

Açık deniz rüzgâr çiftlikleri (OWF), yapay resifler (ARs) ve deniz ekolojisi ilişkisi

Kadriye ZENGİN^{1*}, Dilek TÜRKER¹, Abdulkadir ÜNAL²

¹Balıkesir Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü., Çarşı kampüsü, Balıkesir.

²Balıkesir İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, Balıkesir,

Geliş Tarihi (Received Date): 14.05.2025

Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.07.2025

Öz

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin su altındaki temelleri ve etrafındaki yapılar, aslında yapay resif (Artificial Reef, AR) işlevi görerek deniz canlıları için yeni habitatlar oluşturma potansiyeline sahiptir. Bu durum, yenilenebilir enerji üretimi ile deniz biyoçeşitliliğinin desteklenmesini bir araya getiren önemli bir fırsata işaret etmektedir. AR, bilinçli planlama ile rüzgâr türbinlerinin altyapısı olarak değerlendirildiğinde, hem iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlayan temiz enerji üretimini, hem de denizel ekosistemlerin korunmasını eşzamanlı olarak mümkün kılabilir. Bu çalışma, farklı denizlerde yapay resifler üzerine inşa edilen rüzgâr türbinlerinin biyoçeşitlilik ve ekolojik etkilerini anlayabilmek ve iklim krizi ile mücadele kapsamında ulusal düzeyde oluşturulacak eylem planı ve strateji belgelerine katkı sunabilmek amacıyla ulusal ve uluslararası bilimsel literatürlerin incelenmesi ile hazırlanmıştır. Ulusal ve uluslararası bilimsel literatürlerin incelenmesinde, yayınlanan çalışmaların hakemli dergide yayımlanmış 34 farklı bilimsel çalışma ve araştırmacıların AR'lar ile ilgili proje deneyimlerinden de faydalanılmıştır. Bu kapsamda iklim değişikliği bağlamında yenilenebilir enerjinin önemi ve deniz ekosistemlerinin korunması perspektifiyle ele alınmıştır ve yapay resif-rüzgâr türbini etkileşimlerinin olumlu ve olumsuz yönleri değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Offshore wind farms (OWF), rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji, yapay resif, biyoçeşitlilik.

Offshore wind farms (OWF), artificial reefs (ARs) and marine ecology relationship

Abstract

The underwater foundations and surrounding structures of offshore wind turbines have the potential to function as artificial reefs (AR), creating new habitats for marine species. This

*Kadriye ZENGİN, zenginkadriye@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3730-0042>

Dilek TÜRKER, dturker@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-8725-7604>

Abdulkadir ÜNAL, k9845048@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9267-3258>

represents an important opportunity to combine renewable energy generation with the promotion of marine biodiversity. When AR is utilised as an infrastructure for wind turbines with conscious planning, it can simultaneously enable both clean energy production that contributes to combating climate change and the protection of marine ecosystems. This study was prepared by examining national and international scientific literature in order to understand the biodiversity and ecological impacts of wind turbines built on artificial reefs in different seas and to contribute to the action plans and strategy documents to be created at national level within the scope of combating the climate crisis. In the review of national and international scientific literature, 34 different scientific studies published in peer-reviewed journals and the project experiences of researchers related to ARs were also utilised. In this context, the importance of renewable energy in the context of climate change and the protection of marine ecosystems has been discussed from the perspective of conservation and the positive and negative aspects of artificial reef-wind turbine interactions have been evaluated.

Keywords: Offshore wind farms (OWF), wind energy, renewable energy, artificial reef, biodiversity.

1. Giriş

İklim değişikliğiyle mücadelede yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla yaygınlaşması hayati önem taşımaktadır. Özellikle rüzgâr enerjisi, küresel ölçekte en fazla kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (GWEC) tarafından hazırlanan “2024 Küresel Rüzgâr Raporu”nda, 2023 yılında kara ve deniz üstü toplam 1 TW (terawatt) rüzgâr enerjisi kapasitesi kurulduğu bildirilmektedir. Kıyı alanlarının sınırlı olması ve karada uygun alan bulmanın zorluğu nedeniyle rüzgâr türbini yatırımları giderek açık denizlere kaymaktadır. Açık deniz rüzgâr çiftlikleri (offshore wind farms, OWF), enerji ihtiyacını karşılamada önemli bir potansiyele sahip olmakla birlikte, deniz ekosistemleri üzerindeki etkileri konusunda çeşitli endişeler de doğurmaktadır. Nitekim, balıkçılık sektörü başta olmak üzere rüzgâr sörfçüleri gibi deniz sporcularının da dahil olduğu denizel ekosistemin bazı paydaşları rüzgâr çiftliklerinin bu ekosistemdeki canlı yaşamını olumsuz etkileyebileceğini dile getirirken, diğer yandan rekreasyonel balıkçılık sektörü gibi paydaşlar tarafından ise bu yapılar, balıklar başta olmak üzere diğer deniz canlılarına yeni habitatlar olabileceği için özellikle sektörün ilgi alanı gereği balık tür ve birey sayılarındaki artışa neden olacağı öngörülmektedir.

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin su altındaki temelleri ve etrafındaki yapılar, aslında yapay resif (Artificial Reef-AR) işlevi görerek deniz canlıları için yeni habitatlar oluşturma potansiyeline sahiptir. Bu durum, yenilenebilir enerji üretimi ile deniz biyoçeşitliliğinin desteklenmesini bir araya getiren önemli bir fırsata işaret etmektedir. AR, bilinçli planlama ile rüzgâr türbinlerinin altyapısı olarak değerlendirildiğinde, hem iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlayan temiz enerji üretimini, hem de denizel ekosistemlerin korunmasını eşzamanlı olarak mümkün kılabilir. Bu çalışma, farklı denizlerde yapay resifler üzerine inşa edilen rüzgâr türbinlerinin biyoçeşitlilik ve ekolojik etkilerini anlayabilmek ve iklim krizi ile mücadele kapsamında ulusal düzeyde oluşturulacak eylem planı ve strateji belgelerine katkı sunabilmek amacıyla ulusal ve uluslararası bilimsel literatürlerin incelenmesi ile hazırlanmıştır. Ulusal ve uluslararası bilimsel literatürlerin incelenmesinde, yayınlanan çalışmaların hakemli dergide olması ve derginin indeks olarak ise başta Web of Science, DOAJ, Index Copernicus, Google Scholar, Crossref, ROAD, DRJI, OAJI, MIAR ve EZB gibi indekslerde yer almasına

dikkat edilmiş olup 34 farklı bilimsel çalışmanın yanı sıra araştırmacıların AR'lar ile ilgili proje deneyimlerinden de faydalanılmıştır. Bu kapsamda iklim değişikliği bağlamında yenilenebilir enerjinin önemi ve deniz ekosistemlerinin korunması perspektifiyle ele alınmıştır ve yapay resif-rüzgâr türbini etkileşimlerinin olumlu ve olumsuz yönleri değerlendirilmiştir.

1.1 Yapay resifler ve biyoçeşitlilik

Yapay resif (Artificial Reef-AR), doğal veya insan yapımı malzemelerden oluşturulan ve deniz tabanına yerleştirilen, amaçlı olarak canlı kaynaklar üzerinde fiziksel, biyolojik veya sosyo-ekonomik süreçleri etkilemek için tasarlanan yapılardır. Tarihsel olarak balıkçılık verimliliğini artırmak, biyoçeşitliliği zenginleştirmek ve kıyı erozyonunu önlemek gibi çeşitli hedeflerle binlerce yıldır farklı tipte yapay resifler kullanılmaktadır. Günümüzde yapay resifler; balık popülasyonlarını desteklemek, yaşam alanı oluşturmak, dalış turizmi ve akuakültür faaliyetlerini geliştirmek gibi amaçlarla yaygın şekilde kullanılan bir deniz teknolojisidir. Bu yapılar genellikle doğal resiflere benzer yapısal özelliklerde tasarlanır ve deniz canlılarının kısa sürede kolonizasyonu için uygun karmaşık yüzeyler sunar. Nitekim yapay resiflerin ortama kazandırdığı sert yüzeyler, algler, yumuşakçalar, mercanlar ve diğer omurgasızlar için tutunma ve büyüme alanı sağlayarak, çıplak yumuşak zemine kıyasla habitat heterojenliğini artırır. Habitat heterojenliğindeki bu artış, genellikle tür çeşitliliği ve birey yoğunluğunu olumlu yönde etkiler.

[1] tarafından hazırlanan meta-analiz çalışmasında, farklı denizel ekosistemlerde kurulan yapay resiflerin, doğal resiflere yakın düzeyde balık yoğunluğu, biyokütlesi, tür zenginliği ve çeşitliliği barındırabildiğini ortaya koymuştur. Özellikle balık topluluklarının iyileştirilmesi hedefiyle kurulan yapay resiflerin, çevredeki doğal kayalık veya mercan resiflerine benzer biçimde balıkları cezbediği ve desteklediği gözlenmiştir. Söz konusu çalışmada 39 istasyon üzerinde inceleme yapılmış olup yapay resiflerin ortalama olarak doğal resiflerle benzer balık tür çeşitliliği ve bolluğu sağladığı vurgulanmıştır. Bu bulgu, uygun tasarlanmış yapay resiflerin ekosistem restorasyonu ve biyolojik çeşitliliği artırma konusunda etkili bir araç olabileceğini göstermiştir. Yapay resifler ayrıca su kolonunda ve dipte yeni besin zincirleri oluşumunu tetikleyebilir. Yine [1] tarafından yapılan çalışmada resif yapısına yerleşen süspansiyon yiyici organizmalar (midye, istiridye gibi) sudaki organik parçacıkları filtreleyerek biyokütleye dönüştürür; bunların dışkıları dipteki detritivor canlılar için besin kaynağı olur ve böylece trofik ağın tabanından başlayarak yukarı doğru bir zenginleşme görülür. Artan besin ve barınak imkânı, daha büyük avcı türler (balıklar, yengeçler ve hatta memeliler) için de cezbedici olup lokal biyolojik üretimi destekleyebilir.

