

# Türkiye'nin Akdeniz kıyılarında açık deniz güneş ve rüzgâr enerjisi üretiminin verim bazlı karşılaştırılması

Cemre YILDIZ<sup>1</sup>, M. Adil AKGÜL<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Maslak Kampüsü, İstanbul*

<sup>2</sup>*Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Böl., 26 Ağustos Kampüsü, İstanbul*

Geliş Tarihi (Received Date): 27.07.2022.

Kabul Tarihi (Accepted Date): 05.12.2022

## Öz

Güneş enerjisi üretiminde fotovoltaik sistemlerin tabii ve suni göller ve baraj hazneleri üzerine kurulması son senelerde artış gösteren bir uygulamadır. Bu çalışmada fotovoltaik santrallerin açık deniz ortamında kurulumu halinde sistemlerin verim, üretim ve maliyet oranları açılarından açık deniz rüzgâr santralleri ile karşılaştırılmaları hedeflenmiştir. Bu amaçla Türkiye'nin Akdeniz kıyılarında dört farklı konum uygulama alanı olarak seçilmiştir. Güneş verileri ECMWF ERA-5 veritabanından edinilmiş ve PVSyst 6.8.5 yazılımı ile 5MW'lık bir kurulum için güç üretimleri hesaplanmıştır. Rüzgâr verileri NCEP veritabanından alınmış ve NREL 5MW referans türbini üzerinden güç üretimi hesaplanmıştır. Kurulum maliyetleri ve enerji üretimi değerleri her iki sistem için karşılaştırılmış olup incelenen dört bölgede de yüzer GES kurulumu enerji üretimi ve yatırım verimliliği açılarından daha avantajlı bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Fotovoltaik sistemler, güneş enerjisi, açık deniz yapıları, rüzgâr enerjisi, enerji üretimi

\*Adil AKGUL, adil.akgul@yeditepe.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-2419-7712>  
Cemre YILDIZ, yildizce20@itu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-2794-5154>

# Efficiency-based comparison of offshore solar and wind energy production in the Mediterranean coasts of Turkey

## Abstract

*Deployment of photovoltaic systems on natural and artificial lakes and dam reservoirs is a developing and spreading application in the recent years for the harvestment of solar energy. In this study, the efficiency, energy production and cost ratios of photovoltaic systems suitable for offshore use has been studied and compared with offshore wind farms. For this purpose, four locations on Turkey's Mediterranean coast were chosen. ECMWF ERA-5 dataset has been used for the solar power calculations carried out in PVSyst 6.8.5 software considering a 5MW deployment. NCEP wind data has been used with the NREL 5MW prototype offshore wind turbine to evaluate the wind power. Construction costs and energy production values are evaluated and compared. It has been found that offshore PV farms can provide a higher energy production and investment efficiency on all four locations.*

**Keywords:** Photovoltaic systems, solar energy, offshore structures, wind energy, energy production.

## 1. Giriş

Hızla çoğalan nüfus, şehirlileşme oranının giderek artması ve teknolojinin gündelik hayatın bir parçası haline gelmesi sonucunda doğal kaynaklara ve enerjiye olan talep giderek artmaktadır [1]. Enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için kullanılan fosil yakıtların sebep olduğu karbon emisyonlarına dayalı çevresel risklerinin giderek büyümesiyle birlikte rezervlerin sınırlı olması da bir enerji dönüşümü yaşanmasını zorunlu kılmaktadır [2]. Fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, küresel enerji sorunlarının ele alınmasına ve iklim değişikliğinin azaltılmasına yönelik önemli bir adım olarak görülmektedir [3-4].

Dünyadaki toplam yenilenebilir enerji kapasitesinin 2021'in sonunda 3064 GW'a ulaştığı bildirilmiştir [5]. Türkiye'de 2022 Nisan sonu itibariyle toplam kurulu güç 100341 MW'a ulaşmış olup bu gücün %54.15'ini (54338 MW) yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim yapan santraller oluşturmaktadır [6]. Kurulu gücün kalanını oluşturan fosil kaynakların kullanımı dışa bağımlılığı da beraberinde getirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları bu kapsamda enerji ihtiyacının giderilmesi için sürdürülebilir ve temiz bir ikame sağlamaktadırlar. Türkiye'nin sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynakları olarak hidroelektrik, rüzgâr ve güneş enerjileri başı çekmektedir. Rüzgâr ve güneş enerjisinin olumsuz etkileri fosil kaynaklara kıyasla oldukça düşüktür [7]. Nisan 2022 kurulu güç miktarları incelendiğinde rüzgâr enerjisinin 10.88 GW güneşin ise 8.09 GW kapasiteye ulaştığı görülmektedir [6].

Güneş, enerji üretimi için büyük bir potansiyele sahiptir. Dünya çapında güneş enerjisi pazarı hızla büyüyerek 2021'in sonunda 849 GW'a ulaşmış olup [8] kurulu güç bakımından dünyadaki toplam yenilenebilir gücün %27.71'ni oluşturmaktadır [5]. Dünyanın ciddi bir sağlık ve ekonomik kriz yaşadığı 2020'de güneş santrallerinin, yıl

boyunca tüm yeni kurulumlar arasında %39'luk pay ile en yüksek net kurulu kapasiteye sahip oldukları belirtilmiştir [9].

Türkiye’de Nisan 2022 itibariyle güneş enerjisi kurulu gücünün 8.09 GW değerine ulaştığı görülürken [6], 2021 yılında güneş enerjisi üretiminin ise yüzde 4.15 pay ile 13647.8 *GWh* olarak gerçekleştiği hesaplanmaktadır [10]. Tamamlandığında 1300 *MW*’lık kurulu güç ile Avrupa’nın en büyük güneş enerjisi santrali olacak Konya Karapınar Güneş Enerjisi Santrali’nin bu aşamada 628 *MW*’lık kısmı tamamlanarak 818903 *MWh* üretim gerçekleştirdiği bildirilmiştir [11].

