmıştır. Yapılan tüm işlemler sonucunda, tekil kazık temelin 2019 Ocak maliyeti 20.693.864,3 \$ bulunmuştur.

$$\text{Tekil kazık tipi temel maliyeti} = 2,242,483.33 + 7,236 * d_{kayı} + 986,059 * \exp(0.0182 * d) \quad (7)$$

Denklem (7)'de (Rosenauer, 2014); $d_{kayı}$ kıyıdan uzaklığı, d temel derinliğini göstermekte olup, verilen denklem anma gücü başına maliyeti ifade etmektedir.

$$\text{Türbin başına maliyet} = (3.106. \ln(x.MW) - 662400) \text{ €} \quad (8)$$

Denklem (8)'de (Kolios ve Brennan, 2018) ise; x seçilen rüzgâr türbininin anma gücünü ifade ederken, bahsi geçen denklemde maliyet sonucu ise € para birimi olarak elde edilmektedir.



Şekil 5. Vestas V-112 kulesi için maliyet- yükseklik grafiği. (Way ve Van Zijl, 2015)

Bir türbinin toplam maliyeti için ise, türbini oluşturan parçaların -nacelle ve rotor ile kule- maliyeti birlikte düşünülerek hesaplama yapılmıştır. Vestas V-112 3MW türbinin nacelle ve rotor parçalarının toplam maliyeti, denklem (8) (Kolios ve Brennan, 2018) ile hesaplanıp, dolar birimine çevrildikten sonra, 2019 Ocak maliyetinin elde edilmesi için AB üretici gösterge fiyatı (OECD) ile güncellenmiştir. Yapılan bu işlemler sonucunda, bu çalışmada kurulan sistem için tüm nacelle ve rotor parçalarının

toplam maliyeti 7.900.311 \$ olarak elde edilmiştir. Bulunan bu tutara toplam kule maliyeti de eklenerek, toplam türbin maliyeti elde edilmiştir. Toplam kule maliyeti için ise; (Way ve Van Zijl, 2015) çalışmadan elde edilen verilerden oluşturulmuş Şekil 5'te gösterilen grafik kullanılmıştır. Yapılan işlemler sonucunda tüm türbinlerin toplam maliyeti 9.382.956,0 \$ olarak hesaplanmıştır.

Kablo maliyetlerinin hesaplanmasında, 33 kV'lık türbinler arası kablolar için 2016 yılında yapılan çalışmadan (Judge ve diğ., 2019) elde edilen maliyetler ışığında, 2019 yılındaki tutarlara ulaşmak amacıyla AB üretici gösterge fiyatları (OECD) ile güncelleştirme yapıldıktan sonra, 33 kV'lık kabloların toplam maliyeti 147.993,5 \$ olarak; 132 kV'lık anakaraya bağlantı ve anakaradan istasyon bağlantısı için kullanılan kablolar için (Gonzalez-Rodriguez, 2017) çalışmadan elde edilen ve türbinler arası kablo maliyetinin 2019 yılı fiyatlandırmasını yapmak için kullanılan aynı yöntemle; 132 kV'lık kabloların toplam maliyeti 13.737.648 \$ olarak bulunmuştur.

Deniz üstü rüzgâr çiftliğinin işletme ve bakım maliyetinin hesaplanması aşamasında ise, 2013 yılında yapılmış olan bir tez çalışmasından elde edilen (Puglia, 2013) maliyetler, yine AB üretici gösterge fiyatları (OECD) ile güncellenmiştir. Yapılan işlemler sonucunda, Bozcaada'da kurulması planlanan bu santralin, işletme ve bakım maliyeti 4.960.320,0 \$ olarak hesaplanmıştır.

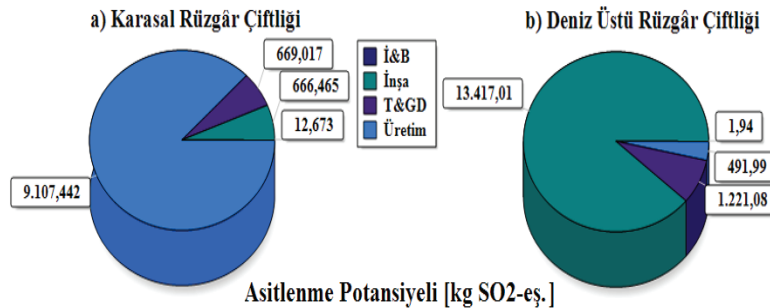
Deniz üstü rüzgâr çiftliğinin son evresi için katlanması gereken masraflardan oluşan maliyetin hesaplanmasında ise, karasal rüzgâr çiftliğinin tasfiye ve geri dönüşüm evresinin maliyetinin hesaplanmasında da kullanılan denklem (6)'dan yararlanılmıştır. Yaşam döngüsü değerlendirmesinde kullanılan yazılımdan (GaBi'den) elde edilen yakıt miktarlarının British Petrol firmasının arşivlerinden elde edilen 2019 Ocak ayı dizel fiyatı ile çarpılması sonucunda deniz üstü rüzgâr çiftliğinin son evresinin maliyeti 101.052,2 \$ olarak bulunmuştur.

4. Bulgular ve Değerlendirmeler

Bu bölümde, her iki yenilenebilir enerji sistemi için elde edilen bulgular karşılaştırılmalı olarak bulgular bölümünde sunulmuştur. Değerlendirmeler bölümünde ise, bu çalışmanın literatürdeki çalışmalardan farklı olan yönleri vurgulanmaya çalışılmıştır.

4.1. Bulgular

Bu bölümde, GaBi yazılımından elde edilen bulgular grafikler ile ifade edilmiştir. Ayrıca, elde edilen bulguların önem verilen kıstaslar açısından değerlendirilebilmesi için, ulaşılan bulgular her sistemin yaşam boyu üreteceği öngörülen elektrik miktarına bölünerek Tablo 9'da MWh başına değerler olarak sunulmuştur.

