

## Türkiye'nin Marmara Bölgesindeki Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi Santrallerinin Teknik, Ekonomik ve Çevresel Yönlerden Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

### Comparative Evaluation of Technical, Economical, and Environmental Impacts of Offshore Wind Power Plants in Marmara Region of Türkiye

<sup>1</sup>İbrahim ÇELİK 

<sup>1</sup>Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Meslek Yüksek Okulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

[ibrahim.celik@istiklal.edu.tr](mailto:ibrahim.celik@istiklal.edu.tr)

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 11 December 2024

Accepted : 6 February 2025

##### Keywords:

Wind energy,  
RETScreen Expert,  
Levelized cost of energy

#### ABSTRACT

Today, studies on the feasibility of offshore wind power plants (OWPPs) are strategically significant to countries. This study identified six candidate locations along the Marmara and Aegean coasts of Türkiye. Three candidate locations were selected from the Çanakkale coast, one from the Balıkesir coast, and two from the Bursa coast. Four different types of wind turbines, with hub heights ranging from 90 m to 105 m, were placed in these candidate OWPP regions. The monthly average wind speed values, wind frequency values, average wind speed power density, Weibull distribution, scale, and shape parameters were obtained from WAsP software at heights of 100 m using the global wind atlas for candidate OWPPs. These values were used to calculate each WPP's annual energy production, capacity factor, carbon emissions avoided, and carbon certificate revenue value. The RETScreen Expert software performed these calculations. In addition, the levelized cost of energy for candidate OWPPs was determined by using the System Advisor Model (SAM) program. In the study's context, 24 candidate OWPPs were evaluated comparatively regarding technical, environmental, and economic aspects.

© 2025 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 11 Aralık 2024

Kabul : 6 Şubat 2025

##### Anahtar Kelimeler:

Rüzgâr enerjisi,  
RETScreen Expert,  
Seviyendirilmiş enerji maliyeti

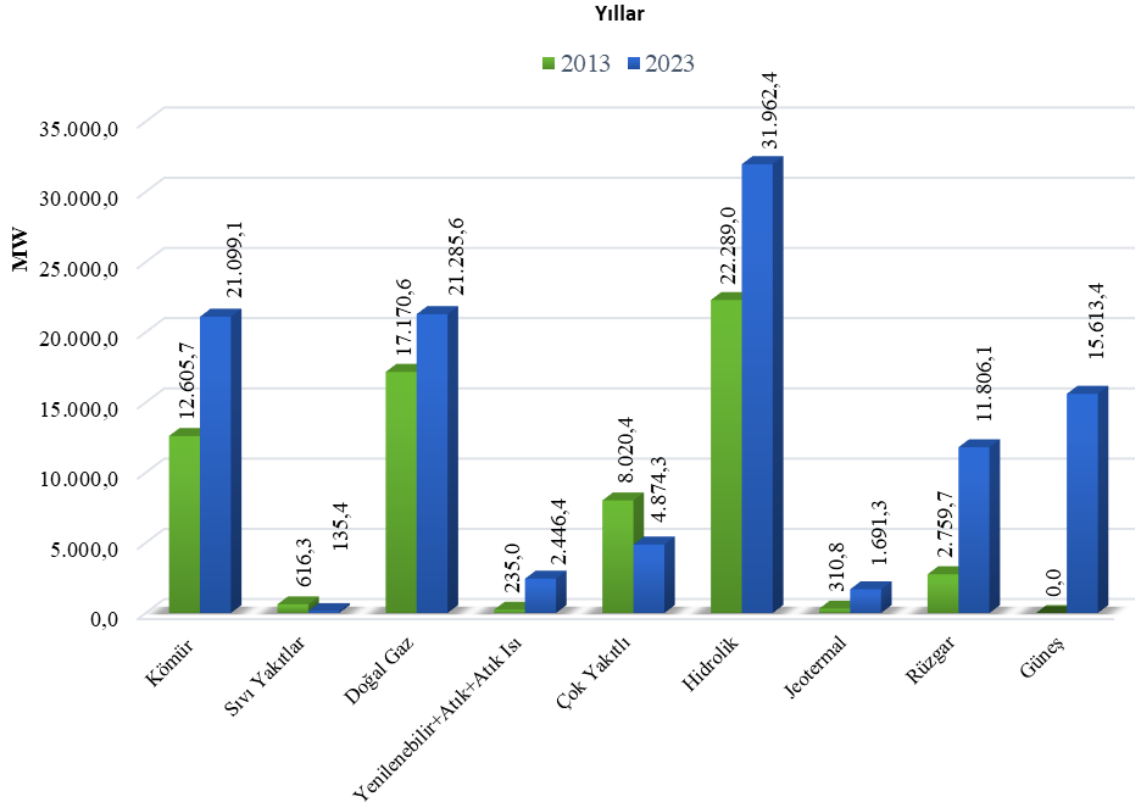
#### ÖZET

Günümüzde deniz üstü rüzgâr enerjisi santrallerinin (DÜRES) fizibilitesine yönelik çalışmalar ülkeler için stratejik öneme sahiptir. Bu çalışmada, Türkiye'nin Marmara ve Ege Denizi kıyılarında altı aday bölge belirlenmiştir. Bu aday bölgelerden üçü Çanakkale kıyılarından, birisi Balıkesir kıyılarından, ikisi ise Bursa kıyılarından seçilmiştir. Bu aday DÜRES bölgelerine göbek yükseklikleri 90 m ile 105 m arasında değişen dört farklı tipte rüzgâr türbini yerleştirilmiştir. Aday DÜRES'ler için 100 m yükseklikteki aylık ortalama rüzgâr hızı değerleri, rüzgâr frekansı değerleri, ortalama rüzgâr hızı güç yoğunluğu, Weibull dağılımları, ölçek ve şekil parametreleri, küresel rüzgâr atlası kullanılarak WAsP yazılımından elde edilmiştir. Bu değerler, her bir DÜRES'in yıllık enerji üretimi, kapasite faktörü, engellenen emisyon miktarı ve karbon sertifikası gelir değerini hesaplamak için kullanılmıştır. Bu hesaplamalar RETScreen Expert yazılımı tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aday DÜRES'ler için seviyendirilmiş enerji maliyeti System Advisor Model programı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma bağlamında, 24 adet aday DÜRES teknik, çevresel ve ekonomik açılarından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

© 2025 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında ülkelerin gelişmişlik düzeyleriyle ilişkili olarak elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artmaktadır. Dünyadaki diğer ülkelerde olduğu gibi, Türkiye’de de elektrik enerjisine olan talep, benzer bir seyir göstermektedir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları artan bu talebin karşılanmasında önemli bir yere sahiptir. Bu durum, Şekil 1’de verilmiş olan 2013 ve 2023 yıllarına ilişkin kurulu gücün kaynaklara göre dağılım grafiğine de yansımıştır [1]. Burada 2013 ile 2023 yıllarındaki rüzgâr ve güneş enerjisine dayalı kurulu güç değerleri kıyaslandığında bu değerlerde çok önemli bir artış olduğu görülmektedir.



Şekil 1. 2013 ve 2023 yılları için kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı.

Türkiye tarafından 2021 yılında Paris İklim Anlaşması onaylanmıştır. Bu antlaşmaya göre Türkiye, 2030'a kadar karbon emisyonlarını %41 oranında azaltmayı ve 2053'e kadar ise "net sıfır" emisyon hedefine ulaşmayı taahhüt etmiştir [2]. Bu durum yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik enerjisi üretimini zaruri hale getirmektedir. Bu üretim şekli ülkelerin karbon salımlarının azaltılmasını sağlamaktadır. Ayrıca salım karbon kredisi miktarlarına bağlı olarak karbon kredi ticareti yapmalarına da olanak tanımaktadır. Bu durum hem çevresel hem de ekonomik olarak önemli avantajlar sunmaktadır.

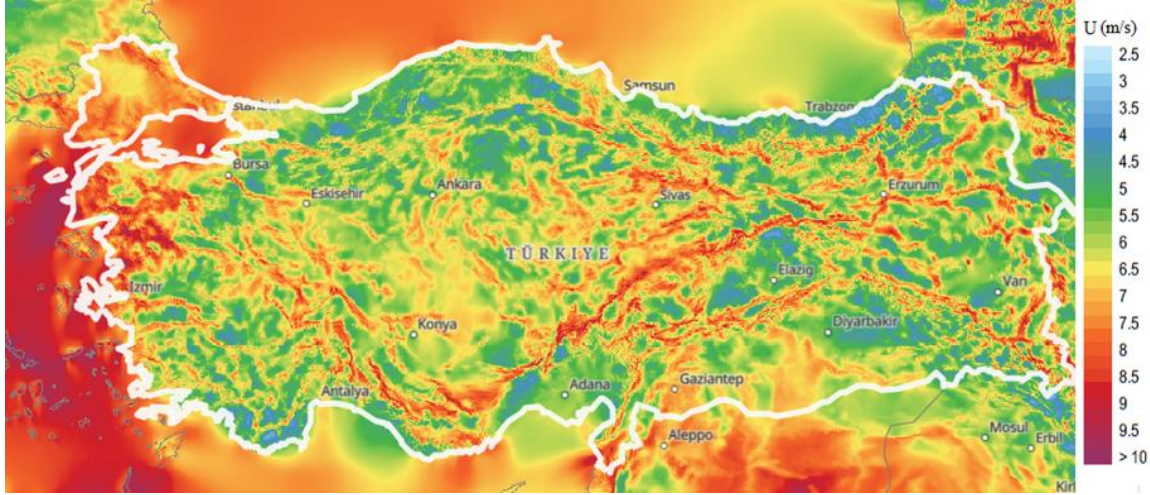
Günümüz dünyasında yenilenebilir enerji teknolojileri arasında rüzgâr enerjisi teknolojisi önemli bir yere sahiptir. Rüzgâr enerjisi teknolojisi, kaynağın güvenilir olması, dışa bağımlılığın olmaması ve maliyetin günümüz güç santralleriyle rekabet edebilecek düzeyde olması gibi nedenlerden dolayı ön plana çıkmaktadır.

