KIDEM2025

DALGA VE RÜZGAR ENERJİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ İÇİN KAPASİTE FAKTÖRÜ ANALİZİ: CORPOWER VE SIEMENS SWT 6.0-154 ÖRNEĞİ

Osman Yüksek, Bursa Uludağ Üniversitesi osmanyuksek@uludag.edu.tr
Khalid Amarouche, Bursa Uludağ Üniversitesi, khalidamarouche@uludag.edu.tr
Adem Akpınar, Bursa Uludağ Üniversitesi, ademakpinar@uludag.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojik gelişmelerin hız kazanması ve küresel nüfusun sürekli artması, dünya genelinde enerji ihtiyacını önemli ölçüde artırmıştır. Bu artan enerji talebini karşılamak amacıyla, tarih boyunca büyük ölçüde fosil yakıtlar gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarına başvurulmuştur. Ancak bu tür kaynakların sınırlı oluşu ve çevre üzerinde yarattıkları olumsuz etkiler insanlığı yeni arayışlara yöneltmiştir. Bu nedenle, çevresel zararların azaltılması ve gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakılabilmesi adına yenilenebilir, çevre dostu enerji kaynaklarına olan ilgi ve ihtiyaç giderek artmaktadır.

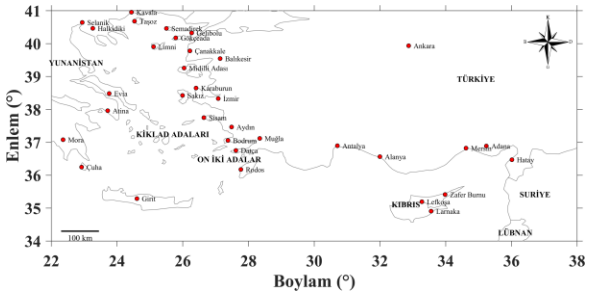
Rüzgar, güneş, hidroelektrik ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, günümüzde çevre dostu alternatifler olarak öne çıkmaktadır (Nelson, 2011; Soukissian vd., 2023). Bu kaynaklar, hem sınırsız oluşları hem de sera gazı emisyonlarını azaltmadaki rolleriyle gitgide önem kazanmaktadır. 2023 yılı itibarıyla yenilenebilir enerji, küresel elektrik üretiminin %30'unu karşılayarak önemli bir eşiği aşmıştır (Wiatros-Motyka vd., 2024). ABD ve AB gibi pek çok ülke ve topluluk bu alanda ciddi adımlar atmaktadır (European Commission, 2023; Yang ve Copping, 2017). Türkiye, çok sayıda ülkenin imzaladığı 2015 Paris Anlaşması'na (Lüning ve Vahrenholt, 2017) taraf olarak sera gazı emisyonlarını azaltma ve iklim değişikliğiyle mücadele konusunda uluslararası yükümlülükler üstlenmiştir (Dönmezçelik vd., 2023). Türkiye hükümeti, 2030 için %41 emisyon azaltımı ve 2053 için Net-Sıfır emisyon hedefi belirlemiştir (Resmi Gazete, 2021). Bu gelişmeler, enerji politikalarının yenilenebilir kaynaklara yöneldiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, dalga ve rüzgar enerjisinin potansiyelini analiz etmek amacıyla çalışma alanı olarak Kuzeydoğu Akdeniz'i ele almaktadır. Bölgeye ait 30 yıllık (1994-2023) rüzgar ve dalga verileri girdi olarak kullanılıp saatlik çözünürlüklü güç değerleri elde edilmiştir. Bu bölgedeki rüzgar ve dalga enerji potansiyelleri, nominal gücü 750 kW olan CorPower dalga enerjisi dönüştürücüsü ile nominal gücü 6 MW olan Siemens SWT 6.0-154 rüzgar türbini kullanılarak değerlendirilmiştir. CorPower dönüştürücüsünün orijinal ölçekteki versiyonuna ek olarak, bölgenin dalga ikliminden daha verimli yararlanmak amacıyla Froude benzerlik yasası kullanılarak %40, %30, %20 ve %10 oranlarında küçültülmüş versiyonları da analiz edilmiştir. Toplam altı dönüştürücü için Kapasite Faktörü (CF) haritaları üretilmiştir. Ardından, her bir konum için en yüksek CF'yi sağlayan dalga dönüştürücü ölçeği ile SWT 6.0-154 rüzgar dönüştürücüsü eşleştirilerek hibrit bir enerji dönüştürücüsü oluşturulmuş ve bu hibrit sistemin CF değerleri tüm çalışma alanı için hesaplanmıştır.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışma, Akdeniz'in kuzeydoğusunda yer alan ve karmaşık morfolojik özellikler sergileyen denizel alanlara odaklanmaktadır. Çalışma sahası, 22°-37° doğu boylamları ile 34°-41° kuzey enlemleri arasında kalan geniş bir bölgeyi kapsamaktadır. Bu sınırlar içerisinde Ege Denizi'nin tamamı da yer almakta olup, Türkiye, Yunanistan, Lübnan, Suriye, KKTC) ve GKRY gibi kıyıdaş ülkeler bu alanın parçasını oluşturmaktadır (Vasileiou vd., 2017).