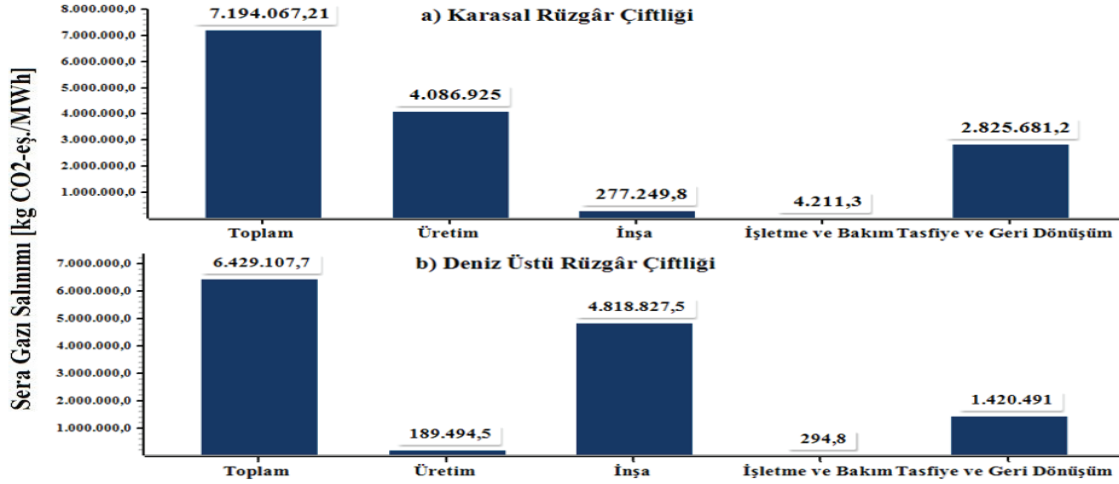


Şekil 6. Evrelerin kıyaslamalı asitleştirme potansiyeli

Asitleştirme; kükürt dioksit (SO₂) ve azot oksitler (NO_x)'lerden önemli hava kirletici olarak kabul edilen azot monoksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) (Cindoruk, 2018) bileşiklerinin oluşturduğu inorganik maddelerin, dünya yüzeyindeki atmosferde tortulaşması olarak tanımlanabilir (Üçtuğ, 2017). Bazı

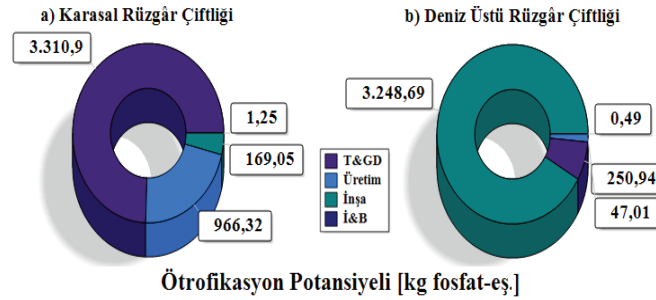
maddelerin H⁺ iyonları kurma ve serbest bırakması da asidifikasyon potansiyelinin diğer bir tanımı olarak karşımıza çıkmaktadır (Taşkın, 2018). Asidifikasyon potansiyeli bazı kaynaklarda asitleştirme potansiyeli olarak da adlandırılmaktadır (Şayan ve diğ., 2010). Bu inorganik maddelerin suda çözünmesi; suyun bazikliğini ve inorganik karbon miktarını değiştirerek okyanuslarda kirlenmeye sebep olurken, atmosferdeki birikim sonucunda ise asit yağmurlarının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Kim ve Chae, 2016).

Şekil 6'dan da anlaşılacağı üzere, deniz üstü rüzgâr çiftliğinin inşa evresi ağır iş makinelerinin kullanımını gerektirdiğinden karasal rüzgâr çiftliğindeki duruma göre daha yüksek asidifikasyon potansiyeli teşkil etmektedir. Karasal rüzgâr çiftliğinin en yüksek asitleştirme yaptığı evre ise üretim evresidir.



Şekil 7. Evrelerin kıyaslamalı sera gazı salınımı

Şekil 7'den de görüldüğü üzere; en yüksek sera gazı salınımı karasal rüzgâr çiftliği için %57'lik payla üretim evresinde gerçekleşirken, deniz üstü rüzgâr çiftliği için %75'lik pay ile inşa evresinde ortaya çıkmaktadır. Deniz üstü rüzgâr santralının inşa evresinde gereken ağır iş makinesi kullanımı bu durumun ortaya çıkmasındaki en büyük etken olarak gösterilebilir.