Dünyada rüzgâr enerji teknolojisinde önemli bir yere sahip olan deniz üstü rüzgâr enerjisi santrallerinde (DÜRES) kurulu güç her geçen yıl büyük artışlar göstermektedir. 2018 yılında 23 GW olan kurulu güç 2023 yılı sonunda 75 GW'a ulaşmıştır. Toplam kurulu gücün %50'si Çin'de, %20'si Birleşik Krallık'ta, %11'i Almanya'da ve %6'sı Hollanda'da bulunmaktadır [3].

Türkiye’de hâlihazırda DÜRES bulunmamakta ancak potansiyeli oldukça yüksektir. Küresel rüzgâr atlası verilerine göre Türkiye’nin toplam potansiyeli 75 GW’tır. Şekil 2’deki haritada 100 m yükseklikteki rüzgâr hızları incelendiğinde Türkiye’nin özellikle Marmara ve Ege denizlerinde rüzgâr hızı değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir [4]. Bu da özellikle bu denizlerdeki yüksek enerji üretim potansiyelini göstermektedir.

DÜRES’ler kara üstü rüzgâr enerjisi santrallerine göre daha yüksek rüzgâr hızı, daha geniş uygulanabilir alan ve kurulum/işletme sırasında daha rahat ulaşım gibi sayısız avantajlara sahiptir. Ancak, uzun bir kullanım ömrü (20-30 yıl) dikkate alındığında açık DÜRES geliştirmek için hâlâ bazı zorluklar vardır. Örneğin, yüksek sermaye maliyeti ve işletme giderleri, açık DÜRES kullanımını önemli ölçüde sınırlar. Bu nedenle, şu anda bu harcamalar ile ilgili ayrıntılı çalışmalar hala yüksek talep görmektedir ve genellikle açık DÜRES yatırımı için ilk inceleme safhasında kullanılmaktadırlar. Ancak bunun yanında devletlerin enerji yönetim politikalarını uygularken, açık DÜRES teknolojileri için seviyelendirilmiş enerji maliyetinin (SEM) etkinliği ve uygulanabilirliği konusunda net bir anlayışa sahip olmaları son derece önemlidir. SEM metodolojisi, farklı enerji üretim teknolojilerinin veya

planlarının maliyet etkinliğini değerlendirmek için bir kıyaslama veya sıralama aracı oluşturmak amacıyla tamamen gerçekliğin her yönünü modellemek amacıyla kullanılmaktadır [5,6]. Bu bağlamda SEM analizi yapılırken belirli bir proje için hatalı bir SEM değeri, optimal olmayan kararlar alınmasına yol açmaktadır. Aynı zamanda özellikle DÜRES'ler için yerel ve küresel ölçekte politika girişimlerinin yanlış bir şekilde yönlendirilmesine sebep olabilmektedir. Bugüne kadar, çoğu yenilenebilir enerji teknolojisi için SEM değerlerinin varsayımı ve gerekçelendirilmesi konusunda hâlâ bir anlayış eksikliği vardır. SEM değerlerinin iyi anlaşılması ve belirlenmesi, karar alma ve politika girişimi için bir kıyaslama noktası görevi görecektir. Bu bağlamda günümüzde denize kıyısı bulunan ve DÜRES kurulumu konusunda gerekli şartları sağlayan Türkiye dahil çok sayıda ülkede SEM değerinin doğru ve güvenilir şekilde hesaplanması kritik bir öneme sahip olmaktadır.



Şekil 2. Türkiye'nin 100 m yükseklikte rüzgâr hızı dağılımını gösteren harita.

Türkiye'de DÜRES yer seçimi ve rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi konularında birçok çalışma yapılmıştır [7-13]. Kütükcü ve Yalılı [7], dünyada açık DÜRES kurulumu bakımından önde gelen altı ülkeyi incelemişlerdir. Bu ülkelerde DÜRES projelerine ilişkin yürütülen yasal prosedürler, proje geliştirme aşamasında yer alan kurum ve kuruluşlar ile destek mekanizmalarını irdelemişlerdir. Türkiye'de açık DÜRES projelerine ilişkin bugüne kadar yapılan çalışmalar ve mevcut durum değerlendirilerek, önümüzdeki dönemde Türkiye'de açık DÜRES kurulumu için atılması gereken adımlar konusunda çeşitli önerilerde bulunmuşlardır. Çokyaşar ve Beji [8], ekonomik öngörülere bağlı olarak, gelecekte açık DÜRES'lerin yaygınlaşması konusunu genel olarak ele almışlardır ve Türkiye'de kurulabilecek bir açık DÜRES için tahmini bir yatırım maliyet çıkarımı yapmışlardır. Arın ve Yerci [9] karasuları, askeri alanlar, sivil havacılık, nakliye rotaları, boru hatları ve yer altı kabloları, sosyal ve çevresel kaygılar dahil olmak üzere konum seçimi kriterlerine dayanarak Türkiye'deki Karadeniz kıyı bölgesinin açık deniz rüzgâr gücü potansiyelini incelemişlerdir. WASP (Rüzgâr Atlası ve Uygulama Programı) yazılımını Karadeniz kıyı bölgesindeki 20 yer için rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü verilerinin istatistiksel analizini yapmak için kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, uzun kıyı şeridine sahip olmasına rağmen Karadeniz bölgesinde DÜRES kurulumu için sınırlı sayıda konum olduğu sonucuna varmışlardır. Satır ve ark. [10] gerçekleştirdikleri çalışmada, Türkiye denizlerinde bir DÜRES'in uygulanabilirliğini belirlemeyi amaçlamışlardır. Rüzgâr hızları ve diğer faktörleri dikkate alarak Ege Denizi'nde bir yer belirlemişlerdir. Bölgenin teknik analizi, windPro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen projenin potansiyel yıllık enerji üretim (YEÜ) değeri hesaplanmıştır. Ekonomik analizle birlikte, böyle bir açık DÜRES'in uygulanabilirliği tartışılmıştır. Özbek ve Tunç [11] yapmış oldukları çalışmada Ege Denizi'nde çok yüksek potansiyele sahip olan Edremit Körfezi'nde inşa edilecek 50 ile 90 MW arasında farklı kapasitelere sahip DÜRES'ler için kapsamlı simülasyon ve analiz çalışmaları yapmışlardır. DÜRES'lerde nominal gücü 2 MW ile 3.6 MW arasında değişen 8 farklı rüzgâr türbini (RT) kullanılmıştır. Tortumluoğlu ve Doğan [12] çeşitli kriterleri dikkate alarak WASP yazılımı kullanarak Kuzey Ege kıyılarında bulunan Gökçeada, Bozcaada, Çanakkale ve Ayvacık bölgeleri için uygulamalar yapmışlardır. DÜRES kurulumunda RT'ler için Bozcaada ve Gökçeada kıyıların uygun olduğu belirlenmiştir. Yıldırım [13] DÜRES kurulumu için üç aday bölge belirlemiştir. Bunlardan ikisi Ege Denizi'nde birisi ise Karadeniz'de yer almaktadır. Bu üç aday bölgeye ait DÜRES projelerinin kapsamlı bir tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Belirtilen sahalardaki toplam deniz üstü rüzgâr gücü kapasitesinin 3.329,4 MW olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, açık deniz bölgeleri için ekonomik analizde kullanılan yöntemler kapsamında bir kıyaslama gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, en iyi sonuçlar Saros bölgesindeki DÜRES için elde edilmiştir.

Bu çalışmada, Marmara bölgesinde 6 adet aday DÜRES belirlenmiştir. Bunlar RETScreen Expert programı kullanılarak modellenmiştir. Bölgelerin rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi için yapılan teknik analizlerde WASP yazılımından faydalanılmıştır. Aday DÜRES'ler için YEÜ değerleri, Kapasite Faktörü (KF), Engellenen Emisyon (EE) miktarı ve Karbon Sertifikası Geliri (KSG) hesaplamaları yapılmıştır. Ayrıca SEM değerleri SAM programının finansal modeli yardımıyla bulunmuştur. Elde edilen SEM değerleri literatürdeki farklı bölgelere kurulan DÜRES'lere ait SEM değerleriyle kıyaslanmıştır.

Bu çalışmanın literatüre temel katkıları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Çalışma yüksek bir DÜRES potansiyeline sahip Marmara bölgesi için gerçekleştirilmiştir. Modellemelerde RETScreen Expert programı ile WAsP yazılımından faydalanılarak teknik analizler daha geniş bir perspektiften irdelenmiştir.
- DÜRES'lerin YEÜ değerleri kullanılarak KF, EE miktarı ve KSG hesaplamaları sayesinde bölge özelinde teknik, ekonomik ve çevresel etkileri ortaya koyan bir çalışma gerçekleştirilmiştir.
- SAM'ın finansal modeli ile YEÜ değerleri ve sabit ücret oran katsayısı kullanılarak aday DÜRES'lerin SEM değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler sayesinde hem bölgesel olarak hem de literatürde farklı bölgeler için gerçekleştirilen çalışmalara ait SEM değerlerinin birbirleri ile kıyaslanabilmesine olanak tanınmıştır.
- DÜRES yatırım sürecinde KF ile birlikte SEM değerinin de karar alma sürecinde önemli bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur.