Şekil 1 - Çalışma Alanı

2.2. Çalışmada Kullanılan Rüzgar ve Dalga Verileri

Çalışmada, 1994-2023 dönemine ait 1 saatlik zaman çözünürlüklü ERA5 reanaliz rüzgar verileri kullanılmıştır (Hersbach vd., 2020). Rüzgar verileri, 10 m (dalga modellemesi için) ve 100 m (rüzgar enerjisi

analizi için) yükseklikliklerden temin edilmiştir. Rüzgar verilerinde mekansal çözünürlük 0,25° × 0,25°'dir. Dalga verileri, ERA5 rüzgar girdileri ile çalıştırılan SWAN dalga modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Model, düzensiz yapılı sayısal ağ üzerinde çalıştırılmıştır:
Kıyıya yakın bölgelerde ~3,5 km,
Açık denizde ~25 km çözünürlük sağlanmıştır.
Dalga için belirgin dalga yüksekliği (H_S), dalga enerji periyodu (T_e) ve pik dalga periyodu (T_P) parametreleri türetilmiştir.

2.3. Enerji Dönüşüm Teknolojileri
Bu çalışma kapsamında yapılacak olan analizlerde, rüzgar gücü verileri, seçili bir rüzgar türbininin üretim eğrisi kullanılarak üretilmektedir. Bunun için açık deniz rüzgar enerjisi üretiminde yaygın olarak kullanılan Siemens SWT 6,0-154 rüzgar türbini seçilmiştir (Wen vd., 2022). Söz konusu rüzgar türbini, 154 metre rotor çapına sahiptir. Türbin, 4 ila 25 m/s rüzgar hızları arasında üretim yapmakta, bu aralıkların dışında ise çalışmamaktadır (Siemens, 2013).

Bu çalışmada, dalga enerjisinin elektrik üretimine dönüştürülmesinde kullanılan sistem, nokta emici bir dönüştürücü olan CorPower Ocean teknolojisidir (Pennock vd., 2022). Belirgin dalga yüksekliği ve pik dalga periyodu bilgilerine dayalı olarak cihazın güç üretim potansiyeli değerlendirilmiştir. Güç tahminleri, Corpower dönüştürücüsüne ait, literatürde de kullanılan 750 kW kurulu güce sahip güç matrisi üzerinden gerçekleştirilmiştir (Majidi vd., 2025).