Güneş enerjisi santrali kurulumlarında arazi seçimi önemli bir kriterdir, artan arazi eğimi inşaatı zorlaştırdığı gibi yamaçlarda oluşacak erozyon, drenaj ve statik problemleri de maliyeti arttırır [12]. Kurulacak santrallerin şebekeye mesafesi, altyapı ve iletim kayıpları gibi kurulum ve işletme maliyetleri üzerinde etkilidir [13]. Ayrıca tesislerin inşasında; yerleşim alanlarına, sit bölgelerine, tarım alanlarına ve bitki örtüsünün yoğun olduğu alanlara dikkat edilmelidir [14].

Rüzgâr enerjisi uygulamaları son 20 yıl içerisinde önemli miktarda artış göstermiştir. Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (GWEC)’in 2021 yılı sonunda oluşturduğu rapora göre dünya çapında kurulu güç miktarı 837 GW seviyesine ulaşmış olup kurulu güç miktarında 2001-2021 yılları arasında 34 kat artış görülmüştür [15]. Türkiye’de ise 2022 Nisan sonu itibariyle toplam kurulu güç 10883 *MW*’a ulaşmış olup [6] 2021 yılında rüzgâr enerjisi üretimi toplam elektrik üretiminde 30899 *GWh* ile yüzde 9.40’lık paya sahiptir [10].

Rüzgâr enerjisinin mevcut olarak karasal (onshore) ve açık deniz (offshore) kurulumu olmak üzere iki farklı uygulaması vardır. Karasal bazlı kurulumlar bir asırdan daha uzun zamandır kullanılıyor olsa da deniz üstü santraller 1991’den beri faaldir [16]. Kyoto Anlaşması’nın gerekliliklerini [17] yerine getirme ihtiyacı sebebiyle kullanımı giderek artan açık deniz rüzgâr türbinleri 2021 yılında Avrupa genelinde 25 GW kurulu güce ulaşmıştır [18].

Açık deniz rüzgâr çiftliklerinde rüzgâr türbinleri, karadaki kurulumlarda kullanılanlardan daha büyük rotor çapına ve daha yüksek kapasiteye sahiptir ve bu da güçlü rüzgâr koşullarının daha iyi kullanılmasına olanak tanır. Sonuç olarak genellikle daha yüksek enerji üretimi seviyeleri elde edilir ve türbinler daha nadir hız değişimi kaynaklı dalgalanmalarla karşılaşır [19]. Bu teknolojinin ilerlemesinin başlıca faktörleri ise, kısıtlı alana sahip karasal bölgelerin uygun kurulum alanı belirlemede yarattığı darboğazdan kurtulmak olduğu gibi deniz üzerinde pürüzlülüğün azalmasına bağlı olarak daha yüksek hızlarının varlığından yararlanmak ve karasal alanlara kurulan rüzgâr türbinlerinin yarattığı çevresel etkileri minimize etmektir. Bunlara ek olarak, daha fazla güç üretebilen büyük türbinlerin deniz üstü kurulumları sırasında gemiler ile taşınabilmesi lojistik avantajları beraberinde getirmektedir. Buna karşılık karasal sistemlerin nakli sırasında daha dar yol ve alçak köprülerden geçilme zorunluluğu çeşitli fiziksel zorluklar yaratmaktadır. Bu tür lojistik problemler karasal kurulumlar için türbin boyutlarını sınırlayan etmenlerden biridir [20].

Güneş enerjisi eldesinde son zamanlarda artan bir uygulama, güneş panellerinin tabii ve suni göller ve baraj rezervuarları gibi su kütleleri üzerine yerleştirilerek verimli tarım arazilerinin kullanımının önlenmesi, tatlı su kaynaklarında buharlaşmanın azaltılması ve güneş panelleri için soğutma sağlanması gibi avantajların değerlendirilmesidir. Doğal bir

soğutma yöntemi olarak mevcut bir su kütesini kullanmak, PV panelinin sıcaklıklarını araziye göre daha düşük tutmakta ve böylece verimi artırmaktadır. Ayrıca yüzen PV sistemleri, suyun yüzeyinde gölgeleme sağlamak ve buharlaşmayı azaltmaktadır. Bu yenilenebilir teknoloji, tatlı su kaynaklarını korumak için birçok yerde kullanılmaktadır [21].

Yüzer fotovoltaik sistemlerin (YPV) karasal kurulumlara göre başlıca avantajları; tarım arazileri üzerine yapılacak kurulumların önüne geçmek, su kütlelerinin buharlaşma oranını düşürerek tatlı su kaybını azaltmak [22], inşa edildiği su kütesinin biyoyararlılığını artırmak [23] ve suyun soğutma etkisi sayesinde [24] daha az ısınarak daha yüksek verimlilik oranlarına [25] sahip olması sayılabilir. Güç üretimi, PV santral teknolojilerinin ve açık deniz mühendislik tekniklerinin bir kombinasyonudur.

Yüzer güneş enerjisi, dünya çapında son beş yılda yüz kattan fazla büyüyerek 35 ülkede 2.6 (GW) kurulu güce ulaşmıştır [26]. Tüm insan yapımı su kütlelerinin (erişimi kolay ve ekolojik risk yaratmayan) yüzey alanının yalnızca %1'i yüzen güneş panelleri ile kaplanarak 400 (GW) kapasiteye ulaşabileceği hesaplanmaktadır [27]. Şu anda dünyanın en büyük operasyonel yüzer güneş enerjisi çiftliği ise 320 MW'lık Dezhou Dingzhuang (Şekil 1) Çin'de yer almaktadır [28].