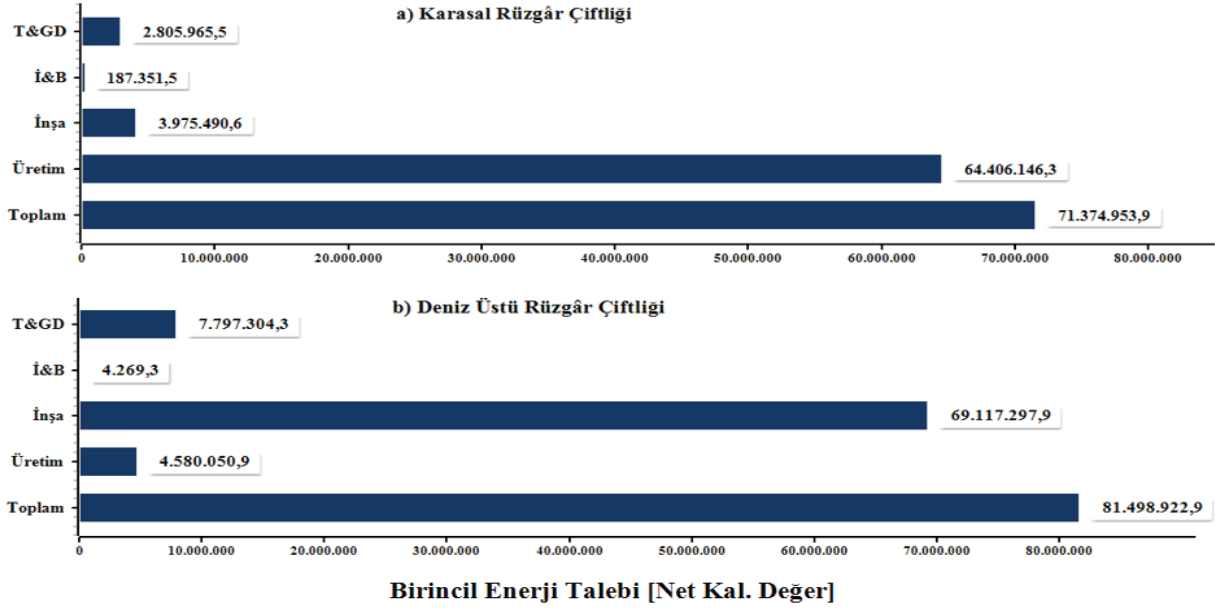


Şekil 8. Evrelerin kıyaslamalı ötrofikasyon potansiyeli

Ötrofikasyon gölün besleyici elementlerce zenginleşmesi (Yağcı, 2010) ve bunun sonucunda kıyı alanlarındaki tür dağılımını ve ekosistem fonksiyonunu olumsuz etkileyen bir çevre sorunudur (Doğan-Sağlamtimur ve Sağlamtimur, 2018). Bu süreci özellikle iki ana besin maddesi (azot ve fosfor) harekete geçirir. Ötrofikasyon açısından deniz üstü rüzgâr çiftliğinin karasal rüzgâr çiftliğine göre daha avantajlı olduğu ise, Şekil 8'den anlaşılmaktadır.

Şekil 9'da ise, her iki sistemin beşikten mezara kadar kullandığı net enerji miktarı (birincil enerji talebi) gösterilmektedir. Deniz üstü rüzgâr çiftliğinin birincil enerji talebinin, karasal rüzgâr çiftliğinin birincil enerji talebine göre daha fazla olduğu Şekil 9'dan anlaşılmaktadır. Tablo 9'da kıyaslama amaçlı kullanılan kümülatif enerji talebi (Mert ve diğ., 2017) ise, bir birim elektrik üretimi gerçekleştirebilmek için harcanması gereken ilk enerji miktarı olarak tanımlanabilir. Şekil 9'da deniz üstü rüzgâr çiftliği için

harcanması gereken ilk enerji miktarı daha yüksek olmasına rağmen, deniz üstü rüzgâr çiftliğinde üretilmesi öngörülen elektrik enerjisi miktarının da daha yüksek olması kümülatif enerji talebi sonucunun deniz üstü teknolojisi için daha düşük çıkmasına sebep olmuştur. Bu durumun bir diğer sonucu ise, Tablo 9'dan anlaşılacağı üzere; sistemlerin tüm yaşamı boyunca kullanacağı enerjiyi üretme süresi olarak da ifade edilebilecek olan, enerji geri ödeme sürelerinin deniz üstü rüzgâr çiftliği için yaklaşık 7 ay; karasal rüzgâr çiftliği için ise yaklaşık 7,4 ay olmasına neden olmuştur.



Şekil 9. Teknolojilerin ihtiyaç duyduğu enerjilerin evrelere göre gösterimi

Özetlemek gerekirse, Tablo 9'dan anlaşılacağı üzere, çevresel anlamda, deniz üstü rüzgâr çiftliğinin dezavantaj yarattığı tek nokta asidifikasyon potansiyelidir. Bulgular bölümünde de değinildiği üzere, inşa evresinin işletmeye alma kısmında kullanılan ağır iş makineleri sonucunda ortaya çıkan bu durum, deniz üstü rüzgâr çiftliğinin kurulumu için daha çevre dostu teknolojiler içeren yöntemlerin geliştirilmesiyle aşılabilir.

Tablo 9. Kıyaslama bulguları

	Karasal	Deniz Üstü
Sera Gazı Salınımı (SGS) [kg CO ₂ -eş./MWh]	10,64	7,65
Asitleştirme Potansiyeli (AP) [kg SO ₂ -eş./MWh]	0,01545	0,01801
Ötrofikasyon Potansiyeli [kg PO ₄ ⁻³ -eş./MWh]	0,00651	0,00422
Enerji Geri Ödeme Süresi (EGÖS) [yıl]	0,62	0,58
Kümülatif Enerji Talebi (KET) [MJ/MWh]	104,95	97,02
Enerji Birim Maliyeti (EBM) [\$/MWh]	35,22	59,00

Yaşam döngüsü maliyet analizi ile ilgili olarak, Tablo 10'da hesaplamalarda kullanılan maliyet kalemlerinin kısaltmaları ile açıklamaları birlikte verilmiştir. Karasal ve deniz üstü rüzgâr santrali kurulumunda ortaya çıkan maliyetler kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Tablo 10'dan anlaşılacağı üzere; karasal rüzgâr çiftliğindeki en yüksek maliyet kalemini türbinler oluşturmasına rağmen, deniz üstü rüzgâr teknolojisi yatırımında tekil kazık temel (monopile) en yüksek maliyetli kalem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 10. Maliyetler için kullanılan kısaltmalar ve açıklamaları

Kısaltmalar	Açıklamalar	Maliyetler [\\$]	
		Karasal	Deniz Üstü
M_{türbin}	Toplam türbin maliyeti	12.696.331,4	9.382.998,3
M_{elek}	Toplam elektronik aksam maliyeti	10.768.314,0	13.885.641,2
M_{altyapı}	Toplam altyapı (temel) maliyeti	271.638,0	20.693.864,3
M_{n1}	Üretim ve inşa evresinde gerçekleşen toplam nakliye ve montaj masrafı	98.263,0	483.857,7
M_{iyM}	İlk yatırım maliyeti	23.838.415,9	44.446.361,5
M_B	Bakım için gerekli malzemelerin toplam maliyeti	106.786,6	5.008.292,1
M_{n2}	İşletme ve bakım döneminde gerçekleşen nakliye masrafı	237,8	321,6
M_{iBM}	İşletme ve bakım maliyeti	107.024,4	5.008.613,7
M_{n3}	Tasfiye ve geri dönüşüm evresi için gerçekleştirilen nakliye masrafı	7.530,0	101.052,2
M_{TGM}	Toplam tasfiye ve geri dönüşüm maliyeti	7.530,0	101.052,2
M_n	Tüm yaşam döngüsü boyunca nakliye masrafı	106.030,8	585.231,5
YDM_{RÇ}	Rüzgâr çiftliğinin yaşam döngüsü maliyeti	23.952.970,3	49.556.027,5