Bu çalışma dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde konu genel olarak anlatılmış, Türkiye'nin DÜRES kurulumu yer seçimi ve rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi konuları ile ilgili literatür özetinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde Marmara bölgesinde kurulacak altı adet DÜRES bölgesi incelenmiştir. Ayrıca DÜRES'lerde kullanılacak RT'lerin karakteristik özellikleri sunulmuştur. Belirlenen bölgelerin Weibull eğrileri, ortalama rüzgâr hızları, ortalama rüzgâr güç yoğunlukları, rüzgâr frekansı değerleri, A ve k (ölçek ve şekil) parametreleri incelenmiştir. RETScreen Expert ortamında kullanılan YEÜ, KF, EE, KSG hesaplama yöntemlerine değinilmiştir. Son olarak SAM programının finansal modeli kullanılarak SEM değerlerinin hesaplanması ifade edilmiştir. RETScreen Expert programı genel olarak ele alınmıştır. Üçüncü bölümde aday DÜRES'lerin YEÜ, KF, EE, KSG ve SEM değerleri sunulmuştur. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar ortaya koyulmuştur.

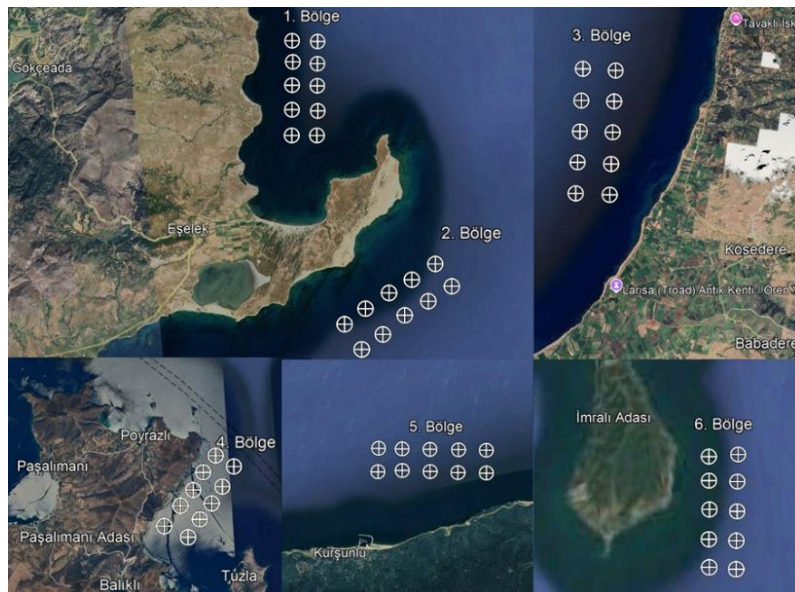
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

DÜRES potansiyelerini belirlemek amacıyla bölgelere ait birçok parametre (ortalama rüzgâr hızları, ortalama rüzgâr güç yoğunlukları, rüzgâr frekansı değerleri, A ve k katsayıları) incelenmektedir [14]. Bunun yanı sıra DÜRES'in farklı ortamlarda (WAsP, WindPro, WindSim, SAM, RETScreen Expert) gerçekleştirilen modelleri ile yatırımın teknik, ekonomik ve çevresel etkinliği ortaya koyulabilmektedir.

Bu bölüm altı kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda DÜRES için belirlenmiş olan bölgeler sunulmuştur. İkinci kısımda bu bölgelere yerleştirilecek RT'lere ait karakteristik özellikler ve güç eğrileri ifade edilmiştir. Üçüncü kısımda küresel rüzgâr haritasından yararlanılarak WAsP yazılımı yardımıyla 100 m yükseklikte DÜRES bölgeleri için Weibull eğrileri, ortalama rüzgâr hızları, ortalama rüzgâr güç yoğunlukları, A ve k katsayıları ortaya koyulmuştur. Ayrıca rüzgâr frekansı değerleri incelenmiştir. Dördüncü kısımda RETScreen Expert yazılımında, DÜRES YEÜ, KF, EE ve KSG hesaplamaları incelenmiştir. Beşinci kısımda DÜRES'lerin SAM yazılımıyla gerçekleştirilen finansal modeli sunularak SEM değerlerinin hesaplanmasına değinilmiştir. Son kısımda ise RETScreen Expert yazılımı irdelenmiştir.

### 2.1. DÜRES Kurulumu için Aday Bölgeler

Bu bölümde Türkiye'nin Marmara ve Ege Denizine kıyısı olan Çanakkale'den üç tane, Balıkesir kıyılarından bir tane ve Bursa kıyılarından iki tane olmak üzere altı bölge RES kurulumu için belirlenmiştir. Bu bölgeler Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. DÜRES kurulumu için belirlenen bölgeler.

Çanakkale'deki ilk iki bölge Gökçeada kıyılarında, üçüncü bölge Ayvacık kıyılarında, Balıkesir'de dördüncü bölge Paşa limanı adası kıyılarında, Bursa da ise beşinci bölge İmralı adası kıyılarında ve altıncı bölge ise Karacabey kıyılarından seçilmiştir.

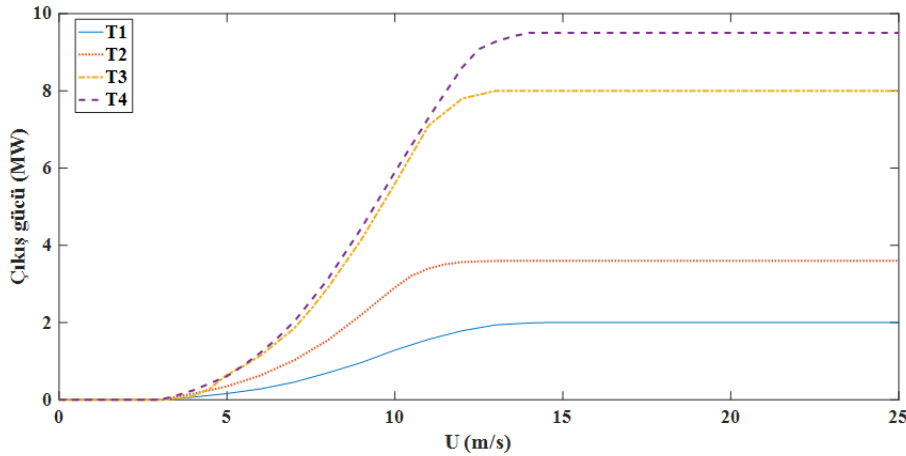
## 2.2. DÜRES'te Kullanılacak RT'lerin Güç Eğrileri ve Karakteristik Özellikleri

Aday altı adet DÜRES'in her birinde 10 adet RT kullanılmaktadır. Her DÜRES için 4 farklı RT seçilmektedir. Bu RT'lere ilişkin karakteristik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir. Burada, Tip 1 (T1), Tip 2 (T2) ve Tip 4 (T4) RT'si 3,5 m/s hızda devreye girmekte ve 25 m/s hızda devreden çıkmaktadır. Tip 2 (T2) RT'si ise 4 m/s hızda devreye girmekte ve 25 m/s hızda devreden çıkmaktadır. T1 RT'si 100 m, T2 RT'si 90 m göbek yüksekliğine sahip iken T3 ile T4 RT'si 105 m göbek yüksekliğine sahiptir. T2 ile T4 RT'si anma hızı 14 m/s'dir. T1 ile T3 RT'si anma hızları sırasıyla 14,5 m/s ve 13 m/s'dir.

Çizelge 1. RT'lere ait karakteristik özellikler

Türbin Tipi	Göbek yüksekliği (m)	Rotor çapı (m)	Devreye girme hızı (m/s)	Devreden çıkma hızı (m/s)	Anma Hızı (m/s)
Tip 1/ 2 MW	100	80	3,5	25	14,5
Tip 2/ 3,6 MW	90	120	3,5	25	14
Tip 3/ 8 MW	105	164	4	25	13
Tip 4/ 9,5 MW	105	164	3,5	25	14

RT'lere ait güç eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. T1 2 MW, T2 3,6 MW, T3 8 MW ve T4 9,5 MW gücündedir. Kurulacak olan DÜRES'lerin her birinde 10 adet RT kullanılacaktır. DÜRES'lerin kurulu güçleri sırasıyla 20 MW, 36 MW, 80 MW ve 95 MW olacaktır.



Şekil 4. RT'lere ait güç eğrileri [15-18].