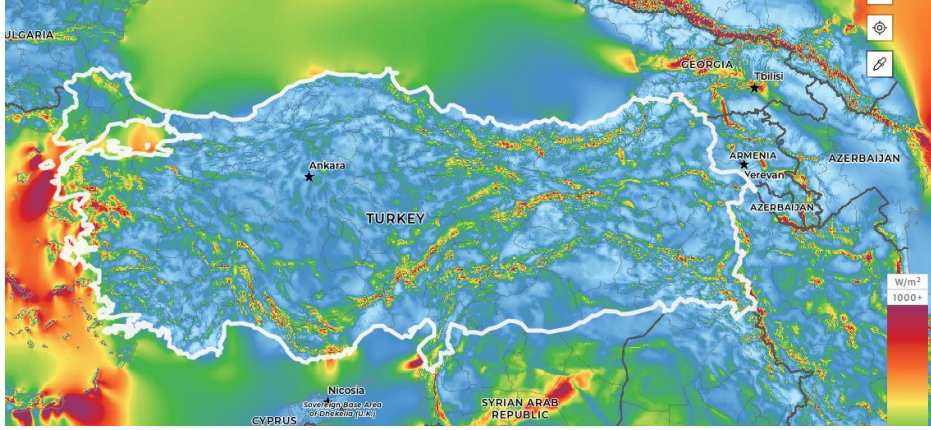


Şekil 1. Çin'de yüzen PV sistemi [29].

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin fizibilitesini değerlendirirken, yapısal veya ekonomik yönlerin yanı sıra sosyal etkiler de dikkate alınmalıdır. Karasal güneş veya rüzgâr santrallerinin kurulumunda yerel halkların olumsuz tepkiler gösterebildiği bilinmektedir [30]. Bu tür tepkilerin kurulacak YPV sistemler için de gelebileceği öngörülebilir. Bu tepkilerin nedenleri arasında; potansiyel çevresel riskler [31] ve görsel rahatsızlıkların yanında kurum ya da kuruluşlara olan güven eksikliği sayılabilir [32]. Yeterli toplumsal desteğin sağlanamaması bir çok projenin gecikmesine neden olmakla birlikte projelerin iptaline de yol açabilmektedir [33].

Üç tarafı denizlerle çevrili olan Türkiye, özellikle kıyı bölgelerindeki yüksek güç yoğunlukları nedeniyle önemli bir rüzgâr enerjisi potansiyeline sahiptir [34]. Türkiye'nin karasal rüzgâr enerjisi potansiyeli 37000 MW iken deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyelinin ise 11000 MW olduğu öngörülmektedir [35]. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü'ne göre, rüzgâr enerjisi potansiyeli yüksek yerler Güney Marmara, Ege

Bölgesi, Doğu Akdeniz'deki bazı küçük alanlar ve İç Anadolu olarak tanımlanmıştır [10]. Türkiye'deki rüzgâr santrallerinin durumu göz önüne alındığında, Marmara Denizi'nin güney kıyıları, açık deniz rüzgâr santrallerinin kurulması için uygun bir yer sağlayabilir [36]. Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgâr enerjisi yoğunluğu Şekil 2'de görülebilmektedir [37]. Güneş enerjisi ise, özellikle konuma bağlı olarak ülkenin tüm arazisinde Avrupa'ya kıyasla daha yüksek potansiyele sahip olup karasularımız için de benzer durum söz konusudur.



Şekil 2. 100 metrede ortalama rüzgâr enerjisi yoğunluğu [37].

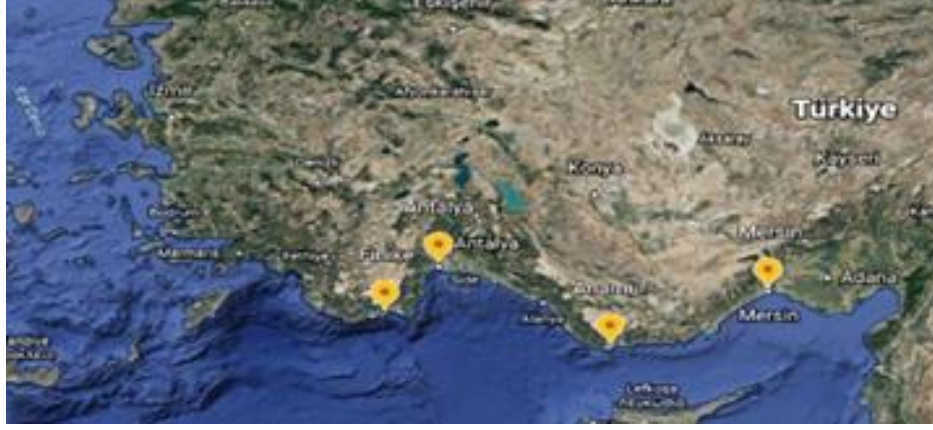
Açık deniz rüzgâr enerjisi santrallerinin kurulum maliyetleri ve verimlerinin rüzgâr iklimine göre değişiklik gösterdiği de dikkate alındığında deniz ortamında rüzgâr enerjisi ile rekabet edebilecek güneş santrallerinin kurulabilirliği sorusu akla gelmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin Akdeniz kıyıları için kullanılabilir nitelikte açık deniz ortamının çevresel etkilerine uygun tasarlanmış fotovoltaik sistemlerinin verimlerinin, üretim ve maliyet oranları üzerinden açık deniz rüzgâr santralleri ile karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla Türkiye'nin Akdeniz kıyılarında dört farklı konum pilot bölge olarak seçilmiştir. Seçilen bölgeler için 5 MW'lık kurulu güce sahip güneş ve açık deniz rüzgâr enerjisi kurulumları öngörülmüş, yıllık üretim değerleri hakkında çıktılar sunulmuş ve elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Çalışma, üç bölgenin enerji üretimleri karşılaştırılması açısından tebliğ kapsamında sunulmuş olup [38] burada dört bölgenin enerji üretimleri, verimleri ve maliyet oranları ilave edilerek sunulmuştur.

