



Appropriate port selection for floating based offshore wind farms with MCDM methods: The case of Türkiye

Ayşe Nuray Canat*^{ID}, Coşkun Özkan^{ID}

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Yıldız Technical University, 34349, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- Examining port requirements for floating wind turbines
- Creating a model for the evaluation of ports to be used in offshore wind energy
- Criteria weighting with FUCOM, BWM and terminal port selection with CRADIS, CoCoSo

Keywords:

- Port selection for floating offshore wind turbine
- FUCOM
- BWM
- CRADIS
- CoCoSo

Article Info:

Research Article
Received: 30.11.2023
Accepted: 06.04.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1398232

Acknowledgement:

This research was supported by the Council of Higher Education (YÖK) 100/2000 doctoral project

Correspondence:

Author: Ayşe Nuray Canat
e-mail:
aysenuraycanat@gmail.com
phone:+90 532 156 1252

Graphical/Tabular Abstract

In this study, FUCOM, BWM, CRADIS and CoCoSo methods are combined to develop a new integrated multi-criteria decision making model as shown in Figure A. First, the weights of the criteria and sub-criteria are determined by FUCOM and BWM and weighted by the joint weighting method. Then, the scores and rankings of the alternatives were determined by CRADIS and CoCoSo methods and a single ranking was made for the alternatives using the Borda method.

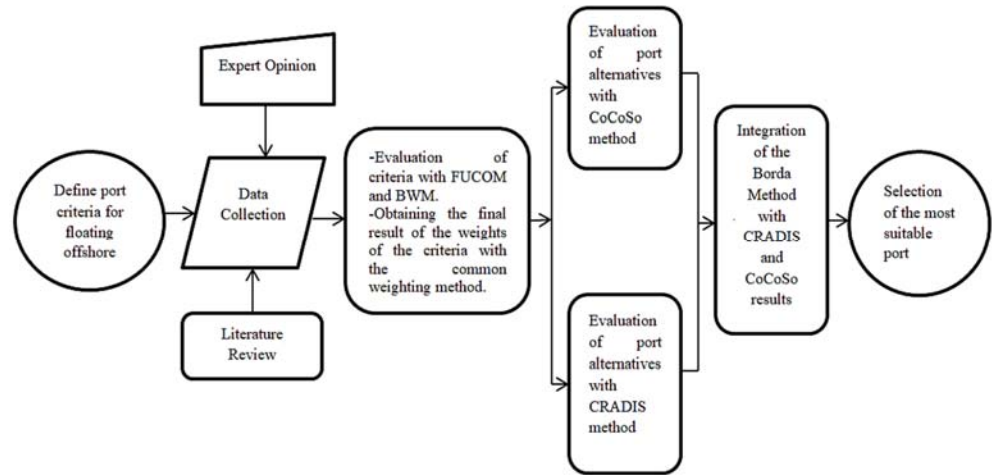


Figure A. Methodology of the study

Purpose:

The aim of this study is to analyze the selection of a suitable terminal port for floating offshore wind power in Türkiye using a multi-criteria decision-making approach.

Theory and Methods:

In order to evaluate suitable ports for floating offshore wind farms, 8 main criteria and 18 sub-criteria were created by analyzing the studies in the literature and expert opinions. FUCOM and BWM, the newest methods of the MCDM, were used to evaluate the relevant criteria and alternative ports. CRADIS and CoCoSo were used to verify the results obtained by the method. The selection process of the suitable port for the terminal port has been completed (Figure A).

Results:

As a result of the multi-criteria decision-making methods we applied, Samsunport was selected as the most suitable port for floating offshore wind power plants. As a result of the control with other MCDM methods, it was seen that the most appropriate choice was Samsunport again.

Conclusions:

The weights of 8 main port eligibility criteria and 18 sub-criteria related to them were obtained. The component fabrication facility, which is the most important main criterion, has a weight of 0.70, and the most important sub-criteria is the quay load-bearing capacity. Later, the ports in Turkey were eliminated by considering the minimum conditions that the terminal ports should have. The ranking of the remaining 4 alternative ports has been determined. According to the determined ranking, Samsunport was found to be the most suitable port for floating offshore wind power.



Yüzer temelli açık deniz rüzgâr santralleri için ÇKKV yöntemleriyle uygun liman seçimi vaka analizi: Türkiye örneği

Ayşe Nuray Canat*¹, Coşkun Özkan²

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34349, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Yüzer temelli rüzgâr türbinleri için liman gereksinimlerinin incelenmesi
- Açık deniz rüzgâr enerjisinde kullanılacak limanların değerlendirilmesi için model oluşturulması
- FUCOM, BWM ile kriter ağırlıklandırılması, CRADIS ve CoCoSo ile terminal liman yeri seçimi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.11.2023

Kabul: 06.04.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1398232

Anahtar Kelimeler:

Yüzer temelli açık deniz rüzgâr türbini için liman seçimi, tam tutarlılık yöntemi, en iyi-en kötü yöntemi, alternatiflerin ideal çözüme olan uzaklıklarına göre uzlaşma sırası yaklaşımı, kombine uzlaşma çözümü

ÖZ

Yenilenebilir enerji temin araçlarından biri olan açık deniz rüzgâr santrallerinin optimum hizmet verebilmesi, düşük maliyetli ve yüksek faydalı olması için kurulum, işletim ve bakım aşamalarının enerji santraline yakın bir lokasyonda uygun limanda yapılması gerekmektedir. Bu liman seçimi işleminde, kurulumu sağlanacak türbin yapısına göre limanların sahip olması gereken kriterler farklılaşmaktadır. Literatürde yüzer temelli rüzgâr türbinleri için liman yeri seçimine ilişkin yapılmış herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, yüzer temelli rüzgâr türbinlerinin denizdeki yaşam döngüleri için limanların sahip olması gereken özellikler literatürdeki çalışmalar incelenerek elde edilmiştir. Uygun limanların seçimi için Tam Tutarlılık Yöntemi, En İyi- En Kötü Yöntemi, Ortak Ağırlıklandırma Yöntemi, Alternatiflerin İdeal Çözüme Olan Uzaklıklarına Göre Uzlaşma Sıralaması Yaklaşımı, Kombine Uzlaşma Çözümü ve Borda Yöntemi kullanılarak karar verme sürecine katkıda bulunulmuştur. Kullanılan entegre yöntem itibarıyla de literatüre katkı sağlamaktadır. Diğer ÇKKV (Çok kriterli karar verme) yöntemleri ile karşılaştırmalı analiz yapılarak uygun liman seçiminin yapılması sağlanmıştır. Çalışmada, liman özelliklerinin en az asgari düzeyde sağlanması gerektiği için Türkiye'deki konteyner ve Ro-Ro limanlar kullanılmıştır. Çalışmada Karadeniz bölgesinde bulunan Samsunport her üç liman tipi (terminal, servis ve yanıt) için en uygun liman olarak bulunmuştur. "Bileşen üretim tesisine sahip olması" kriteri yüzer temelli açık deniz enerji santrali terminal liman seçimi için en önemli kriter olarak bulunmuştur.

Appropriate port selection for floating based offshore wind farms with MCDM Methods: The Case of Türkiye

HIGHLIGHTS

- Examining port requirements for floating wind turbines
- Creating a model for the evaluation of ports to be used in offshore wind energy
- Criteria weighting with FUCOM, BWM and terminal port location selection with CRADIS, CoCoSo

Article Info

Research Article

Received: 30.11.2023

Accepted: 06.04.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1398232

Keywords:

Port selection for floating offshore wind turbine, Full Consistency Method, Best Worst Method, CRADIS, Combined Compromise Solution

ABSTRACT

In order for offshore wind power plants, which are one of the renewable energy branches, to provide optimum service, to be low cost and highly beneficial, the installation, operation and maintenance stages should be carried out in a suitable port close to the power plant. In this port selection process, the criteria that ports should have differ according to the turbine structure to be installed. In the literature, there is no study on port location selection for floating wind turbines. In this study, the characteristics that ports should have for the life cycle of floating wind turbines at sea are obtained by examining the studies in the literature. For the selection of suitable ports, the Full Consistency Method (FUCOM), Best Worst Method (BWM), Common Weighting Method, Compromise Ranking of Alternatives from Distance to Ideal Solution Compromise Ranking of Alternatives from Distance to Ideal Solution (CRADIS), Combined Compromise Solution (CoCoSo) and Borda Method were used to contribute to the decision making process. Comparative analyses with other MCDM (Multi-criteria decision making) methods have been carried out to select the appropriate port. In the study, container and Ro-Ro ports in Turkey were used since the port characteristics should be provided at least at minimum level. Samsunport in the Black Sea region was found to be the most suitable port for all three port types (terminal, service and response). The criterion of having a component production facility was found to be the most important criterion for floating based offshore power plant terminal port selection.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *aysenuraycanat@gmail.com.tr, cozkan@yildiz.edu.tr / Tel: +90 532 156 1252

1. Giriş (Introduction)

Açık deniz rüzgâr enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklardan olup sera gazı emisyonunu azaltmak için üzerine son zamanlarda üzerine yoğun olarak çalışılmaktadır. Küresel açık deniz enerji konseyinin (GWEC), 2022 yılında yayınladığı raporda da belirtildiği gibi 2030 yılına kadar 380 GW'a yakın açık deniz rüzgâr enerji hedeflenmektedir [1]. Bu hedefe ulaşmak için dünya devletleri yoğun mesai harcayarak çalışmaktadır. Açık deniz rüzgâr enerjisi ile ülkelerin enerji ihtiyaçları fazlaca karşılanabilmekte ve karbon ayak izi azaltımı sağlanmaktadır.

Açık deniz rüzgâr enerjisi santralinin kurulumu için geçen süre uzun ve maliyetlidir. Süreci doğru yönetebilmek ve maliyetleri minimize etmek için doğru projelendirilmenin yapılması önceliklidir. Açık deniz rüzgâr enerji santrali kurulumunun projelendirme süreci çok aşamalıdır. Projelendirme sürecinde, kara ve deniz lokasyonlarında çalışmalar yürütülmektedir. Açık deniz rüzgâr enerji santrali kurulacak yer için seçim yapmak ilk aşamadır. Bunun için ön mühendislik çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Yer seçimi işleminin tamamlanmasına müteakip diğer adımlar yürütülerek projelendirme işlemi tamamlanır. Daha sonra tesisin inşası için süreç başlar ve bu süreç için olmazsa olmaz gerekliliklerden biri limanlardır. Kurulacak enerji tesisi için limanın altyapısı ve lojistik ağı kriterleri yeterli standartlarda olmak zorundadır. Limanlar, hem karada yürütülen faaliyetlerde hem de bileşenlerin açık denize taşınması sırasında açık deniz rüzgâr enerji santrallerinin tedarik zincirinin en önemli ögesi olduğundan uygun limanın seçimi büyük önem kazanmaktadır. Bu çalışma ile açık deniz rüzgâr santralinin kurulum, işletme ve bakım-onarım safhaları için en uygun liman kriterleri belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca açık deniz rüzgâr enerjisi için en uygun limanın seçilmesine dair stratejik zorluğun ve karar vermenin üstesinden gelinmeye çalışılmaktadır. Bu endüstrinin gelişmesi için limanlar ve sahip oldukları özellikler büyük önem arz etmektedir [2] ve kurulumu yapılacak türbinin temel tipine göre limanlar için farklı gereksinimler söz konusu olmaktadır. Genelleme yaparak ifade edecek olursak farklı teknik ihtiyaçlarla birlikte açık deniz rüzgâr enerji santralleri için limanlar oldukça önemlidir.