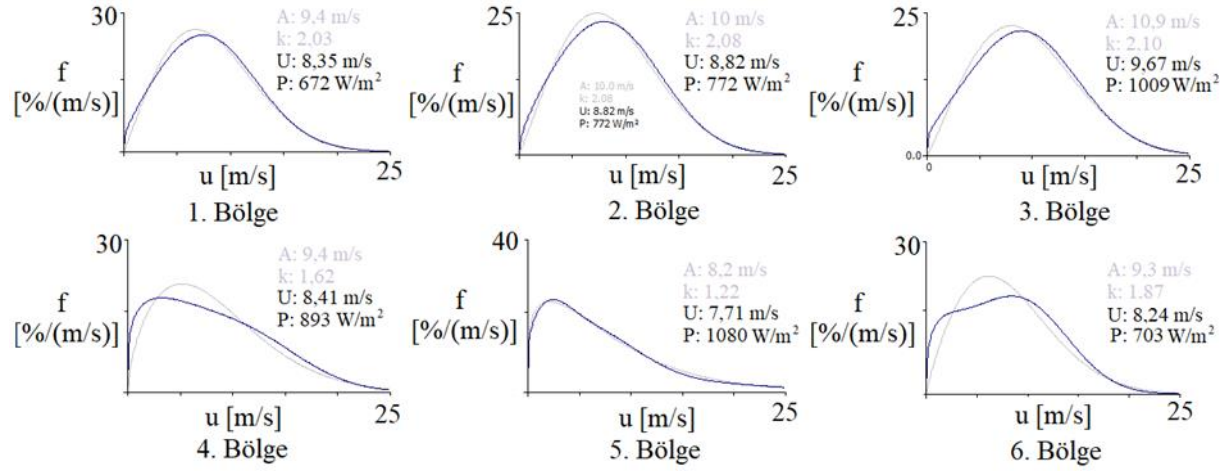
## 2.3. Aday DÜRES Bölgelerine ait Ortalama Rüzgâr Hızları, Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunlukları, Rüzgâr Frekansı Değerleri, Weibull dağılımları, A ve K Katsayıları

DÜRES kurulumu için belirlenen altı farklı aday bölge için 100 m yükseklikte çeşitli veriler elde edilmiştir. Bu veriler küresel rüzgâr atlası haritasından faydalanılarak WASP yazılımından elde edilmiştir. WASP yazılımından Weibull eğrileri, ortalama rüzgâr hızları, ortalama rüzgâr güç yoğunlukları ile A ve k katsayıları Şekil 5'te görülmektedir.

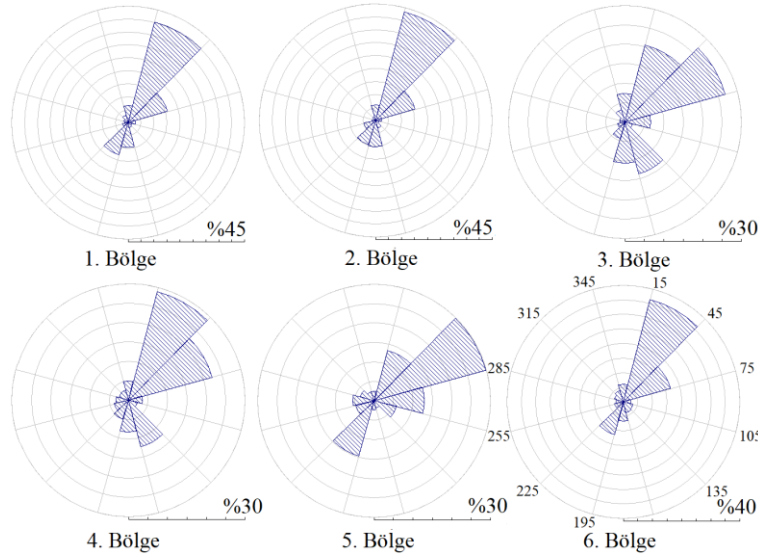
Şekil 5'te ortalama rüzgâr hızı değerinin 7,71 m/s ile 9,67 m/s arasında, ortalama rüzgâr güç yoğunluğu değerinin ise 672 W/m<sup>2</sup> ile 1080 W/m<sup>2</sup> arasında değiştiği görülmektedir. Ayrıca Weibull dağılımında A parametresi 8,2 m/s ile 10,9 m/s arasında, k parametresi de 1,22 ile 2,10 arasında değerler almaktadır. Burada ilk olarak ortalama rüzgâr hızı değeri incelenecek olursa bu değer 3. bölgede 9,67 m/s ile en yüksek değere, 5. bölgede ise 7,71 m/s ile en düşük değere sahiptir. 6 aday bölgedeki ortalama rüzgâr hızı değerlerinin büyükten küçüğe doğru bölgesel olarak sıralaması yapılacak olursa bu sıralama 3, 2, 4, 1, 6 ve 5. bölge şeklinde gerçekleşmektedir. İkinci olarak güç yoğunluğu değeri incelenecek olursa bu değer 5. bölgede 1080 W/m<sup>2</sup> ile en yüksek değere, 1. bölgede ise 672 W/m<sup>2</sup> ile en düşük değere sahiptir. 6 aday bölgedeki ortalama güç yoğunluğu değerlerinin büyükten küçüğe doğru bölgesel olarak sıralaması yapılacak olursa bu sıralama 5, 3, 4, 2, 6 ve 1. bölge olarak gerçekleşmektedir. Son olarak Weibull dağılımındaki A ve k parametreleri incelenirse bu değerler 3. bölgede en yüksek, 5. bölgede en düşük değerlere sahip olmaktadır. Weibull dağılımında yalnızca A parametresinin değişken olması durumunda A parametresinin artışına bağlı olarak eğri yatay eksene uzanmakta ve yüksekliği düşmektedir. Bu da bölgede yüksek rüzgâr hızı değişimi olduğunu ifade etmektedir. Sadece k şekil parametresinin değişken olması durumunda ise k parametresinin düşük bir değere sahip olması ortalama rüzgâr hızı etrafında nispeten geniş bir rüzgâr hızı

dağılımını, daha yüksek bir değere sahip olması da ortalama rüzgâr hızı etrafında nispeten dar bir rüzgâr hızı dağılımını göstermektedir. Yani k parametresinin yüksek bir değere sahip olması düşük bir rüzgâr hızı değişimi olduğunu, düşük bir değere sahip olması da yüksek bir rüzgâr hızı değişimi olduğunu ifade etmektedir [19].

Rüzgâr hızı frekans değerleri tüm bölgeler için Şekil 6'da verilmiştir. Rüzgâr hızı frekansı değerleri 0° ile 360° arasında değişen yönlerde 12 sektör için gösterilmiştir. Burada 1. sektör 345° ile 15°, 2. sektör 15° ile 45°, 3. sektör 45° ile 75°, 4. sektör 75° ile 105°, 5. sektör 105° ile 135°, 6. sektör 135° ile 165°, 7. sektör 165° ile 195°, 8. sektör 195° ile 225°, 9. sektör 225° ile 255°, 10. sektör 255° ile 285°, 11. sektör 285° ile 315°, 12. sektör 315° ile 345° aralığını ifade etmektedir. Her sektöre ilişkin tekrar sayısı ise % olarak sağ alt kısımdaki skalada görülmektedir. Burada 1. 2. 4. ve 6. bölgede hâkim rüzgâr yönü ikinci sektör iken, 3. ve 5. bölgede üçüncü sektör olmaktadır.



Şekil 5. Bölgelerin 100 m yükseklikteki ortalama rüzgâr hızları, ortalama rüzgâr güç yoğunlukları, Weibull eğrileri, A ve k katsayıları.



Şekil 6. DÜRES bölgelerinde 100 m yükseklikte rüzgâr frekans değerleri.

#### 2.4. YEÜ, KF, EE Miktarı ve KSG Hesabı

Bu bölümde RETScreen Expert yazılımından faydalanılarak 6 farklı aday DÜRES bölgesindeki 4 farklı RT için YEÜ, KF, EE miktarı hesaplama yöntemleri incelenmiştir. Son olarak EE miktarına bağlı olarak KSG değerinin hesaplanmasına değinilmiştir. Burada öncelikle Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu, enerji eğrisi, brüt ve net enerji üretim değerlerinin hesaplanması konularına değinilmiştir. Daha sonra YEÜ değeri dikkate alınarak KF, EE miktarı ve KSG değerlerinin hesaplamaları ifade edilmiştir.

İlk olarak Denklem 1'deki iki parametrelili Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu irdelenmiştir [20]. Burada  $p(x)$  gözlemlenen rüzgâr hızı  $x$ 'in olasılık yoğunluk fonksiyonunu,  $k$  ile  $A$  ise sırasıyla şekil ve ölçek parametrelerini ifade etmektedir.

$$p(x) = (k/A)(x/A)^{k-1}e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k} \quad (1)$$

İkinci olarak enerji eğrisi Denklem 2'de ifade edilmiştir. Enerji eğrisinde her bir noktadaki  $E_v$  değeri hesaplanmaktadır. Burada  $P_x$ ,  $x$  hızındaki RT gücünü,  $p(x)$  herhangi bir rüzgâr hızı için hesaplanan Weibull olasılık

yoğunluk fonksiyonunu ve  $x$  ise ortalama bir rüzgâr hızı değerini ifade etmektedir. Burada RT güç eğrisi, 0 m/s'den 25 m/s'ye kadar 1 m/s'lik artışlarla rüzgâr hızının bir fonksiyonu olmaktadır. [21].

$$E_v = 8760 \sum_0^{25} P_x p(x) \quad (2)$$

Üçüncü olarak brüt enerji üretimi, rüzgâr enerjisi ekipmanı tarafından herhangi bir kayıp olmadan, rüzgâr hızı, atmosferik basınç ve sahadaki sıcaklık koşulları dikkate alınarak gerçekleştirilen toplam YEÜ değeridir. RETScreen Expert'te, bu değeri hesaplamak için Denklem (3) kullanılmaktadır. Burada  $E_U$  ayarlanmamış enerji üretimidir,  $C_H$  ve  $C_T$  ise hesaplanan basınç ve sıcaklık ayarlama katsayılarıdır [21].