## 2. Malzeme ve yöntem

### 2.1. Yer seçimi

Çalışma için Türkiye'nin Akdeniz kıyılarında Finike, Antalya, Anamur ve Mersin karasularında dört farklı bölge seçilmiştir. Seçilen bölgeler Şekil 3'te gösterilmiş olup bölgelerin coğrafi koordinatları Tablo 1'de verilmiştir.





Şekil 3. Çalışma için seçilen bölgeler [39].

Güneş ve rüzgâr enerjisinin seçili bölgelerdeki verimlerinin karşılaştırmasında tutarlı bir sonuç elde edebilmek adına her iki enerji kaynağı için de hesaplamalar 5 MW'lık kurulumlar üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Seçilen yerlerin coğrafi koordinatları.

No	Yer Adı	Enlem	Boylam
1	Anamur	36°04'46" K	32°50'22" D
2	Antalya	36°54'36" K	30°42'00" D
3	Finike	36°17'24" K	30°09'36" D
4	Mersin	36°43'12" K	34°46'48" D

## 2.2. Üretim sistemleri

NREL'in 5 MW'lık rüzgâr türbini [40], bölgelerdeki rüzgâr enerjisinin üretebileceği güç miktarını belirlemek için referans olarak kullanılmıştır. 63 m rotor yarıçapına ve 90 m göbek yüksekliğine sahiptir. Türbinin temel teknik bilgileri Tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 2. NREL 5-MW rüzgâr türbini için teknik özellikler [40].

Güç	5 MW
Rotor Yönü	Rüzgâra Karşı, 3 Bıçak
Rotor, Hub Çapı	126 m, 3 m
Devreye Alma, Devreden Çıkma Hızı	3 m/s, 25 m/s
Nominal Uç Hızı	80 m/s
Rotor Kütlesi	11000 kg
Nasel Kütlesi	24000 kg
Kule Kütlesi	34746 kg

PV santrali için, sistem maliyetlerini düşürmek ve yerli üretimin geliştirilmesine yardımcı olmak için CW Energy'nin 'CWT385-72PM' PV modül modeli seçilmiştir. Bu panellerin temel özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. PV santralin rüzgâr türbini ile aynı nitelikte monopile tipi bir temel üzerinde kurulduğu kabul edilmiştir. Üstyapı için statik ve maliyet hesabı ayrıca yapılmış olup detaylar için yazarın yüksek lisans tezine bakılabilir [41].

Tablo 3. CWT385-72PM'nin teknik özellikleri [42].

Elektriksel Özellikler		Mekanik Özellikler	
Maksimum Güç ( $P_{max}$ )	385 Wp	Ağırlık (kg)	22
Modül Verimliliği	19.75	Panel Boyutu (mm)	1959 x 995 x 40
Maksimum Güç Gerilimi ( $V_{mp}$ )	40.19	Maksimum Güç Akım ( $I_{mp}$ )	9.58

### 2.3. Veri kaynakları ve veri işleme

Rüzgâr enerjisinin hesaplanması için kullanılan veri seti, Vand og Miljø Enstitüsü (DHI) arayüzü kullanılarak US National Centers for Environmental Prediction (NCEP) veri tabanından toplanmıştır ve 1979 ile 2019 yılları arasında saatlik rüzgâr hızı ve yön kayıtlarından oluşmaktadır. Veriler koordinatlara bağlı olarak NetCDF dosyası olarak indirilmiş ve aylık ortalama rüzgâr hızları hesaplanmıştır. Hesaplanan aylık ortalama rüzgâr hızları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. NCEP verilerinden hesaplanan aylık ortalama rüzgâr hızları.

Aylar	Aylık ortalama rüzgâr hızı [m/s]			
	Anamur	Antalya	Finike	Mersin
Ocak	5.76	4.31	3.98	6.05
Şubat	5.67	4.19	4.07	5.71
Mart	5.18	3.82	3.86	5.22
Nisan	4.86	3.56	3.77	4.85
Mayıs	4.53	3.55	3.61	4.56
Haziran	4.78	3.99	3.95	4.92
Temmuz	4.89	4.27	4.03	5.32
Ağustos	4.81	4.08	3.84	5.44
Eylül	4.65	3.90	3.61	5.20
Ekim	4.39	3.71	3.23	4.92
Kasım	4.82	3.75	3.42	5.34
Aralık	5.53	4.07	3.82	5.92
Ortalama	4.99	3.93	3.77	5.29

Rüzgâr güçlerinin hesaplanabilmesi için rüzgâr hızlarının frekans dağılımları çıkarılmıştır. Elde edilen frekans oranlarına Weibull dağılımı uygulanarak güç yoğunluklarına ulaşılmıştır. İki parametrelili bir dağılım olan Weibull'un dağılım fonksiyonu (Denklem 1) şu şekilde ifade edilebilir:

$$F_W(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

Bu denklemde  $v$  [m/s] rüzgâr hızı,  $c$  [m/s] Weibull ölçek parametresi ve  $k$  Weibull şekil parametresidir.

Rüzgâr hızlarının 90 m, yani 5 MW NREL referans türbininin rotor yüksekliğine ekstrapolasyonunda Hellman formülü (Denklem 2) kullanılmıştır.

$$V_r = V_{rref} \times \left( \frac{H}{H_{ref}} \right)^\mu \quad (2)$$

Denklem 2'de,  $V_r$  [m/s] istenen yükseklikteki ( $m$ ) rüzgâr hızı,  $V_{rref}$  [m/s] referans rüzgâr hızı,  $H$  [m] yerden istenen yükseklik,  $H_{ref}$  [m] referans yüksekliği ve  $\mu$  Hellmann katsayısıdır. Hesaplamalarda Hellmann katsayısı su yüzeyi için önerildiği gibi 0.12 alınmıştır.