Açık deniz rüzgâr enerjisi için literatürde birçok yayın mevcuttur. Yapılan çalışmaların çoğunda yer seçimi problemi, maliyet analizi, ekonomik ve politik faktörler ele alınmıştır. Açık deniz rüzgâr enerji tesisleri için gereken altyapının uygunluğunu analiz eden çalışma yeterli sayıda değildir. Limanların değerlendirilmesi ilgili olan alt yapı ile ilgili çalışmalarda, liman yerleşiminin optimizasyonu, tedarik zinciri ağının modellenmesi, bakım-onarım için gemi filolarının boyutunun, çeşitliliğinin ve konuşlandırılmasının belirlenmesi gibi konular işlenmiştir. Bunun yanında az sayıda da olsa açık deniz rüzgâr enerji santrali için limanlarda olması gereken kriterler ve liman seçimi değerlendirmeleri mevcuttur. Yaptığımız çalışma, bu alanda henüz yeterince ele alınmayan yüzer temelli açık deniz rüzgâr enerji santralleri için altyapı uygunluğunu araştırmaktadır. Bu çalışmanın, literatüre yüzer temelli açık deniz rüzgâr enerjisi için liman seçimi yapan ilk çalışma olarak katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca yapılan önceki çalışmaların hepsinde ÇKKV tekniklerinden sadece bir metot (AHP- Analitik Hiyerarşi Prosesi) kullanılmıştır. Bu metot, literatürde karar verme problemlerinde yaygın kullanılmakla birlikte çözüme daha hızlı, güvenilir ve verimli ulaşabileceğimiz yeni entegre metotlar geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada, diğer ÇKKV metotlarına göre belirgin olumlu farklara sahip FUCOM, BWM, CRADIS ve CoCoSo yöntemleri kullanılmaktadır. Bu dört ÇKKV yönteminin bütünlük olarak kullanılmasının literatüre yeni bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu katkılara ek olarak, yapılan çalışma ile yüzer temelli rüzgâr santralleri için uygun liman seçimi çerçevesi oluşturulmuştur. Bu çerçeveyin, karar vericilere sadece değerlendirme değil, aksiyon, planlama ve strateji oluşturma kısmında

yardım edeceği düşünülmektedir. Çalışmanın bir başka avantajı ise yenilenebilir enerjinin kurulu güç içindeki payının yüzde 52'sini oluşturduğu Türkiye için farklı bir vizyon oluşturulmasıdır [3]. Güncel durumda açık deniz rüzgâr enerjisinden faydalanamayan ülke için gereken altyapının kriterleri bu çalışmayla değerlendirilmeye çalışılmıştır. Çalışmada devam eden bölümde yazın taraması yapılmıştır. Diğer bölümlerde şu şekilde sıralanmaktadır: Üçüncü bölümde çalışmada nasıl bir yol izlendiği ve kullanılan yöntemler detaylıca açıklanmıştır. Dördüncü bölümde ise yüzer temelli rüzgâr türbinleri kurulumu, bakım-onarımı, işletmesi için gereken liman gereksinimleri belirlenmiş ve gerçekleştirilen uygulamaya yer verilmiştir. Sonuç bölümünde ise elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2. Literatür İncelemesi (Literature Review)

Açık deniz rüzgâr enerjisi için altyapı uygunluğu denildiğinde limanların gereksinimleri, enerji tesisine olan konumları, operasyonel görevleri, mevcut imkânları ve geliştirilebilirlikleri vb. birçok başlık ele alınmaktadır. Bu konularda inceleme yapanların ilki olan Akbari vd. [4] yaptığı çalışmada, açık deniz rüzgâr enerji santralinin kurulması için limanlardaki gereksinimler tespit edilmiştir. Kullanılan yöntem ÇKKV teknikleri arasında en yaygın kullanılan ve en eski olan yöntemlerden biri olan AHP'dir. AHP'de her bir kriter için ikili karşılaştırma yapılmaktadır, bu da karar verici için zaman alıcı olmakta ve işi zorlaştırmaktadır. Ayrıca tutarlılık oranı hesaplanmasında ve diğer kriter değerlendirmelerinde yeni yöntemlere göre iyi performans göstermemektedir. Irawan vd. [5] çalışmasında ise liman gereksinimleri ile tedarik zinciri ağının optimize edilmesi problemini birleştirip yeni bir çalışma yapmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında belirtilen lokasyon için uygun kurulum limanı seçimi AHP yöntemi ile çözümlenmiş ve daha sonrasında bu limandaki nakliye programının en uygun şekilde gerçekleşmesini sağlamak için tam sayılı doğrusal programlama modeli kullanılmıştır. Önerilen model, İngiltere'deki açık deniz rüzgâr santralleri için bir vaka çalışması olarak uygulanmıştır. Akbari'nin çalışması temel alınarak yapılan bir diğer çalışmada ise Coğrafi Bilgi Sistemleri ile açık deniz rüzgâr santrali kurulması için uygun alanlar belirlenmiş ve AHP yöntemi ile hangi bölgede hangi limanda çalışmanın daha doğru olacağı belirlenmiştir. Çalışmanın vaka analizi Marmara denizinde yapılmıştır [6]. Jäppelt vd. [7] tarafından yapılan çalışmada açık deniz rüzgâr enerji santralleri için liman konseptlerini açıklanıp, Kuzey Denizi'ne inşası planlanan santral için muhtemel limanların hangi amaçla kullanılması gerektiği değerlendirilmiştir. Limanlar; temel, besleme ve yanıt portu olarak sınıflandırılmış olup ilgili limanlar için yönergeler oluşturulmuştur. Açık deniz rüzgâr türbinleri için incelediğimiz çalışmalarda türbin temel tipi olarak sabit temeller kullanılmış ve kriterler buna göre değerlendirilmiştir. Crowle ve Thies'in yaptığı çalışmada [8] ise liman gereksinimleri belirlenirken nispeten yeni bir teknoloji olan yüzer açık deniz türbinleri temel alınmıştır. Çalışmada yüzer temel çeşitliğindeki farklılıklara göre gerekli donanımlarda ve liman özelliklerinde farklılık olabileceği vurgulanmaktadır.

Enerji santrali kurulumu gerçekleştirecek olan ülkeler, santralleri projelendirmeden önce nasıl bir türbin yapısı kuracaklarını planlamak için ön incelemeler yaptırmaktadır. Yapılan ön incelemeler neticesinde deniz derinliği, taban yapısı, konuma göre rüzgâr hızının ve uygunluğunun değişmesine bağlı olarak türbin temel tipi kararı verilmektedir. Bu değerlendirmeleri yaparken bölgedeki limanın sahip olduğu yeterlilikler göz önüne alınmaz ise yapılan planlamada değişiklik olması ya da oldukça fazla maliyet çıkması kaçınılmazdır. İlgili limanın seçimi yapılırken enerji santralinde kullanılacak türbin temel yapısını göz önüne alınarak liman gereksinimleri belirlenmektedir. Yaptığımız araştırmalara göre yüzer temelli rüzgâr türbinli enerji santrali için sahip olunması gereken liman

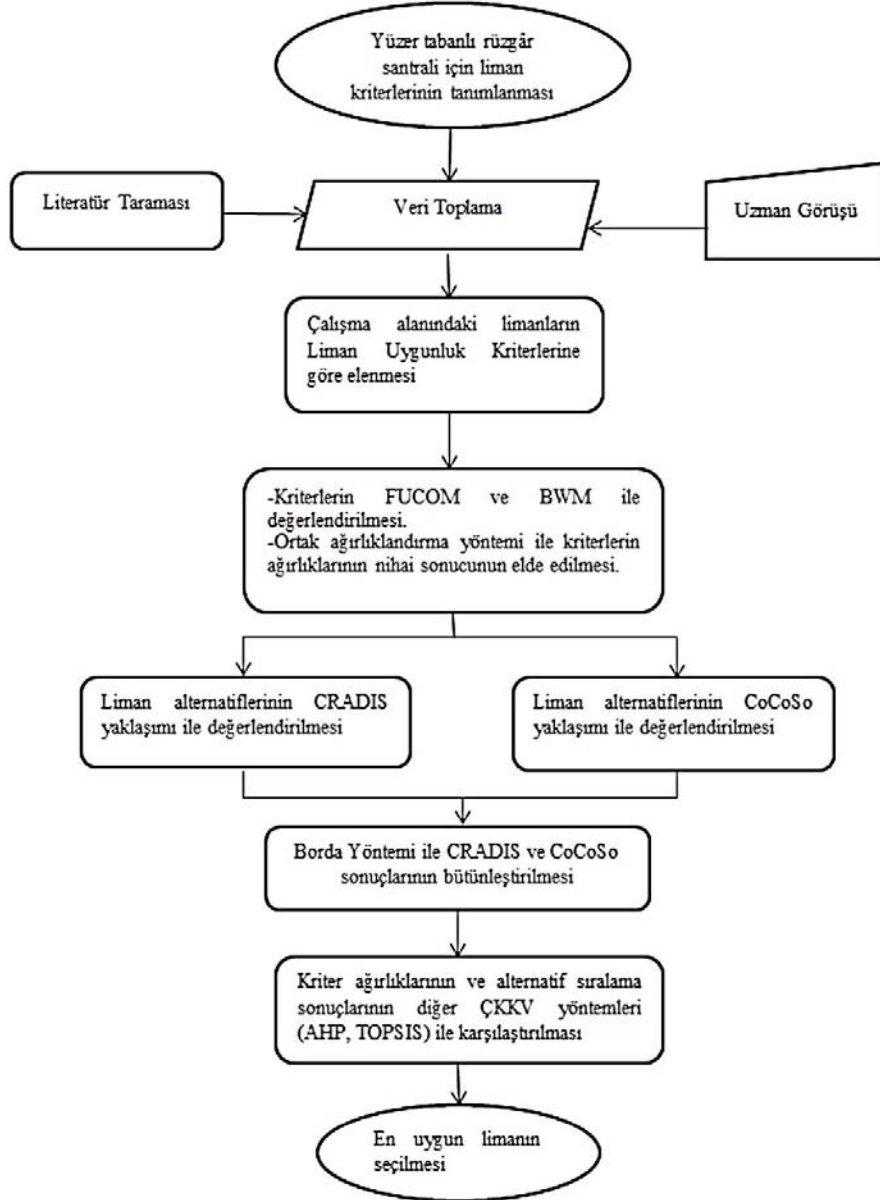
gereksinimlere göre yer seçimi yapan bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Çalışmada yüzer temelli deniz üstü rüzgar türbinleri için liman gereksinimleri literatür taramasıyla belirlenecek ve türbin temel tipi için ihtiyacı karşılayan liman gereksinimleri sektörde çalışan uzmanlarca değerlendirilecektir. Kriterlerin önem dereceleri belirlenip uygun liman seçimi yapılacaktır. Yapılan çalışmada FUCOM yöntemi ve BWM yöntemi ile kriterlerin ağırlıkları belirlenmiştir. Sonuçları daha güvenilir olması için ortak ağırlıklandırma yöntemi ile ortak kriter ağırlıkları elde edilmiştir. Alternatiflerin sıralanmasında ise CRADIS ve CoCoSo yaklaşımları kullanılmıştır. Alternatiflerin bütünlük sıralamasını yapmak için Borda yöntemi kullanılmıştır. Sonuçları kıyaslamak için kriterlerin ağırlıklandırılması aşamasında AHP yöntemi, alternatiflerin sıralanması aşamasında ise TOPSIS yöntemi kullanılacaktır. Önerilen metodolojinin şeması Şekil 1'de gösterilmektedir. Çıkan kararın doğruluğunu karşılaştırmalı olarak değerlendirmek mümkün olacaktır. Karar vericinin kriterleri değerlendirme ve alternatiflerin

seçimi aşamasındaki kullanım kolaylığı, enerji alanındaki kullanımlarında kanıtlanmış karar destek yeteneği gibi özelliklerinden dolayı BWM, FUCOM, CRADIS ve CoCoSo yöntemleri en uygun metodolojiler olarak seçilmiştir. Henüz deniz üstü rüzgar enerji santrali olmayan Türkiye için gerekli ön fizibilite çalışması yerine geçerek uygun liman seçiminin sağlanması amaçlanmaktadır.