Şekil 2 - Siemens SWT 6,0 - 154 Rüzgar Türbini (Solda) ve CorPower Ocean Dalga Enerji Dönüştürücüsü (Sağda)

2.4. Ölçek Küçültme Yaklaşımı
Çalışmada kullanılan 750 kW kurulu güce sahip CorPower, yüksek H_S ve T_P değerlerinden enerji üretebilmek için tasarlanmıştır. Bu durumda dönüştürücü, küçük dalgalardan üretim yapmakta zorlanmaktadır. Çalışma alanında meydana gelen küçük dalgalardan da elektrik enerjisi üretilebilmesi için bu çalışmada ölçek küçültme işlemi gerçekleştirilmiştir (Majidi, Bingölbali, Akpınar, Iglesias, vd., 2021). Böylelikle küçük dalgalardan da enerji elde edilmesine olanak sağlanmıştır. Ölçek küçültme işlemi yapılırken Froude benzerlik kuralından yararlanılmıştır (Martić vd., 2024). Bu kurala göre dalga enerji dönüştürücüsünün uzunluk (yükseklik), zaman (periyot) ve güç değerleri, birbirleriyle non-lineer bir ilişki içerisinde değiştirilebilmektedir.

Ölçek küçültme oranı anlamına gelen λ sayısı; ölçeklendirilerek küçültülmüş değerin, orijinal değere oranıdır. Froude benzerlik kuralında λ_L, λ_T ve λ_P sırasıyla uzunluk, periyot ve gücün ölçek küçültme oranıdır. Bu kurala göre λ_L sabit tutulup, diğer büyüklüklerin ölçek küçültme oranları; λ_L'nin birer fonksiyonu olarak yazılır. Bu fonksiyonlar şu şekilde tanımlanmıştır (de Andres vd., 2016);

$$\lambda_P = \lambda_L{}^{3,5} \quad (1)$$

$$\lambda_T = \lambda_L{}^{0,5} \quad (2)$$

Dalga dönüştürücüsünün fiziksel boyutuyla birlikte güç matrisindeki değerler de bu kurala göre ölçeklenmektedir.

Bozzi vd. (2018) çalışmasının bulgularına göre, Akdeniz kıyılarında en verimli sonuçlar %40 ve daha küçük olan ölçekleme oranlarından elde edilmiştir. Bu çalışmada da dönüştürücünün orijinal ölçeğinin yanı sıra %10, %20, %30 ve %40 olmak üzere 4 ayrı ölçek küçültme oranında küçültülmüş versiyonları baz alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

2.5. Kapasite Faktörü
Kapasite Faktörü (CF), Bir dönüştürücü tarafından elde edilen gücün, o gücün elde edildiği dönüştürücünün kurulu gücüne oranıdır (Majidi, Bingölbali, Akpınar, ve Rusu, 2021).

$$CF = \frac{P_{ortalama}}{Kurulu\ Güç} \quad (3)$$

Farklı kurulu güçlere sahip enerji dönüştürücülerinin doğrudan güç çıktıları karşılaştırıldığında, aradaki büyük farklar anlamlı bir değerlendirme yapmayı güçleştirmektedir. Bu sorunun önüne geçebilmek için, her bir dönüştürücünün güç çıktısının kendi kurulu gücüne oranlanmasıyla elde edilen CF indeksi kullanılmaktadır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA
3.1. Rüzgar ve Dalga Enerji Dönüştürücülerinin Ayrık Performansları
Çalışmada kullanılan 6 enerji dönüştürücüsüne ait CF değerlerinin çalışma alanındaki mekânsal dağılımları Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3a incelendiğinde, Türkiye'nin Muğla, Çanakkale ve Karaburun kıyılarında rüzgar enerji dönüştürücülerine ait CF'nin 0,3'ün üzerine çıktığı bölgeler göze çarpmaktadır. Tüm

alan içerisindeki en yüksek verimlilik ise yaklaşık 0,5'lik CF değerleriyle Girit Adası'nın doğusunda ve Kiklad Adalarının civarında elde edilmiştir; bu değer aynı zamanda tüm CF haritalarındaki en yüksek kapasite faktörünü oluşturmaktadır.