Rüzgâr sayılarına ve rüzgâr hızlarına bağlı olarak türbin kuvvetleri kullanılarak aylık ve genel yıllık enerji hesaplamaları yapılabilmektedir. Belirli bir zaman boyunca üretilebilecek toplam enerji (Denklem 3) kullanılarak belirlenmiştir.

$$E = \sum_{i=1}^n P_{ti} \Delta t_i \quad (3)$$

Denklem (3)'te  $E$  [kWh] rüzgâr türbini tarafından üretilen enerji,  $P_{ti}$  [kW] rüzgâr türbini tarafından elde edilen güç ve  $\Delta t_i$  [h] zaman artışıdır. Türbinin ürettiği gücün hesaplanmasında türbin rüzgar hızı-güç eğrisi parçalı denklem olarak tanımlanmış ve saatlik rüzgar verilerine uygulanmıştır.

Güneş enerjisi hesaplamalarında kullanılan veriler European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-5 Interim veri tabanından alınmıştır[43]. ECMWF 7/24 erişilebilen ve dijital hava tahminlerini üye ülkelerle paylaşan bilimsel bir kuruluştur. ERA-5 verisetinden 41 yıllık (1978-2019) saatlik ortalama veriler aylık ortalamalara dönüştürülerek kullanılmıştır. Güneş enerjisi potansiyelini ölçmek için yüzeye ulaşan doğrudan radyasyon değerleri ( $C_{dir}$ ) kullanılmıştır. Saatlik verilerden hesaplanan aylık ortalama doğrudan radyasyon değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir. Açık gökyüzü-doğrudan güneş radyasyonuna ek olarak, PV panellerin güç çıkışını ölçmek için gerekli olan sıcaklık, rüzgâr hızı, bağıl nem ve Linke bulanıklığı parametreleri de saatlik değerler olarak ERA-5 veritabanından alınmış ve aylık ortalama değerlere çevrilmiştir.

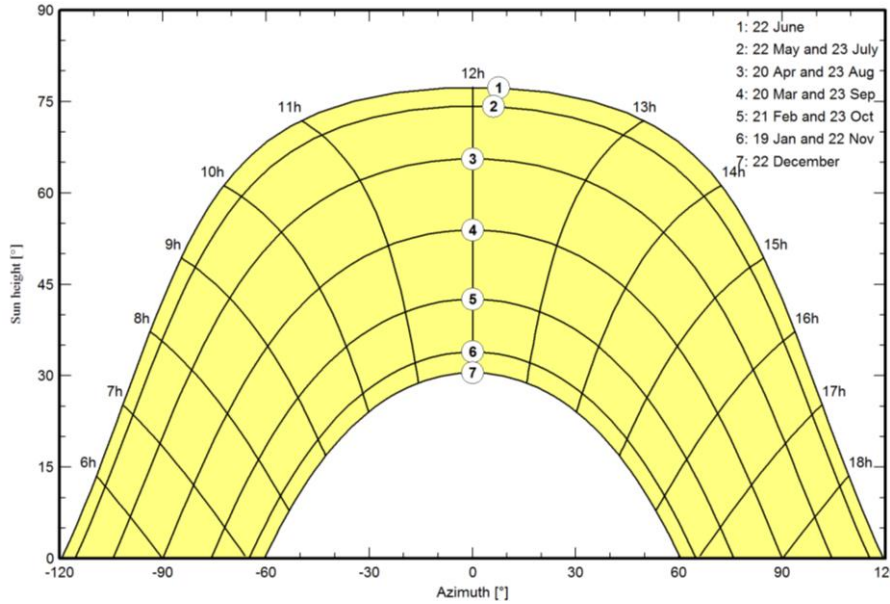
Tablo 5. ECMWF veri setinden değerlendirilen çalışma alanları için ortalama aylık doğrudan radyasyon değerleri.

Aylar	Aylık ortalama doğrudan radyasyon [kWh/m <sup>2</sup> ]			
	Anamur	Antalya	Finike	Mersin
Ocak	2.63	2.58	2.61	2.67
Şubat	3.54	3.49	3.52	3.61
Mart	4.66	4.65	4.66	4.78
Nisan	5.52	5.51	5.53	5.66
Mayıs	6.07	6.11	6.12	6.21
Haziran	6.42	6.59	6.59	6.56
Temmuz	6.35	6.53	6.53	6.54
Ağustos	5.79	5.92	5.91	5.99
Eylül	4.75	4.81	4.82	4.89
Ekim	3.57	3.56	3.58	3.66
Kasım	2.68	2.66	2.65	2.73
Aralık	2.23	2.17	2.20	2.26
Ortalama	4.52	4.55	4.56	4.63



İncelenen bölgelerde toplanan güneş verilerinin işlenmesi için Cenova Üniversitesi Enerji Enstitüsü tarafından geliştirilen PVSyst 6.8.5 yazılımı kullanılmıştır. Yazılım, şebekeye bağlı, tek başına kurulum ve pompajlı çevrim kurulumu olmak üzere üç farklı durum için PV sistemlerin öntasarım ve proje aşaması tasarım/üretim verilerini hesaplamaktadır.

Enerji üretimi ile ilgili olan panel ve evirici gibi parça özellikleri program veritabanında marka ve modele bağlı olarak bulunmakla birlikte envantere bulunmayan bileşenler için manuel veri girişi de desteklenmektedir. Hesaplamalar için gerekli radyasyon değerleri, bulutluluk, sıcaklık, nispi nem oranı, rüzgar hızı ve Linke bulanıklığı gibi diğer parametreler ise programın kendi GIS bazlı veritabanından çekilebilmekte veya manuel olarak programa tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada program envanterinden sadece güneş yörüngeleri incelenen bölgelerin coğrafi konumları girilerek programdan çekilmiş olup Anamur için elde edilen güneş yörüngesi diyagramı Şekil 4'te verilmiştir. Diğer tüm parametreler aylık ortalama değerler cinsinden ECMWF veritabanından alınan veriler kullanılarak manuel girilmiştir.