3. Metodoloji (Method)

3.1. FUCOM Yöntemi (Full Consistency Method)

Pamucar vd. [9] tarafından geliştirilen FUCOM (Tam Tutarlılık Yöntemi) çok kriterli karar verme yöntemlerinin en yenilerindedir. Daha az sayıda karşılaştırma ile sonuca ulaşılması [10], karar vericinin subjektifliğinin azaltılması, bu sayede kriterlerin ağırlık değerlerinde tutarlılık veya simetri oluşması bu yöntemin en önemli özelliklerindedir.



Şekil 1. Önerilen metodolojinin akış şeması (Flowchart of the proposed methodology)

Fucom yönteminin yenilenebilir enerji klasmanında literatür taraması yapılacak olursa rüzgâr çiftlikleri için yer seçimini etkileyen kriterin ağırlıklandırılması için [11], biyogaz üretim tesisi yer seçimi için CRITIC ve MABAC yöntemleri ile birlikte [12], güneş enerji santralının kurulumu için coğrafi bilgi sistemi (GIS) ile birlikte uygun yer seçimi yapmak amacıyla [13], güneş paneli yüklenici firmalarının değerlendirilmesinde gri sayıların kullanıldığı SWARA yöntemiyle birlikte kullanılmıştır [14]. Bunun dışında enerji sektöründe açık deniz rüzgâr çiftliği yer seçiminde q-basamaklı ortçoifti bulanık kümelerine (q-ROFS) dayalı FUCOM yöntemi kullanılmıştır [15]. Kurak bölgelerdeki yeraltı suyu gelişimi ve sürdürülebilirliğini etkileyen kriterlerin değerlendirilmesinde üç yöntem ile bulunan sonuçların (AHP-FUCOM-BWM) kıyaslaması yapılırken kullanılmıştır [16].

Fucom yöntemin aşamaları aşağıda adımlar halinde sıralanmıştır.

Adım 1. Önceden tanımlanmış değerlendirme kriterleri kümesindeki kriterler, karar vericiler tarafından önemine göre sıralanır. Sıralamada en önemli kritere 1 değeri verilmektedir, diğer kriterler en az önemli kritere doğru numaralandırılarak devam etmektedirler. Eş. 1’de kriterlerin önem sırasına göre dizilim şekli gösterilmektedir. Eğer kriterlerin önem sıralamasında eşit öneme sahip olduğu düşünülüyor ise “=” işareti kullanılabilir.

$$C_{j(1)} > C_{j(2)} > \dots > C_{j(k)} \quad (1)$$

Adım 2. Sıralanan kriterlerin karşılaştırmalı öncelikleri $\varphi_{k/(k+1)}$ belirlenir, burada k ile kriterlerin sırası temsil edilmektedir.

$\varphi_{k/(k+1)}$, $C_{j(k)}$ kriterinin sıralamasının $C_{j(k+1)}$ kriterinin sıralamasına göre avantajını temsil eder. Değerlendirme kriterlerinin karşılaştırmalı öncelikleri vektörleri Eş. 2’de belirtildiği gibi ifade elde edilir:

$$\Phi = (\varphi_{1/2}, \varphi_{2/3}, \varphi_{3/4}, \dots, \varphi_{k/(k+1)}) \quad (2)$$

FUCOM yönteminde karar vericiler, kriterleri ikili karşılaştırırken tamsayı, ondalık değer vb. ölçek değerleri kullanılabilir.

Adım 3. Değerlendirme kriterinin ağırlık katsayılarının son değerleri ($w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$)^T hesaplanır. Ağırlık katsayılarının son değerlerinin aşağıda belirtilen iki koşulu sağlaması gerekmektedir.

Koşul 1. Gözlemlenen kriterlerin ağırlık katsayılarının oranı, gözlemlenen kriterler arasındaki karşılaştırmalı önceliğe ($\varphi_{k/(k+1)}$) eşittir.

$$\frac{w_k}{w_{k+1}} = \varphi_{k/(k+1)} \quad (3)$$

Koşul 2. Ağırlık katsayılarının son değerleri, matematiksel geçişlilik koşulunu sağlamalıdır, yani

$$\varphi_{k/(k+1)} \times \varphi_{(k+1)/(k+2)} = \varphi_{k/(k+2)}$$

Ayrıca $\varphi_{k/(k+1)} = \frac{w_k}{w_{k+1}}$ ve $\varphi_{(k+1)/(k+2)} = \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}}$ olduğu için $\frac{w_k}{w_{k+1}} \times \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}} = \frac{w_k}{w_{k+2}}$ elde edilir. Böylece, değerlendirme kriterlerinin ağırlık katsayılarının nihai değerlerinin yerine getirmesi gereken başka bir koşul Eş. 4’deki gibi elde edilmiş olur.

$$\frac{w_k}{w_{k+2}} = \varphi_{k/(k+1)} \times \varphi_{(k+1)/(k+2)} \quad (4)$$

Tam tutarlılık, yani minimum TTS (Tam Tutarlılıktan Sapma) (χ), yalnızca geçişliliğe tam olarak uyum sağlandığında gerçekleşir. Bu

şekilde maksimum tutarlılık (0,000) sağlanır, yani ağırlık katsayılarının elde edilen değerleri için TTS değeri $\chi = 0$ ’dır.

Sonuç olarak, tanımlanan ayarlara dayanarak değerlendirme kriterlerinin ağırlık katsayılarının son değerlerinin belirlenmesine yönelik nihai model Eş. 5’teki gibi tanımlanabilir.

min χ s.t.

$$\left. \begin{aligned} \left| \frac{w_j(k)}{w_j(k+1)} - \varphi_{k/(k+1)} \right| &\leq \chi, \forall j \\ \left| \frac{w_j(k)}{w_j(k+2)} - \varphi_{k/(k+1)} \times \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| &\leq \chi, \forall j \\ \sum_{j=1}^n w_j &= 1, w_j \geq 0, \forall j \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Eş. 5’teki modelin çözülmesi ile değerlendirme kriterlerinin ($w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$)^T nihai değerleri ve TTS (χ) derecesi elde edilir.

3.2. BWM Yöntemi (Best- Worst Method)

Bu çalışma için kullanılacak diğer ÇKKV yöntemi En İyi- En Kötü yöntemidir. Yöntem, karar verirken dikkate aldığımız kriterlerin içinden en iyi ve en kötü kriterin seçilmesi ve diğer kriterlerin bunlara göre değerlendirilmesi ile oluşmaktadır. Yöntemin en göze çarpan özelliklerinden biri iki referans noktasına (en iyi, en kötü olarak seçilen) dayanmasıdır. Ayrıca tüm kriterler arasında ikili karşılaştırma yapılmadan [17], 2n-3 adet (n kriter sayısı olmak üzere) karşılaştırma yapılarak sonuca kolayca ulaşabilmektedir. Yöntemde karşılaştırmalar yapılırken yalnızca tam sayı değerleri kullanılmaktadır, bundan ötürü değerlendirme süreci kolaylaşmaktadır. BWM yöntemi için literatür taraması yapıldığında çeşitli problemlerin çözümü için kullanıldığı görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları değerlendirmesinde yapılan çalışmalar mevcuttur. Rusya’nın yenilenebilir enerji sektöründeki fırsatlar ve zorluklar incelenip ağırlıkları tespit edilmiştir [18]. Bir rüzgâr çiftliği kurulumu için en iyi sahayı seçmek amacıyla BWM, AHP ve MARCOS (Alternatiflerin Ölçülmesi ve Uzlaşık Çözüme Göre Sıralama) yöntemi olmak üzere üç yöntemin kombinasyonuna dayanan hibrit birçok kriterli yaklaşım uygulanmıştır [19]. Belirsizlik altında yenilenebilir enerji alternatiflerini değerlendirmek için BWM ve D sayılarını entegre eden ve D-BWM olarak belirtilen yeni birçok kriterli karar verme çerçevesi önerilmektedir [20]. BWM ve Trapezoidal bulanık sayıya dayanan trapezoidal bulanık BWM ile bulanık AHP’nin hibritlendiği “Trapezoidal bulanık En Kötü Analitik Hiyerarşi” olarak adlandırılan olarak yeni bir bulanık karar verme tekniği geliştirilmiştir ve bir hidroelektrik santralının performans verimliliğinden sorumlu olan en önemli alternatifini belirlemek için kullanılmıştır [21]. Birinci, ikinci ve üçüncü nesil güneş panellerinden dokuz teknolojiyi inceleyerek güneş panelleri için en iyi teknolojiyi seçmek için BWM ile MULTIMOOSRAL kullanan çalışmalar mevcuttur [22].

Yöntemin aşamaları aşağıda adımlar halinde sıralanmıştır.

Adım 1. Alternatifler, kriterler belirlenir. ÇKKV probleminde Eş. 6’da m alternatiflerin sayısı, n ise toplam kriter sayısı olmak üzere problemin matris formunda görünümü verilmektedir. a alternatifleri, c kriterleri, p_{ij} ise i alternatifinin j kriteri için puanı anlamına gelmektedir.

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} c_1 & c_2 & \dots & c_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

Problemdaki temel amaç, en iyi toplam puanla en iyi alternatifi bulmaktır. Her bir alternatif için toplam puanı hesaplamamızın farklı yöntemleri olabilir ama en kolay yol, Eş. 7'deki formülasyonu kullanarak hesaplama yapmaktır. Burada V_i , i alternatifi için toplam puanı belirtirken, w_j ($w_j \geq 0, \sum w_j = 1$) j kriteri için ağırlık değerini, p_{ij} ise i alternatifi için j kriterinin puanını ifade etmektedir.

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j p_{ij} \quad (7)$$

Her bir kriterin ağırlığını belirlemek için BWM yöntemi kullanılmaktadır. Bunun için bir dizi kriter tanımlanır.

Adım 2. En iyi ve en kötü kriterler karar vericiler tarafından seçilir.

Adım 3. En iyi kriterin diğer kriterlere göre önemi 1-9 ölçeği kullanılarak belirlenir. En iyi kriterin kendisiyle kıyaslaması 1 olarak ifade edilirken, diğer kriterlere göre en iyi kriter ne kadar en iyi muhasebesi yapılarak puanlama yapılır, A_B vektörü belirlenir.

$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, a_{B3}, \dots, a_{Bn})$ olmak üzere a_{Bj} ; j kriterine göre en iyi B kriterinin tercihidir ve 1 ile 9 arası bir tamsayıdır. $a_{BB} = 1$

Adım 4. Diğer kriterlerin en kötü kriter W 'ye göre tercihleri tanımlanır, A_W vektörü oluşturulur. Değerler 1-9 ölçeği kullanılarak belirlenir.