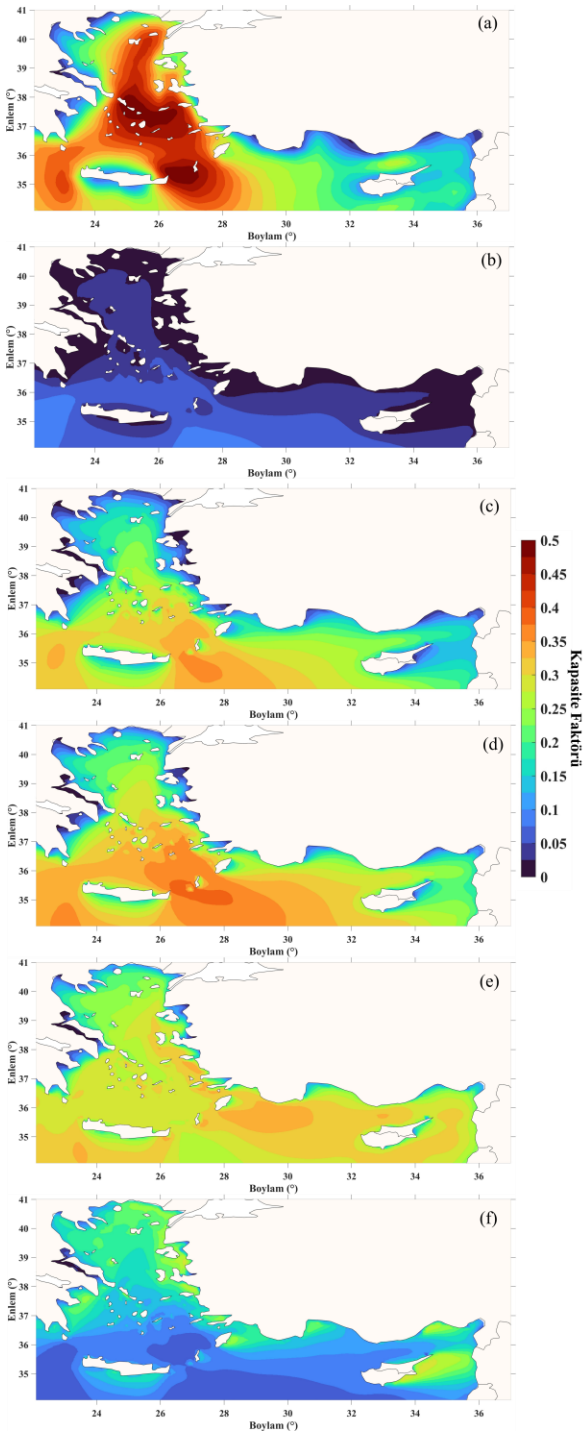
Dalga enerjisi için ise yüksek CF değerlerinin mekânsal dağılımı, kullanılan dönüştürücü ölçeğine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Orijinal ölçekli dönüştürücü için en elverişli alanlarda bile yaklaşık 0,1'lik CF değerleri elde edilebilmiştir. %40 ila %20 ölçekli sistemlerde ise yüksek kapasite faktörü gösteren bölgeler daha geniş bir alana yayılmıştır. Özellikle Kiklad Adaları açıkları, Girit'in doğusu, Mersin ve Antalya kıyıları, Rodos'un güneybatısı, Çuha Adası'nın güneyi, Sakız Adası ve Aydın açıkları gibi bölgelerde 0,3 ila 0,4 aralığında CF değerlerine ulaşılmıştır.

Öte yandan, %10 ölçekli dönüştürücü çok farklı bir performans sergilemiş; daha büyük ölçeklerde düşük CF değerlerinin elde edildiği doğu Kıbrıs kıyıları ve İzmir kıyıları gibi düşük dalga iklimine sahip bölgelerde yer yer 0,3'ü aşan sonuçlara ulaşmıştır.