$$E_G = E_U C_H C_T \quad (3)$$

Dördüncü olarak net YEÜ değeri Denklem (4)'teki gibi ifade edilmektedir. Burada  $E_G$  brüt enerji üretim değerini,  $C_L$  ise kayıp katsayısını temsil etmektedir. Bu katsayı belirlenirken ise Denklem (5) kullanılmaktadır. Burada  $\lambda_a$ ,  $\lambda_{s\&i}$ ,  $\lambda_d$ ,  $\lambda_m$ , ifadeleri sırasıyla dizi kayıplarını, toprak ve buzlanma kayıplarını, arıza süresini ve çeşitli kayıpları ifade etmektedir. Tüm bu kayıplar dikkate alınarak net YEÜ değeri hesaplanmaktadır. Genel olarak RETScreen Expert yazılımı, dizi kaybını, topraklanma ve buzlanma kaybını, arıza süresi ve çeşitli kayıpları yıllık brüt enerji üretimi değerinin %2'si ile %6'sı arasında olacak şekilde hesaplanmaktadır [21].

$$E_C = E_G C_L \quad (4)$$

$$C_L = (1 - \lambda_a) \cdot (1 - \lambda_{s\&i}) \cdot (1 - \lambda_d) \cdot (1 - \lambda_m) \quad (5)$$

Rüzgâr santrali KF değeri ise santralin bir yıl boyunca ürettiği ortalama gücün nominal güç kapasitesine oranını temsil eder. Bu da Denklem (6) ile ifade edilir. Burada  $h_a$  bir yıldaki toplam saati yani 8760'ı, RSK ise rüzgâr enerjisi santrali kapasitesini ifade eder [22].

$$KF = \left( \frac{E_C}{RSK \cdot h_a} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

RETScreen Expert'te bir DÜRES'te üretilen YEÜ değerine bağlı olarak karbon emisyonu miktarı hesaplanabilmektedir. Bu miktara bağlı olarak karbon kredi ticareti ile bir gelir elde edilebilmektedir. Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü, rüzgâr enerji kaynaklı elektrik enerjisi üretimi için 0,6345 tCO<sub>2</sub>/MWh olmaktadır [23]. Buradan EE miktarı her bir DÜRES'in YEÜ değerinin MWh cinsinden ifadesinin emisyon faktörüyle çarpımıyla bulunmaktadır. Bu da Denklem 7'de ifade edilmektedir.

$$EE = E_C \cdot 0,6345 \quad (7)$$

Çizelge 2'de ise gönüllü karbon piyasalarında işlem gören RES projelerinin ortalama fiyatları yıllara göre verilmiştir. Burada 2019'daki fiyat ile 2024'teki fiyat aynı olarak kabul edilmiştir. Bir RES projesinde 1 ton CO<sub>2</sub> salımını engellemenin fiyatı ortalama olarak 1,4 \$ olmaktadır. Buradan KSG değeri ise Denklem 8 ile hesaplanmaktadır. KSG değeri, EE miktarı ile piyasaya göre o yıldaki belirtilen ortalama fiyat değerinin çarpımıyla bulunmaktadır [24].

**Çizelge 2.** Gönüllü karbon piyasalarında işlem gören RES projelerinin yıllara göre ortalama fiyatları

Yıllar	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Fiyat (\$/tCO <sub>2</sub> )	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4

$$KSG = EE \cdot 1,4 \quad (8)$$

## 2.5. SEM Hesabı

Bu çalışmada DÜRES'ler için SEM değeri hesaplanırken yalnızca aşağıdaki girdilerin kullanıldığı bir sabit ücret oranı (SÜO) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde beş adet girdi parametresi bulunmaktadır. Bunlardan ilki sabit ücret oranı (SÜO) katsayısı olmaktadır. İkincisi ve üçüncüsü sermaye maliyeti (SM) ve sabit yıllık işletme maliyeti (SYİM) değerleridir. Bunların birimleri \$ cinsindedir. Dördüncü değişken işletme maliyeti (DİM)'dir. Bu değer de \$/kWh cinsinden ifade edilmektedir. Beşincisi YEÜ değeri olmakta, bu değer birimi ise kWh'dir. SEM hesabı tüm bu değişkenler kullanılarak Denklem 9'da olduğu gibi ifade edilmektedir [25].

$$SEM = (SÜO \cdot SM + SYİM) / YEÜ + DİM \quad (9)$$

DÜRES'in finansal modeli oluşturulurken SAM programından faydalanılmıştır. Bu bağlamda SEM hesabı için kullanılan SM ve SYİM değerleri sırasıyla 4100 \$/kWh, 100 \$/kWh-yıl olarak RET Screen Expert programından alınmıştır. SÜO'ya ait hesaplama Denklem 10 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada sermaye kurtarma faktörü (SKF), proje finansman faktörü (PFF) ve inşaat finansman faktörü (İFF) değerlerinin birbiriyle çarpılması neticesinde SÜO katsayısı bulunmaktadır. Burada inşaat finansman maliyetleri ile projedeki finansman maliyetleri

analizde kullanılmamıştır. Bundan dolayı İFF ile PFF katsayıları 1 olarak alınarak SÜO değerine etki etmediği varsayılmıştır. Analizler yalnızca SKF değerine göre yapılmıştır. Bu faktör sermayenin ağırlıklı ortalama maliyetinin (SAOM) ve analiz süresinin (N) bir fonksiyonu olarak Denklem 11’de ifade edilmiştir. Buradan SAOM değeri Denklem 12’deki ifade kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada proje vadeli borç oranı (PVBO), gerçek yatırım getirisi (GYG), gerçek borç faiz oranı (GBFO) ve enflasyon oranı (EO) değişkenleri hesaplamalarda kullanılmaktadır. GYG ile GBFO değerleri de sırasıyla Denklem 13 ve Denklem 14’te olduğu gibi ifade edilmektedir. Denklem 13’te iç getiri oranı (İGO) ve EO değerleri kullanılarak GYG değeri bulunmaktadır. Denklem 14’te ise nominal borç faiz oranı (NBFO) ve EVO değerlerinden faydalanılarak GBFO değeri elde edilmektedir [25].

$$SÜO = \frac{SKF \cdot PFF \cdot İFF}{SAOM} \quad (10)$$

$$SKF = \frac{1}{1 - \frac{1}{(1 + SAOM)^N}} \quad (11)$$

$$SAOM = \frac{1 + (1 - PVBO) \times ((1 + GYG) \times (1 + EO) - 1) + PVBO}{1 + EO} \times \frac{1}{(1 + GBFO) \times (1 + EO) - 1} - 1 \quad (12)$$

$$GYG = \frac{1 + İGO}{1 + EO} - 1 \quad (13)$$

$$GBFO = \frac{1 + NBFO}{1 + EO} - 1 \quad (14)$$

Çizelge 3’te verilen değişkenler kullanılarak SÜO değeri Denklem 11, Denklem 12, Denklem 13 ve Denklem 14 kullanılarak hesaplanmaktadır. Ayrıca SEM hesabında DİM değeri, tükenebilir malzeme ve kaynaklar ile atıkların neden olduğu bir maliyet olduğu için DÜRES’lerde DİM bulunmamaktadır. Hesaplamalar da bu durum dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.** SKF hesaplamalarında kullanılan değişkenler

N	20 yıl
EO	%44,38/yıl
İGO	%30/yıl
PVBO	Sermaye maliyetinin %90’ı
NBFO	%50/yıl

## 2.6 RET Screen Expert Yazılımı

RETScreen Expert yazılımı, Kanada Hükümeti tarafından geliştirilmiştir. Bu yazılım enerji verimliliği, yenilenebilir enerji ve kojenerasyon sistemlerinin fizibilite çalışmalarına olanak sunan genel bir yazılımdır. Birçok çalışmada yaygın olarak kullanılmaktadır. RETScreen Expert bilgisayar ortamında yapılan fizibilite çalışmaları ile hem zaman açısından hem de mali açılardan kullanıcılara önemli katkılar sağlamaktadır. Bu program ile analizi yapılacak olan projenin konum bilgileri girilmektedir. Daha sonra iklim veri tabanında bulunan yer verileri ve NASA uydu verilerine ya da bunlara ek olarak, Canmet ENERGY araştırma merkezinden temin edilen, küresel rüzgâr haritası ve küresel rüzgâr atlası gibi enerji kaynak haritaları doğrudan RETScreen Expert yazılımına entegre edilebilmektedir. Bu sayede yapılan çalışmalarda gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmektedir [26]. Programın Türkçe ara yüzü de mevcut olup Şekil 7’de görülmektedir.

DÜRES’lerin modellenmesinde birçok farklı yazılım (WAsP, WindPro, WindFarmer, WindSim, Windographer, Homer, RETScreen Expert) kullanılabilir. Bu yazılımlardan Windographer, Homer ve RETScreen Expert hesaplamalarda yalnızca doğrusal yöntemler kullanırken WAsP, WindPRO, WindFarmer ve Openwind akışkanlar dinamiği modellemesini kullanmaktadır. En yaygın kullanılan yazılımlardan RETScreen Expert ve WAsP’ta yapılan bir rüzgâr santrali modelleme çalışmasında elde edilen sonuçlarda %3 gibi küçük bir fark olduğu görülmüştür [21]. Bu da bu yazılımların hesaplamalarda farklı yöntemler kullanmış olsalar da birbirine yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir.