Öte yandan, yapay resif uygulamalarının her zaman istenen sonucu vermeyebileceği ve ek bazı riskler barındırabileceği de bilinmektedir. Yapay resiflerin balık popülasyonlarını artırmadaki etkisi, “çekim-üretim” tartışmasını gündeme getirmiştir; yani “bu yapılar gerçekten yeni balık üretimi mi sağlıyor, yoksa mevcut balıkları sadece belirli bir noktada toplamaktan mı ibaret?” Bu konuda yapılan çalışmaların bir kısmı, uygun koşullarda yapay resiflerin ek üretim yaratabildiğini, en azından balıkların büyüme ve kondisyonunda bir düşüşe yol açmayarak “ekolojik tuzak” oluşturmadığını göstermektedir. Kuzey Denizi’nde yapay resif işlevi gören yapılarda yaşayan *Gadus morhua* ve *Trisopterus luscus* balık türleri üzerinde yapılan bir araştırmada, bu balıkların büyüme boyları ve kondisyonlarının, yakındaki doğal kumluk alanlardaki akranlarıyla

benzer veya daha iyi olduğu tespit edilmiş ve yapay resifin bu türler için bir ekolojik tuzak oluşturmadığı sonucuna varılmıştır [2]. Bununla birlikte, yapay resiflerde biriken balıkların avcılık baskısına karşı korunmaması durumunda yoğun avlanmaya maruz kalıp stokların zarar görebileceği de bir gerçektir; dolayısıyla yapay resiflerin etkinliği, balıkçılık yönetimiyle entegre edilme düzeyine de bağlıdır.

Yapay resiflerin bir diğer potansiyel olumsuz etkisi, istilacı (yabancı) türlere yeni yayılma alanları sunma potansiyelidir. Yeni sert zemin yapıları, bölgeye ait olmayan türlerin yerleşip çoğalmasına imkân tanıyarak doğal habitatlardaki tür bileşimini olumsuz yönde etkileyebilir. Nitekim rüzgâr türbinleri, petrol platformları gibi deniz yapıları üzerinde gerçekleştirilen gözlemlerde, Akdeniz ve Atlas Okyanusu gibi farklı biyocoğrafik bölgelere ait türlerin bu yapılara tutunarak yayılım gösterdiği saptanmıştır. Bu durum, yapay resiflerin “basamak taşı” etkisiyle yabancı türlerin dağılımını kolaylaştırabileceğini göstermektedir [3]. Sonuç olarak, yapay resiflerin biyoçeşitliliğe etkisi genellikle olumlu yönde olsa da elde edilecek faydalar resifin tasarımına, materyal özelliklerine, konumuna ve o bölgedeki doğal türlerin özelliklerine bağlıdır. Doğru yerde ve doğru tasarımla kurulmuş yapay resifler, doğal resiflere yakın bir ekolojik işlev görebilirken, plansız uygulamalar beklenen faydayı sağlamayabileceği gibi istenmeyen ekosistem değişimlerine de yol açabilir. Bu nedenle, yapay resif projeleri bilimsel ilkeler ışığında planlanmalı ve uzun vadeli izleme programlarıyla desteklenmelidir.

1.2 Deniz üstü rüzgâr türbinleri ve biyoçeşitlilik

Açık deniz rüzgâr türbinleri (ORW), enerji üretiminin yanı sıra deniz ortamında bir dizi ekolojik etkiyi beraberinde getirmektedir. Bu etkiler yeni habitat oluşturulması gibi olumlu sonuçlara sebep olurken aynı zamanda gürültü kirliliği, çarpışma riskleri gibi olumsuz sonuçlarıyla da bilimsel araştırmalara konu olmuştur. Rüzgâr türbinlerinin deniz tabanına sabitlenen temelleri ve etraflarındaki koruma yapıları, yeni sert zemin habitatları oluşturarak çevredeki biyotayı değiştirmektedir. Yumuşak sedimentli bir deniz tabanına dikilen beton/çelik yapı ve çevresine dökülen kaya parçaları (scour proteksiyonu) kısa sürede epifitik algler, midye ve deniz süngeri gibi biyo-kirlenme (biofouling) toplulukları tarafından istila edilir. Bu yapay resif etkisi, OWF’lerin kurulmasından sonraki ilk aylardan itibaren gözlenebilir düzeydedir. [4], tarafından yapılan “Açık deniz rüzgâr çiftlikleri Gadidae familyasına ait balıklar için verimli alanlar mı yoksa ekolojik tuzaklar mı? Büyüme, kondisyon indeksi ve diyet kompozisyonu üzerindeki etkisi” konulu çalışmada, Belçika kıyılarındaki bir rüzgâr çiftliğinde türbin kaidelerine yerleşen deniz canlıları arasında midyeler, deniz şakayıkları, deniz kestaneleri, denizyıldızları, barnakıllar (barnacles) ve boru solucanları gibi yüksek çeşitlilikte bentik türler kaydedilmiştir. Genelde ilk yerleşen organizmalar, su kolonundan organik parçacık filtreleyen süspansiyon yiyiciler (midyeler) olmaktadır. Bu canlılar kısa sürede yüksek bir biyokütle oluşturup çevredeki suyun plankton ve partikül yükünü azaltarak su kalitesini olumlu yönde etkiler. Filtre ettikleri organik maddeyi dışkı yoluyla deniz tabanına aktarırlar ve böylece yapı etrafındaki sedimentte, organik madde ve besin artışı gözlenir. Bu zenginleşme, dipte beslenen omurgasızlar ve balıklar için ek gıda kaynağı sağlayarak onların bölgeye çekilmesine yol açar. Sonraki aşamalarda, söz konusu yapılar etrafında küçük balıklar ve omurgasızlarla beslenen yırtıcı balık türleri (lüfer, mezgit, morina vb.) toplanmaya başlar. Barınak ve besin imkânının artmasıyla balık popülasyonlarında yerel bir artış görülebilir. Nitekim Avrupa denizlerinde OWF’lerin devreye girmesiyle birlikte, sert zemin seven balık türlerinin (kayabalığı, kabuklu avcıları vb.) ilgili sahalarda daha sık gözlemlendiği rapor edilmiştir. Yine [4] tarafından Belçika açıklarında yaptıkları uzun süreli araştırmalar, rüzgâr türbini temellerinin çevresinde

Gadus morhua ve *Trisopterus luscus* gibi balık türleri bol miktarda bulunduğunu, bu balıkların türbin sahasını düzenli olarak kullandığını ve büyüme-kondisyon açısından doğal alanlardan geri kalmadığını göstermiştir. Bu bulgular, rüzgâr türbinlerinin balık birikimi ve üretimi açısından mini resifler gibi işlev gördüğünü ortaya koymaktadır.

Açık deniz rüzgâr çiftliklerinin ekosistem üzerindeki bir diğer önemli etkisi, balıkçılığa kapalı alanlar (no-take zones) oluşturmalarıdır. Güvenlik ve navigasyon gerekçeleriyle pek çok ülkede rüzgâr çiftliklerinin bulunduğu sahalarda trol avcılığı gibi faaliyetler sınırlandırılmıştır veya tamamen yasaklanmıştır [5]. Bu durum söz konusu alanda yaşayan deniz canlılarının balıkçılık baskısından kısmen muaf olacağı anlamına gelir. Çalışmaya konu olan bilimsel çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, rüzgâr çiftliklerinin yarattığı bu koruma etkisinin, bentik habitatlar ve balık stokları için bir tür sığınak işlevi görerek, deniz koruma alanlarına benzer yararlar sağlayabileceği öngörülmektedir. Hatta uygun konum ve sıkı koruma tedbirleriyle, bazı durumlarda rüzgâr çiftliklerinin geleneksel deniz koruma alanlarından daha etkin bir koruma sağlayabileceği de değerlendirilmektedir. Kuzey Denizi örneklerinde, rüzgâr santrallerinin kurulu olduğu ve balıkçılığa kapatılan bölgelerde dipteki hassas habitatların tahrip olmadan korunabildiği, bentik canlıların ve balıkların ömür boyu sığınak bulabildiği rapor edilmiştir [2]. Bu durum balıkçılık baskısının azalmasıyla bireylerin daha uzun yaşama ve daha büyük boylara ulaşma olasılığını artırır; bunun sonucunda, üreme kapasiteleri yükselen bu balıkların bir kısmı zamanla korunmuş bölgeden dışarı göç ederek civar bölgelere taşma (spillover) etkisi oluşturabilmektedir. Nitekim yapay resifler ve OWF'ler etrafında sıklıkla gözlenen daha iri balık bireyleri ve artan yumurtayavru bolluğu, bu taşma etkisinin ve koruma alanı benzeri etkinin bir göstergesi olarak yorumlanmaktadır.

Bununla birlikte, deniz üstü rüzgâr türbinlerinin olumsuz ekolojik etkileri de kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Özellikle türbinlerin inşa ve işletme süreçlerinin deniz canlıları üzerindeki etkileri dikkat çekmektedir. Türbin temellerinin deniz tabanına çakılması sırasında oluşan şiddetli yüksek sesli darbe (pile-driving gürültüsü), başta deniz memelileri olmak üzere işitsel duyarlılığı yüksek türleri bölgeden uzaklaştırabilmektedir. *Phocoena phocoena* türünün kazık çakma faaliyetleri esnasında bölgeden kaçtıkları ve bu inşaat gürültüsünden belirgin şekilde rahatsız oldukları belgelenmiştir. Almanya'daki bir OWF inşası sırasında yapılan ölçümlerde, kazık çakma gürültüsünün 20 km'ye varan mesafelerde bulunan yaban hayatı canlılarında davranış değişikliğine sebep olarak dağılıma neden olduğu tespit edilmiştir [5,6]. Gürültü kirliliği sorunu inşaat aşamasında en üst düzeydeyken, işletme aşamasında ise daha düşük seviyede devam eder. Türbinlerin çalışırken su altına ilettiği düşük frekanslı uğultu ve titreşimler, bazı balık türlerini rahatsız edebilir. Özellikle yüksek hareketliliğe sahip pelajik balıkların (uskumru familyasına ait orkinos vb.) işletme sırasındaki seslerden rahatsız olup bölgeden uzak durabildiğine dair bulgular mevcuttur. Bununla birlikte, çoğu balık türünün zamanla türbin kaynaklı seslere alışabildiği veya bu sesleri tolere edebildiği; dolayısıyla işletme aşamasındaki gürültünün uzun vadeli etkilerinin tür ve bölgeye göre değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Rüzgâr çiftliklerinin çevresel etkilerinden bir diğeri ise, manyetik alan ve elektrik aksı oluşturmalarıdır. Türbinleri birbirine ve karaya bağlayan denizaltı kabloları, özellikle doğru akım iletiminde, çevrelerinde zayıf elektromanyetik alanlar oluşturur ve bu alanlar, göç eden yılan balıkları, vatozlar ve köpekbalıkları gibi manyetik duyarlılığı olabilen bazı türleri potansiyel olarak etkileyebilir. [7] çalışmasında, *Anguilla anguilla* gibi bazı