Enerji üretim maliyeti açısından ise, Tablo 9'dan görüleceği üzere; enerji birim maliyeti (EBM) 35,22 \$/MWh olan karasal rüzgâr sistemi, enerji birim maliyeti 59,00 \$/MWh olan deniz üstü rüzgâr çiftliğine göre daha avantajlı bir yatırım olmaktadır. Deniz üstü rüzgâr teknolojisinin yeni gelişen bir teknoloji olması dolayısı ile bu durumun zaman içinde değişeceğini söylemek yanlış olmayacaktır.

Tablo 11'den anlaşılacağı üzere, karasal rüzgâr çiftliği için kullanılan malzemelerin oluşturduğu ilk yatırım maliyetinin oranı; işletme ve bakım operasyonlarının maliyetinin deniz üstü rüzgâr çiftliğine göre daha az masraflı olmasından dolayı, toplam yaşam döngüsü maliyeti içinde en yüksek oranı oluşturmaktadır. Bu da; deniz üstü rüzgâr çiftliğinin işletme ve bakım evresi için, daha ekonomik yöntemlerin araştırılmasını önemli kılmaktadır.

Tablo 11. Evrelerin maliyet oranları

	Karasal Rüzgâr Çiftliği	Deniz Üstü Rüzgâr Çiftliği
İYM (nakliye ve söküm hariç)	99,11	88,71
İ&B (nakliye ve söküm hariç)	0,45	10,11
Toplam nakliye ve söküm masrafları	0,44	1,18

4.2. Değerlendirmeler

Karşılaştırma yapmak adına bir diğer sonuç değerlendirme kistası olan (TRACI 2) ile tekrar değerlendirme yapıldıktan sonra bu çalışmada analizi yapılan deniz üstü rüzgâr çiftliğinin sera gazı salınımı 7,64 kg CO₂-eş./MWh olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçla beraber seçilebilecek değerlendirme kistaslarından TRACI 2 ve CML2001-Jan 2016 arasında sera gazı salınımı değerlendirmesi açısından belirgin bir fark olmadığı söylenebilir. Ancak asitleştirme potansiyeli açısından, birimin değişmesinden de anlaşılacağı üzere TRACI ve CML2001-Jan 2016 yöntemleri ile hesaplanan sonuçların kıyaslanması mümkün görünmemektedir. Bu yüzden küresel ısınma potansiyeli (sera gazı salınımı) açısından, bu çalışmada önerilen deniz üstü rüzgâr çiftliği yapısı ile kıydan uzaklık ve temel tipi ve derinliği açısından

(Tsai ve diğ., 2016) çalışmada yer alan Berrien eyaleti sonuçları karşılaştırılmıştır. Berrien eyaletinde küresel ısınma potansiyeli 27,98 kg CO₂-eş./MWh olarak elde edilirken, bu çalışmada 7,64 kg CO₂-eş./MWh olarak elde edilmiştir. Bu değerlerin arasındaki yaklaşık 4 kat farkın en büyük sebebi olarak elektrik üretim değerlerinin farklı olması gösterilebilir. Yani, Berrien ilçesinde kurulan deniz üstü rüzgâr türbinlerinden (Tsai ve diğ., 2016) bir tanesi yıllık ortalama 7,9 GWh elektrik üretimi yaparken, bu çalışmada bahsedilen değer 14 GWh olarak öngörülmüştür (Güzel, 2012; Vestas). Bu çalışmada türbin başına öngörülen yıllık elektrik üretim değeri (14 GWh) yukarıda bahsi geçen çalışmada kullanılarak sera gazı salınımı hesabı güncellendiğinde, 15,75 kg CO₂-eş./MWh değeri elde edilmiştir. Bu noktadan sonra geriye kalan farklılık ise, kablolu kaynaklı sera gazı salınımı olarak karşımıza çıkmaktadır. (Tsai ve diğ., 2016) çalışmasında yer alan toplam kablo mesafesi, türbinler arası 81 km, karaya olan bağlantı 10 km ve karada devam eden kablo mesafesi 3 km olmak üzere toplam 94 km'dir. Bu çalışmada ise, Tablo 6'dan da detayları görüldüğü üzere toplam kablo kullanımı yaklaşık 20 km'dir. Buradan hareketle toplam türbin sayısının, dolayısıyla elektrik üretim miktarının artışı ile azalması beklenen sera gazı salınımının; türbin sayısının artmasıyla dolaylı olarak ortaya çıkan kablo miktarındaki artış ve bu kablo miktarındaki artış kaynaklı kurulum aşamasında ortaya çıkan sera gazı salınımında sebep olduğu artış nedeniyle; beklenenin aksine sistemin sera gazı salınımını arttırdığı (burada bahsi geçen kıyaslamada yaklaşık olarak 2 kat) aşikârdır. Bu yüzden, yüksek kapasiteli deniz üstü rüzgâr çiftliği için dikkat edilmesi gereken, Şekil 7'nin de doğruladığı gibi inşa evresinin en belirgin aşaması olan nakliye ve kurulum sürecinde ortaya çıkacak emisyon oranları olmalıdır. Bu noktada değinilmesi gereken bir diğer husus ise, (Tsai ve diğ., 2016) çalışmasında kullanılan bir diğer yaşam döngüsü değerlendirmesi yazılımı olan SimaPro 7.0 ile bu çalışmada kullanılan GaBi Education sürümlerindeki farklı veri tabanları dolayısıyla ortaya çıkan inşa aşamasında kullanılan donanımlardaki farklılıktır. Daha önce de belirtildiği gibi, bu çalışmada GaBi Education veri tabanında bulunan kurulum aşamasının modellemesinde kullanılabilecek ağır iş makinesi donanımı sadece ekskavatör idi. (Tsai ve diğ., 2016) çalışmasında ise, vinç ve kaldırma gemisi kullanılmıştır. Ortaya çıkan 2 kat farkın bir diğer sebebi olarak gösterilebilecek unsurlardan biri de budur. Bahsi geçen çalışmada, karşılaştırılması yapılan tüm durumlar için düşünülen alt istasyonun, bu çalışmada yer almadığı da gözden kaçırılmaması gereken bir diğer unsurdur. Buradan yola çıkarak alt istasyon yapımının ciddi oranda malzeme gerektirmesi dolayısıyla oluşan bu fark da önemli bir yer işgal ettiği ve (Haung ve diğ., 2017) çalışmasında da vurgulandığı gibi, bir diğer deyişle; alt istasyon yapımının daha kötü çevresel sonuçlar yaratacağı söylenebilir. Bu sebeple, bir deniz üstü rüzgâr çiftliği yatırımında çevresel olarak dikkat edilmesi gereken unsurların en önemlilerinden biri, alt istasyona ihtiyaç olup olmadığının belirlenmesidir.