Şekil 4. Anamur için güneş yörüngeleri.

Çalışmada  $30^\circ$  sabit açılı, tek yön güneş takip ve çift yön güneş takip mekanizmalı olmak üzere üç farklı panel durumu dikkate alınmıştır. İncelenen bölgeler için tasarım aşaması modülü kullanılarak güç üretimleri aylık ortalama değerler olarak elde edilmiştir.

### 3. Üretim kapasiteleri ve maliyet

#### 3.1. Üretim kapasiteleri

Rüzgâr enerjisi için yapılan hesaplar sonucunda elde edilen aylık, ortalama aylık ve toplam yıllık güç üretimleri Tablo 6'da verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere rüzgâr santrallerinde güneş santrallerinin aksine kış aylarında üretim değerleri artış göstermekte, en düşük üretimler ise Eylül ve Ekim aylarında gerçekleşmektedir. En yüksek üretim değerleri yine Mersin'de görülmektedir.

Net kapasite faktörü belirli bir süre boyunca üretilen elektrik enerjisi miktarının, bu süre boyunca oluşacak maksimum potansiyel elektrik enerjisi miktarına oranıdır [44]. Rüzgâr türbinleri için kapasite faktörü belirlenirken, tesisin kurulu gücünün üretebileceği maksimum enerji belirli bir süre üzerinden hesaplanır. Daha sonra aynı zaman diliminde elde edilen çıktı miktarı değerlendirilir. Gerçek üretimin maksimum potansiyele oranı, o tesis için kapasite faktörüdür. Tablo 8’de görülebileceği üzere, RES kurulumu için seçili bölgelerden en yüksek kapasite faktör oranına Mersin sahipken, bu oranın en düşük olduğu yer Finike’dir.

Tablo 6. ECMWF verilerine göre sabit açılı PV sistemler için aylık güç üretim tablosu.

Aylar	Bölgelere Göre Aylık Güç Üretimi [MWh]			
	Anamur	Antalya	Finike	Mersin
Ocak	568	581	576	603
Şubat	614	622	618	646
Mart	772	780	775	801
Nisan	765	771	766	788
Mayıs	780	786	777	783
Haziran	742	771	761	764
Temmuz	766	782	785	784
Ağustos	755	776	769	788
Eylül	682	692	688	704
Ekim	605	620	614	632
Kasım	523	536	518	541
Aralık	492	493	478	520
Ortalama	672	684	677	696
Toplam	8064	8210	8124	8354

Tablo 7. NCEP verilerine göre referans türbin RES için aylık güç üretim tablosu.

Aylar	Bölgelere Göre Aylık Güç Üretimi [MWh]			
	Anamur	Antalya	Finike	Mersin
Ocak	985	563	444	1051
Şubat	870	478	399	848
Mart	769	392	365	742
Nisan	641	287	301	611
Mayıs	505	277	258	543
Haziran	523	359	297	632
Temmuz	547	433	310	814
Ağustos	520	376	271	810
Eylül	476	331	236	649
Ekim	476	329	192	572
Kasım	632	385	275	711
Aralık	882	483	390	966
Ortalama	652	391	312	746
Toplam	7825	4693	3739	8951

Tablo 8. Bölgelerin RES kapasite faktörü oranları.

Bölgeler	Güç Üretimi (MWh/yıl)	Kapasite Faktörü (%)
Anamur	7825	18
Antalya	4693	11
Finike	3739	9
Mersin	8951	20

### 3.2. Maliyet hesabı

Açık deniz rüzgâr santrallerinin birim kurulu güç için ortalama yatırım maliyetlerinin belirlenebilmesi amacıyla dünya çapında maliyetleri açık şekilde paylaşılan örnekler incelenmiştir [41]. Bu alanda yapılmış uluslararası çalışmalar da incelenerek gelecek kurulumlar için referans olarak 2.45 milyon €/MW belirlenmiştir [45].

1 MW'lık bir açık deniz güneş enerjisi santralının yaklaşık maliyetinin, arazi tabanlı PV çiftlik maliyeti ve açık deniz rüzgâr yapılarının temel maliyetleri ile belirlenen maliyet analizinden çıkarılabileceği varsayılmıştır. Yapılan birim maliyet analizi ve var olan örneklerin ışığında kurulum maliyeti için 1,43 milyon €/MW referans değeri alınmıştır [41].

### 3.3. Yatırım verimliliği hesabı

Bu çalışmada, seçili bölgelere kurulması ön görülen 5 MW kapasiteli sabit açılı güneş santralleri ile açık deniz rüzgâr çiftliklerinin verim hesabı, sistemlerin bir yılda üreteceği tahmin edilen miktarın o sistemin toplam kurulum maliyetine bölünmesi ile elde edilmiştir. Yatırım verimlilikleri Tablo 9'da incelenen dört konum ve rüzgâr/güneş enerji alternatifleri için sunulmuştur.

Tablo 9. Kaynak değişimine göre maliyet ve verim oranları.

Bölgeler	Kaynak	Güç (MWh/yıl)	Güç/Milyon €
Anamur	Güneş	8064	1128
	Rüzgâr	7824	639
Antalya	Güneş	8209	1148
	Rüzgâr	4693	383
Finike	Güneş	8124	1136
	Rüzgâr	3739	305
Mersin	Güneş	8354	1168
	Rüzgâr	8951	731

Bir yatırımın karlılık oranı, toplam yatırım maliyetinin ne kadar sürede geri alınabileceği ile orantılıdır. Geri ödeme süresi yöntemi oldukça yaygın kullanılan bir yöntem olmakla birlikte önemli bir eksiği vardır [46-47]. Yöntem, paranın zamana karşı değer kaybı anlamına gelen enflasyon oranını dikkate almaz ve farklı yıllara ait nakit girişlerini aynı değerde kabul eder [48]. Bir yatırım projesinin geri ödeme süresi ne kadar kısaysa o kadar olumlu kabul edilir.