## 3. BULGULAR

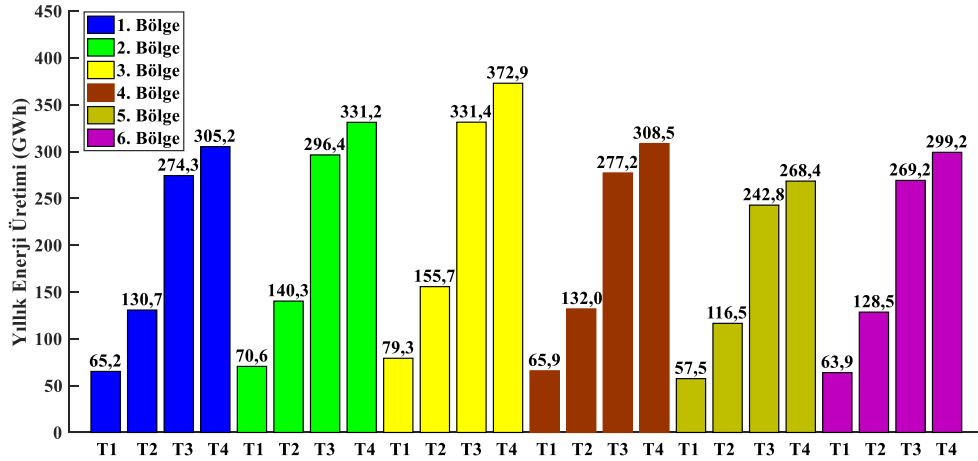
Bu çalışmada 6 farklı aday DÜRES bölgesi için 4 farklı RT kullanılarak YEÜ, KF, EE, KSG ve SEM değerleri hesaplanmıştır. YEÜ değeri hesaplanırken RETScreen Expert’te dizilim kaybı %4, kanat kayıpları %1 ve diğer kayıplar %3 olarak alınmıştır. Ayrıca kullanılabilirlik oranı %95 şeklinde varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplama sonucu YEÜ değerleri ve KF değerleri sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9’da verilmiştir. Şekil 8’de 6 farklı aday bölgede T1, T2, T3 ve T4 RT’leri için en yüksek YEÜ değerlerinin 3. bölgede, en düşük YEÜ değerlerinin ise 5. bölgede gerçekleştiği görülmektedir. T1, T2, T3 ve T4 RT’lerinin 6 aday bölgede gerçekleştirdikleri YEÜ

değerlerine göre büyükten küçüğe doğru sıralaması yapılacak olursa bu sıralama 3, 2, 4, 1, 6 ve 5. bölge şeklindedir.



Şekil 7. RETScreen Expert enerji analiz programı ara yüzü.

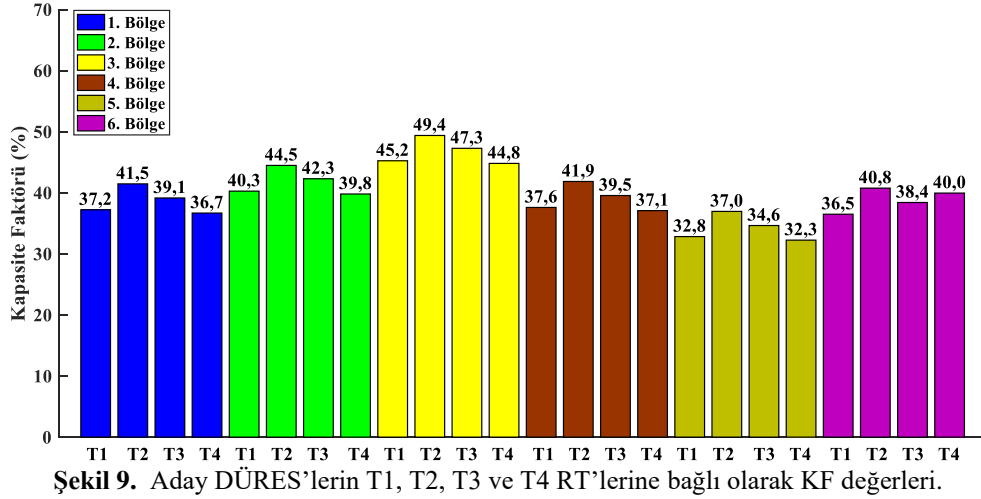
DÜRES'lerde en yüksek YEÜ değerleri 3. bölgede T1 RT'si kullanılırken 79,3 GWh, T2 RT'si kullanılırken 155,7 GWh, T3 RT'si kullanılırken 331,4 GWh ve T4 RT'si kullanılırken 372,9 GWh olarak gerçekleşmiştir. En düşük YEÜ değeri gerçekleşen 5. bölgede ise T1 RT'si kullanılırken 57,5 GWh, T2 RT'si kullanılırken 116,5 GWh, T3 RT'si kullanılırken 242,8 GWh ve T4 RT'si kullanılırken 268,4 GWh olarak gerçekleşmiştir.



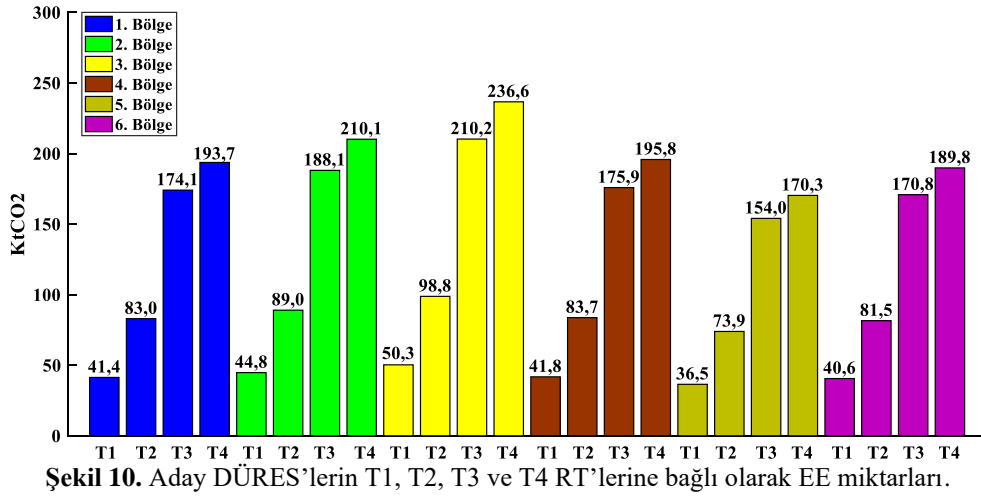
Şekil 8. Aday DÜRES'lerin T1, T2, T3 ve T4 RT'lerine bağlı olarak YEÜ değerleri.

Şekil 9'da 6 farklı bölgede T1, T2, T3 ve T4 RT'leri için en yüksek KF değerlerini 3. bölgede almaktadır. En düşük değerleri ise 5. bölgede almaktadır. En yüksek KF değerlerinin elde edildiği 3. bölgede KF değerleri sırasıyla %45,2, %49,4, %47,3 ve %44,8 olmuştur. En düşük kapasite faktörü değerinin elde edildiği 5. bölgede ise KF değerleri sırasıyla %32,8, %37, %34,6 ve %32,3 şeklindedir. Kapasite faktörü değeri aday DÜRES'ler için en düşük %32,3, en yüksek ise %49,4 olmaktadır. Ekonomik bir DÜRES yatırımı için kapasite faktörü değerinin %35 veya üzerinde olması gerekmektedir [27]. Bu bağlamda KF değeri 5. bölge haricindeki diğer bölgelerde %35'in üzerindedir. 5. bölgede ise T2 RT'si kullanılırken KF değeri %37 olmaktadır. T1, T3 ve T4 RT'leri kullanılırken KF değerinin %35'in altında olduğu görülmektedir. 5. bölgede, kullanılan RT'ye göre yatırımın ekonomik uygunluğu değişkenlik göstermektedir. DÜRES'lerin YEÜ değerlerine bağlı olarak EE miktarı ile KSG değerleri sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 10'da EE miktarı 3. bölgede en yüksek ve 5. bölgede en düşük değerlere sahip olmaktadır. Bu değerlere bağlı olarak hesaplanan Şekil 11'deki KSG değerleri incelendiğinde 3. bölgeden en yüksek gelirler, 5. bölgeden ise en düşük gelirler elde edilmektedir. 3. bölge için EE miktarları T1, T2, T3 ve T4 RT'leri için sırasıyla 50,3 KtCO<sub>2</sub>, 98,8 KtCO<sub>2</sub>, 210,2 KtCO<sub>2</sub> ve 236,6 KtCO<sub>2</sub> olmaktadır. KSG gelirleri de sırasıyla 70.400 \$, 138.300 \$, 294.300 \$ ve 331.300 \$ olmaktadır. 5. bölgede ise T1, T2, T3 ve T4 RT'leri için EE miktarları sırasıyla 36,5 KtCO<sub>2</sub>, 73,9 KtCO<sub>2</sub>, 154 KtCO<sub>2</sub> ve 170,3 KtCO<sub>2</sub> olmaktadır. KSG değerleri ise sırasıyla 51.100 \$, 103.500 \$, 215.700 \$ ve 238.400 \$ şeklindedir.