Bulgular kısmında deniz üstü rüzgâr çiftliği için çevresel anlamda tek dezavantajlı nokta olarak ortaya çıkan asidifikasyon potansiyeli, Şekil 6 ve Tablo 9'un da yardımıyla detaylı olarak incelediğinde; sadece inşa evresinin 0,01597 kg SO₂-eş./MWh değeri ile deniz üstü rüzgâr santralının asitleştirmesinin yaklaşık %90'lık kısmını oluşturduğu görülmektedir. Bu da, deniz üstü rüzgâr çiftliğinin inşa evresinde yer alan nakliye ve kurulum teknolojilerinin, daha önce de değinildiği gibi, gözden geçirilmesi gerekliliğini işaret etmektedir.

Yaşam döngüsü maliyeti ile ilgili olarak ise; konu ile ilgili yapılan diğer çalışmalarda da belirtildiği gibi (Köroğlu ve Ülgen, 2018), deniz üstü rüzgâr çiftliğinin yatırım maliyetinin karasal rüzgâr santrali yatırımlarının yaklaşık 2 katı olmasının deniz üstü teknolojilerinin gelişmesiyle kapanacağı düşünülmektedir. Bu maliyet farkının azaltılabilmesi amacıyla yapılması gerekenlerden biri olarak, deniz üstü rüzgâr sisteminin en yüksek maliyet kalemini oluşturan temel teknolojisinin maliyetini (bu çalışma özelinde 30 m derinlik için tasarlanan tekil kazık temelin maliyetini) azaltmak üzere Ar-Ge faaliyetlerinin artırılması da sayılabilir.

5. Sonuçlar

Türkiye’de henüz deniz üstü rüzgâr çiftliği yatırımı olmadığından; bu çalışmada, türbin sayısı 3 ile sınırlı tutulup, Vestas V-112 3MW türbinleri ile kurulacak bir deniz üstü rüzgâr çiftliğinin yararlı ömür süresince elektrik üretim miktarı 840 GWh olarak öngörülmüştür. Oysaki karada bulunan 17 adet Enercon E-40 türbiniyle 20 yılda 680 GWh elektrik üretimi yapılabilmektedir. Asitleştirme potansiyeli haricinde deniz üstü teknolojisinin 3 türbin kullanımıyla birlikte bile, daha çevresel olduğu göz önüne alındığında; deniz üstü rüzgâr teknolojisinin yaygınlaşması, bir diğer deyişle, açık deniz veya deniz üstü türbin sayısının arttırılmasıyla, Türkiye’nin enerjide dışa bağımlılığı, çevreye daha az salınım gerçekleştirilerek azaltılabilir.

Bu çalışma özelinde bir yorum yapmak gerekirse, Bozcaada’da yapılacak bir deniz üstü rüzgâr çiftliği kurulumunda, potansiyel teşkil eden su derinliğinin (Güzel, 2012) 20-45 m arasında tekrar değerlendirilmesinde, Tablo 10’da yer alan ikinci en yüksek maliyet kaleminin kablolama maliyetleri olduğu göz önünde bulundurularak; optimum tasarım için temel derinliği ve kablo mesafelerine öncelik veren bir fizibilite çalışması oldukça anlamlı olacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışmada yapılan kıyaslamalar; değişen teknik detayların fazla olduğu sistemlerin (karasal ve deniz üstü gibi farklı yer seçimleri içerebilen, deniz üstü çiftliğinde dişli kutulu mekanizma teknolojisi barındıran ve karasalda direkt tahrikli rüzgâr türbinlerinin kullanıldığı ve seçilen anma güçlerinin farklı olduğu vb.) karşılaştırılabilmesi için yaşam döngüsü değerlendirilmesi (YDD) ile yaşam döngüsü maliyet (YDM) analizi, herhangi bir bölgede yapılması düşünülen bir yatırım öncesi, çevresel etkiler ve maliyet açısından yatırımcıya fikir vermek üzere kullanılacak yöntemlerdir. Çoklu karar matrisi gibi daha karmaşık karar alma mekanizmalarının uygulandığı karar verme süreçlerinde, bu etkenlerin yanı sıra risk değerlendirilmesi ile birlikte yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) çalışmaları yapılması da seçilecek yatırımın daha anlamlı olmasını sağlayacaktır.