$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, a_{3W}, \dots, a_{nW})^T$, burada a_{jW} , j ölçütünün en kötü ölçüt W 'ye olan tercihidir.

$$a_{WW} = 1$$

Adım 5. Kriterlerin optimal ağırlıkları hesaplanır ($w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$). Bu adımdaki öncelik, elde edilen ağırlıklar ile karar vericinin görüşü arasındaki maksimum boşlukları en aza indirgeyen bir çözüm bulmaktır. Bu sebeple, öncelikle $|w_B - a_{Bj}w_j|$ ve $|w_j - a_{jW}w_{jW}|$ farklarının maksimumunu minimum yapan doğrusal programlama modeli oluşturulmalıdır. Doğrusal programlama modelini oluşturabilmek için problem ilk olarak Eş. 8 ve Eş. 9'da gösterildiği gibi min-max modeli şeklinde oluşturulmalıdır.

$$\min \max_j \{ |w_B - a_{Bj}w_j|, |w_j - a_{jW}w_{jW}| \} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_j w_j = 1 \quad \text{Tüm } j\text{'ler için } w_j \geq 0 \quad (9)$$

Eş. 10'da verildiği gibi elde edilen min-max modeli ise doğrusal programlama modeline dönüştürülmektedir.

$$\begin{aligned} \min \quad & \xi \\ \text{s.t.} \quad & |w_B - a_{Bj}w_j| \leq \xi, \text{ bütün } j\text{'ler için} \\ & |w_j - a_{jW}w_{jW}| \leq \xi, \text{ bütün } j\text{'ler için} \\ & \sum_j w_j = 1 \quad \text{Tüm } j\text{'ler için } w_j \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Optimal kriter ağırlıkları ($w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$) ve tutarlılık oranını hesaplamak için kullanılan ξ^* değerine ulaşmak için Eş. 10'daki doğrusal programlama modeli çözülmelidir.

Adım 6. Sonuçların güvenilir olup olmadığını ve karşılaştırmaların tutarlılığını kontrol etmek için Eş. 11'deki formülasyon ile tutarlılık oranı hesaplanır. Tutarlılık indeksi Tablo 1'de verilmiştir.

$$\text{Tutarlılık Oranı (CR)} = \xi^* / \text{Tutarlılık Endeks Değeri (CI)} \quad (11)$$

Tutarlılık oranı bire yaklaştıkça tutarlılık azalmakta ve sifıra yaklaştıkça tutarlılık artmaktadır.

3.3. Ortak Ağırlıklandırma Yöntemi (Common Weighting Method)

Çalışmada FUCOM ve BWM yöntemi uygulama basamaklarına göre sırasıyla uygulanmıştır. Her iki yöntemin sonucunda elde edilen ağırlıklar, Eş. 12'deki ortak ağırlıklandırma yöntemi kullanılarak birleştirilebilir. Bu sayede oluşturulacak model ile daha güvenilir bir analiz metodu oluşturulacaktır. Kullanılacak ağırlıklandırma yöntemi Zavadskas ve Podvezko'nun çalışmasından elde edilmiştir [24].

$$w_{j,ortak} = \frac{w_{j,bwm}w_{j,fucom}}{\sum_{j=1}^m w_{j,bwm}w_{j,fucom}} \quad (12)$$

3.4. CRADIS Yöntemi (Compromise Ranking of Alternatives from Distance to Ideal Solution)

CRADIS yöntemi, 2021 yılında Puška vd. tarafından belirli alternatiflerin ideal ve ideal olmayan çözümden uzaklıklarının değerlendirilmesiyle fikriyle tasarlanmış yeni bir ÇKKV yaklaşımıdır. CRADIS yöntemi ARAS (Katki Oranı Değerlendirmesi), MARCOS (Alternatiflerin Ölçülmesi ve Uzlaşma Çözümüne göre Sıralanması) ve TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe göre Tercih Sıralanması Tekniği) yöntemlerinin bazı adımlarının birleşiminden oluşmaktadır [25].

Literatürde bu yöntemin kullanımı farklı sektörlerde ve farklı konfigürasyonlarla olmuştur. Enerji sektöründeki kullanımı, alandaki sürdürülebilirliği değerlendirmek için ARAT, CRITIC, SOWIA, CODAS-Sort yöntemlerinin birlikte kullanıldığı [26] çalışmadır.

Sekiz adımda CRADIS yönteminin adımları aşağıda belirtilmiştir.

Adım 1. Başlangıç karar matrisinin oluşturulması m alternatif, n kriterden oluşan karar problemi için Eş. 13'deki gibi başlangıç karar matrisi (X) oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Adım 2. Karar matrisi fayda ve maliyet özelliklerine göre Eş. 14'deki formüller ile normalize edilir.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{jmax}}, \text{ Fayda için} \quad n_{ij} = \frac{x_{jmin}}{x_{ij}}, \text{ Maliyet için} \quad (14)$$

Adım 3. Eş. 15 kullanılarak kriter ağırlıklarıyla normalize matris değerleri çarpılarak ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilir.

$$v_{ij} = n_{ij} \cdot w_j \quad (15)$$

Adım 4. Eş. 16'daki eşitlikler ile ideal çözümün hesaplanması için ağırlıklı karar matrisindeki en büyük ' v_{ij} ' değeri bulunur, anti-ideal çözümün hesaplanması için ağırlıklı karar matrisindeki en küçük ' v_{ij} ' değerinin bulunması ile yapılır.

$$t_i = \max v_{ij}, t_{ai} = \min v_{ij} \quad (16)$$

Tablo 1. BWM için Tutarlılık Endeks Değerleri (The Consistency Index Table for BWM) [23]

a_{BW}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tutarlılık indeksi (max ξ)	0,00	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

Adım 5. İdeal ve anti-ideal çözümlerden sapmalar Eş. 17 ile hesaplanır.

$$d^+ = t_i - v_{ij}, d^- = v_{ij} - t_{ai} \quad (17)$$

Adım 6. Her bir alternatifin ideal ve anti-ideal çözümlerden sapma dereceleri Eş. 18'deki formüller ile hesaplanır.

$$s_i^+ = \sum_{j=1}^n d^+, s_i^- = \sum_{j=1}^n d^- \quad (18)$$

Adım 7. Optimum alternatiflerden sapmalara ilişkin olarak her bir alternatif için fayda fonksiyonu Eş. 19'daki eşitlikler kullanılarak hesaplanır. s_0^+ , ideal çözümden minimum mesafeye sahip olan optimum seçeneği, s_0^- , antiideal çözümden en büyük mesafeye sahip olan optimum seçeneği ifade etmektedir.

$$K_i^+ = \frac{s_0^+}{s_i^+}, K_i^- = \frac{s_i^-}{s_0^-} \quad (19)$$

Adım 8. Nihai sıra, alternatiflerin her biri için ortalama sapma değeri Q_i Eş. 20'deki gibi hesaplanır.

$$Q_i = \frac{K_i^+ + K_i^-}{2} \quad (20)$$

Q_i değeri en büyük olan alternatif en iyi alternatif olarak belirlenir.

3.5. CoCoSo Yöntemi (Combined Compromise Solution Method)

Yazdani vd. tarafından ortaya konulan bu yöntemle alternatiflerin sıralaması yapılmaktadır. Yöntemde üç farklı toplama stratejisi aracılığıyla farklı perspektiflerden alternatiflerin göreceli ağırlık değerleri bulunur. Optimum sıralama endeksine ulaşmak için bu üç sıralama endeksini nihai sonuçları ilişkilendirilir. Bu yöntem sayesinde, daha da iyileştirilen bir sıralama puanına erişilmektedir. CoCoSo yöntemi, entegre bir basit eklemeli ağırlıklandırma ve üssel olarak ağırlıklandırılmış ürün modeline dayanmaktadır [27]. Bu yöntem ile yenilenebilir enerji alanında farklı yöntemlerin bir arada kullanıldığı çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Fotovoltaik güneş enerjisinin geliştirilmesi için alternatiflerin önceliklendirilmesini aralık değerli sezgisel bulanık kümeler çerçevesinde SWOT analizi, AHP ve CoCoSo yöntemlerini kullanarak yapan bir çalışma [28], Nesnelerin İnternetinin (IoT)'nin yenilenebilir enerji sistemlerinde uygulanmasının risklerini değerlendirmek için Bulanık Adımsal Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi yöntemi ile birlikte Bulanık Birleşik Uzlaşma Çözümü yönteminin kullanıldığı çalışma [29], açık deniz rüzgar türbini seçimi için aralık 2-tuple dilbilimsel modeli, güç ağırlıklı ortalama operatörü, kademeli ağırlıklı değerlendirme oranı analizi II, kriterlerin kaldırma etkilerine dayalı yöntem, kümülatif beklenti teorisi ve (CoCoSo) yöntemini entegre eden bir çalışma [30] literatürde mevcuttur. Yöntemin uygulama adımları aşağıda verilmiştir:

Adım 1. Başlangıç karar verme matrisi m alternatif, n kriterleri belirtmek üzere Eş. 21'deki gibi oluşturulur.

$$x_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Adım 2. Eş. 22 ve Eş. 23 kullanılarak uzlaşma normalizasyon denklemine dayalı olarak normalize edilmiş karar matrisi oluşturulur.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}}, \text{ Fayda kriteri için} \quad (22)$$

$$r_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}}, \text{ Maliyet kriteri için} \quad (23)$$

Adım 3. Ağırlıklandırılmış karşılaştırılabilirlik dizisinin toplamı (S_i) ve karşılaştırılabilirlik dizisinin güç ağırlığının tamamı (P_i) sırasıyla Eş. 24 ve Eş. 25'deki formüller ile bulunur.

$$S_i = \sum_{j=1}^n (w_j r_{ij}) \quad (24)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j} \quad (25)$$

Adım 4. Bu adımda, Eş. 26, Eş. 27 ve Eş. 28 formülleri ile ifade edilen toplama stratejileri kullanılarak alternatiflerin göreceli ağırlıkları hesaplanır. Eş. 27'de λ (genellikle $\lambda = 0,5$) karar vericiler tarafından seçilir. Ancak, önerilen CoCoSo'nun esnekliği ve istikrarı başka değerlere de dayanabilir.

$$k_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^m (P_i + S_i)} \quad (26)$$

$$k_{ib} = \frac{S_i}{\min_i S_i} + \frac{P_i}{\min_i P_i} \quad (27)$$

$$k_{ic} = \frac{\lambda(S_i) + (1-\lambda)(P_i)}{(\lambda \max_i S_i + (1-\lambda) \max_i P_i)}; \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (28)$$

Adım 5. Alternatiflerin nihai sıralaması Eş. 29 ile belirlenir.

$$k_i = (k_{ia} k_{ib} k_{ic})^{1/3} + \frac{1}{3} (k_{ia} + k_{ib} + k_{ic}) \quad (29)$$

3.6. Borda Yöntemi (Borda Method)

Borda sayım yöntemi birden fazla sıralamayı birleştirip tek sıralama haline getirmektedir. ÇKKV yönteminin kullanıldığı çalışmalarda en iyi alternatifin tespit edilmesi için kullanılan yöntemlerin sonuçları birleştirilip en doğru sonucu elde etmesi beklenmektedir. Yöntemde incelenen sınıfların önem dereceleri eşit kabul edilmektedir. Sınıf içerisindeki en iyi alternatife $m-1$ değeri verilir. En kötü alternatif sıfır değerini alacak şekilde azalan sıralama takip edilerek her bir alternatif birer azalan değerlere sahip olurlar. Yöntemin matematiksel ifadesi Eş. 30'da verilmektedir.

$$b_i = \sum_{k=1}^n (M - r_{ik}), \quad r_{ik}: k. \text{ kriter altındaki } i. \text{ alternatifin sırası}; M: \text{ toplam alternatif sayısı olmak üzere} \quad (30)$$

4. Uygulama (Application)

4.1. Kriterlerin Belirlenmesi (Determination of Criteria)

Çalışmada, yüzer deniz üstü rüzgâr türbinlerinin yerleşimi için liman gereksinimlerinin değerlendirilmesi problemi incelenmektedir. Bu çalışmada ele alınan ana ve alt kriterler [4, 8, 31] çalışmalarından derlenerek oluşturulmuş ve uzmanlarca uygunluğu değerlendirilmiştir. Karar verici uzman grup; rüzgâr enerjisi konusunda 20 yılı aşkın deneyime sahip ikisi makine mühendisliği diğeri enerji mühendisliği alanında çalışan üç akademisyen ve sektörde 15 yıllık ulusal ve uluslararası tecrübelere sahip enerji konusunda doktora yapmış bir iş insanı olmak üzere dört mühendisten oluşmaktadır. Uzmanlar, açık deniz rüzgâr enerjisi konusunda deneyimleri dikkate alınarak belirlenmiştir ve kriterlerin ağırlıklandırılmaları taraflarca yapılmıştır. Tablo 2'de uzmanlarca değerlendirilen kriterler ve tanımlamaları gösterilmektedir.