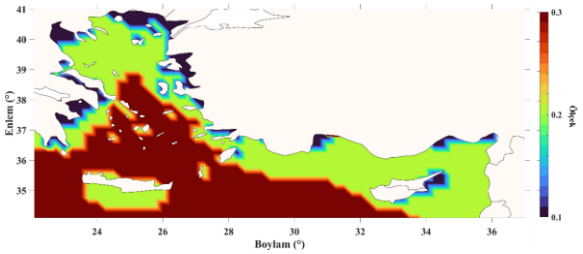
Genel olarak, dalga enerjisine ilişkin en yüksek CF değerleri %20 ve %40 ölçekli dönüştürücülerle elde edilmiştir. Orijinal ve %10 ölçekli sistemler ise daha çok uç değerlerdeki dalgaları hedef aldıklarından, bölgenin genel dalga iklimine uyum sağlayamamış ve kısıtlı sonuçlar vermiştir. Ancak %10 ölçekli dönüştürücü, düşük dalgaların hâkim olduğu kıyı bölgelerinde enerji yakalama potansiyeli göstererek, diğer ölçeklerin düşük verim sağladığı alanlarda umut vaat eden bir seçenek hâline gelmiştir.

Orijinal ölçekli dönüştürücünün tüm ölçeklenmiş sistemlere kıyasla en düşük performansı göstermesi; aynı toplam kurulu güce sahip olacak şekilde birden fazla sayıda küçük ölçekli dönüştürücü kullanıldığında, orijinal tekil sistemden daha yüksek güç çıktısı elde edilebileceğini ortaya koyması açısından oldukça önemli bir bulgudur.

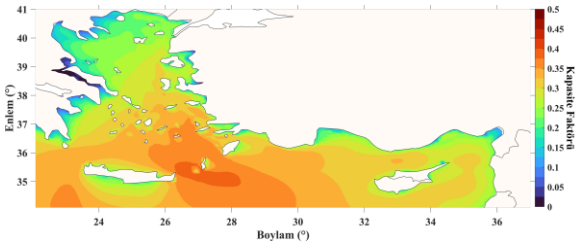
Şekil 4, çalışma alanındaki her bir sayısal ağ noktası için en yüksek CF değerini veren ölçekteki dalga enerji dönüştürücüsünü göstermektedir. Buradan da görülebileceği üzere, en yüksek CF değerlerine yalnızca %10, %20 ve %30'luk dönüştürücülerde ulaşılabilmiştir. Şekil 5'te ise bunun uzantısı olarak çalışma alanındaki en yüksek CF değerleri görülmektedir. Hala rüzgar türbininindeki kadar yüksek pik değerlerine ulaşılamasa da çalışma alanın tamamına yakın bir bölümünde 0,2'yi aşkın değerlere ulaşılmıştır. Bu sonuç, ölçek küçültme işleminin amacına ulaştığını ve yüksek verimle enerji üretimini sağladığını göstermektedir.



Şekil 3 - Rüzgar (a), Orijinal (b), %40 Ölçekli (c), %30 Ölçekli (d), %20 Ölçekli (e) ve %10 Ölçekli (f) Dalga Enerji Dönüştürücülerinin Kapasite Faktörleri



Şekil 4 - Her Konum İçin En Yüksek Kapasite Faktörünü Veren Dalga Dönüştürücü Ölçekleri



Şekil 5 - Her Konum İçin En Yüksek Kapasite Faktörü

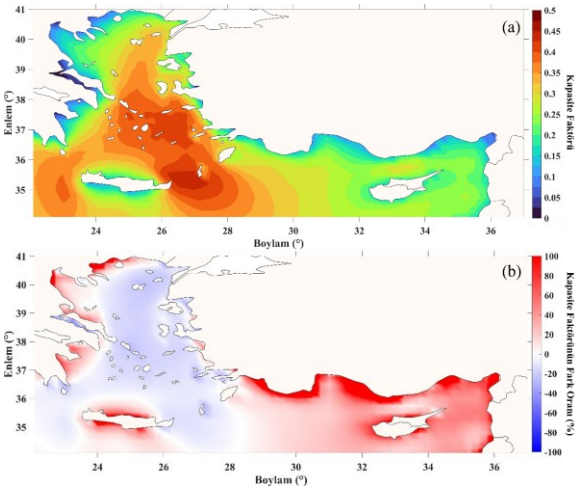
3.2. Hibrit Dönüştürücünün Performansı

Bu bölümde, rüzgar ve dalga enerjisinin birlikte değerlendirilmesiyle oluşturulan hibrit sistemlerin enerji verimliliği üzerine analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, mutlak güç değerleri yerine karşılaştırma kolaylığı sunan CF kullanılmıştır. Her bir grid noktasında, rüzgar enerjisine ait CF ile, dalga enerjisi tarafında en yüksek CF değerini sağlayan ölçekli dönüştürücünün CF değerinin ortalaması alınarak, hibrit sistemin CF dağılımı oluşturulmuştur.