diadrom balık türlerinin yapay manyetik alan kaynaklarına karşı davranış değişikliği sergilediği rapor edilmiştir. Ancak bu etkinin popülasyon düzeyinde ciddi bir olumsuzluğa yol açıp açmadığı henüz net olmamakla birlikte mevcut araştırmalar, OWF kablolarından kaynaklanan elektromanyetik alanların oldukça lokal ve düşük şiddette olduğunu, dolayısıyla büyük ölçekli balık göçleri üzerinde belirgin bir bariyer etkisi beklenmediğini göstermektedir. Ancak bu durum özellikle hassas göçmen türler açısından araştırılmaya devam edilmektedir. Fiziksel habitat değişimi de rüzgâr türbinlerinin ekolojik etkilerinin önemli bir parçasıdır. Bir OWF kurulurken, yumuşak tabanlı bir alanda belirli bir alanı kaplayan sert yapılar inşa edilir. Bu yapılar sebebiyle yumuşak tabanlı alan yerini sert tabanlı alana bırakarak mevcut alan içerisinde habitat dönüşümüne neden olur. Kum veya çamur zemin habitatı kısmen kaybolur, yerine sert zemin habitatı ortaya çıkar. Bu yapay dönüşüm, bentik ekosistemde tür kompozisyonunu etkiler. Örneğin, türbin temellerinin hemen altında ve etrafındaki birkaç metre çapındaki alanda artık kumda yaşayan solucanlar, yengeçler yerini zamanla kaya yüzeyine tutunan midyeler ve buna bağlı yaşayan karideslere bırakacaktır. Bu durum, yumuşak zemine uyum sağlamış bazı türler için habitat kaybı demektir. Bununla birlikte, türbinlerin kapladığı alanın toplam deniz tabanına oranı genellikle oldukça küçüktür (her bir monopile etrafında ~20 m yarıçaplı bir alan). Dolayısıyla, genel anlamda bölgenin yumuşak zemin karakteri büyük ölçüde korunur ve sadece lokal ölçekte bir mikro-habitat çeşitlenmesi söz konusu olur. Habitat çeşitliliğinin artması, toplam tür çeşitliliği üzerinde olumlu bir etkiye de yol açabilir; çünkü artık aynı alanda hem yumuşak zemin türleri (yapıların biraz uzağında) hem de sert zemin türleri (yapıların üzerinde) bir arada bulunabilecektir. Bu nedenle net etki, ölçüm ölçeğine bağlıdır; mikro ölçekte bazı türler çekilip yerini başkalarına bırakırken, mezo ölçekte bakıldığında habitat çeşitliliği mevcut biyoçeşitliliği de artırabilir.

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin diğer olumsuz etkileri arasında, kuş ölümleri ve davranış değişimleri de sayılmalıdır (her ne kadar bu etki su altı ekosisteminden ziyade deniz üstü yaşamı ilgilendirse de ekolojik bütünlük açısından önemli görülür). Özellikle deniz kuşları, OWF sahalarında farklı tepkiler göstermektedir. Bazı dalıcı türler (dalıcı martılar, sümsük kuşu) türbinlerin bulunduğu alanlardan kaçınma davranışı sergileyerek beslenme alanlarını değiştirebilirken, büyük martı türleri gibi bazı kuşlar ise kulelere yaklaşmakta ve dönen pervanelerle çarpışma riskine maruz kalmaktadır. [8] Kuzey Denizi'ndeki OWF'lerin bazı dalıcı kuş popülasyonlarını belirgin şekilde uzaklaştırdığını rapor ederken; özellikle büyük martıların türbinlere cezp olduğunu ve bunun çarpma kaynaklı kuş ölümlerini artırabileceğini belirtmiştir. Kuşlar üzerindeki bu etkiler, proje planlama aşamasında göç yollarının ve önemli kuş alanlarının dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Özetle, deniz üstü rüzgâr türbinleri deniz ekosistemlerinde çok yönlü etkilere sahiptir. Bir yandan yapay resif etkisi ve balıkçılık baskısını azaltma yoluyla su altı biyoçeşitliliği ve biyolojik üretimi destekleyebilecek olumlu yönlere sahipken, diğer yandan gürültü kirliliği, habitat değişimi, yabancı tür kolonizasyonu ve hassas türler üzerindeki olumsuz etkiler gibi yönetilmesi gereken risklere de sahiptir. Bu nedenle, OWF projelerinin ekolojik etkileri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilerek, olumlu etkileri azami seviyede ve olumsuz etkileri asgari seviyede tutacak stratejileri geliştirmek büyük önem taşımaktadır.

1.3 Biyoçeşitlilik açısından değerlendirme

Yapay resifler ve deniz üstü rüzgâr türbinleri, her ikisi de deniz ortamına insan yapımı sert yapılar ekleyerek habitat yapısını değiştirir ve bu yolla biyoçeşitlilik üzerinde etkili olurlar. Ancak bunların tasarım amacı, kapsam ve ölçekleri farklı olduğu için biyoçeşitliliğe etkilerinin ayrıntılı bir karşılaştırması yapılmalıdır. Yapay resifler, birincil amacı itibarıyla biyolojik çeşitliliği ve canlı varlığını artırmak üzere tasarlanmış mühendislik yapılarıdır. Dolayısıyla yapıları, konumları ve malzemeleri genellikle maksimum ekolojik faydayı sağlayacak şekilde seçilir (örneğin karmaşık yüzeyli beton bloklar, doğal resif topluluğunu cezbetmek için). Buna karşın rüzgâr türbini temelleri öncelikle mühendislik gereksinimleri (stabilite, maliyet, inşaat kolaylığı) gözetilerek inşa edilir; ekolojik işlev başlangıçta ikincil bir öneme sahiptir. Bununla birlikte, rüzgâr türbinleri de fonksiyonel olarak yapay resiflere benzer biçimde kolonize olduğundan, biyoçeşitlilik üzerine bazı etkiler bakımından yapay resifler ile OWF arasında benzerlikler bulunmaktadır. Her iki durumda da yeni sert substrat eklenmesi bölgedeki tür kompozisyonunu zenginleştirebilir. Özellikle OWF’ler genelde geniş yumuşak zemin alanlarında kurulduğu için, buralara eklenen her bir sert yapı aslında çevreye göre oldukça nadir bir habitat türü oluşturur. Bu, o bölgede normalde barınamayan sert zemin epifauna ve flora türlerinin ortaya çıkmasına imkân tanır ve sonuç olarak yapay resif etkisiyle yerel biyoçeşitlilik artışı gözlenebilir. Örneğin, Kuzey Denizi’nde kumlu bir alanda kurulan OWF’de birkaç yıl içinde hem bentik omurgasız çeşitliliğinin hem de buna bağlı yaşayan balık türlerinin sayısının önemli ölçüde arttığı raporlanmıştır. Bu anlamda, OWF’ler “bataklıkta bir vaha” misali, çamur veya kum denizinde birer kaya resifi adası olarak işlev görerek tür çeşitliliğinin artmasına katkı sağlar. Nitekim [3] tarafından yayımlanan kapsamlı derlemede, Avrupa ve Amerika’daki OWF’lerin su altı yapılarının yüksek çeşitlilikte biyo-kirlenme toplulukları barındırdığı ve yerel ekosistemin tür zenginliğini artırdığı vurgulanmıştır. Yapay resifler de benzer şekilde, bulundukları ortamdaki tür çeşitliliğini artırma potansiyeline sahiptir; ancak yapay resiflerin başarı düzeyi, tasarım özelliklerine göre değişir. Örneğin, karmaşık yüzeyli ve barınak boşlukları fazla olan tasarımlar, düz bloklara kıyasla çok daha fazla türü kendine çekmektedir.

Yapay resifler ve OWF’lerin biyoçeşitlilik üzerindeki etkilerinde bir diğer ortak yön, mevcut türlerin bolluğundaki değişimlerdir. Genelde her iki yapının da yakın çevresinde sert zemin türlerinin (midye, deniz lalesi, algler vb.) popülasyonları dramatik biçimde artar. Bu artış, çoğu zaman bölgedeki toplam biyokütleyi de yükseltir. Örneğin, Belçika’daki yapay bir resif projesinde, resif bloğu çevresinde omurgasız biyokütlesinin komşu yumuşak zemine oranla 20 kat fazla olduğu belirlenmiştir [9]. Benzer şekilde [10] tarafından yapılan çalışmada Kaliforniya açıklarındaki petrol platformlarında yapılan bir çalışmada, bu yapıların etrafındaki balık üretim kapasitesinin birim alan başına dünyanın en verimli doğal habitatlarından (örneğin mercan resifleri, mangrovlar) bile daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu çarpıcı bulgu, iyi konumlandırılmış büyük yapısal komplekslerin (platform, resif, türbin temeli vb.) ikincil üretimi ciddi oranda artırabileceğini göstermektedir. Rüzgâr türbinleri de çok sayıda birimden oluşan geniş bir alanı kapladığında, bir bütün olarak ele alındığında, bölgesel ekosistemde önemli ölçüde biyokütle artışına katkı sunabilir. Dahası, rüzgâr çiftlikleri, coğrafi olarak birbirinden kopuk sert zemin habitatları arasında birer bağlantı noktası işlevi görerek bazı türlerin yayılımını kolaylaştırabilir (örneğin, larval yayılım yoluyla). Bu durum biyojeografik bağlantısallık açısından olumlu olabileceği gibi, istenmeyen yabancı türlerin yeni bölgelere sıçramasını da kolaylaştırabilir. Nitekim [11] tarafından yapılan araştırmada, OWF’lerin yabancı türler için basamak taşı işlevi görerek Akdeniz kökenli bazı türlerin Kuzey Denizi’ne doğru yayılımını hızlandırabileceğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla,

AR ve OWF yapılarına bağlı biyoçeşitlilik artışı her zaman arzu edilen türlerden oluşmayabilir; ekosistem açısından bakıldığında biyotik bütünlüğü bozabilecek istilacı türlerin kontrolü bu bağlamda kritik bir konudur.