#### 4. Sonuçlar ve tartışma

Rüzgâr ve güneş enerjisi sistemlerinin, enerji üretim ve maliyet bazlı verimlerini değerlendirerek karşılaştırmak için Anamur, Antalya, Finike ve Mersin'de vaka incelemeleri yapılmıştır. ECMWF ERA-5 ve NCEP veritabanları kullanılarak bölgeler için edinilen rüzgâr ve güneş enerjisi verileri 5MW kapasiteli GES kurulumu için PVSyst 6.8.5 yazılımı ile, RES kurulumu için ise NREL 5MW referans türbini güç üretim eğrisinin hesap tablosu kullanılarak saatlik rüzgâr verilerine uyarlanması ile işlenerek aylık ortalama enerji üretimleri 40 seneyi kapsayan veriler kullanılarak elde edilmiştir. Açık deniz güneş kurulumunun incelenmiş olan bölgelerin tamamında rüzgâr santrallerine kıyasla daha yüksek verim sağladığı Tablo 10'da görülebilmektedir.

Tablo 10. Seçilen bölgeler için en yüksek verime sahip kurulum sıralaması

Bölgeler	Kaynak	Güç (MWh/yıl)	Güç/Milyon €
Mersin	Güneş	8354	1168
Antalya	Güneş	8209	1148
Finike	Güneş	8124	1136
Anamur	Güneş	8064	1128
Mersin	Rüzgâr	8951	731
Anamur	Rüzgâr	7824	639
Antalya	Rüzgâr	4693	383
Finike	Rüzgâr	3739	305

Veri setleri üzerinden yapılan hesaplamalar sonucunda bu yeni konseptin açık deniz rüzgâr santrallerine önemli bir alternatif oluşturduğu gösterilmiştir. Bu sistem özellikle Türkiye'nin güney kıyıları için umut verici olarak görünmektedir. Bununla birlikte, bu çalışma kapsamında monopile tipi kurulum üzerinde baz alınan GES sisteminin daha farklı kurulumlara uyarlanması, deprem, dalga ve rüzgâr gibi çevresel etkiler altındaki davranışının incelenmesi ve bu hususlara bağlı olarak taşıyıcı sistem optimizasyonu gibi konularda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulacağı açıktır.

Güneş enerjisinin önemi, Türkiye'nin sahip olduğu yüksek güneş enerjisi potansiyeli nedeniyle giderek artmaktadır. Güneş enerjisindeki global alandaki son eğilim olan su üstü açık deniz güneş santrallerinin ülkemizde de kurulmaya başlanacağı öngörülmektedir. Özellikle Türkiye'deki son dönemde artan hidroelektrik santral yatırımları göz önüne alındığında, baraj havzalarının üstüne kurulacak sistemlerin elektrik üretimi dışında tatlı su kaynaklarının korunmasına da katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

#### Kaynaklar

- [1] Kılavuz, T., Türkiye'de rüzgâr enerjisi yatırımlarındaki devlet teşviklerinin gerçek opsiyonlar yöntemiyle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2012).
- [2] Çelik, Ö., Teke, A. ve Tan, A., Overview of micro-inverters as a challenging technology in photovoltaic applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 3191-3206, (2018).

- [3] Owusu, P. A. ve Asumadu-Sarkodie, S., A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation, *Cogent Engineering*, 3, 1, 1167990, (2016).
- [4] Holdren, J. P., The energy innovation imperative: Addressing oil dependence, climate change and other 21st century energy challenges, *Innovations: Technology Governance, Globalization*, 1, 2, 3-23, (2006).
- [5] Lebedys, A., Akande, D., Coent, N., Elhassan, N., Escamilla, G., Arkhipova, I. ve Whiteman, A., *Renewable Capacity Statistics 2022*, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, (2022), <https://irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>, (22.05.2022).
- [6] TEİAŞ Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı, Nisan 2022 kurulu güç raporu, <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari>, (22.05.2022).
- [7] Ay, A., Energy sources and investment Project assessment: A case study about wind energy in Turkey, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2010).
- [8] The International Renewable Energy Agency (IRENA), Solar energy data installed capacity trends, <https://www.irena.org/solar>, (10.05.2022).
- [9] Schmela, M., Hemetsberger, W. ve Sauaia, R. L., *Global Market Outlook for Solar Power 2021-2025*, SolarPower Europe, (2021), <https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2022>, (25.05.2022).
- [10] EPIAŞ, Elektrik piyasası bültenleri, <https://www.epias.com.tr/spot-elektrik-piyasasi/elektrik-piyasasi-bultenler/elektrik-piyasasi-aylik-bulten>, (22.05.2022).
- [11] <https://kalyonpv.com/gunes-santrali.html#1>, (22.05.2022).
- [12] Brewer, J., Ames, D. P., Solan, D., Lee, R. ve Carlisle, J., Using GIS analysis and social preference data to evaluate utility-scale solar power site suitability, *Renewable Energy*, 81, 825-836, (2015).
- [13] Charabi, Y. ve Gastli, A., PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation, *Renewable Energy*, 36, 9, 2554-2561, (2011).
- [14] Kereush, D. ve Perovych, I., Determining criteria for optimal site selection for solar power plants, *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, (2017).
- [15] Lee, J. ve Zhao, F., *Global Wind Report 2022*, Global Wind Energy Council (GWEC), <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>, (25.05.2022).
- [16] Markard, J. Ve Petersen, R., The offshore trend: Structural changes in the wind power sector, *Energy Policy*, 37, 9, 3545-3556, (2009).
- [17] Esteban, M. D., Diez, J. J., López, J. S. ve Negro, V., Why offshore wind energy?, *Renewable Energy*, 36, 2, 444-450, (2019).
- [18] O'Sullivan, R., Komusanac, I., Brindley, G., Fralle, D. ve Ramirez, L., *Wind energy in Europe-2021 Statistics and the outlook for 2022-2026*, WindEurope, <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2021-statistics-and-the-outlook-for-2022-2026/>, (2022).
- [19] Bilgili, M., Yasar, A. ve Şimşek, E., Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2, 905-915, (2011).
- [20] Sun, X., Huang, D. ve Wu, G., The current state of offshore wind energy technology development, *Energy*, 41, 1, 298-312, (2012).
- [21] Ritchie, H. ve Roser, M., *Renewable energy: Our World in Data*, <https://ourworldindata.org/renewable-energy>, (19.06.2019).