Bunun ardından, her lokasyon için hibrit sistemden elde edilen CF değeri ile yalnızca rüzgar sistemine ait CF değeri arasındaki fark hesaplanmış; bu farkın rüzgar sistemine ait değere oranı alınarak hibrit sistemin katkı oranı yüzdesel olarak belirlenmiştir. Böylece hibrit sistemin, rüzgar sistemine göre enerji üretiminde ne ölçüde artış (veya bazı durumlarda azalış) sağladığı ortaya konmuştur.

Şekil 6a'da, rüzgar dönüştürücüsü ile en yüksek performansı gösteren ölçekli dalga dönüştürücüsünün CF ortalamasından elde edilen hibrit kapasite faktörünün mekânsal dağılımı sunulmaktadır. Rüzgar enerjisinde yüksek verimlilik sağlayan bölgelerden On İki Adalar ve Girit'in doğu kıyılarında, hibrit sistem de benzer şekilde 0,4'ü aşan CF değerleriyle en elverişli alanlar olarak öne çıkmaktadır. Türkiye kıyılarında ise Muğla, Aydın, İzmir ve Çanakkale sahilleri hibrit sistem açısından en yüksek verimliliğe sahip bölgeler arasında yer almaktadır.

Şekil 6b'de hibrit sistem ile yalnızca rüzgar sisteminin CF değerleri karşılaştırıldığında ise çarpıcı mekânsal farklılıklar gözlemlenmektedir. Ege Denizi'nde, Yunanistan kıyıları dışındaki çoğu bölgede rüzgar sisteminin CF değeri hibrit sisteme kıyasla daha yüksektir. Dolayısıyla, bu bölgelerde yalnızca rüzgar sisteminin kullanılması daha yüksek enerji verimliliği sağlayabilecektir. Buna karşın, Girit'in kuzey ve güney sahilleri ile Türkiye'nin Akdeniz kıyıları gibi alanlarda hibrit sistem, rüzgar sistemine göre belirgin şekilde daha başarılı performans göstermektedir. Bazı lokasyonlarda hibrit sistemin CF değeri, rüzgar sistemine kıyasla %100'ün üzerinde artış göstermiştir.



Şekil 6 - Hibrit Dönüştürücüye Ait CF (a), Hibrit Dönüştürücüyle Rüzgar Dönüştürücüsünün Arasındaki CF Fark Oranı (b)

4. SONUÇ

Bu çalışmada, Akdeniz'in kuzeydoğusunda rüzgar ve dalga enerjisi potansiyelleri ayrı ayrı değerlendirilmiş ve ardından hibrit enerji sistemlerinin verimliliği analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, özellikle Girit, Rodos ve On İki Adalar gibi bölgelerde hem rüzgar hem dalga kaynaklarının yüksek kapasite faktörleriyle öne çıktığını göstermiştir. Dalga dönüştürücülerinde ölçek faktörünün performans üzerinde belirleyici olduğu, %10-30 aralığındaki ölçeklerin en verimli sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Hibrit sistemler ise bazı kıyı bölgelerinde rüzgar sistemine göre anlamlı düzeyde avantaj sağlamıştır. Özellikle Girit'in kuzeyi ve güneyi ile Antalya ve Mersin kıyılarında hibrit sistemlerin katkısı %100'ü aşan oranlarda CF artışı göstermiştir. Sonuçlar, bölgesel koşullara uygun sistem seçimlerinin enerji verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymaktadır.