Biyoçeşitlilik açısından bir diğer değerlendirme kriteri, türlerin ekolojik rollerinin ve trofik ağları nasıl etkilediğidir. Yapay resifler, amaçlarına bağlı olarak belirli tür gruplarını (örneğin ekonomik değeri yüksek balıklar) desteklemek üzere tasarlanmış olabilir. Bu durumda, biyoçeşitlilik artışı sağlanırken avcı balıkların küçük balıklara oranla daha fazla artması gibi trofik yapıda da insan yönelimli bir değişim olabilir. Rüzgâr türbinleri ise amacı gereği herhangi bir türü hedeflemez, bu nedenle ortaya çıkan ekosistem yapısı doğal bir süreç izleyecektir. Çoğu çalışmada, OWF'lerin tüm trofik seviyelerde etkiler yaratabildiği gözlenmiştir. Dipte yeni filtratörler, onların peşinden gelen detritivorlar, küçük balıkları avlayan orta seviye avcılar ve en tepede fok, kuş gibi avcılar dahil olmak üzere geniş bir yelpazede organizma bu değişimden pay alır. Sonuç olarak bölgedeki biyoçeşitliliğin yanı sıra türler arası etkileşimler de değişir. Hollanda kıyılarındaki bir OWF'de, midyelerin yoğun filtrasyonu nedeniyle su kolonundaki fitoplankton yoğunluğunun yerel ölçekte azaldığı, bunun da planktonla beslenen balıkların o bölgede sayıca düşmesine yol açtığı, buna karşılık dipteki yırtıcı deniz yıldızlarının midye bolluğu sayesinde çok fazla arttığı kaydedilmiştir [12]. Bu tip ekolojik denge değişimleri, yapay resiflerde de görülebilir. Dolayısıyla hem yapay resiflerin hem de rüzgâr türbinlerinin eklenmesiyle oluşan yeni habitatın hangi türlere avantaj sağladığı, biyoçeşitlilik değerlendirmesinde kalitatif olarak önem taşır. İdeal olan, bu yapısal müdahalelerin yerli türlerin çeşitliliğini ve mevcut popülasyonda artış sağlaması, ekosistemin işleyişini iyileştirmesi ve en önemlisi de istenmeyen türlere veya tek tipleşmeye yol açmamasıdır.

Genel olarak, literatürde yapay resifler ve OWF'lerin biyoçeşitlilik etkileri karşılaştırmalı şekilde incelenmiş ve her ikisinin de uygun şartlarda deniz yaşamını zenginleştirebildiği sonucuna varılmıştır. [13], yaptıkları derlemede, OWF'lerdeki scour koruma yapılarının işlevsel olarak yapay resif kriterlerini karşıladığını; barınma, beslenme, üreme alanı sağladığını ve balık bolluğunu sıkça artırdığını belirtmiştir. Aynı çalışmada, yapay resif tasarım ilkelerinin gelecekte OWF altyapılarına entegre edilmesi durumunda deniz canlı türleri açısından çok daha yüksek bir ekolojik değer elde edilebileceği vurgulanmaktadır. Buna karşılık, [14] dünya genelindeki yapay resif uygulamalarını değerlendirdikleri meta-analizde, her ne kadar yapay resifler bulundukları bölgede tür sayısını belirgin artırsa da referans doğal resiflerle tam anlamıyla aynı kompozisyona ulaşamadıklarını istatistiksel olarak ortaya koymuştur. Bu durum, yapay yapıların hiçbir zaman doğal habitatların birebir ikamesi olamayabileceğini, ancak yine de önemli ölçüde fayda sağladığını akılda tutmak gerektiğini gösterir. Öte yandan, [15] tarafından yapılan bir incelemede, rüzgâr çiftliklerinin uygun planlama ile deniz koruma alanları kadar etkili koruma ve üretim alanları olabileceği not edilmiş; ancak özellikle kuşlar gibi gruplar açısından bazı uyumsuzluklar olabileceği ifade edilmiştir. Yani rüzgâr çiftlikleri deniz tabanı ve su kolonundaki pek çok canlı için habitat ve korunak sağlarken, üst trofik seviyedeki deniz kuşları gibi bazı türler için olumsuzluk teşkil edebilir. Bu nedenle, biyoçeşitlilik değerlendirmesi yapılırken tüm organizma grupları ayrı ayrı ele alınmalı ve farklı ekolojik ölçütler birlikte değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak, yapay resifler de deniz üstü rüzgâr türbinleri de çevrelerindeki biyoçeşitliliği değiştirir; çoğu senaryoda çeşitliliği ve biyokütleyi artırır, ancak beraberinde yeni etkileşimler ve bazen istenmeyen türler de getirebilir. En iyi uygulama,

her iki yaklaşımın da avantajlarını bir araya getirmek, yani rüzgâr enerjisi altyapısını doğaya duyarlı yapay resif prensipleriyle tasarlayarak hem enerji üretilip hem de biyoçeşitliliği güçlendirmektir. Bu konuda atılacak adımlar ekolojik sürdürülebilirlik perspektifiyle ele alınmalıdır.

2. Ekolojik değerlendirme

Deniz üstü rüzgâr türbinlerinin ve yapay resiflerin sucül ekosistemlere entegre edilmesi, yalnızca tür çeşitliliği boyutuyla değil, su kalitesi, besin döngüleri-karbon dengesi ve sürdürülebilirlik başta olmak üzere daha geniş ekolojik süreçler açısından da değerlendirilmelidir.

2.1 Su kalitesi

Rüzgâr türbinlerinin su altında oluşturduğu yeni habitatlara bağlı olarak üzerinde yoğun biçimde gelişen ve süzerek beslenen canlılar sayesinde su kalitesi etkilenebilir. Türbin temellerine ve yapay resiflere yerleşen midye, istiridye, tulumlular gibi filtratör (filter feeding) organizmalar, sudaki askıda kalmış partikülleri ve planktonik canlıları sürekli olarak süzerek beslenir. Bu süreç, yerel ölçekte suyun berraklığını artırabilir ve ışık penetrasyonunu yükselterek birincil üretimi (fitoplankton ve makroalg büyümesi) etkileyebilir. Midye resiflerinin bulunduğu OWF sahalarında, çevredeki suların komşu bölgelere göre daha berrak olduğu ve klorofil-a konsantrasyonlarının düşük seyrettiği gözlemlenmiştir [16]. Ancak filtrasyon yoluyla su kolonu temizlenirken, bu organizmaların dışkıları ve psödo-feses dipte organik madde birikimine yol açar. Bu durum, lokal zenginleşme sağlayarak dipteki bakteri faaliyetini ve bentik besin ağını destekleyebilir. Dolayısıyla su kalitesindeki değişim çift yönlüdür, suda askıda madde azalır, dipte organik içerik artar. Bu artış, uygun akıntı koşullarında çevreye yayılıp seyreterek ciddi bir olumsuzluk yaratmaz ancak durgun ortamlarda aşırı birikme olursa, lokal oksijen tüketimi artışı gibi etkiler görülebilir. Yapay resifler de benzer şekilde su akıntı rejimini ve dalga kırılımını değiştirip tortu dinamiklerini etkileyebilir. Belirli şekilde tasarlanmış resifler kıyı erozyonunu azaltmak için kullanıldığında, dalga enerjisini kırarak sığ kesimde çökelen partikül miktarını artırabilir. Genel anlamda, OWF ve yapay resiflerin su kalitesine etkileri lokal ölçekte ve genellikle nötr-olumlu yöndedir; büyük ölçekli olumsuz bir su kirliliği etkisi beklenmez. Ayrıca bu yapılar herhangi bir kimyasal kirlenici salmadığı için (boya dökülmeleri veya yağ sızıntıları istisnai arızalı durumlardır), su kalitesi daha çok biyolojik etkileşimler aracılığıyla değişir. Sonuç olarak, uygun tasarım ve izleme ile rüzgâr türbinleri/yapay resif kombinasyonlarının su kolonunda doğal filtrasyon kapasitesini artırarak su kalitesine olumlu katkı yapması mümkündür. Nitekim [17] tarafından yapılan bir çalışmada, OWF sahalarında biyo-kirlenme topluluklarının yıllık bazda tonlarca partikülü filtre ederek sudan çektiği hesaplanmıştır. Bu da denizlerin kendi kendini temizleme mekanizmalarına destek sağlayan bir hizmet olarak değerlendirilebilir.

2.2 Karbon döngüsü

Yenilenebilir enerji yatırımlarının en önemli küresel çaptaki çevresel faydası, fosil yakıt kullanımını azaltarak karbon emisyonlarını düşürmesidir. Rüzgâr türbinleri, işletme aşamasında neredeyse sıfır karbon emisyonu ile elektrik üretir. Her ne kadar imalat, nakliye ve inşaat süreçlerinde bir miktar karbon ayak izi oluşsa da bir rüzgâr türbini ömrü boyunca üretilen elektrik miktarıyla kıyaslandığında bu emisyon oldukça düşüktür.

[18] tarafından yapılan çalışmada, hayat döngüsü değerlendirmelerine göre açık deniz rüzgâr enerjisinin karbon yoğunluğu yaklaşık 11 g CO₂-eşdeğeri/kWh civarındadır ki bu değer, kömür yakıtlı termik santrallerin ~900 g CO₂/kWh seviyesindeki emisyonlarının %2'si gibi son derece düşük bir oran olduğu tespit edilmiştir. Yine aynı çalışmada LCA analizinde, açık deniz rüzgâr santrallerinin yaşam döngüsü boyunca ürettiği sera gazı emisyonunun, aynı elektriği üreten bir doğalgaz santraline kıyasla %98 daha az olduğunu rapor etmiştir. Dolayısıyla, deniz üstü rüzgâr türbinlerinin yaygınlaşması, atmosferik karbon birikiminin azaltılmasına ve iklim değişikliğinin yavaşlatılmasına ciddi katkı sağlar. Bu küresel ölçekli pozitif etki, deniz ekosistemleri dahil tüm biyosfer için uzun vadede okyanusların ısınma ve asitleşme hızının düşürülmesi gibi kritik öneme sahiptir.

Yerel ölçekte bakıldığında ise, yapay resif-rüzgâr türbini yapıları karbon döngüsünü organik karbonun biyolojik tutulumu açısından etkileyebilir. Bu yapılarda gelişen yoğun biyota, fotosentez ve biyolojik üretim yoluyla karbonu organik formda bünyelerine alır. Bir OWF yapısı üzerinde büyüyen makro algler, atmosferik CO₂'i emerek biyokütleye dönüştürebilir. Yine midyeler, fitoplanktonu tüketirken onun içerdiği karbonu kabuk ve doku formunda bir süreliğine depolar. Bu canlıların bir kısmı predatörlerce yenip karbon tekrar solungaçlardan CO₂ olarak atılsa da bir kısmı da ölürek karbonu dip sedimanına taşıyabilir. Hatta midye ve deniz kabuklularının kireçli kabukları, çözünmeden uzun süre sediman içinde kalarak karbon gömme (carbon sequestration) işlevi bile görebilir. Ancak bu etkinin büyüklüğü, fosil yakıt offset'ine kıyasla oldukça küçüktür. Yine de deniz yapılarının etrafında artan biyokütle, lokal karbon döngüsünü etkilemesi bakımından ilgi çekicidir. [18], geniş bir OWF alanındaki toplam biyolojik karbon stokundaki artışın, o bölgenin karbon bütçesine ölçülebilir bir katkı yapabileceğini öne sürmektedir (epibiyota ve balıklar yoluyla birkaç yüz tonluk artışlar gibi). Bu konu henüz tam olarak nicelleştirilmemiş olsa da doğa pozitif tasarımların, karbon depolama potansiyelini de artırabileceği düşünülmektedir. Örneğin, okyanuslarda karbon tutulumunda önemli rol oynayan midye resiflerinin yapay olarak türbin temellerinde teşvik edilmesi hem biyoçeşitliliği hem de karbon tutulumunu birlikte destekleyebilir.