Kaynaklar

Abu-Rumman, A. K., Muslih, I., & Barghash, M. A. (2017). Life Cycle Costing of Wind Generation System. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 4(3), 185-191. doi:10.22105/jarie.2017.54726

Andersen, P. D., Bonou, A., Beauson, J., & Brøndsted, P. (2014). Recycling of wind turbines. Technical University of Denmark (DTU). http://orbit.dtu.dk/files/102458629/DTU_INTL_ENERGY_REP_2014_WIND_91_97.pdf adresinden alındı

Argin, M., Yerci, V., Erdogan, N., Kucuksari, S., & Cali, U. (2019). Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multicriteria site selection. *Energy Strategy Reviews*, 23, 33-46. doi:https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.005

Atilgan, B., & Azapagic, A. (2016). Renewable electricity in Turkey: Life cycle environmental impacts. *Renewable Energy*, 89(April), 649-657. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.082

Bayraç, H. N. (2010). Enerji Kullanımının Küresel Isınmaya Etkisi ve Önleyici Politikalar. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(2), 229-259. <http://dergipark.org.tr/ogusbd/issue/10998/131623> adresinden alındı

Bilgili, M. (2009). A Global Review of Wind Power Installations and their Development in Turkey. *Soil Air Water*, 37(3), 195-202. doi:10.1002/cfen.200800231

Bilgili, M., Şahin, B., & Kahraman, A. (2004). Wind energy potential in Antakya and İskenderun regions, Turkey. *Renewable Energy*, 29(10), 1733-1745. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.10.003>

Birkeland, C. (2011). Assessing the Life Cycle Environmental Impacts of Offshore Wind Power Generation and Power Transmission in the North Sea. Norwegian University of Science and Technology Department of Energy and Process Engineering.

Bores Bozcaada Santrali. (tarih yok). 13 Temmuz 2019 tarihinde <http://www.demirer.com.tr/santral/bores/index.html> adresinden alındı

BP Türkiye-Ürünler ve Servisler-Akaryakıt-Akaryakıt Pompa Satış Fiyatları. (tarih yok). 13 Temmuz 2019 tarihinde <http://www.bppompafiyatlari.com/> adresinden alındı

Chan, D., & Mo, J. (2017). Life cycle reliability and maintenance analyses of wind turbines. *Energy Procedia*, 110, 328-333. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.148>

Chipindula, J., Botlaguduru, V., Du, H., Kommalapati, R., & Huque, Z. (2018). Life Cycle Environmental Impact of Onshore and Offshore Wind Farms in Texas. *Sustainability*, 10, 2022. doi:<https://doi.org/10.3390/su10062022>

Cindoruk, S. S. (2018). Havadaki NO ve NO₂ Parametrelerinin Marmara Temiz Hava Merkezi Ölçümleri Kapsamında İncelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 600-611. doi:10.28948/ngumuh.443194

CML-Institute of Environmental Sciences, Department of Industrial Ecology. (2016). CML-IA Characterisation Factors. Leiden, The Netherlands: Leiden University.

Demiroren, A., & Yilmaz, U. (2010, January). Analysis of change in electric energy cost with using renewable energy sources in Gökceada, Turkey: An island example. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 323-333. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.030>

Doğan-Sağlamtimur, N., & Sağlamtimur, B. (2018). Sucul Ortamlarda Ötrofikasyon Durumu ve Senaryoları. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 75-82. doi:10.28948/ngumuh.386307

Enercon E-40/6.44-600,00 kW-Wind Turbine. (tarih yok). 13 Temmuz 2019 tarihinde <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/68-enercon-e-40-6.44> adresinden alındı

Erdem, O., Batur, B., Bilge, Z. D., & Temir, G. (2015). Bozcaada'da Kurulacak Olan Bir Rüzgar Enerjisi Santralinin Ekonomik Analizi. *Tesisat Mühendisliği*, 148(Temmuz/Ağustos), 22-27.

Eremia, M., Toma, L., & Sanduleac, M. (2017). The Smart City Concept in the 21st century. *Procedia Engineering*, 181, 12-19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.357>

Fathiyah, R., Mellott, R., Panagoda, M., & Lane, M. (2008). Windmill Design Optimization through Component Costing. IEEE Seminar. London, U.K.

Gonzalez-Rodriguez, A. G. (2017). Review of offshore wind farm cost components. *Energy for*

Sustainable Development, 37(April), 10-19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.12.001>

Güzel, B. (2012). Açık Deniz Rüzgar Enerjisi, Fizibilite Adımları ile Bozcaada ve Gökçeada Örnek Çalışması. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü.

Haapala, K. R., & Prempreeda, P. (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. *Int. Journal of Sustainable Manufacturing*, 3(2), 170-185. doi:DOI: 10.1504/IJSM.2014.062496

Hanafi, J., & Raman, A. (2015). Life Cycle Assessment of a Mini Hydro Power Plant in Indonesia: A Case Study in Karai River. *Procedia CIRP*, 29, 444-449. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.160>

Hekimci, F. (2012). Sürdürülebilir Yarınlar İçin; "Sürdürülebilir Tüketim ve Enerji Verimliliği". *Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Anahtar Dergisi*, 226, 10-15. 21 Ağustos 2019 tarihinde <https://anahtar.sanayi.gov.tr/tr/news/surdurulebilir-yarinlar-icin-surdurulebilir-tuketim-ve-enerji-verimliliği/158> adresinden alındı

Hernández, C. V., González, J. S., & Blanco, R. F. (2019). New method to assess the long-term role of wind energy generation in reduction of CO₂ emissions- Case Study of the European Union. *Journal of Cleaner Production*, 207(10th January), 1099-1111. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.249>

Hong, J. H., Kim, J., Son, W., Shin, H., Kim, N., Lee, W. K., & Kim, J. (2019). Long-term energy strategy scenarios for South Korea: Transition to a sustainable energy system. *Energy Policy*, 2019(April), 425-437. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.055>

Huang, Y.-F., Gan, X.-J., & Chiueh, P.-T. (2017). Life cycle assessment and net energy analysis of offshore wind power systems. *Renewable Energy*, 102(Part A), 98-106. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.050>

İlkiliç, C. (2012). Wind energy and assessment of wind energy potential in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1165-1173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.021>

Inflation Calculator. (tarih yok). 13 Temmuz 2019 tarihinde <http://www3.tcmb.gov.tr/inflationcalc2/inflationcalc.php> adresinden alındı

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.