Tablo 2. Limanlar için kriterler ve alt kriterlerin tanımlanması (Defining the main and sub-criteria for ports)

Kriter	Alt Kriter	Açıklama	Yazarlar
Depolama – Montaj Alanı (K1)	Depolama Yük Taşıma Kapasitesi	Şamandıra ve diğer bileşenlerin ağırlığını kaldırabilecek kapasitede olmalıdır.	[4, 8, 31]
	Açık Depolama Alanı	Özellikle ağır kaldırma operasyonlarında ek yük de dikkate alınmalıdır.	[4, 8, 31]
	Bileşen Yerleştirme Alanı	Tersanelerde aynı anda birden fazla yüzdürücü inşa edilmesi gerekmektedir. Montajı tamamlanan yüzdürücüler rıhtım kenarında kuru olarak depolanabilir.	[4, 8]
	Kapalı Depolama Alanı	Tersanelerde bileşenlerin birbirine monte edileceği alanlara ihtiyaç vardır.	[4, 8]
	Kapalı Depolama Alanı	Montaj ve kurulumdan önce bazı bileşenlerin kapalı ortamda depolanması için gereklidir.	[4, 8, 31]
Seyir Kanalı Özellikleri (K2)	Seyir Kanalı Genişliği	Rıhtım ve manevra alanlarına giriş kanalları, gemi hareketleri ve operasyonel yüklemeye koşullarında güvenli açıklık sağlar.	[8]
	Seyir Kanalı Derinliği	Minimum derinlikleri, gemi yaklaşımları sırasında beklenen teknik ve dalga koşulları için maksimum su çekimini ve toleranslarını içerir.	[8]
	Seyir Kanalı Tavanı	Navigasyon kanalları, kıyı kanallarında derin çekimli gemilere, iç su yollarında ise sığ çekimli römorkörlere erişim sağlayan arterlerdir.	[8]
	Rıhtım Uzunluğu	Açık deniz rüzgâr enerjisi için kullanılan gemilerin uzunluklarına uygun olmalıdır.	[4, 31]
Rıhtımların Özellikleri (K3)	Rıhtım Sayısı	Rıhtım sayısının fazlalığı eş zamanlı operasyonların yürütülmesi için önemlidir.	[4]
	Rıhtım Derinliği	Şamandıra tasarımına bağlı olan şamandıra yükü için önemli bir faktördür. Aynı zamanda limana erişebilecek gemi türleri üzerinde de etki sahibidir.	[4, 8]
	Rıhtım Taşıma Kapasitesi	Rıhtım zemininin bileşen ağırlıklarını taşıyabilecek yeteneğe sahip olması gerekmektedir.	[4, 8]
	Karayoluna Uzaklık	Türbin bileşenlerinin taşınması için karayollarına erişim kolay olmalıdır.	[4, 8, 31]
Mevcut Altyapı- Alan (K4)	Demiryoluna Uzaklık	Bazı türbin parçalarının nakliyesi demiryolu ile gerçekleştirilebilir.	[4, 8, 31]
	Vinç Varlığı	Ulaşım ağlarına yakınlık liman seçimi için önemlidir. Bazı türbinlerin ağırlığını kaldırmayı sınırlı sayıda vinçler yapabilmektedir. Ayrıca, türbinin şamandıraya takılması için de kullanılmaktadır.	[4, 8]
	Kuru Havuz Varlığı	Büyük ölçekli bileşenlerin inşası ve imalatı için idealdir. Çeşitli imalat ve yüklemeye konseptlerinin test edilmesine ve uygulanmasına olanak tanır.	[8]
	Açık Deniz Sahasına olan Uzaklık	Transit süresini ve hava durumu pencerelerine olan bağımlılığı etkiler. Ayrıca işletme ve bakım maliyetleri üzerinde etkisi vardır	[4, 8]
Yerel Olanaklar (K5)	Ana Bileşen Tedarikçisine olan Uzaklık	Tedarik zinciri, maliyeti azaltmanın bir öncelik olduğu gerçeğine dayanarak kurulmalıdır.	[4, 8, 31]
	Genişleme Potansiyeli	Genişleme olanağı fazla olan limanlar diğerlerine göre tercih önceliğine sahiptir. Çünkü açık deniz rüzgâr enerjisi için liman seçimi stratejik bir karardır.	[4, 31]
	İşgücüne Erişim (K6)	Limanın bulunduğu bölgenin olanaklarının fazla olması yerel tedarik zinciri oluşumunu destekleyebilir. Üretimden montaja birçok noktada aktif rol alınabilir.	[31]
	Bakım- Onarım Atölyeleri (K7)	İşgücünün yetersiz olması ve/veya kolay sağlanamaması ilerleme için darboğaz oluşturmaktadır.	[31]
Bileşen Üretim Tesisleri (K8)	Deniz üstü rüzgâr santrali için gereken ekipmanın çalışan durumda bulunması için çalışma yapılan yerdir. Duruşları en aza indirmesi açısından önemlidir.	[8, 31]	
		Bileşenlerin proje yerine yakın üretilip monte edilmesi imalat ve montaj için en verimli seçenektir. Ayrıca taşıma maliyetlerinde azalım sağlanır.	[8, 31]

4.2. Çalışma Yapılacak Alanın Özellikleri (Characteristics of the Study Area)

Türkiye üç tarafı denizlerle çevrili bir yarımadadır. Jeolojik açıdan bu avantajını enerji üretimi için kullanmamaktadır. Henüz denizde üretilen herhangi bir yenilenebilir enerji santraline (dalga enerjisi, yüzer güneş santralleri, deniz üstü rüzgâr enerji santrali) sahip değildir. Dünya Bankası raporunda Türkiye'nin 12 GW sabit temelli ve 63 GW yüzer temelli olmak üzere toplamda 75 GW açık deniz rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olduğu ifade edilmektedir [32]. T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından açık deniz rüzgâr enerjisi için ilk adım, 2018 yılında atılmış ve Saros, Kıyıköy ve Gelibolu kıyılarında 1200 MW gücüne sahip açık deniz rüzgâr enerji tesisi için yarışma başvurusu yayınlamıştır. Ama bu ilan yeterince altyapı bilgisine sahip olunmadığı için karşılık bulamamıştır. Bu ilan ile hem akademiye hem de sanayide açık deniz rüzgâr enerjisi için çalışma yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Açık deniz rüzgâr enerjisi santrali ile ilgili Türkiye özelinde yer seçimi yapan çalışmalar

bulunmaktadır [33–35]. Ancak hala yetersizdir, türbin temel tipine göre uygun liman seçimi çalışması ise henüz yoktur. Bulduğu konum itibarıyla geçiş noktası sebebiyle çok sayıda uluslararası limana sahiptir. Bu limanlarda çeşitli yük tiplerinde nakliye ve depolama işlemleri yapılabilmektedir. Akaryakıt ürünleri, genel kargo, ham petrol, kömür, konteyner, Ro-Ro, sıvı dökme, kuru dökme ve yolcu bu yük tiplerini oluşturmaktadır.

Daha geniş depolama alanları, daha yüksek ticari operasyonları, daha geniş rıhtım uzunlukları ve daha yüksek yük kapasiteleri nedeniyle konteyner limanları, açık deniz rüzgâr sektörü için daha uygun olduğunu bilinmektedir [2]. Konteyner limanları sadece kurulum için değil, aynı zamanda işletme ve bakım (O&M) kullanımları için de uygun limanlardır [4]. Bir konteyner limanının uygunluğu, talepleri en iyi şekilde karşılayan açık deniz rüzgâr çiftliklerinin maliyetlerini etkileyebilir, kurulumu ve işletme-bakım sürecini kolaylaştırabilir [36]. Bu çalışmada değerlendirmeye alınacak limanlar konteyner ve Ro-Ro yük tipine sahip olan limanlardır. Ülkemizde konteyner

gemilerine hizmet veren toplam 28 adet liman bulunmaktadır [37]. Bu limanlardan bazıları iskele, bazıları ise rıhtım formunda hizmet vermektedir. Konteyner taşımacılığı yapan çoğu limanımızda Ro-Ro taşımacılığı da yapılmaktadır. Tablo 3’de ise Türkiye’de bulunan konteyner ve Ro-Ro taşımacılığı yapan limanların sahip oldukları özellikler tablolaştırılarak verilmektedir.

Yalnız her konteyner ya da Ro-Ro taşımacılığı yapılan liman, açık deniz enerji santralının kurulumunda kullanılacak limanların özelliğini sağlayamamaktadır. Rüzgâr türbini imalatını, altyapı imalatını, donatımını ve rüzgâr çiftliklerinin açık deniz kurulumu, işletimi ve bakımını desteklemek için farklı işlevlere sahip liman tesislerine ihtiyaç vardır [8]. Limanlar, enerji santrali kurulumunda yaptıkları işlevlere göre kategorize edilebilirler.

Açık deniz rüzgâr enerjisi için kullanılacak limanlar üç işlevde çalışmak üzere farklılaşırlar. Bunlardan ilki türbin parçalarının üretim ve montajının yapılacağı temel (terminal) limanlardır. İkincisi kurulum aşamasında tüm yedek parça ve ekipmanların depolandığı ve servis hizmetlerinin yürütüldüğü bakım (besleme) limanlarıdır. Bu limanlarda türbin hizmet süresi boyunca bakım çalışmaları yürütülür. Üçüncü liman ise yanıt (reaksiyon) limanıdır. Her bir liman türünün gereksinimleri işlevine göre değişmektedir.

Temel (terminal) limanlarda ilgili türbin parçaları için elleçleme, montaj, taşıma ve depolama alanları vardır. Bu limanlarda enerji tesisinin kurulumu için gereken ana fonksiyonlar gerçekleştirilmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelenerek ilgili liman için sahip olması gereken asgari özelliklerin listesi oluşturulmuştur. Bu limanlarda, yüzer temelli rüzgâr türbinlerinin parçalarını taşıma- depolama için 13-15 hektarlık, elleçleme ve montaj için ise 16 hektarlık alan gereksinimi vardır [31]. Bu alanların daha fazlasına sahip olunması arzu edilen bir özelliktir çünkü hava

koşulları inşaat çalışmaları üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bu durum tampon alan gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Rıhtımların uzunluğu en az 400m ve sayısı ve derinlikleri, gelgitten bağımsız 8m den az olmamalı, yük taşıma kapasitesi en az 20t/m² olmalıdır [31].

Bir diğer liman işlevi ise servis hizmetinin yürütülmesidir. Bu işlevi yürüten limanlara bakım (besleme) limanı, hizmet limanı denilmektedir. Bir açık deniz rüzgâr türbinin ortalama ömrü 25 senedir [38]. Bu ömür boyunca bakım-onarım için devamlı hizmet alması gerekmektedir. İşletme ve bakım faaliyetleri, önleyici ve küçük düzeltici bakım ve ağır bakım (yani büyük parça değişimi) olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma, bu faaliyetleri gerçekleştirmek için gereken altyapı gereksinimlerini etkileyecektir. Bunun için enerji kurulumunun gerçekleştiği yere yakın servis gemilerinin yanaşıp yükleme- boşaltma yapması için 80*100m uzunluğunda ve en az 3,5 m su derinliğine sahip rıhtımlara sahip bir liman olmalıdır [31]. Bu tür liman işlevleri için rıhtım uzunluğu ve derinliği Türkiye’deki çoğu liman tarafından kolaylıkla sağlanan bir kriterdir. Açık depolama alanının en az 2000 m², kapalı depolama alanının ise en az 500m²’lik alana sahip olması gerekmektedir.