2.3 Çevresel sürdürülebilirlik

Yapay resiflerin rüzgâr türbinleri altyapısı olarak kullanılması fikri, bütüncül bir mavi ekonomi ve sürdürülebilir okyanus yönetimi yaklaşımının parçası olarak değerlendirilebilir. Burada amaç, enerji üretimi, ekosistem sağlığı ve ekonomik faaliyetlerin bir arada gözetilmesidir. Eğer doğru uygulanırsa, rüzgâr çiftlikleri ile deniz koruma hedefleri ortak bir noktada buluşabilir. [19], denizel alan planlamasında rüzgâr çiftliklerinin uygun alana yerleştirilmesinin, deniz çevresinin korunması açısından da beklenmedik bir kazanç sağlayabileceğini belirtmiştir. Bu tür çoklu kazanım senaryoları, somut uygulamalarla desteklenmeye başlanmıştır. Özellikle Kuzey Denizi ülkelerinde, doğaya duyarlı tasarım (nature-inclusive design) kavramı OWF projelerine entegre edilmektedir. Bu yaklaşımla, türbin temellerine ekolojik nişler (örneğin balık barınma kovukları, istiridye resif üniteleri) eklenerek yapının biyolojik değeri artırılmakta hem enerji üretimi hem de ekosisteme net olumlu bir katkı sunulması hedeflenmektedir. Hollanda'daki yeni OWF projelerinde uygulanan "Balık Dostu Tasarım" modülleri, türbin temellerinin etrafına eklenen kafesli yapılar sayesinde genç balık ve ıstakozların saklanabileceği mikro-habitatlar yaratmış ve ilk izleme sonuçları bu yapıların pek çok tür tarafından hızla iskân edildiğini göstermiştir [20]. Benzer şekilde Danimarka'da bazı OWF'lerde, türbin ayaklarına istiridye yatakları yerleştirilerek hem nesli azalan bir türün restorasyonu hem de filtrasyon kapasitesinin artırılması amaçlanmaktadır [5].

Çevresel sürdürülebilirlik aynı zamanda izleme, adaptasyon ve yönetim süreçlerini de gerektirir. [21], Avrupa'daki OWF'lerin izleme programlarını inceledikleri çalışmalarında, ekosistem üzerindeki etkilerin kapsamlı takibinin önemini vurgulamış ve gelecekte olumlu etkilerin teşvik edilip olumsuzların azaltılması için aktif adaptif yönetim stratejileri önermiştir. Bu öneri, sürdürülebilir bir yaklaşımın özünü oluşturmaktadır. Yani rüzgâr çiftliklerinin ekolojik etkilerini ölçmek, anlamak ve bu bilgiye dayanarak tasarım veya işletme değişiklikleri yaparak daha doğa dostu uygulamalara geçmek şeklinde açıklanabilir. Örneğin, inşaat gürültüsünün balinalar üzerindeki etkisi izlendiğinde yüksek rahatsızlık tespit edilirse, bir sonraki projede ses yalıtımlı kazık çakma tekniklerine geçilmesi şeklinde bir öneri geliştirilmesini öngörmektedir. Nitekim [22] çalışmasında, bir OWF inşasında kullanılan baloncuk perdesi (bubble curtain) yönteminin, kazık çakma sırasında su altı gürültü seviyesini önemli ölçüde düşürerek mutur (porpoise) rahatsızlığını belirgin biçimde azalttığı gösterilmiştir. Bu tür teknolojik ve yönetsel çözümler, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda her yeni projede geliştirilmelidir.

Denizel ekosistemlerin korunumu açısından önemli bir konu da kümülatif ve uzun vadeli etkilerdir. Tekil bir OWF projesinin etkileri küçük görünse de denizlerde yüzlerce türbin kurulması planlandığı düşünüldüğünde toplam etki ciddi boyutlara ulaşabilir. Bu nedenle, sürdürülebilir planlama, kümülatif etki değerlendirmelerini de içermelidir. Özellikle kuş göç yolları, balık yumurtlama alanları, deniz memelilerinin kritik habitatları gibi hassas bölgelerde aşırı yoğunlaşmayı önlenmesi gerekir. Ayrıca tüm projelerin aynı tip alanlarda yoğunlaşması (örneğin hep kumul alanlara kurulması), belirli bir habitat tipine orantısız yük bindirebilir. Bu yüzden ülke ve bölge bazında deniz planlaması yapılırken, OWF alanlarının ekolojik açıdan en uygun bölgelere dağıtılması önerilmektedir (mevcut tür çeşitliliği düşük, bozulmuş alanların kullanılması vb.). Yine, OWF'lerin yaratacağı koruma etkisinden azami faydalanmak için, mevcut deniz koruma alanlarıyla sınırlandırılarak kurulması veya bu alanlara yakın konuşlanması üzerinde durulan stratejilerdendir (böylece bir tampon bölge gibi çalışabilirler).

Bir diğer husus, OWF'lerin işletme ömrü sonunda (genellikle 20-25 yıl) söküm aşamasının nasıl yönetileceğidir. Söküm (decommissioning) sırasında artık birer yapay resif haline gelmiş yapıların tamamen kaldırılması, ekosistemde ikinci bir büyük değişime yol açabilir; zira o yapıları yuva edinmiş binlerce canlının yaşam alanı bir anda yok olacaktır. [23], açık deniz altyapılarının (petrol platformları, rüzgâr türbinleri vb.) kullanım ömrü bitiminde denizde bırakılmasının belirli koşullar altında çevresel fayda sağlayabileceğini belirtmiştir. "Rigs-to-reefs" olarak bilinen uygulamaya benzer şekilde, eğer bir OWF yapısı çevresinde zengin bir ekosistem oluşmuşsa ve güvenlik açısından sakınca yoksa, bu yapıların bir kısmının yerinde bırakılarak kalıcı yapay resiflere dönüştürülmesi değerlendirilebilir. Bu durum hem ekosistemdeki istikrarı koruyacak hem de söküm maliyetlerini azaltacaktır. Ancak denizde bırakma kararı, denizcilik ve çevre mevzuatı çerçevesinde dikkatlice ele alınmalı, her proje özelinde bilimsel değerlendirmelerle desteklenmelidir.

Özetle, yapay resif entegrasyonlu rüzgâr türbini projeleri, doğru uygulandığında çevresel sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu hale getirilebilir. Bu entegrasyon sayesinde yenilenebilir enerjinin genişlemesi, denizel biyoçeşitliliğin ve ekosistem hizmetlerinin kaybı pahasına olmak zorunda değildir. Tam aksine, iyi planlanmış projeler doğa pozitif sonuçlar doğurabilir. Elbette, her projenin çevresel etkisi şeffaf biçimde izlenmeli, elde edilen veriler ışığında tasarım ve yönetim yaklaşımları güncellenmelidir. Bu proaktif

yaklaşım, insan ile doğanın denizlerdeki etkileşimini kazan-kazan durumuna çevirmek için anahtardır.

Yukarıdaki bölümlerde değinilen noktalar, çeşitli bilimsel araştırmalardan elde edilen bulgularla temellendirilmiştir. Aşağıda, konuyla ilgili incelenen literatürde öne çıkan bulgular özetlenmekte ve her bir madde ilgili çalışmalardan alınan kanıtlarla desteklenmektedir:

- **Yapay resifler habitat heterojenliğini artırarak biyoçeşitliliği destekler:** Yapay resif eklenen bölgelerde doğal çevreye göre daha fazla niş ortam oluşur. [24] bu durumun tür çeşitliliği ve birey yoğunluğunu artırdığını, heterojenliğin biyoçeşitlilik için kritik olduğunu vurgulamıştır. [1] ise meta-analizinde yapay resiflerin doğal resiflere yakın seviyede balık çeşitliliği sağladığını göstermiştir.
- **Yapay resifler doğal resiflerin tam ikamesi olmayabilir:** [14] dünya genelindeki yapay resif uygulamalarını inceleyerek, AR topluluklarının tür bileşiminin referans doğal resiflerden istatistiksel olarak farklı olabildiğini belirtmiştir. Bu, yapay resiflerin ekosisteme önemli katkı yapsa da doğal resiflerin yerini bire bir tutamayabileceğine işaret eder.
- **Yapay resiflerin olumlu etkisi tasarım ve konuma bağlıdır:** [24] derlemesine göre, yapay resiflerin pozitif etkisinin büyüklüğü resifin doğasına, bulunduğu ortama ve yerel türlerin özelliklerine bağlıdır; uygun malzeme ve tasarımla yüzey alanını artırmanın resifin verimliliğini yükseltebileceği belirtilmektedir.
- **Rüzgâr türbini temelleri yapay resif işlevi görür:** OWF türbinlerin su altı kısımları ve özellikle kaya dolgu scour korumaları, tıpkı yapay resifler gibi, üzerine yerleşen canlılara barınak, beslenme ve üreme alanı sunar. [13] literatür taramalarında OWF temellerinin etrafında sert zemin türlerinin bolluğunun sıkça arttığını ve scour korumalarının yapay resif kriterlerini karşıladığını bildirmiştir. [3] Avrupa OWF'lerinde yüksek çeşitli epifauna kolonizasyonu gerçekleştiğini ve bunun ekosistem yapısını etkilediğini not etmektedir.
- **Rüzgâr çiftlikleri balıkçılığa kapalı alan etkisiyle koruma sağlar:** Birçok OWF sahasında avcılığın kısıtlanması, balık ve bentik toplulukların sömürü baskısından kurtulmasını sağlamıştır. [24], rüzgâr çiftliklerinin trol avcılığına kapalı alanlar yaratarak balıkların hayatta kalma oranını ve boyutlarını artırabileceğini, bunun çevre alanlara taşma etkisiyle yarar sağlayabileceğini belirtmiştir. [15] ise OWF'lerin uygun koşullarda deniz koruma alanları kadar etkili sığınaklar olabileceğini, bentik habitatları, balıkları ve hatta deniz memelilerini koruyabildiğini raporlamıştır.
- **Yapay resif ve türbinler etrafında balık bolluğunda artış:** Belçika'da yapılan uzun vadeli araştırmalarda, OWF yapılarının çevresinde Atlantik morinası ve pouting gibi türlerin yüksek bolluklara ulaştığı, balıkların bu yapay resif alanlarını yoğun olarak kullandığı gösterilmiştir [4]. Meta-analitik bir çalışma da OWF sahalarında finfish (yüzgeçli balık) bolluğunun önemli ölçüde arttığını ortaya koymuştur [25]. Bu bulgular, yapay resif etkisinin balık topluluklarında üretim artışı sağlayabildiğini desteklemektedir.