REFERANSLAR

Bozzi, S., Besio, G., & Passoni, G. (2018). Wave power technologies for the Mediterranean

offshore: Scaling and performance analysis. *Coastal Engineering*, *136*(January), 130–146. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.03.001

de Andres, A., Maillet, J., Todalshaug, J. H., Möller, P., Bould, D., & Jeffrey, H. (2016). Techno-economic related metrics for a wave energy converters feasibility assessment. *Sustainability (Switzerland)*, *8*(11). https://doi.org/10.3390/su8111109

Dönmezçelik, O., Koçak, E., & Örkcü, H. H. (2023). Towards net zero emissions target: Energy modelling of the transport sector in Türkiye. *Energy*, *279*(June). https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128064

European Commission. (2023). Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*, *2413*(401), 1–77. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413&qid=1699364355105

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., … Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Lüning, S., & Vahrenholt, F. (2017). Paleoclimatological Context and Reference Level of the 2°C and 1.5°C Paris Agreement Long-Term Temperature Limits. *Frontiers in Earth Science*, *5*(December), 1–7. https://doi.org/10.3389/feart.2017.00104

Majidi, A. G., Bingölbali, B., Akpınar, A., Iglesias, G., & Jafali, H. (2021). Downscaling wave energy converters for optimum performance in low-energy seas. *Renewable Energy*, *168*, 705–722. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.092

Majidi, A. G., Bingölbali, B., Akpınar, A., & Rusu, E. (2021). Wave power performance of wave energy converters at high-energy areas of a semi-enclosed sea. *Energy*, *220*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119705

Majidi, A. G., Ramos, V., Rosa-Santos, P., das Neves, L., & Taveira-Pinto, F. (2025). Power production assessment of wave energy converters in mainland Portugal. *Renewable Energy*, *243*(January), 122540. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122540

Martić, I., Degiuli, N., & Grlj, C. G. (2024). Scaling of wave energy converters for optimum performance in the Adriatic Sea. *Energy*, *294*(December 2023). https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130922

Nelson, V. C. (2011). INTRODUCTION TO RENEWABLE ENERGY. İçinde *Introduction to Renewable Energy*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781439891209

Pennock, S., Vanegas-Cantarero, M. M., Bloise-Thomaz, T., Jeffrey, H., & Dickson, M. J. (2022). Life cycle assessment of a point-absorber wave energy array. *Renewable Energy*, *190*, 1078–1088. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.010

Resmi Gazete. (2021). Milletlerarası Andlaşma. İçinde *Resmi Gazete*. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/10/20211007M1-1.pdf

Siemens. (2013). *The new standard for offshore Siemens , the offshore leader*.

Soukissian, T., O'Hagan, A. M., Azzellino, A., Boero, F., Brito e Melo, A., Comiskey, P., & Pennock, S. (2023). European offshore renewable energy. İçinde *Emb Future Science Brief* (Sayı Nº 9 April 2023).

Vasileiou, M., Loukogeorgaki, E., & Vagiona, D. G. (2017). GIS-based multi-criteria decision analysis for site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *73*(July 2016), 745–757. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.161

Wen, Y., Kamranzad, B., & Lin, P. (2022). Joint exploitation potential of offshore wind and wave energy along the south and southeast coasts of China. *Energy*, *249*, 123710. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123710

Wiatros-Motyka, M., Fulghum, N., Jones, D., Altieri, K., Black, R., Broadbent, H., Bruce-Lockhart, C., Ewen, M., MacDonald, P., Rangelova, K., Brown, S., Copsey, L., Dizon, R., Hawkins, S., Heberer, L., Hong, S., Hutt, R., Lee, U., Lolla, A., … Zaimoglu Disclaimer, O. (2024). *Global Electricity Review 2024 - Ember Climate*. 20–35.

Yang, Z., & Copping, A. (2017). Marine renewable energy: Resource characterization and physical effects. İçinde Z. Yang & A. Copping (Ed.), *Marine Renewable Energy: Resource Characterization and Physical Effects*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53536-4