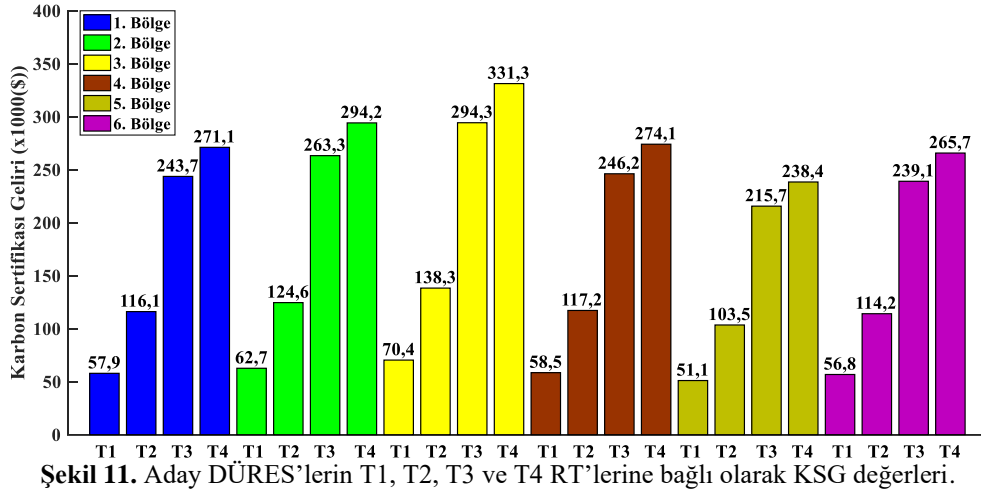
Şekil 12'de DÜRES'lerin SEM değerleri verilmiştir. SEM değeri 3. bölgede T2 RT'si kullanılarak gerçekleştirilen DÜRES'te en küçük değere sahip olmaktadır.



Şekil 9. Aday DÜRES'lerin T1, T2, T3 ve T4 RT'lerine bağlı olarak KF değerleri.



Şekil 10. Aday DÜRES'lerin T1, T2, T3 ve T4 RT'lerine bağlı olarak EE miktarları.

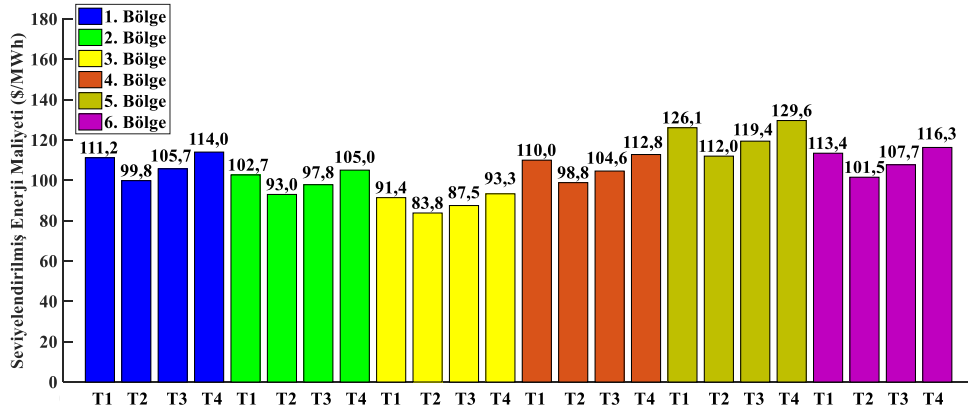


Şekil 11. Aday DÜRES'lerin T1, T2, T3 ve T4 RT'lerine bağlı olarak KSG değerleri.

Burada MWh başına maliyet 83,8 \$ olmaktadır. Bunu aynı bölgede T1 ve T3 RT'si kullanılarak gerçekleştirilen DÜRES'ler sırasıyla 87,5 \$/MWh ve 91,4 \$/MWh ile takip etmektedir. 2. bölgede T2 RT'si kullanılarak gerçekleştirilen DÜRES'te bu değer 93 \$/MWh olmaktadır. En yüksek SEM değerleri 5. bölgedeki T1 ve T4 RT'leri kullanılarak gerçekleştirilen DÜRES'lerde sırasıyla 126,1 \$/MWh ve 129,6 \$/MWh olarak gerçekleşmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Türkiye üç yanı Akdeniz, Karadeniz, Marmara ve Ege denizleriyle çevrili vaziyettedir. Bu durum Türkiye'nin kıyı bölgelerindeki rüzgâr enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin değerlendirilmesi konularını önemli hale getirmektedir. Günümüzde bu bağlamda gerçekleştirilen akademik çalışmalar ve projeler ülkeler açısından stratejik bir öneme sahiptir.



Şekil 12. Aday DÜRES'lerin T1, T2, T3 ve T4 RT'lerine bağlı olarak SEM değerleri.

Bu çalışmada, Türkiye'nin Marmara Bölgesinde DÜRES kurulumu için 6 adet aday bölge seçimi yapılmıştır. Bu bölgelerden ilk üçü Çanakkale kıyılarından, dördüncüsü Balıkesir kıyılarından, beşinci ve altıncısı ise Bursa kıyılarından seçilmiştir. Bu bölgelere göbek yükseklikleri 90 m ile 105 m arasında değişen 4 farklı RT yerleştirilmiştir. RT'lerin nominal güçleri küçükten büyüğe doğru sırasıyla 2 MW, 3,6 MW, 8 MW ve 9,5 MW'tır. Bu RT'ler kullanılarak 10 adet RT'den oluşan 24 farklı DÜRES senaryosu oluşturulmuştur. DÜRES modellemesi RETScreen Expert'te yapılmıştır. Aday DÜRES'lere ilişkin YEÜ, KF, EE ve KSG değerleri bulunmuştur. DÜRES bölgelerinin fizibilite koşulları küresel rüzgâr atlası kullanılarak WASP yazılımından faydalanılarak incelenmiştir. Ayrıca aday DÜRES'lerin SEM değerleri de SAM'ın finansal modeli ve RETScreen Expert yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Bu sayede Marmara bölgesindeki aday 24 DÜRES'e ilişkin teknik, ekonomik ve çevresel bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda DÜRES'lerin SEM değerleri ile 24 aday DÜRES'in SEM değerleri kıyaslanmıştır.

Çalışmada modellemeleri gerçekleştirilen DÜRES'lerin YEÜ değeri T1 için 57,5 GWh ile 79,3 GWh arasında, T2 için 116,5 GWh ile 155,7 GWh arasında, T3 için 242,8 GWh ile 331,4 GWh arasında ve T4 için 268,4 GWh ile 372,9 GWh arasında değişim göstermektedir. Ayrıca tüm aday DÜRES'lerin KF değerleri %32,8 ile %49,4 arasındadır. EE miktarı ise 36,5 KtCO<sub>2</sub> ile 236,6 KtCO<sub>2</sub> arasında değişmektedir. Bunun KSG değeri karşılığı ise 51.100 \$ ile 331.300 \$ arasında olmaktadır. SEM değerleri ise en az 83,8 \$/MWh, en fazla ise 129,6 \$/MWh'tır. Literatürde yer alan çalışmalarda DÜRES'lerin SEM değerleri incelendiğinde, ilk çalışmada Saros, Gelibolu ve Kıyıköy'de kurulacak olan DÜRES'lerde SEM değerleri sırasıyla 81,4 \$/MWh, 85,1\$/MWh ve 104,4 \$/MWh'tır [13]. Diğer bir çalışmada Bozcaada, Bandırma ve Gökçeada'da kurulacak DÜRES'ler için en iyi ve en kötü SEM değerleri bulunmuştur. Bozcaada için bu değerler 81,85 \$/MWh ile 109,55 \$/MWh, Bandırma için 100,73 \$/MWh ile 135,97 \$/MWh, Gökçeada için ise 85,28 \$/MWh ile 112,09 \$/MWh olmuştur [28].

Çalışma neticesinde Çanakkale kıyılarından seçilen 3. aday bölge en yüksek YEÜ değeri, KF değeri, EE miktarı ve KSG değerine sahiptir. Bu bölgeyi sırasıyla Çanakkale 2., Balıkesir 4., Çanakkale 1., Bursa 6. ve 5. bölge takip etmiştir. SEM değerleri incelendiğinde ise bu değerlerin bölgelere göre sıralanamadığı, doğrudan RT seçimine bağlı olduğu görülmüştür. SEM değerinin Çanakkale 1. bölgede 99,8 \$/MWh ile 114 \$/MWh arasında, Çanakkale 2. bölgede 93 \$/MWh ile 105 \$/MWh arasında, Çanakkale 3. bölgede 83,8 \$/MWh ile 93,3 \$/MWh arasında, Balıkesir 4. bölgede 98,8 \$/MWh ile 112,8 \$/MWh arasında, Bursa 5. bölgede 112 \$/MWh ile 129,6 \$/MWh arasında ve Bursa 6. bölgede 101,5 \$/MWh ile 116,3 \$/MWh arasında değiştiği görülmüştür. Bu SEM değerleri daha önce gerçekleştirilen çalışmalarla kıyaslandığında, hesaplanan değerlerin makul seviyelerde olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca Çanakkale 2. bölge ve 3. bölgedeki SEM değerleri karşılaştırıldığında T4 RT'si yerine T2 RT'si kullanıldığında SEM değeri daha düşük bulunmuştur. Benzer bir durum olarak Bursa 6. bölgede T2 RT'si, Çanakkale 2. bölgede T1 RT'si kullanıldığında elde edilen SEM değerleri kıyaslandığında T2 RT'si kullanılan 6. bölgedeki SEM değeri daha düşüktür. Buradan bölgenin enerji üretim potansiyeli yüksek olsa da uygun olmayan RT seçiminin SEM değerinde bir artışa neden olduğu görülmüştür.