- **Rüzgâr çiftlikleri balıklar için ekolojik tuzak değildir:** OWF'lerin sadece balıkları cezbedip büyüme veya kondisyona zarar vererek tuzak oluşturduğu hipotezi araştırılmış, ancak kanıtlanmamıştır. [4] çalışmasında, OWF resiflerinde yaşayan *Gadus morhua* ve *Trisopterus luscus* bireylerinin büyüme ve kondisyon açısından doğal alanlardakilere eşdeğer olduğunu, bir ekolojik tuzak etkisi gözlenmediğini ortaya koymuştur.
- **Balık kompozisyonunda ölçülü değişimler görülür:** Rüzgâr çiftliği kurulumu sonrasında balık topluluk yapısında bazı değişiklikler kaydedilmiştir. Örneğin, İsveç'teki bir OWF'de demersal balık kompozisyonunun türbin kurulumu öncesine göre kısmen farklılaştığı, özellikle kayalık seven bazı türlerin arttığı bildirilmiştir [26,27,28]. Hollanda'da [2], bir OWF sonrasında balık faunasında küçük pelajik türlerin (ringa balığı) azalırken dipte yaşayan bazı türlerin arttığını raporlamıştır. Ancak bu değişimler genellikle ılımlı seviyededir ve ciddi bir ekolojik dengesizliğe yol açmamaktadır.
- **Bentik topluluklar yapısal değişime uğrar:** Yapay resif ve türbin eklenmesiyle, dip bölgedeki omurgasız toplulukları da değişim gösterir. [29], OWF'lerin bentik faunada gözlenen değişimleri derlemiş ve bazı yumuşak zemin türlerinin bolluğunun azalıp sert zemin epifaunasının arttığını, bununla birlikte genel tür çeşitliliğinin yükseldiğini not etmiştir. [30], özellikle OWF temellerinde ardışık ekolojik birikim gözlendiğini; ilk yıllarda baskın olan midye ve tüp kurtlarının zamanla daha karmaşık bir komüniteye dönüştüğünü ve mevsimsel dinamiklerin oluştuğunu belirtmiştir. Ayrıca bu yapıların yabancı türlerin bentik ekosisteme girişini kolaylaştırdığı, örneğin uzak coğrafyalı bir midye türünün platformlar aracılığıyla bölgede yayılım gösterdiği saptanmıştır.
- **Yabancı/istilacı tür kolonizasyonu mümkündür:** Yapay resifler ve OWF yapıları, kozmopolit fouling türlerinin yerleşmesi için uygun zemin hazırlayabilir. [24], yapay resiflerin istilacı türler için yeni habitatlar sunarak yerli ekosistemleri olumsuz etkileyebileceğini vurgulamıştır. [30] çalışmasında, Belçika OWF'lerindeki epifauna içinde birkaç yeni yabancı tür (*Molgula manhattensis* adında bir tulumcuk) tespit etmiş ve OWF'lerin bir yayılma koridoru işlevi gördüğünü raporlamıştır. Bu bulgu, yapısal müdahalelerin biyogüvenlik boyutunun önemini ortaya koyar.
- **İnşaat kaynaklı su altı gürültüsü deniz memelilerini kaçıır:** Gürültü kirliliği, OWF inşaatlarının en ciddi geçici etkilerindendir. [22], bir OWF inşasında kazık çakma sırasında liman yunuslarının bölgede bulunma sıklığının %100'e yakın oranda azaldığını ve bu etkiyi azaltmak için baloncuk perdesi gibi önlemlerin etkin olduğunu göstermiştir. [6] benzer şekilde, inşaat gürültüsünün yunus ve mutur davranışlarını olumsuz etkilediğini nicel olarak ortaya koymuştur. Dolayısıyla yüksek şiddetli impulsif gürültü, hassas deniz memelilerini uzaklaştırarak kısa vadeli habitat kaybına neden olmaktadır.
- **İşletme gürültüsü ve manyetik alanın etkileri sınırlıdır:** İşletme aşamasında türbinlerin oluşturduğu sürekli uğultu ve titreşimler, bazı balıklar ve deniz memelileri tarafından algılanabilse de yapılan çalışmalarda çoğu türün bu düşük seviyeli seslere zamanla adaptasyon geliştirdiği görülmüştür. Porpoise'ların OWF inşaatı sonrası işletme döneminde bölgeye kısmen geri döndüğü,

popülasyon yoğunluğunun normale yakın seyrettiği tespit edilmiştir [31]. Elektrik kablolarının oluşturduğu manyetik alanlar konusunda [7], diadrom balıkların bazı davranış değişiklikleri gösterebildiğini ancak alan şiddetinin çok düşük olması nedeniyle göç modellerinde belirgin bir sapma saptanmadığını bildirmiştir. Yani işletme kaynaklı sürekli etkiler, inşaat aşamasındaki etkiler kadar dramatik değildir ve ek uygun mühendislik tedbirleriyle daha da asgari seviyeye çekilebilmektedir.

- **Kuşlar üzerindeki etkiler tür spesifiktir:** Rüzgâr çiftliklerinin kuşlar üzerine etkisini inceleyen araştırmalar karışık sonuçlar vermektedir. [32] Kuzey Denizi'nde bazı dalıcı deniz kuşlarının OWF alanlarından kaçındığını, beslenme rotalarını değiştirdiğini rapor ederken; büyük martıların OWF sahalarında yoğunlaştığını ve bunun çarpma riskini arttırdığını belirtmiştir. Genel olarak, deniz kuşu çeşitliliği ve bolluğu üzerindeki etki, çiftliğin konumuna ve hedef türlere bağlıdır. Hassas kuş alanlarından uzak konumlandırılan OWF'lerde ciddi bir olumsuz etki gözlenmezken, önemli kuş göç yolları üzerindeki projeler risk teşkil edebilir. Bu nedenle çevresel değerlendirmelerde kuş etkileşim modelleri kullanılmalıdır.
- **OWF'lerin karbon emisyonunu azaltıcı etkisi büyüktür:** Yenilenebilir enerjiye geçişin ekolojik yararı, iklim değişikliğini yavaşlatmasıdır. Bir rüzgâr türbini, yaşam döngüsü boyunca üretiminden çok daha fazla karbon tasarrufu sağlar. Yapılan analizler, bir türbinin ömrü boyunca neden olduğu emisyonların, aynı sürede fosil yakıtlardan salınacak emisyonların sadece %1-2'si kadar olduğunu göstermiştir. Örneğin, Ørsted tarafından yapılan hesaplama göre bir OWF türbinin yaşam boyu sağladığı karbon azaltımı, üretim/kurulum kaynaklı emisyonlarının 50 katına kadar çıkabilmektedir. Bu, rüzgâr enerjisinin karbon ayak izi en düşük elektrik üretim yöntemlerinden biri olduğunu teyit etmektedir.
- **Doğaya duyarlı tasarım yaklaşımları başarılı olabilir:** Offshore projelerde doğa ile uyumlu tasarım prensiplerinin uygulanmasıyla, enerji üretimi ve ekosistem korunumu birlikte sağlanabilir. [20] tarafından tanımlanan *Nature-Inclusive Design* kavramı, insan yapısı yapılara ekolojik işlev kazandırmayı amaçlar. Nitekim ilk uygulamalarda, türbin temeline özel dokulu malzemeler eklenmesinin epifauna çeşitliliğini ve biyokütleyi arttırdığı, dolayısıyla yapıların ekolojik performansının yükseldiği gözlemlenmiştir [33]. Bu tür önlemler, yenilenebilir enerji altyapısını ekolojik restorasyon fırsatına dönüştürebilir.
- **OWF'lerin deniz koruma alanlarıyla entegrasyonu mümkün ve faydalı:** Yapılan çalışmalar, uygun yerde kurulan OWF'lerin bir yandan enerji üretirken diğer yandan koruma alanı işlevi görerek deniz canlılarını koruyabildiğini ortaya koymuştur. [15] incelemesinde bazı OWF'lerin bentik habitatları ve balıkları koruma etkisinin mevcut deniz koruma alanları kadar güçlü olduğu ve hatta yoğun balıkçılık baskısının olduğu bölgelerde daha bile verimli olabileceği ifade edilmiştir. Ancak aynı çalışma, hassas deniz kuşu bölgelerinde OWF'lerin koruma hedefleriyle çelişebileceğini vurgulayarak mekânsal planlamanın önemine dikkat çekmiştir.

Yukarıdaki maddelerde görüldüğü üzere, denizel yapay resifler ve rüzgâr türbinlerinin ekolojik etkileri kapsamlı araştırmalara konu olmuş ve genel eğilim, dikkatli planlama ve

yönetim ile bu yapıların ekosistemler için net bir faydaya dönüştürülebileceği yönündedir.

3. Sonuç ve öneriler

Denizlerde yapay resiflerin üzerine kurulan rüzgâr türbinleri, uygun planlama ve yönetim stratejileriyle uygulandığında hem yenilenebilir enerji üretimi hem de denizel biyoçeşitliliğin desteklenmesi açısından önemli fırsatlar sunar. Bu bütünlük yaklaşım, iklim değişikliğiyle mücadeleyi deniz ekosistemlerinin korunmasıyla eşzamanlı yürütme potansiyeline sahiptir. Konu ile ilgili incelenen bilimsel çalışmaların büyük bir bölümü, açık deniz rüzgâr çiftliklerinin su altı yapılarının çok çeşitli deniz canlılarına yeni habitat sağladığını, balık ve omurgasız popülasyonlarını yerel ölçekte artırabildiğini ve iyi yönetilen alanlarda birer yarı-koruma bölgesi işlevi gördüğünü ortaya koymaktadır. Bu bulgular, yapay resif olarak tasarlanmış rüzgâr türbini altyapılarının, ekolojik sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu bir şekilde geliştirilebileceğini göstermektedir.