Bir diğer liman işlevi ise acil durumlarda kolay cevap verebilmek amacı ile yanıt (reaksiyon) limanlarıdır. Bu limanların sahip olması gereken en önemli kriter enerji tesisi yerleşim alanına en fazla iki saatlik seyir mesafesinde bulunmasıdır. Rıhtım özellikleri, depolama alanı özellikleri, sosyal faaliyet alanları ve konaklama alanları besleme limanları ile benzerlik göstermektedir. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin liman gereksinimlerini değerlendiren göz önüne almamız gereken diğer önemli nokta temel tipidir. Bu çalışmada, yüzer temel tipleri ile ilgili çalışma yapılmaktadır. Yüzer temeller farklı şekillere ve malzeme yapılarına sahiptir, bundan dolayı farklı montaj usullerine sahiptirler. Farklı tedarik ağına, montaja, depolamaya ve taşınmaya sahip yüzer tip türbin temelleri için liman

Tablo 3. Türkiye’deki konteyner ve Ro-Ro limanlarının özellikleri (Features of container and Ro-Ro ports in Türkiye)

Limn Adı	Elleçleme Kapasitesi (ton/yıl)	Toplam Liman Sahası (m ²)	Rıhtım boyu (m)	Rıhtım derinliği (m)	Vinç Kapasitesi (ton)	Depolama Sahası (m ²)	Kapalı Depo (m ²)
Atakaş Limanı	10.000.000	203.219	716	27	140		
Akçansa Ambarlı Limanı	4.000.000	89.743	930	13	140	50.205	3.032
Alteş Ambarlı Limanı		2.000.000	6.000	17			
Anadolu Port		25.000	205	9			
Asbaş- Antalya Serbest B.	1.300.000	27.750	400	10			
Assan Port	1.000.000	225.000	340	19	150		
Asyaport	2.500.000	300.000	2.010	18	120		
Autoport	2.000.000	157.792	328	15	140	146.404	5.400
Belde Port	2.000.000	600.000	1.671	18	280		
Borusan Lojistik	5.000.000	465.000	1.773	15	140		15.000
Çelebi Bandırma Uluslararası Limanı	12.000.000	268.348	2.974	12	100		8.250
Ceyport Tekirdağ Uluslararası Liman	5.000.000	152.514	2.310	12	100		
DP WORLD Yarımca Liman	1.300.000	460.000	457	16	140		6.000
Ege Gübre	2.500.000	485.000	367	28	150	46.740	26.740
Erdemir	13.750.000	750.000	1.670	20	50	139.000	
Evyap Port	1.000.000	265.000	358	19	140		
Gem Port	2.500.000	868.000	2.040	36	104	212.200	14.077
Giresunport	3.000.000	94.000	800	10			29.800
Kumport	2.100.000	477.867	2.226	17	104		10.400
Karasu Limanı	6.000.000	676.000	250.000	1.108	11	240.000	6.500
Limak İskenderun Uluslararası Liman	3.000.000	1.000.000	1.652	16			
Mardaş	3.000.000	197.047	877	17	140	202.600	
Marpot	2.300.000	447.431	2.005	17	140	423.000	6.103
Mersin Uluslararası Liman	2.600.000	1.120.000	3.370	19	150	1.253.355	8.412
Nem Port	1.000.000	160.000	1.080	22	140	100.000	
Ortadoğu Antalya Liman	4.000.000	201.125	1.117	10	150	80.000	6.790
Roda Liman	3.000.000	211.000	1.200	13	100	186.000	11.500
Samsunport	11.500.000	445.000	1.756	12	124		51.500
Socar Aliğa Limanı	1.500.000	420.000	700	16	70	400.000	225
Yılport Konteyner Terminali	6.000.000	310.337	1.455	27	70	298.000	6.400
Limaş Liman	1.000.000	120.000	165	12	160	44.100	

gereksinimleri de değişmektedir [39]. Bahsedilen liman işlevleri ve asgari özellikler değerlendirildiğinde Tablo 3’de verilen liman listesinden sadece dört tanesi temel liman ile ilgili tüm şartları sağlamaktadır. İlgili dört limanın listesi aşağıda verilmektedir. Besleme ve reaksiyon limanlarının özelliklerini ülkemizde bulunan çoğu liman sağlamakta olduğu için temel liman üzerinden çalışma yürütülecektir.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

İlgili kriterler konusunda en az 15 yıllık deneyime sahip akademisyen ve sektörde çalışan uzman dört kişiye danışılmıştır. Tablo 5’de uzman karar vericiler tarafından önem düzeylerine göre ana ve alt kriterler arasında yapılan sıralama gösterilmiştir. Alt kriterlerin ağırlıkları hesap edilirken alt kriter ağırlıkları (yerel ağırlıklar), bağlı bulunan ana kriterin ağırlığı ile çarpılarak global kriter ağırlıkları hesaplama

yapılmıştır. Yüzer temelli açık deniz enerji santralleri için terminal liman gereksinimleri Bölüm 3.1. de bahsedilen ilgili makalelerden elde edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında enerji santralleri için kullanılacak liman sayısı alternatifleri belirlenmiştir. İlgili alternatiflere ait özellikler Tablo 4’de belirtildiği gibidir.

İlgili değerler yerine konulduktan sonra Excel Solver ile Eş. 5 çözüldüğünde karar vericiler için kriterlerin nihai önem ağırlıkları belirlenir. Her iki yöntemde de bileşen üretim tesisi en önemli kriter olarak hesaplanmaktadır. Rıhtım taşıma kapasitesi, bakım-onarım atölyelerinin varlığı sırasıyla diğer önemli kriterler olarak görülmektedir. Seyir kanalı tavanı en küçük ağırlığa sahip kriterdir. Kriterlerin sıralamasında bazı değişiklikler bulunmaktadır. Her iki yöntemin ortak ağırlıklandırılması ile elde edilen sonuçlarda kriterlerin sıralaması çok değişmemekle birlikte ağırlıklar değişmektedir. Tablo 8’de sonuçlar listelenmektedir.

Tablo 4. Temel liman kriterlerine uygun limanların listesi (List of eligible ports for basic port criteria)

Limana Adı	Elleçleme Kapasitesi (ton/yıl)	Toplam Liman Sahası (m ²)	Yük Taşıma Kapasitesi	Rıhtım Boyu (m)	Rıhtım Derinlik (m)	Vinç Kapasitesi (ton)
Atakaş Limanı	10.000.000	203.219	49,20799728	716	27	140
Çelebi Bandırma Uluslararası Limanı	12.000.000	268.348	44,71805268	2974	12	100
Ceyport Tekirdağ Uluslararası Limanı	5.000.000	152.514	32,78387558	2310	12	100
Samsunport Uluslararası Limanı	11.500.000	445.000	25,84269663	1756	12	124

Tablo 5. FUCOM yöntemiyle elde edilen karar vericilerin alt ve ana kriter önem sıralamaları (Sub- and main-criterion importance rankings of decision makers obtained with the FUCOM method)

Karar Verici 1’in Sıralamaları	Karar Verici 2’nin Sıralamaları	Karar Verici 3’ün Sıralamaları	Karar Verici 4’ün Sıralamaları
Ana Kriterler	Ana Kriterler	Ana Kriterler	Ana Kriterler
K8=K3>K4>K7>K1 =K2>K6=K5	K8=K3>K4 =K7>K1>K2>K6=K5	K8>K3 =K4>K7>K1>K2>K6>K5	K8=K3>K4 =K7>K1>K2>K6=K5
Alt Kriterler	Alt Kriterler	Alt Kriterler	Alt Kriterler
K13>K11>K14>K12 K22>K21>K23 K34>K33>K31>K32 K45>K46>K43>K44>K41 =K42>K47	K13>K11>K12>K14 K22>K21>K23 K34>K33>K32>K31 K45=K46>K43=K44>K42 =K41>K47	K13>K11>K12>K14 K22>K21>K23 K34=K33>K31>K32 K46>K45>K43>K44 =K47>K41=K42	K13>K11>K14>K12 K21>K21>K23 K34>K32=K33>K34 K45=K46>K43>K44>K47>K41>K42

Tablo 6. FUCOM yöntemine göre kriterlerin nihai önem ağırlıkları ve sıralaması (Final importance weights and ranking of criteria according to the Fucom method)

Kriterler	Alt Kriterler	Ağırlıklar	Yerel Ağırlıklar	Global Ağırlıklar	Sıralama
Depolama-Montaj alanı	Depolama yük taşıma kapasitesi	0,0722	0,2042	0,0147	14
	Açık depolama alanı		0,1030	0,0074	21
	Bileşen yerleştirme alanı		0,5850	0,0422	8
	Kapalı depolama alanı		0,1080	0,0078	20
Seyir kanalı özellikleri	Seyir kanalı genişliği	0,0596	0,1500	0,0089	16
	Seyir kanalı derinliği		0,7362	0,0438	6
	Seyir kanalı tavanı		0,1139	0,0068	22
Rıhtımların özellikleri	Rıhtım uzunluğu	0,2414	0,1035	0,0250	12
	Rıhtım sayısı		0,1112	0,0268	11
	Rıhtım derinliği		0,2811	0,0678	4
	Rıhtım taşıma kapasitesi		0,5042	0,1217	2
	Karayoluna uzaklık	0,1409	0,0601	0,0085	18
Mevcut altyapı-alan	Demiryoluna uzaklık		0,0583	0,0082	19
	Vinç varlığı		0,1274	0,0179	13
	Kuru havuz varlığı		0,0989	0,0139	15
	Açık deniz sahasına olan uzaklık		0,2979	0,0420	9
	Ana bileşen tedarikçisine olan uzaklık		0,2956	0,0416	10
Yerel olanaklar	Genişleme potansiyeli		0,0618	0,0087	17
	İşgücüne erişim	0,0434		0,0434	7
	Bakım-onarım atölyeleri	0,0453		0,0453	5
	Bileşen üretim tesisi	0,1156		0,1156	3
		0,2818		0,2818	1

Tablo 7. BWM yöntemine göre kriterlerin ve alt kriterlerin ağırlıkları
(Weights of criteria and subcriteria according to the BWM method)

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Ağırlıklar	Yerel ağırlıklar	Global ağırlıklar	Sıralama
Depolama-Montaj alanı	Depolama yük taşıma kapasitesi	0,0815	0,2208	0,0180	12
	Açık depolama alanı		0,0789	0,0064	18
	Bileşen yerleştirme alanı		0,5678	0,0463	4
	Kapalı depolama alanı		0,1325	0,0108	17
Seyir kanalı özellikleri	Seyir kanalı genişliği	0,0582	0,2400	0,0140	15
	Seyir kanalı derinliği		0,6600	0,0384	7
	Seyir kanalı tavanı		0,1000	0,0058	19
Rıhtımların özellikleri	Rıhtım uzunluğu	0,2038	0,1429	0,0291	9
	Rıhtım sayısı		0,0714	0,0146	13
	Rıhtım derinliği		0,2857	0,0582	3
	Rıhtım taşıma kapasitesi		0,5000	0,1019	2
Mevcut altyapı-alan	Karayoluna uzaklık	0,1358	0,0839	0,0114	16
	Demiryoluna uzaklık		0,0839	0,0114	16
	Vinç varlığı		0,1399	0,0190	11
	Kuru havuz varlığı		0,1049	0,0142	14
	Açık deniz sahasına olan uzaklık		0,3357	0,0456	5
	Ana bileşen tedarikçisine olan uzaklık		0,2098	0,0285	10
Yerel olanaklar	Genişleme potansiyeli		0,0420	0,0057	20
	İşgücüne erişim	0,0340		0,0340	8
Bakım-onarım atölyeleri		0,0453		0,0453	6
Bileşen üretim tesisi		0,1019		0,1019	2
		0,3396		0,3396	1