IPEEC Building Energy Efficiency Taskgroup. (2018). *Zero Energy Building Definitions and Policy Activity- An International Review*. Paris, France: IPEEC. https://ipeec.org/upload/publication_related_language/pdf/766.pdf adresinden alındı

ISO. (2006a). ISO 14040:2006 - Environmental management–Life cycle assessment–Principles and framework. Geneva,Switz.: Int. Organ. Stand.

ISO. (2006b). ISO 14044:2006 - Environmental management–Life cycle assessment–Requirements and guidelines. Geneva, Switz.: Int. Organ. Stand.

Jeong, B., Oguz, E., Wang, H., & Zhou, P. (2018). Multi-criteria decision-making for marine propulsion: Hybrid, diesel electric and diesel mechanical systems from cost-environment-risk perspectives. *Applied*

Energy, 230(15th November), 1065-1081. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.074>

Jeong, B., Wang, H., Oguz, E., & Zhou, P. (2018, 20th June). An effective framework for life cycle and cost assesment for marine vessels aiming to select optimal propulsion systems. *Journal of Cleaner Production*, 187(20th June), 111-130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.184>

Judge, F., McAuliffe, F. D., Sperstad, I. B., Chester, R., Flannery, B., Lynch, K., & Murphy, J. (2019). A lifecycle financial analysis model for offshore wind farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103(April), 370-383. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.045>

Kadioğlu, M. (2001). *Bildiğimiz Havaaların Sonu Küresel İklim Değişimi ve Türkiye*. Güncel Yayıncılık: İstanbul.

Kaldellis, J., & Apostolou, D. (2017). Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart. *Renewable Energy*, 108(August), 72-84.

Kalinci, Y. (2015, May). Alternative energy scenarios for Bozcaada island, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 468-480. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.001>

Karl, T. R., & Trenberth, E. (2003). Modern Global Climate Change. *Science*, 302(1719). doi:DOI: 10.1126/science.1090228

Keleş, S., & Bilgen, S. (2012). Renewable energy sources in Turkey for climate change mitigation and energy sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5199-5206. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.026>

Kim, T. H., & Chae, C. U. (2016). Environmental Impact Analysis of Acidification and Eutrophication Due to Emissions from the Production of Concrete. *Sustainability*, 8, 578. doi:10.3390/su8060578

Kirby, N., Xu, L., Lockett, M., & Siepmann, W. (2002). HVDC transmission for large offshore wind farms. *Power Engineering Journal*, 16(3), 135-141. doi:10.1049/pe:20020306

Kolios, A., & Brennan, F. (2018). Review of existing cost and O&M models, and development of a highfidelity cost/revenue model for impact assessment. Cranfield University/University of Strathclyde.

Köroğlu, M. Ö., & Ülgen, K. (2018). *Denizüstü Rüzgâr Enerji Santralleri: Çanakkale Örneği*. Güç Sistemleri Konferansı. Ankara. doi:10.5281/zenodo.1482655

Köseoğlu, Ö., & Demirci, Y. (2018). Akıllı Şehirler ve Yerel Sorunların Çözümünde Yenilikçi Teknolojilerin Kullanımı. *Uluslararası Politik Araştırmalar Dergisi*, 4(2), 2528-9969. https://www.academia.edu/37513030/Akilli_Sehirler_Makale_adresinden_alindi

Lee, D. (2012). Fundamentals of Life-Cycle Cost Analysis. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1812(January 2002), 203-210.

Lee, Y.-M., & Tzeng, Y.-E. (2008). Development and Life-Cycle Inventory Analysis of Wind Energy in Taiwan. *Journal of Energy Engineering*, 134(2). doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9402\(2008\)134:2\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9402(2008)134:2(53))

Li, Q. S., Chen, F. B., Li, Y. G., & Lee, Y. Y. (2013). Implementing wind turbines in a tall building for power generation: A study of wind loads and wind speed amplifications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 116(16th May), 70-82. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.03.004>

Mert, G., Linke, B., & Aurich, J. C. (2017). Analysing the Cumulative Energy Demand of Product-service Systems for wind Turbines. *Procedia CIRP*, 59, 214-219. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.09.018>

Nugent, D., & Sovacool, B. K. (2014). Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy*, 65(February), 229-244. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.048>

OECD. (tarih yok). 2019. doi:doi: 10.1787/a24f6fa9-en

Oguz, E., & Incecik, A. (2014). Feasibility of Installing Offshore Wind Farms in the North Aegean Sea, Turkey. *Grand Renewable Energy 2014, International Conference and Exhibition 27 July - 1 August. Tokyo Big Sight, Tokyo, Japan.*

Oguz, E., Clelland, D., Day, A. H., Incecik, A., López, J. A., Sánchez, G., & Almeria, G. G. (2018). Experimental and numerical analysis of a TLP floating offshore wind turbine. *Ocean Engineering*, 147(January), 591-605. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.10.052>

Oğulata, R. T. (2003). Energy sector and wind energy potential in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(6), 469-484. doi:[https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(03\)00090-X](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(03)00090-X)

Oğuz, E., & Şentürk, A. (2019). Selection of the most sustainable renewable energy system for Bozcaada Island: wind vs. photovoltaic. *Sustainability*, 11(15), 4098. doi:<https://doi.org/10.3390/su11154098>

Oh, K.-Y., Nam, W., Ryu, M. S., Kim, J.-Y., & Epureanu, B. I. (2018). A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88(May), 16-36. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.005>

Owens, B. N. (2019). *Europe Sails Ahead. The Wind Power Story-A Century of Innovation That Reshaped The Global Energy Landscape* (s. 245). içinde New Jersey, Canada: WILEY-IEEE Press.

Ozerdem, B., Ozer, S., & Tosun, M. (2006). Feasibility study of wind farms: A case study for Izmir, Turkey. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(10), 725-743. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.02.004>

Öksel, C., Koç, A., Koç, Y., & Yağlı, H. (2016). Antakya Körfezi Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi Potansiyel Araştırılması. *SUJEST*, 4(1), ISSN: 2147-9364 (Elektronik).