3.1 Ekolojik fırsatlar

Yapay resif destekli türbinler, doğru uygulandığında pek çok ekolojik fayda sağlayabilir:

- **Habitat ve Biyoçeşitlilik Artışı:** Geniş ölçekli OWF rüzgâr projeleri, bir bölgeye yüzlerce yeni sert zemin yapısı ekleyerek su altı habitat çeşitliliğini ciddi oranda artırabilir. Bu da özellikle doğal sert zeminlerin kısıtlı olduğu denizlerde, toplam biyolojik çeşitliliğin ve üretimin yükselmesine katkı sunar. Sonuçlar, OWF sahalarında bentik tür zenginliğinin anlamlı derecede arttığını ve kompleks gıda ağlarının oluştuğunu göstermektedir.
- **Balık Stoklarının Desteklenmesi:** Balıkçılık faaliyetlerine kapalı kalan türbin sahaları, balıklar ve diğer deniz canlıları için birer sığınak olacağından, aşırı av baskısının azaltılmasına yardımcı olur. Bu alanlarda büyüyen ve çoğalan balıkların bir kısmı zamanla komşu bölgelere göç ederek bölgesel stoklara takviye olabilir (spillover). Rüzgâr çiftliklerinin, özellikle yoğun avlanan denizlerde, balık biyokütlesini artırdığı ve koruyucu bir etki gösterdiği saptanmıştır.
- **Ekosistem Hizmetlerinin Gelişimi:** Yapıların üzerindeki filtratör organizmalar suyu temizlerken, algler karbon sekestre eder, midye resifleri kıyı erozyonunu azaltabilir. Bu sayede su kalitesinin iyileşmesi, karbon tutulumu ve besin ağı üretkenliğinin artması gibi dolaylı ekosistem hizmetleri elde edilebilir.
- **Restorasyon ve Koruma ile Sinerji:** Yapay resif modüllerinin, örneğin istiridye yataklarının restorasyonu veya balık yuvalama alanlarının iyileştirilmesi gibi amaçlarla tasarlanıp türbin temellerine entegre edilmesi, aktif bir restorasyon faaliyeti olarak değerlendirilebilir. Bu sayede enerji altyapısı aynı zamanda ekosistem restorasyonuna hizmet etmiş olur.
- **Çok Kullanımlı Alan Yönetimi:** Rüzgâr çiftlikleri, iyi planlandığında diğer faaliyetlerle uyumlu hale getirilebilir. Örneğin, türbin sahaları kontrollü dalış turizmi için cazip alanlar haline getirilebilir veya sınırlı ölçekte sportif olta balıkçılığına izin verilerek sosyo-ekonomik fayda yaratılabilir. Bu tip

bütünleşmiş (entegre) kullanım, elbette ekosistem taşıma kapasitesi gözetilerek ve önceliğin ekolojik denge olduğunu unutmadan tasarlanmalıdır.

3.2 Potansiyel riskler ve dikkat edilmesi gerekenler

Yapay resif-rüzgâr türbini konseptinin başarısı, risklerin doğru yönetilmesine bağlıdır:

- **İstilacı Tür Riski:** Yeni yapılarla birlikte yabancı türlerin bölgeye giriş ihtimali artar. Bu nedenle, proje öncesinde ve sonrasında biyogüvenlik izleme programları yürütülmeli, tehlikeli istilacıların tespiti halinde hızlı müdahale planları hazır bulundurulmalıdır. Yapılarda kullanılacak malzemelerin ve tasarımların, istilacı türlere avantaj sağlayıp sağlamadığı araştırılmalıdır (çok sıcak yüzeyler bazı tropikal türlerin tutunmasını engelleyebilir).
- **Hassas Türler Üzerindeki Etkiler:** Deniz memelileri (balinalar, yunuslar) ve deniz kuşları gibi gruplar, bu yapılardan olumsuz etkilenebilir. Özellikle inşaat aşamasında gürültü ve işletmede çarpma riskine karşı sıkı önlemler alınmalıdır. İnşaat için zamanlama kısıtları (örneğin balinaların göç mevsiminde kazık çakmama) uygulanması, yumuşak başlangıç (soft-start) prosedürleri, akustik caydırıcılar ve gürültü bariyerleri gibi teknikler kullanılmalıdır. Kuşlar için ise, kritik kuş alanlarından uzak yer seçimi esas olmalı; gerekirse türbinlerde kuşların görsel algısını artıran boyama veya radar destekli durdurma sistemleri gibi yenilikçi çözümler devreye alınmalıdır.
- **Kümülatif Etki ve Taşkınlık:** Çok sayıda projenin aynı bölgeye yığılmasıyla oluşabilecek kümülatif etkiler iyi değerlendirilmelidir. Birden fazla rüzgâr çiftliğinin ardışık şekilde dizildiği deniz alanlarında balık göç yollarının yön değiştirip değiştirmediği, sediman taşınımının nasıl etkilendiği gibi sorular araştırılmalıdır. Bölgesel planlamada, projeler arasında ekolojik tampon bölgeler bırakılması ve farklı habitat temsilinin sağlanması önemlidir.
- **Söküm ve Sonrası:** Yukarıda değinildiği gibi, işletme ömrü biten yapılar konusunda strateji belirlenmelidir. Eğer kaldırılacaklarsa, çevredeki biyotanın kaybını telafi etmek için belki yakında yeni yapay resif üniteleri bırakılabilir. Eğer bırakılacaklarsa, güvenlik ve çevre açısından risk teşkil etmediklerinden emin olunmalıdır. Ulusal ve uluslararası mevzuat çerçevesinde, çevresel açıdan en az zarar veren ama mümkünse en çok faydayı koruyan seçenek tercih edilmelidir.

3.3 Öneriler

- **Entegre Planlama:** Rüzgâr enerjisi planlaması, deniz koruma planları ile eşgüdümlü yapılmalıdır. Özellikle biyolojik çeşitlilik sıcak noktaları, balık üreme/ büyüme alanları ve göç yolları gibi hassas bölgeler belirlenerek, OWF yer seçiminde bu alanlar ya korunmalı ya da projeler doğa dostu şekilde tasarlanmalıdır.
- **Doğaya Duyarlı Tasarım Uygulamaları:** Yeni OWF projelerinde, yapısal tasarım aşamasından itibaren yapay resif fonksiyonu gözetilmelidir. Scour koruma katmanları, balık barınaklı bloklar, biyo-çeşitliliği teşvik eden yüzey dokuları gibi unsurlar standart tasarımın parçası haline getirilmelidir. Bu sayede

ek bir maliyet yerine projenin doğal bileşeni olarak ekoloji entegrasyonu sağlanabilir.

- OWF türbinlerinin çevresel etkileri üzerine kapsamlı bilimsel çalışmaların eksikliğine rağmen [34] tarafından yapılan çalışma OWF'lerden kaynaklanan korozyon ürünleri ve plastik türleri de dahil olmak üzere kimyasal emisyonların incelenmesine ışık tutmaktadır. Bu emisyonların deniz ekosistemi ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini anlamak, OWF geliştirme sahalarını değerlendirmek ve olası tesislere izin vermenin yanı sıra operasyonel tesisler için kaplama ürünü seçimine kılavuz oluşturmak adına önem teşkil etmektedir. Deniz balıkçılığına yönelik potansiyel riskler, navigasyon tehlikeleri, turizm ve deniz ekolojisi üzerindeki etkiler OWF endüstrisinin gelişmesi, yeşil enerji arzının artması ve karbon emisyonlarının azaltılması için fırsatlar sunmaktadır. Bununla birlikte OWF deniz ekonomisi ve deniz çevresi arasındaki karmaşık etkileşimin tam olarak anlaşılması gelecekteki OWF projelerinin ihtiyatlı bir şekilde ilerlemesi içinde gereklidir.
- **İzleme ve Adaptif Yönetim:** Her bir proje, başlangıçtan itibaren kapsamlı bir ekolojik izleme programına sahip olmalıdır. Su altı gürültüsü, su kalitesi, bentik ve pelajik topluluklar, kuş ve memeli varlığı gibi parametreler düzenli izlenmeli; elde edilen veriler ışığında gerektiğinde türbin operasyonlarında veya tasarımında değişiklikler yapılmalıdır (adaptif yönetim). İzleme verileri şeffaf şekilde bilim camiasıyla paylaşılmalı, böylece kolektif bir öğrenme süreci ile en iyi uygulamalar geliştirilebilmelidir.
- **Bölgesel İş Birliği:** Deniz ekosistemleri ulusal sınır tanımadığından, özellikle açık deniz projelerinde komşu ülkeler arasında koordinasyon önemlidir. Kuzey Denizi gibi çok ülkenin OWF geliştirdiği alanlarda ortak çevresel standartlar belirlenmeli, izleme verileri paylaşılmalı ve bütüncül değerlendirmeler yapılmalıdır. Bu iş birliği, ekolojik risklerin geniş ölçekli yönetimini kolaylaştıracaktır.
- **Paydaş Katılımı:** Projelerin planlama aşamasında ilgili kamu kurumları, balıkçılar, STK'lar, bilim insanları ve yerel halk gibi paydaşların görüşleri alınmalı, endişeleri giderilmeli ve ortak faydaya yönelik modeller geliştirilmeli. Örneğin, balıkçılar için OWF sahası dışında telafi edici avlak alanlar oluşturma veya onları izleme programlarına dahil etme gibi adımlar, çatışmaları azaltıp çevresel hedefleri destekleyebilir.
- **Acil Durum ve İstilacı Tür Planları:** OWF sahalarında kazara oluşabilecek petrol sızıntısı, ekipman kazaları veya yeni bir istilacı tür patlaması gibi durumlara karşı hazır planlar oluşturulmalı, müdahale ekipleri oluşturulmalı ve acil durum eylem planına göre eğitilmelidir. Bu, ekosistem risklerini kontrol altında tutmayı sağlar.
- **Ar-Ge Yatırımları:** Yapay resiflerin ekolojik performansını artırmaya yönelik malzeme bilimi, tasarım mühendisliği ve biyoloji kesişiminde araştırmalar teşvik edilmelidir. Örneğin, balıkların daha rahat yumurtlayabileceği yüzeyler, mercan larvalarını cezbeden kaplamalar, gürültüyü emen inşaat yöntemleri gibi inovasyonlar uzun vadede büyük fark yaratabilir.