Tablo 8. Ortak ağırlıklandırma yöntemi ile kriterlerin ağırlıklarının hesaplanması sonucu
(As a result of calculating the weights of the criteria with the common weighting method)

Ana kriterler	Alt Kriterler	Ortak Ağırlıklandırma Sonucu Kriter Ağırlıkları	Sıralama
Depolama-montaj alanı	Depolama yük taşıma kapasitesi	0,0019	14
	Açık depolama alanı	0,0004	21
	Bileşen yerleştirme alanı	0,0143	6
	Kapalı depolama alanı	0,0006	19
Seyir kanalı özellikleri	Seyir kanalı genişliği	0,0009	16
	Seyir kanalı derinliği	0,0123	8
	Seyir kanalı tavanı	0,0003	22
	Rıhtım uzunluğu	0,0053	11
Rıhtımların özellikleri	Rıhtım sayısı	0,0029	12
	Rıhtım derinliği	0,0289	4
	Rıhtım taşıma kapasitesi	0,0908	2
	Karayoluna uzaklık	0,0007	17
Mevcut altyapı-alan	Demiryoluna uzaklık	0,0007	18
	Vinç varlığı	0,0025	13
	Kuru havuz varlığı	0,0015	15
	Açık deniz sahasına olan uzaklık	0,0140	7
Yerel olanaklar	Ana bileşen tedarikçisine olan uzaklık	0,0087	10
	Genişleme potansiyeli	0,0004	20
İşgücüne erişim		0,0108	9
Bakım-onarım atölyeleri		0,0150	5
Bileşen üretim tesisi		0,0862	3
		0,7009	1

Kriterlerin ağırlıkları belirlendikten sonra ilgili kriterler baz alınarak alternatiflerin sıralaması uzmanların puanlamalarına göre CRADIS yöntemiyle yapılmıştır. Tablo 9'da açık deniz rüzgâr enerjisi için uygun liman olarak Samsunport ilk sırada yer almıştır. Sırasıyla Çelebi Bandırma, Atakaş ve Ceyport Limanları gelmektedir.

Alternatiflerin sıralaması için kullanılan diğer yöntem CoCoSo'nun sonuçları Tablo 10'da verilmiştir. Bu yöntemle yapılan alternatiflerin sıralaması CRADIS yöntemi ile çıkan sonuç ile aynıdır. Açık deniz rüzgâr enerjisi için en uygun limanın 4,1712 puan skoru ile

Samsunport olduğu görülmektedir. Çalışmanın son adımında, alternatifleri sıralamak için kullanılan yöntemler Borda Yöntemi kullanılarak nihai sıralama oluşturulmaktadır. Borda yönteminin sonuçları Tablo 11'de verilmektedir. Borda yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlara göre 6 puan ile Samsunport en uygun liman seçilirken sırasıyla Çelebi Bandırma, Atakaş ve Ceyport limanları en uygun liman sıralamasını oluşturmaktadır.

Sonuçların tutarlılığını kontrol etmek amacıyla kriterlerin ağırlıklandırılması için AHP (Analitik Hiyerarşi Yöntemi),

alternatiflerin sıralanması için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. AHP ile elde edilen yerel ve global ağırlıklar Tablo 12’de verilmektedir. Tablo 13’de TOPSIS yöntemine göre pozitif ideal çözüme uzaklık, negatif ideal çözüme uzaklık, ideal çözüme göreli yakınlık değerleri belirtilmiş ve sıralama yapılmıştır. TOPSIS yönteminin sonucuna

göre ise Samsunport diğer limanlara göre önde bir yakınlık derecesine sahipken, Çelebi Bandırma Uluslararası Limanları ve Atakaş Limanlarının yakınlık dereceleri birbirine yakındır. Her iki çok kriterli karar verme yönteminin sonucu incelendiğinde sıralamanın değişmediği, aynı kaldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 9. CRADIS yaklaşımına göre alternatiflerin sonuçları (Results of alternatives according to the CRADIS approach)

Alternatifler	s_i^+	K_i^+	s_i^-	K_i^-	Q_i	Sıralama
Atakaş Limanı	3,1730	0,9739	0,8739	0,9135	0,9437	3
Çelebi Bandırma Uluslararası Limanı	3,0961	0,9981	0,9508	0,9939	0,9960	2
Ceyport Tekirdağ Uluslararası Liman	3,2625	0,9472	0,7844	0,8200	0,8836	4
Samsunport	3,0902	1,0000	0,9566	1,0000	1,0000	1

Tablo 10. CoCoSo metoduna göre alternatiflerin sonuçları (Results of alternatives according to the CoCoSo method)

Alternatifler	k_{ia}	k_{ib}	k_{ic}	k_i	Sıralama
Atakaş Limanı	0,2424	3,9045	0,7167	3,3130	3
Çelebi Bandırma Uluslararası Limanı	0,2886	4,3321	0,8532	3,5842	2
Ceyport Tekirdağ Uluslararası Liman	0,1307	2,0000	0,3864	2,1981	4
Samsunport	0,3383	5,4934	1,0000	4,1712	1

Tablo 11. Borda yöntemi ile nihai sıralama sonuçları (Final ranking results with Borda method)

Alternatifler	CRADIS		CoCoSo		Borda Sayım	
	Sıra	Puan	Sıra	Puan	Puan	Sıra
Atakaş Limanı	3	1	3	1	2	3
Çelebi Bandırma Uluslararası Limanı	2	2	2	2	4	2
Ceyport Tekirdağ Uluslararası Liman	4	0	4	0	0	4
Samsunport	1	3	1	3	6	1

Tablo 12. AHP yöntemi ile elde edilen global kriter ağırlıkları (Global criteria weights obtained by AHP)

Kriterler	Alt Kriterler	Ağırlıklar	Yerel Ağırlıklar	Global Ağırlıklar
Depolama-montaj alanı	Depolama yük taşıma kapasitesi	0,1220	0,3239	0,0395
	Açık depolama alanı		0,0566	0,0069
	Bileşen yerleştirme alanı		0,4533	0,0553
	Kapalı depolama alanı		0,1662	0,0203
Seyir kanalı özellikleri	Seyir kanalı genişliği	0,0581	0,2857	0,0166
	Seyir kanalı derinliği		0,5714	0,0332
	Seyir kanalı tavanı		0,1429	0,0083
Rıhtımların özellikleri	Rıhtım uzunluğu	0,1629	0,1602	0,0261
	Rıhtım sayısı		0,0802	0,0131
	Rıhtım derinliği		0,3253	0,0530
	Rıhtım taşıma kapasitesi		0,4343	0,0707
	Karayoluna uzaklık	0,1537	0,0724	0,0111
Mevcut altyapı-alan	Demiryoluna uzaklık		0,0472	0,0073
	Vinç varlığı		0,1545	0,0237
	Kuru havuz varlığı		0,1205	0,0185
	Açık deniz sahasına olan uzaklık		0,2907	0,0447
	Ana bileşen tedarikçisine olan uzaklık		0,2680	0,0412
Yerel olanaklar	Genişleme potansiyeli		0,0466	0,0072
			0,0340	0,0340
İşgücüne erişim			0,0385	0,0385
Bakım-onarım atölyeleri			0,1375	0,1375
Bileşen üretim tesisi			0,2933	0,2933

Tablo 13. TOPSIS yöntemine göre ideal çözüme göreli yakınlık değerleri (Relative closeness values to the ideal solution according to the TOPSIS method)

Alternatifler	S_i^*	S_i^-	C_i^*	Sıralama
Atakaş Limanı	0,1083	0,1144	0,5137	3
Çelebi Bandırma Uluslararası Limanı	0,0746	0,0810	0,5207	2
Ceyport Tekirdağ Uluslararası Limanı	0,1387	0,0322	0,1885	4
Samsunport	0,0249	0,1423	0,8510	1

6.Sonuçlar (Conclusions)

Türkiye’de açık deniz rüzgâr santralinden enerji üreten bir tesis henüz yoktur. Üç tarafının denizlerle çevrili olması, rüzgâr hızı ve yoğunluğu bakımından yüksek potansiyele sahip olması sebebiyle açık deniz rüzgâr enerjisi için çok elverişli bir konumdur. Açık deniz rüzgâr enerjisinden maksimum düzeyde faydalanabilmek için denizcilik sektörünün dahli gerekmektedir. Denizcilik sektöründeki limanların kapasitelerinin artırılması, şartlarının iyileştirilmesi, enerji santrali için kullanıma hazır duruma getirilmesi ile avantajlar sağlamak mümkündür. Yapılan çalışma ile bu konuda bir farkındalık uyandırılmaktadır.

Bu çalışmada, ÇKKV yöntemlerinden FUCOM, BWM, CRADIS ve CoCoSo kullanılarak açık deniz rüzgâr enerji santralleri için gerekli olan terminal liman seçimi yapılmıştır. Çalışma, yüzer temelli rüzgâr santralleri baz alınarak yapılan ilk liman seçimi çalışmasıdır. Bu özelliği ile literatüre önemli bir katkı sağlayacaktır. Yapılan çalışmada kullanılan yöntemlerin sonucunu değerlendirmek ve çözümün doğruluğunu tespit etmek amacıyla AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. FUCOM, BWM, CRADIS ve CoCoSo metodolojisi karar vericilerin uygun gördüğü kriterler üzerinde uygulanmış olup açık deniz yüzer rüzgâr türbinleri için terminal liman konseptine en uygun liman Samsunport olarak belirlenmiştir. Samsunport alternatifini, AHP yönteminde sırasıyla Çelebi Bandırma Uluslararası Limanı, Atakaş Limanı ve Ceypor Tekirdağ Uluslararası Limanı izlemektedir. TOPSIS yönteminde de sıralama aynı sonuçları vermiştir.

Açık deniz rüzgâr santrali kurulumu için rüzgâr hızı bakımından en uygun bölge Ege Denizi’nin kuzey kısmı, Marmara denizi ve Karadeniz’de Zonguldak, Kastamonu ve Sinop üstündeki bölgeye denk gelmektedir. Akdeniz bölgesinde Atakaş limanının da bulunduğu alanda ortalama güç yoğunluğu dağılımı Ege Denizi’nin kuzey kısımları gibi açık deniz rüzgâr santrali yatırımları için oldukça uygundur. Ekonomik bir rüzgâr enerjisi santrali yapabilmek için ortalama kapasite faktörünün % 35 değerinin üzerinde olması gerekmektedir [40]. Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan 50 m yükseklikteki ortalama kapasite faktörü dağılımı haritasına göre Marmara denizi, Ege Denizi, Karadeniz’in orta ve batı kısımları % 40’ın üzerinde kapasite faktörüne sahiptir. İlk elemeleri yaparak oluşturduğumuz liman listesindeki tüm limanlar açık deniz rüzgâr enerji için uygun konumlarda bulunmaktadır. Yalnız Samsunport’un diğer avantajı, kapalı bir deniz olan Karadeniz için sınır ülkeler ile birlikte bir açık deniz enerji merkezi oluşturulduğunda bunun için en elverişli liman olduğunu kanıtlamasıdır.