Örselli, E., & Akbay, C. (2019). Teknoloji ve Kent Yaşamında Dönüşüm: Akıllı Kentler. *Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi*, 2(1), 228-241. doi:<https://doi.org/10.33712/mana.544549>

Özkale, C., Celik, C., Turkmen, A. C., & Cakmaz, E. S. (2017). Decision analysis application intended for selection of a power plant running on renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70(April), 1011-1021. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.006>

Piasecka, I., Tomporowski, A., Flizikowski, J., Kruszelnicka, W., Kasner, R., & Mroziński, A. (2019). Life Cycle Analysis of Ecological Impacts of an Offshore and a Land-Based Wind Power Plant. *Applied Sciences*, 9(2), 231. doi:<https://doi.org/10.3390/app9020231>

Puglia, G. (2013). *Life Cycle Cost Analysis on Wind Turbines*. Gothenburg, Sweden: Energetic Engineering, Chalmers University of Technology.

Reimers, B., Özdirik, B., & Kaltschmitt, M. (2014). Greenhouse gas emissions from electricity generated by offshore wind farms. *Renewable Energy*, 72(December), 428-438. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.023>

Ristimäki, M., Säynäjoki, A., Heinonen, J., & Junnila, S. (2013). Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design. *Energy*, 63(December), 168-179. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.030>

Rosenauer, E. (2014). *Investment Costs of Offshore Wind Turbines*. Center for Sustainable Energy, University of Michigan.

Santoyo-Castelazo, E., & Azapagic, A. (2014). Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, 80(1st October), 119-138. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.061>

Satir, M., Murphy, F., & McDonnell, K. (2018). Feasibility study of an offshore wind farm in the Aegean Sea, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2), 2552-2562. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.063>

Schanes, K., Giljum, S., & Hertwich, E. (2016). Low carbon lifestyles: A framework to structure consumption strategies and options to reduce carbon footprints. *Journal of Cleaner Production*, 139(15th December), 1033-1043. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.154>

Schmidt, K., Alvarez, L., Arevalo, J., & Abbassi, B. (2017). Life Cycle Impact Assessment of Renewable Energy Systems: Wind vs. Photovoltaic Systems. *International Journal of Current Research*, 9(10), 59140-59147.

Şanlı, B., & Özekicioğlu, H. (2007). Küresel Isınmayı Önlemeye Yönelik Çabalar ve Türkiye. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*(2007/2), 456-482. <http://dergipark.org.tr/kmusekad/issue/10223/125697> adresinden alındı

Şayan, Y., Özen, N., Kırkpınar, F., & Polat, M. (2010). Organik Hayvansal Üretim ve Çevre. Türkiye t. Organik Hayvancılık Kongresi. Kelkit. <http://orgprints.org/19000> adresinden alındı

Şengüler, F., & Yumurtacı, Z. (2019). Hybrid Solar And Wind Energy Potential Map of Turkey and Cost Analysis of 1 MW Hybrid Power Plants. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT)*, 5(6), E-ISSN : 2454-6135. doi:10.31695/IJERAT.2019.3450

Taşkın, E. (2018). Linyit Yakıtlı Pilot Termik Santral İçin Baca Gazı Emisyon Azaltma Seçeneklerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. Ankara: Hacettepe Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü.

Torres Olguin R.E., G. A. (2014). HVDC Transmission for Offshore Wind Farms. M. A. Hossain J. içinde,

Large Scale Renewable Power Generation (s. 289-310). Springer, Singapore: Green Energy and Technology. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-4585-30-9_11

Tsai, L. (2013). An Integrated Assessment of Offshore Wind Farm Siting: A Case Study in the Great Lakes of Michigan. Michigan: The University of Michigan.

Tsai, L., Kelly, J. C., Simon, B. S., Chalat, R. M., & Keoleian, G. A. (2016). Life Cycle Assessment of Offshore Wind Farm Siting: Effects of Locational Factors, Lake Depth, and Distance from Shore. *Journal of Industrial Ecology*, 20(6), 1370-1383. doi:<https://doi.org/10.1111/jiec.12400>

Turkish Wind Energy Association. (2018). Turkish Wind energy Statistic Report. Ankara, Turkey.

USGCRP. (2017). Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment. Washington, DC, USA: U.S. Global Change Research Program. doi:doi: 10.7930/J0J964J6

Üçtuğ, F. G. (2017). Stakeholder Opinion-Based Comparison of Life Cycle Environmental Impacts of Electricity Generation in Turkey with Selected European Countries. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi A- Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 18(1), 178-198. doi:10.18038/aubtda.300422

Velarde, J., & Bachynski, E. E. (2017). Design and fatigue analysis of monopile foundations to support the DTU 10 MW offshore wind turbine. *Energy Procedia*, 137(October), 3-13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.330>

Vestas. (tarih yok). 3 Eylül 2019 tarihinde https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/v112-3_45_mw#! adresinden alındı

Vourdoubas, J. (2018). Review of sustainable energy technologies used in buildings in the Mediterranean basin. *Journal of Buildings and Sustainability*, 1(2).

Wang, H., Oguz, E., Jeong, B., & Zhou, P. (2018). Life cycle cost and environmental impact analysis of ship hull maintenance strategies for a short route hybrid ferry. *Ocean Engineering*, 161(1st August), 20-28. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.084>

Way, A., & Van Zijl, G. (2015). A study on the design and material costs of tall wind turbine towers in South Africa. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 57(4), 45-54. doi:10.17159/2309-8775/2015/v57n4a6

Yağcı, M. (. (2010). Göllerde Ötrofikasyon, Kontrolü ve Planktonik Gösterge Türler. *YUNUS Araştırma Bülteni*, 10(1), 11-14.

Yılan, G., Kadirgan, M. N., & Çiftçioğlu, G. A. (2019). Analysis of electricity generation options for sustainable energy decision making: The case of Turkey. *Renewable Energy*, 146, 519-529. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.164>

Yuan, X., Wang, X., & Zuo, J. (2013). Renewable energy in buildings in China—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24(August), 1-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.022>

Zeinali, R., & Keysan, O. (2019). A Rare-Earth Free Magnetically Geared Generator for Direct-Drive Wind Turbines. *Energies*, 12(3), 447. doi:10.3390/en12030447