Sonuç olarak, denizlerdeki yapay resifler üzerinde konuşlandırılan rüzgâr türbinleri, insanlığın enerji ihtiyacını karşılarken deniz ekosistemlerini koruma ve zenginleştirme vizyonunun bir parçası haline gelebilir. Bu yaklaşım, günümüzün birbirine bağlı çevre sorunlarına (iklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı vb.) entegre çözümler sunma arayışına uygun düşmektedir. Mevcut bilimsel veriler, doğru koşullar sağlandığında OWF'lerin deniz yaşamıyla uyum içinde var olabileceğini, hatta onu destekleyebileceğini göstermektedir. Ancak bunun kendiliğinden değil, bilinçli çaba ve bilim-temelli yönetimle gerçekleşeceği açıktır. İlerleyen yıllarda, daha fazla verinin toplanmasıyla yapay resif destekli rüzgâr çiftliklerinin uzun vadeli etkileri daha net anlaşılabilecektir. Bu bilgiler ışığında uygulamaların sürekli iyileştirilmesi, adaptif ve öğrenen bir yönetim yaklaşımının benimsenmesi elzemdir. Enerji üretimi ile biyolojik çeşitlilik hedeflerini bir araya getiren projeler, sürdürülebilir bir gelecek inşa etmede kilit rol oynayacaktır. Denizel ekosistemlere duyarlı planlanmış her bir rüzgâr türbini, sadece bir enerji üretim ünitesi değil, aynı zamanda yeni bir yaşam adası olarak mavi gezegenimize hizmet edecektir.

Kaynaklar

- [1] Paxton, A.B., Shertzer, K.W., Bacheler, N.M., Kellison, G.T., Riley, K.L. and Taylor, J.C., Meta-analysis reveals artificial reefs can be effective tools for fish community enhancement but are not one-size-fits-all, **Frontiers in Marine Science**, 7, 282, (2020). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00282>
- [2] Van Hal, R., Griffioen, A. B. and Van Keeken, O. A., Changes in fish communities on a small spatial scale, an effect of increased habitat complexity by an offshore wind farm, **Marine Environmental Research**, 126, 26-36, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.01.009>
- [3] Degraer, S., Carey, D.A., Coolen, J.W.P., Hutchison, Z.L., Kerckhof, F., Rumes, B. and Vanaverbeke, J., Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning: A synthesis, **Oceanography**, 33 (4), 18-28, (2020). <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.405>
- [4] Reubens, J.T., Vandendriessche, S., Zenner, A., Degraer, S. and Vincx, M., Offshore wind farms as productive sites or ecological traps for gadoid fishes? – Impact on growth, condition index and diet composition, **Marine Environmental Research**, 90, 66-74, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.05.013>
- [5] Wilson, J.C. and Elliott, M., The habitat-creation potential of offshore wind farms, **Wind Energy**, 12 (2), 203-212, (2009). <https://doi.org/10.1002/we.324>
- [6] Dähne, M., Gilles, A., Lucke, K., Peschko, V., Adler, S., Krügel, K., Sundermeyer, J. and Siebert, U., Effects of pile-driving on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) at the first offshore wind farm in Germany, **Environmental Research Letters**, 8 (2), 025002, (2013). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/025002>
- [7] Gill, A. B., Bartlett, M. and Thomsen, F., Potential interactions between diadromous fishes of UK conservation importance and the electromagnetic fields and subsea noise from offshore wind farms, **Journal of Fish Biology**, 81 (2), 664-695, (2012). <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03374.x>

- [8] Vanermen, N., Onkelinx, T., Verschelde, P., Courtens, W., Van de walle, M., Verstraete, H. and Stienen, E.W.M., Assessing seabird displacement at offshore wind farms: power ranges of a monitoring and data handling protocol, **Hydrobiologia**, 756, 155-167, (2015).
- [9] Norro, A., Rumes, B. and Degraer, S., Differentiating between underwater construction noise of monopile and jacket foundations for offshore windmills: A case study from the Belgian part of the North Sea, **The Scientific Journal** 2013, Article ID 897624, (2013). <http://dx.doi.org/10.1155/2013/897624>
- [10] Claisse, J.T., Pondella II, D.J., Love, M., Zahn, L.A., Williams, C.M., Williams, J.P. and Bull, A.S., Oil platforms off California are among the most productive marine fish habitats globally, **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 111 (43), 15462-15467, (2014). <https://doi.org/10.1073/pnas.1411477111>
- [11] Gill, A.B., Degraer, S., Lipsky, A., Mavraki, N., Methratta, E. and Brabant, R., Setting the context for offshore wind development effects on fish and fisheries. **Oceanography**, 33 (4), 118-127, (2020). <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.411>
- [12] Pezy, J.P., Raoux, A. and Dauvin, J.C., The environmental impact from an offshore windfarm: Challenge and evaluation methodology based on an ecosystem approach, **Ecological Indicators**, 114, 106302, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106302>
- [13] Glarou, M., Zrust, M. and Svendsen, J.C., Using artificial-reef knowledge to enhance the ecological function of offshore wind turbine foundations: Implications for fish abundance and diversity, **Journal of Marine Science and Engineering**, 8 (5), 332, (2020). <https://doi.org/10.3390/jmse8050332>
- [14] Bracho-Villavicencio, C., Matthews-Cascon, H. and Rossi, S., Artificial reefs around the world: A review of the state of the art and a meta-analysis of its effectiveness for the restoration of marine ecosystems, **Environments**, 10 (7), 121, (2023). <https://doi.org/10.3390/environments10070121>
- [15] Hammar, L., Perry, D. and Gullström, M., Offshore wind power for marine conservation: net benefit or ecological cost? **Open Journal of Marine Science**, 6 (1), 1-13, (2016). <http://dx.doi.org/10.4236/ojms.2016.61007>
- [16] Maar, M., Bolding, K., Petersen, J.K., Hansen, J.L.S. and Timmermann, K., Local effects of blue mussels around turbine foundations in an ecosystem model of Nysted off-shore wind farm, Denmark, **Journal of Sea Research** 62 (2-3), 159-174, (2009).
- [17] Slavik, K., Lemmen, C., Zhang, W., Kerimoglu, O., Klingbeil, K. and Wirtz K.W., The large-scale impact of offshore wind farm structures on pelagic primary productivity in the southern North Sea, **Hydrobiologia**, 845, 35-53, (2019). <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3653-5>
- [18] Bonou, A., Laurent, A. and Olsen, S. I., Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy – from theory to application, **Applied Energy**, 180, 327-337, (2016).
- [19] Punt, M.J., Groeneveld, R.A., Van-Ierland, E.C. and Stel, J.H., Spatial planning of offshore wind farms: A windfall to marine environmental protection? **Ecological Economics**, 69 (1), 93-103, (2009). <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.07.013>

- [20] Hermans, A., Bos, O.G. and Pursina, I., Nature-inclusive design: a strategy for marine infrastructure to enhance ecological functioning. **The Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality, Netherlands**, (2020).
- [21] Lindeboom, H., Degraer, S., Dannheim, J., Gill, A. and Wilhelmsson, D., Offshore wind park monitoring programmes, lessons learned and recommendations for the future, **Hydrobiologia**, 756 (1), 169-180, (2015). <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2267-4>
- [22] Brandt, M.J., Anne-Cecile Dragon, A.C., Diederichs, A., Bellmann, M.A., Wahl, V., Piper, W., Nabe-Nielsen, J. and Nehls, G., Disturbance of harbour porpoises during construction of the first seven offshore wind farms in Germany. **Marine Ecology Progress Series**, 596, 213-232, (2018). <https://doi.org/10.3354/meps12560>
- [23] Fowler, A.M., Jørgensen, A.M., Svendsen, J.C., Macreadie, P.I., Jones, D.O.B., Boon, A.R., Booth, D.J., Brabant, R., Callahan, E. and Claisse, J.T., Environmental benefits of leaving offshore infrastructure in the ocean, **Frontiers in Ecology and the Environment**, 16 (10), 571-578, (2018). <https://doi.org/10.1002/fee.1827>
- [24] Langhamer, O., Artificial reef effect in relation to offshore renewable energy conversion: state of the art, **The Scientific World Journal**, 2012. <https://doi.org/10.1100/2012/386713>
- [25] Methratta, E. T. and Dardick, W.R., Meta-analysis of finfish abundance at offshore wind farms, **Reviews in Fisheries Science & Aquaculture**, 27 (2), 242-260, (2019). <https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1584601>
- [26] Wilhelmsson, D., Malm, T. and Öhman, M. C., The influence of offshore windpower on demersal fish, **ICES Journal of Marine Science**, 63 (5), 775-784, (2006). <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2006.02.001>
- [27] Bergström, L., Sundqvist, F. and Bergström, U., Effects of an offshore wind farm on temporal and spatial patterns in a demersal fish community, **Marine Ecology Progress Series**, 485, 199-210, (2013).
- [28] Bergström, L., Kautsky, L., Malm, T., Rosenberg, R., Wahlberg, M., Capetillo, NA. and Wilhelmsson, D., Effects of offshore wind farms on marine wildlife: a generalized impact assessment, **Environmental Research Letters**, 9 (3), 034012, (2014). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034012>
- [29] Dannheim, J., Bergström, L., Birchenough, S. N. R., Brzana, R., Boon, A. R., Coolen, J. W. P., Dauvin, J.-C., De Mesel, I., Derweduwen, J., Gill, A. B., Hutchison, Z. L., Jackson, A. C., Janas, U., Martin, G., Raoux, A., Reubens, J., Rostin, L., Vanaverbeke, J., Wilding, T. A., Wilhelmsson, D. and Degraer, S., Benthic effects of offshore renewables: identification of knowledge gaps and urgently needed research, **ICES Journal of Marine Science**, 77 (3), 1092-1108, (2020). <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz018>
- [30] De Mesel, I., Kerckhof, F., Norro, A., Rumes, B. and Degraer, S., Succession and seasonal dynamics of the epifauna community on offshore wind farm foundations and their role as stepping stones for non-indigenous species, **Hydrobiologia**, 756 (1), 37-5, (2015). <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2157-1>

- [31] Scheidat, M., Tougaard, J., Brasseur, S., Carstensen, J., van Polanen Petel, T., Teilmann, J. and Reijnders, P., Harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) and wind farms: a case study in the Dutch North Sea, **Environmental Research Letters**, 6 (2012) 025102, (2011). <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/025102>
- [32] Vanermen, N., Courtens, W., Daelemans, R., Lens, L., Müller, W., Van de walle, M., Verstraete, H. and Stienen, E., Attracted to the outside: A meso-scale response pattern of lesser black-backed gulls at an offshore wind farm revealed by GPS telemetry. **ICES Journal of Marine Science**, 77 (2), 701-710, (2020). <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz199>
- [33] Davis, K.M., Nguyen, M.N., McClung, M.R. and Moran, M.D. A., Comparison of the impacts of wind energy and unconventional gas development on land-use and ecosystem services: an example from the Anadarko Basin of Oklahoma, USA. **Environmental Management** 61, 796-804. (2018). <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1010-0>
- [34] Çelik-Gül, G. and Gül, M., Chemical approach to offshore wind turbines: coating systems, environmental impacts, and sustainable development, **Turkish Journal of Maritime and Marine Sciences**, 10 (3), 131-144. (2024). <https://doi.org/10.52998/trjmms.1415808>