- [22] Gökbülak, F. ve Özhan, S., Water loss through evaporation from water surface of lakes and reservoirs in Turkey, E-Water: Official Publication of the European Water Association, (2006).
- [23] Sharma, P., Muni, B. ve Sen, D., Design parameters of 10KW floating solar power plant, Int. Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET), National Conference on Renewable Energy and Environment (NCREE-2015), 2, (2015).
- [24] Gamarra, C. Ve Ronk, J. J., Floating solar: An emerging opportunity at the energy-water Nexus, Texas Water Journal, 10, 1, 32-45, (2019).
- [25] Abid M, Abid Z, Sagin J, Murtaza R, Sarbassov D. ve Shabbir M., Prospects of floating photovoltaic technology and its implementation in Central and South Asian Countries, International Journal of Environmental Science and Technology, 16, 3, 1755-1762, (2019).
- [26] Exley, G., Floating solar farms could cool down lakes threatened with climate change, <https://www.weforum.org/agenda/2021/04/floating-solar-farms-lakes-threatened-climate-change>, (06.11.2021).
- [27] World Bank Group, ESMAP and SERIS, Where sun meets water: Floating solar market report, Washington DC, World Bank, (2019).
- [28] <https://www.gvip.io/p/saemangeum-floating-solar-project-21gw>, (06.11.2021).
- [29] Bellini, E., Worlds largest floating PV plant goes online in China, PV Magazine, [https://www.pv-magazine.com/2022/01/03/worlds-largest-floating-pv-plant-goes-online-in-china/#:~:text=Huaneng%20Power%20International%20\(HPI\)%20has,GW%20Dezhou%20thermal%20power%20station](https://www.pv-magazine.com/2022/01/03/worlds-largest-floating-pv-plant-goes-online-in-china/#:~:text=Huaneng%20Power%20International%20(HPI)%20has,GW%20Dezhou%20thermal%20power%20station), (20.05.2022).
- [30] Petrova, M.A., NIMBYism revisited: Public acceptance of wind energy in the United States, Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 4, 6, 575-601, (2013).
- [31] Liebe, U. ve Dobers, G. M., Decomposing public support for energy policy: What drives acceptance of and intentions to protest against renewable energy expansion in Germany?, Energy Research & Social Science, 47, 247-260, (2019).
- [32] Maleki-Dizaji, P., Del Bufalo, N., Di Nucci, M. R. Ve Krug, M., Overcoming barriers to the community acceptance of wind energy: Lessons learnt from a comparative analysis of best practice cases across Europe, Sustainability, 12, 9, 3562, (2020).
- [33] Hanger, S., Komentantoya, N., Schinke, B., Zejli, D., Ihlal, A. ve Patt, A., Community acceptance of large-scale solar energy installations in developing countries: Evidence from Morocco, Energy Research & Social Science, 14, 80-89, (2016).
- [34] Uçar, A. ve Balo, F., Assessment of wind power potential for türbine installation in coastal areas of Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 7, 1901-1912, (2010).
- [35] Küçükkaya, E. (2019). Türkiye Danimarka ile işbirliği yaparak deniz üstü RES Projelerine Başlıyor, Enerji Portalı, <https://www.enerjiportali.com/turkiye-danimarka-ile-isbirligi-yaparak-deniz-ustu-res-projelerine-basliyor/>, (25.05.2022).
- [36] Oğuz, E., Akgül, M. A. ve İncecik, A., Offshore wind farms: Potential and applicability in the Southern Marmara Region, Turkey, Proc. Of the 9th IMAM Conference, International Maritime Association of Mediterranean, A Coruna, 883-891, (2013).
- [37] Global wind atlas, <https://globalwindatlas.info/>, (22.04.2022).

- [38] Yıldız, C. ve Akgül, M. A., Offshore PV farms: Production assessment for southern Turkey seas, Proc. of the 2nd GAP International Renewable Energy and Energy Efficiency Congress, Şanlıurfa, 102-105, (2020).
- [39] <https://earth.google.com/web/@38.9294322,35.04447768,1466.20617118a,2050246.60885602d,35y,-2.266564h,4.00661656t,0r>, (05.05.2022).
- [40] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. ve Scott, G., Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development, NREL Teknik Rapor TP-500-38060, National Renewable Energy Laboratories (NREL), Golden, CO, (2009).
- [41] Yıldız, C., Offshore solar plants: A design study, Yüksek Lisans Tezi, Yeditepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2020).
- [42] <https://indir.cw-enerji.com/mono-perc-mono-gunes-panelleri>, (15.06.2020).
- [43] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), <https://www.ecmwf.int/>, (15.02.2020).
- [44] <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/capacity-factor.html>, (15.06.2020).
- [45] Weston, D., Europe's offshore wind costs falling steeply, Wind Power Monthly, <https://www.windpowermonthly.com/article/1525362/europes-offshore-wind-costs-falling-steeply>, (05.05.2020).
- [46] Bolak, M., İşletme finansı, Birsen Yayınevi, İstanbul, (2000).
- [47] Göker, O., Yatırım projelerinin değerlendirilmesi teori ve uygulama, Atlantis İletişim, (1996).
- [48] Sarıaslan, H., Yatırım projelerinin hazırlanması ve değerlendirilmesi planlama-analiz-fizibilite, Siyasal Kitabevi, Ankara, (2006).