GWEC (Küresel Rüzgâr Enerji Konseyi), “Küresel Rüzgâr Raporu 2021” de açık deniz rüzgâr enerjisindeki büyümenin %31, 5 olacağından bahsetmektedir [41]. Türkiye, bulunduğu konum itibarıyla açık deniz rüzgâr enerjisi yatırımı yapmak isteyen Karadeniz ve Akdeniz ülkelerini hedef pazar olarak görebilir. Bu ülkeler için yüzer açık deniz rüzgâr türbini üretimini gerçekleştirebilir. Henüz Türkiye için detaylı fizibilite çalışmaları yapılmamış olmasına rağmen, yüzer rüzgâr türbin yatırım maliyetinin büyük kısmının mühendislik, altyapı ve finansmana ait maliyetler olduğu bilinmektedir. Bu maliyet kalemi içerisinde liman kirası, lojistik ve ulaştırılmayı da içermektedir [42]. Açık deniz rüzgâr enerjisi için kullanılacak limanın, arazi alanının kullanılması, liman ekipmanlarının kullanılması ve kargo faaliyetleri ile ilgili ek gelir akışlarına sahip olacağı söylenebilir. NREL (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı)’in Avrupa limanlarında hem inşaat alanı hem de depolama için metrekaşe başına yılda ortalama 60 USD gelir elde edilmekte ve ekipman kullanımından ortalama 18 milyon USD/yıl gelir elde edilmektedir [42]. Ayrıca bu çalışma ile enerji tesisleri için planlanan limanların, mevcut durumları ve geliştirilmesi gereken

yönleri belirlenmiş ve yol gösterici olmuştur. Türkiye’de bulunan limanların çoğu bugün yerleşim alanlarının içinde bulunmaktadır. Şehirdeki konutların ve sanayi yapılarının düzensiz büyümesi ve buna ilişkin düzenlemelerin olmaması limanların gerekli durumdaki genişlemesinin önüne geçmektedir. Bunun için liman yakınındaki bölgelerde yapılaşmaya izin verilmemelidir. Çünkü limanlar yeterli kapasiteye sahip olsalar bile geri planda depolama ve çalışma alanlarının olmaması çalışmalarını verimsizleştirmektedir. Bunun önüne geçilmesi için önlem alınması, liman geri sahalarının arka planlarındaki arazilerin liman ve çıkarlarına hizmet edecek şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Ayrıca limanlar için öncelikli konulardan biri de liman etrafına karayolu, demiryolu, hava yolu gibi farklı lojistik yolların erişiminin sağlanmasıdır. Çünkü limanlar düşünülürken ilgili sanayi kollarının demiryolu ara bağlantısı ile limana erişim sağlaması gerekmektedir. Multimodal taşımacılık sistemlerine uyum sağlanması, bunun için de gerekli altyapı sistemlerinin çoklu düşünülmesi elzemdir.

Gelecek çalışmalarda bölgesel olarak belirlenecek limanlar için enerji tesisine yönelik eksik yönleri gidermek amacıyla çalışmalar yapılabilir. Mesela yapılan çalışmada bileşen üretim tesisine yakınlık en önemli kriter olarak belirlenmişti, bu yüzden uygun limanların çevresine bu tesis için uygun yer seçimi çalışmaları yapılabilir. Limanların farklı enerji tesisleri (yüzer güneş enerji santrali, dalga enerji tesisi) için uygunluk analizleri ve buna bağlı seçim yapılabilir. Ayrıca ilgili kriterler doğrultusunda mevcut limanlar içinden seçim yapılması değil yeni liman yerlerinin seçimi hakkında çalışmalar yapılabilir. Limanlarla ilgili tüm sayısal verilerin elde edilmesi durumunda ise nicel verileri kullanarak objektif ağırlıklandırma yapan MEREC gibi yöntemler kullanılabilir. Ayrıca karar vericilerden kaynaklı subjektifliğin azaltılması için bulanık mantık ile entegre edilmiş ÇKKV yöntemleri kullanılabilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora Bursu ile desteklenmektedir.

Kaynaklar (References)

1. Global Wind Energy Council. Global Offshore Wind Report 2022. <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>. Yayın tarihi Haziran 29,2022. Erişim tarihi Ekim 20, 2023.
2. Irawan C. A., Song X., Jones D., Akbari N., Layout optimisation for an installation port of an offshore wind farm, *Eur. J. Oper. Res.*, 259 (1), 67–83, 2017.
3. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Türkiye Ulusal Enerji Planı. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf. Yayın tarihi 2022. Erişim tarihi Ağustos 25, 2023.
4. Akbari N., Irawan C. A., Jones D. F., Menachof D., A multi-criteria port suitability assessment for developments in the offshore wind industry, *Renew. Energy*, 102, 118–133, 2017.
5. Irawan C. A., Akbari N., Jones D. F., Menachof D., A combined supply chain optimisation model for the installation phase of offshore wind projects, *Int. J. Prod. Res.*, 56 (3), 1189–1207, 2018.
6. Öztürk S., Karipoğlu F., Determining suitable container ports for offshore wind farms based on geographical information system-analytic hierarchy process: a case study of Marmara Sea, *Arab. J. Geosci.*, 15 (1), 2022.
7. Jäppelt U., Carstensen N., Schnabel F., Hafenkonzepte für die Offshore-Windindustrie: Anforderungen an Offshore-Häfen, *Beton- und Stahlbetonbau*, 107 (1), 33–38, 2012.
8. Crowle A. P., Thies P. R., Floating offshore wind turbines port requirements for construction, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, 236 (4), 1047–1056, 2022.
9. Pamučar D., Stević Ž., Sremac S., A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full Consistency Method (FUCOM), *Symmetry (Basel)*, 10 (9), 2018.

10. Gölcük İ., Durmaz E. D., Şahin R., Prioritizing occupational safety risks with fuzzy FUCOM and fuzzy graph theory-matrix approach, *Journal of the Faculty Engineering and Architecture of Gazi University.*, 38 (1), 57–69, 2023.
11. Ecer F., An analysis of the factors affecting wind farm site selection through FUCOM subjective weighting method, *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, 27 (1), 24–34, 2021.
12. Tulun Ş., Arsu T., Gürbüz E., Selection of the most suitable biogas facility location with the geographical information system and multi-criteria decision-making methods: a case study of Konya Closed Basin, Turkey, *Biomass Convers. Biorefinery*, 13 (4), 3439–3461, 2023.
13. Khan A., Ali Y., Pamucar D., Solar PV power plant site selection using a GIS-based non-linear multi-criteria optimization technique, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 30 (20), 57378–57397, 2023.
14. Cao Q., Esangbedo M. O., Bai S., Esangbedo C. O., Grey SWARA-FUCOM weighting method for contractor selection MCDM problem: A case study of floating solar panel energy system installation, *Energies*, 12 (13), 2019.
15. Deveci M., Pamucar D., Cali U., Kantar E., Kolle K., Tande J. O., Hybrid q-Rung Orthopair Fuzzy Sets Based CoCoSo Model for Floating Offshore Wind Farm Site Selection in Norway, *CSEE J. Power Energy Syst.*, 8 (5), 1261–1280, 2022.
16. Akbari M. et al., Identification of the Groundwater Potential Recharge Zones Using MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM), Best Worst Method (BWM) and Analytic Hierarchy Process (AHP), *Water Resour. Manag.*, 35 (14), 4727–4745, 2021.
17. Boz E., Çizmecioğlu S., Çalık A., Air cargo company selection under a state of chaos: An integrated bayesian BWM and WASPAS approach, *Journal of the Faculty Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (3), 1589–1600, 2023.
18. Agyekum E. B. et al., Decarbonize Russia - A Best–Worst Method approach for assessing the renewable energy potentials, opportunities and challenges, *Energy Reports*, 7, 4498–4515, 2021.
19. Badi I., Pamučar D., Stević Z., Muhammad L. J., Wind farm site selection using BWM-AHP-MARCOS method: A case study of Libya, *Sci. African*, 19, 01511, 2023.
20. Hadi Mousavi-Nasab S., Sotoudeh-Anvari A., An extension of best-worst method with D numbers: Application in evaluation of renewable energy resources, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 40, 100771, 2020.
21. Majumder P., Balas V. E., Paul A., Baidya D., Application of improved fuzzy best worst analytic hierarchy process on renewable energy, *PeerJ Comput. Sci.*, 7, 1–27, 2021.
22. Shayani Mehr P., Hafezalkotob A., Fardi K., Seiti H., Movahedi Sobhani F., Hafezalkotob A., A comprehensive framework for solar panel technology selection: A BWM- MULTIMOOSRAL approach, *Energy Sci. Eng.*, 4595–4625, 2022.
23. Rezaei J., Best-worst multi-criteria decision-making method, *Omega (United Kingdom)*, 53, 49–57, 2015.
24. Zavadskas E. K., Podvezko V., Integrated determination of objective criteria weights in MCDM, *Int. J. Inf. Technol. Decis. Mak.*, 15 (2), 267–283, 2016.
25. Puška A., Stević Ž., Pamučar D., Evaluation and selection of healthcare waste incinerators using extended sustainability criteria and multi-criteria analysis methods, 24 (9), 2022.
26. Aytakin A., Energy, Environment, and Sustainability: A Multi-criteria Evaluation of Countries, *Strateg. Plan. Energy Environ.*, 41 (3), 281–316, 2022.
27. Yazdani M., Zarate P., Zavadskas E. K., Turskis Z., A combined compromise solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems, *Manag. Decis.*, 57 (9), 2501–2519, 2019.
28. Bouraima M. B., Ayyıldız E., Badi I., Özçelik G., Yeni F. B., Pamucar D., An integrated intelligent decision support framework for the development of photovoltaic solar power, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 27, 2023.
29. Hosseini Dehshiri S. J., Amiri M., Evaluating the risks of the internet of things in renewable energy systems using a hybrid fuzzy decision approach, *Energy*, 285, 129493, 2023.
30. Yu Y., Wu S., Yu J., Xu Y., Song L., Xu W., A hybrid multi-criteria decision-making framework for offshore wind turbine selection: A case study in China, *Appl. Energy*, 328, 2022.
31. Jäppelt U., Carstensen N., Schnabel F., Hafenkonzeppte für die Offshore-Windindustrie: Anforderungen an Offshore-Häfen, Beton- und Stahlbetonbau, 107 (1), 33–38, 2012.
32. World Bank. Offshore Wind Technical Potential in Turkey. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/694551586852099074/pdf/Technical-Potential-for-Offshore-Wind-in-Turkey-Map.pdf> Yayın tarihi Mart 2020. Erişim tarihi Aralık 2023
33. Kabak M. and Akalın S., A model proposal for selecting the installation location of offshore wind energy turbines, *Int. J. Energy Environ. Eng.*, 13 (1), 121–134, 2022.
34. Caceoğlu E., Yildiz H. K., Oğuz E., Huvaj N., Guerrero J. M., Offshore wind power plant site selection using Analytical Hierarchy Process for Northwest Turkey, *Ocean Eng.*, 252, 2022.
35. Cali U., Erdogan N., Kucuksari S., Argin M., Techno-Economic analysis of high potential offshore wind farm locations in Turkey, *Energy Strateg. Rev.*, 22, 325–336, 2018.
36. Dalgic Y., Lazakis I., Dinwoodie I., McMillan D., Revie M., Advanced logistics planning for offshore wind farm operation and maintenance activities, *Ocean Eng.*, 101, 211–226, 2015.
37. Tüsiad. Turklım Limançılık Sektörü 2022 Raporu. <https://www.turklım.org/sektor-raporu-2022/> Yayın tarihi 2022 Erişim Tarihi Eylül 10, 2023.
38. Pakenham B., Ermakova A., Mehmanparast A., A Review of Life Extension Strategies for Offshore Wind Farms Using Techno-Economic Assessments, *Energies*, 14, 1936, 2021.
39. Aktaş K., Adnan R., Karem A., Özbahçeci B. Ö., Platformların Hidrodinamik Modellenmesi, 9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, Adana, 788–801, 2018.
40. Çalışkan M., Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli, EİGM Yenilenebilir Enerji Kaynakları Şubesi Raporu, 1–25, 2018.
41. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2021. <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf> Yayın tarihi Mart 25, 2021. Erişim tarihi Eylül 20, 2023.
42. National Renewable Energy Laboratory. 2019 Cost of Wind Energy Review. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78471.pdf> Yayın tarihi Aralık, 2020. Erişim tarihi Eylül 3, 2023.