Bu çalışma neticesinde, belirlenmiş olan bölgelerdeki DÜRES yatırımlarının Bursa 5. bölgede, kullanılan RT'lere bağlı olarak kısmen, diğer bölgelerde ise kullanılan RT'lerden bağımsız olarak teknik, ekonomik ve çevresel açıdan uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca DÜRES'lerde RT'lerin uygun seçiminin KF üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bir DÜRES'te yalnızca KF değerinin yüksek olması değil aynı zamanda SEM değerinin düşük olması yatırımın uygunluğunu gösteren önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bundan dolayı SEM değeri ile KF değerinin DÜRES yatırımlarında birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

## Yazar Katkıları

İbrahim ÇELİK: Makalenin kapsamı, yöntemi, araştırmanın uygulanması, sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin yazımının tamamına katkı sağlamıştır.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

## KISALTMALAR

DÜRES	Deniz üstü Rüzgâr Enerjisi Santrali	(Birimsiz)
WAsP	Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Programı	(Birimsiz)
RT	Rüzgâr türbini	(Birimsiz)
YEÜ	Yıllık enerji üretimi	(GWh)
KF	Kapasite faktörü	(Birimsiz)
EE	Engellenen emisyon	(KtCO <sub>2</sub> )
KSG	Karbon Sertifikası Geliri	(\$)
SEM	Seviyelendirilmiş enerji maliyeti	(\$/MWh)
SAM	System Advisor Model	(Birimsiz)
p(x)	x rüzgâr hızı olasılık yoğunluk fonksiyonu	(Birimsiz)
x	Ortalama rüzgâr hızı	(m/s)
k	Şekil parametresi	(Birimsiz)
A	Ölçek parametresi	(m/s)
P <sub>x</sub>	Türbin güç eğrisinde hıza karşılık gelen güç değeri	(MW)
E <sub>v</sub>	Enerji eğrisindeki her bir noktada üretilen enerji değeri	(MW)
E <sub>U</sub>	Ayarlanmamış enerji üretimidir	(GW)
E <sub>G</sub>	Brüt enerji üretimi	(GW)
E <sub>c</sub>	Net enerji üretimi	(GW)
C <sub>H</sub>	Basınç ayarlama katsayısı	(Birimsiz)
C <sub>T</sub>	Sıcaklık ayarlama katsayısı	(Birimsiz)
C <sub>L</sub>	Kayıp katsayısı	(Birimsiz)
λ <sub>a</sub>	Dizi kayıpları	(Birimsiz)
λ <sub>s&amp;i</sub>	Toprak ve buzlanma kayıpları	(Birimsiz)
λ <sub>d</sub>	Arıza süresi	(Birimsiz)
λ <sub>m</sub>	Çeşitli kayıplar	(Birimsiz)
RSK	Rüzgâr enerjisi santrali kapasitesi	(Birimsiz)
h <sub>a</sub>	Bir yıldaki toplam saat	(Saat)
SÜO	Sabit ücret oran katsayısı	(Birimsiz)
SM	Sermaye maliyeti	(\$)
SYİM	Sabit yıllık işletme maliyeti	(\$)
DİM	Değişken işletme maliyeti	(\$/kWh)
SKF	Sermaye kurtarma faktörü	(Birimsiz)
PPF	Proje finansman faktörü	(Birimsiz)
İFF	İnşaat finansman faktörü	(Birimsiz)
SAOM	Sermayenin ağırlıklı ortalama maliyeti	(Birimsiz)
GYG	Gerçek yatırım getirisi	(Birimsiz)
GBFO	Gerçek borç faiz oranı	(Birimsiz)
N	Analiz süresi	(Yıl)
EO	Enflasyon oranı	(Birimsiz)
İGO	İç getiri oranı	(Birimsiz)
PVBO	Proje vadeli borç oranı	(Birimsiz)
NBFO	Nominal borç faiz oranı	(Birimsiz)

## KAYNAKÇA

- [1] "Türkiye Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri," [www.teias.gov.tr](http://www.teias.gov.tr). <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- [2] "T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı," <https://www.iklim.gov.tr/guncellenmis-birinci-ulusal-katki-beyani-sunuldu-haber-1139>
- [3] "Global Wind Report," [https://gwec.net/wp-content/uploads/2024/04/GWR-2024\\_digital\\_version\\_final-1.pdf](https://gwec.net/wp-content/uploads/2024/04/GWR-2024_digital_version_final-1.pdf).
- [4] "Global Wind Atlas," <https://globalwindatlas.info/en>.
- [5] K. Branker, M. J. M. Pathak, and J. M. Pearce, "A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4470–4482, Dec. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>.
- [6] Y. Liang, Y. Ma, H. Wang, A. Mesbahi, B. Jeong, and P. Zhou, "Levelised cost of energy analysis for offshore wind farms – A case study of the New York State development", *Ocean Engineering*, vol. 239, p. 109923, Nov. 2021.
- [7] G. Kütükcü ve M. Yalılı, "Deniz Üstü Rüzgar Enerji Santrali Projelerinde Ülke Uygulamalarının

- İncelenmesi ve Türkiye İçin Öneriler”, Müh. Bil. ve Araş. Dergisi, c. 4, sy. 1, ss. 1–21, 2022.
- [8] E. Çokyaşar ve S. Beji, ”Açık Deniz Rüzgâr çiftliklerinin Malî Açından incelenmesi”, Gemi ve Deniz Teknolojisi, sy. 216, ss. 6–16, 2019.
- [9] M. Argin and V. Yerci, “Offshore wind power potential of the Black Sea region in Turkey”, International Journal of Green Energy, vol. 14, no. 10, pp. 811–818, May 2017.
- [10] M. Satir, F. Murphy, and K. McDonnell, “Feasibility study of an offshore wind farm in the Aegean Sea, Turkey”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81, pp. 2552–2562, Jan. 2018.
- [11] M. Özbek and K. Tunç, “Feasibility of Offshore Wind Energy in Turkey; A Case Study for Gulf of Edremit at the Aegean Sea”, Gazi University Journal of Science, vol. 34, no. 2, pp. 423–437, 2021.
- [12] M. İ. Tortumluoğlu ve M. Doğan, “Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri için Uygun Yer Seçim Kriterlerinin İrdelenmesi ve Kuzey Ege Kıyılarına Uygulanması”, DEUFMD, c. 23, sy. 67, ss. 25–41, 2021.
- [13] A. Yıldırım, “The technical and economical feasibility study of offshore wind farms in Turkey”, Clean Techn. Environ Policy, vol. 25, pp. 125–142, 2023.
- [14] F. A. L. Jowder, “Wind power analysis and site matching of wind turbine generators in Kingdom of Bahrain”, Applied Energy, vol. 86, no 4, pp. 538-545, 2009
- [15] “Vestas V80/2000 - Manufacturers and turbines,” [https://www.thewindpower.net/turbine\\_en\\_30\\_vestas\\_v80-2000.php](https://www.thewindpower.net/turbine_en_30_vestas_v80-2000.php)
- [16] “Siemens SWT-3.6 - Manufacturers and turbines,” [https://www.thewindpower.net/turbine\\_en\\_30\\_vestas\\_v80-2000.php](https://www.thewindpower.net/turbine_en_30_vestas_v80-2000.php)
- [17] “Vestas V164-8.0. - Manufacturers and turbines,” <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/318-vestas-v164-8.0>.
- [18] “Vestas V164/9500 Manufacturers and turbines,” [https://www.thewindpower.net/turbine\\_en\\_1476\\_vestas\\_v164-9500.php](https://www.thewindpower.net/turbine_en_1476_vestas_v164-9500.php).
- [19] T.R. Hiester, W.T. Pennell, “The Siting Handbook for Large Wind Energy Systems,” New York: Wind Books, 1981.
- [20] İ. Celik, C. Yildiz, and M. Sekkeli, “Implementation of realistic wind farm layout optimization using artificial bee colony algorithm”, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, pp. 1–15, Apr. 2021.
- [21] E. Bebi, L. Malka, Ilirian Konomi, and Majlinda Alcani, “An Analysis Towards A Sustainable Energy System In Albania Highly Supported By Large Scale Integration Of Wind Resources: A Case Study Of Mamaj Wind Farm”, International Journal of Energy Economics and Policy, vol. 11, no. 1, pp. 355–372, Dec. 2020.
- [22] K. W. Li and A. P. Priddy, “Power Plant System Design,” John Wiley & Sons, 1985.
- [23] “Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,” <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-turkiye-ulusal-elektrik-sebekesi-emisyon-faktoru>
- [24] M. Ozcan, “Increasing voluntary carbon credits potential via renewable energy projects in Turkey”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 28, sy. 5, ss. 710–719, 2022.
- [25] W. Short, D. J. Packey, and T. Holt, “A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies,” Mar. 1995.
- [26] K. Martin, “Environmental and Financial Analysis of Solar Swimming Pool Heating System for 3 Different Regions of Turkey Using RETScreen Clean Energy Management Software”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, vol. 9, no. 3, pp. 505-515, 2021.
- [27] Y. Oner, S. Ozcira, N. Bekiroglu, and I. Senol, “A comparative analysis of wind power density prediction methods for Çanakkale, Intepe region, Turkey”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 23, pp. 491–502, Jul. 2013.
- [28] U. Cali, N. Erdogan, S. Kucuksari, and M. Argin, “Techno-economic analysis of high potential offshore wind farm locations in Turkey”, Energy Strategy Reviews, vol. 22, pp. 325-336, 2018.