

## Investigation of the Potential of Using Lakes and Dams as Solar Power Plants: The Case of Yamula Dam

Ali Rıza DAL\* 

Ministry of Transport and Infrastructure, Çankaya/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the Global Solar Atlas (GSA) simulation program was used to determine the potential power of the floating Solar Power Plants (SPP) and the electricity production, and the RETScreen program was used for the greenhouse gas emission analysis.

#### Article Info:

Research article  
Received: 30.09.2021  
Revision: 16.11.2021  
Accepted: 22.11.2021

#### Highlights

- Electricity generation with solar panels in dams.
- GSA and RETScreen.
- Yamula DAM.

#### Keywords

Floating SPP  
Floating SPP potential  
RETScreen program  
GSA

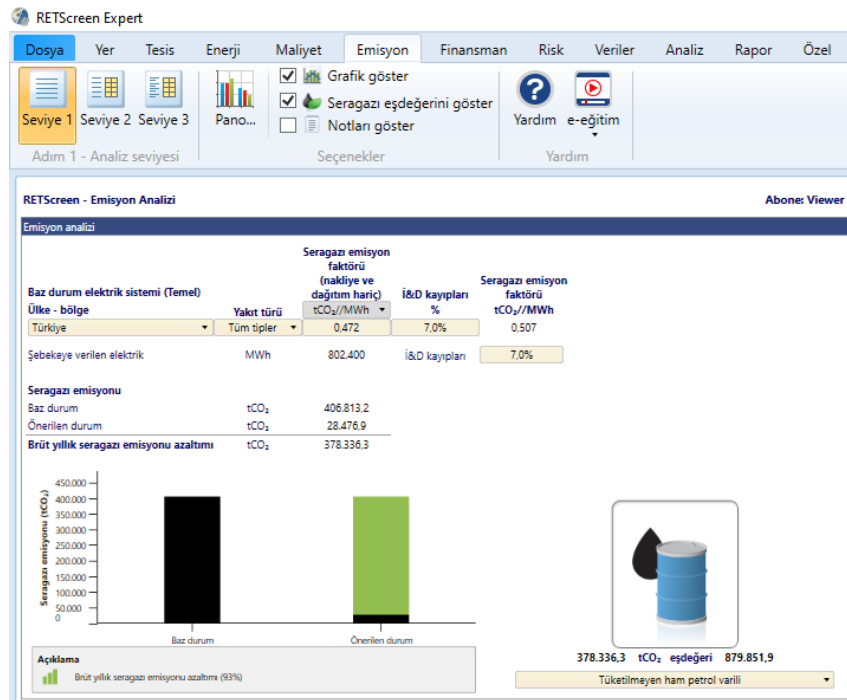


Figure A. RETScreen emission analysis program interface

**Purpose:** In Turkey, electricity generation is not yet made with floating SPP. The aim of this study is to determine the floating SPP potential that can be installed on the water surface of Yamula Dam. In addition, the positive contribution of the floating SPP to the atmosphere has been calculated.

**Theory and Methods:** Yamula Dam is a hydroelectric power plant built on the Kızılırmak river. The minimum operating level of the dam in question is the lake area of 51.67 km<sup>2</sup>. The case of installing floating solar power plants in 10% of the minimum water level area of Yamula Dam has been investigated.

**Results:** In the simulation, it has been determined that the total installed power potential of the floating SPP to be installed on Yamula Dam will be 576.4 MW. With this power, it has been determined that it will produce 802.4 GWh of electricity per year.

**Conclusion:** In addition, it is estimated that the electricity produced by floating SPP will be 2.28 times more than the hydroelectric power plant. It has been determined that with this electricity generation, 378,336.3 tCO<sub>2</sub> emissions per year will be prevented.



## Investigation of the Potential of Using Lakes and Dams as Solar Power Plants: The Case of Yamula Dam

Ali Rıza DAL\*

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Çankaya/ANKARA

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 30.09.2021  
Düzeltilme: 16.11.2021  
Kabul: 22.11.2021

### Keywords

Floating SPP  
Floating SPP potential  
RETScreen program  
GSA

### Anahtar Kelimeler

Yüzer GES  
Yüzer GES potansiyeli  
RETScreen programı  
GSA

### Abstract

The increase in energy consumption causes a negative impact on the environment. The most important factor in sustainable development is the widespread use of renewable energy. The transition to renewable energy sources in the energy sector has started to be implemented in different fields. Electricity is produced by installing floating solar power plants (SPP) on the water surfaces of seas, lakes and dams. There is no floating SPP installation in our country yet, and it has been seen that there is a need for experimental and scientific studies in this field. With this study, it is aimed to determine the floating SPP potential that can be installed on the water surface of the Yamula Dam, which produces hydroelectricity in the industrial city of Kayseri. The Global Solar Atlas (GSA) simulation program was used to determine the potential power of floating SPP and the electricity production, and the RETScreen Program was used for the greenhouse gas emission analysis. The case of installing floating solar power plants in 10% of the minimum water level area of Yamula Dam has been investigated. In the simulation, it has been determined that the total installed power potential of the floating SPP to be installed on Yamula Dam will be 576.4 MW. In addition, it has been determined that the floating SPP will produce a total of 802.4 GWh of electricity per year with this power. It has been determined that with this electricity generation, 378,336.3 tCO<sub>2</sub> emissions per year will be prevented.

## Göl ve Barajların Güneş Enerji Santrali Olarak Kullanım Potansiyelinin İncelenmesi: Yamula Barajı Örneği

### Öz

Enerji tüketimindeki artış çevre açısından olumsuz etkiye sebep olmaktadır. Sürdürülebilir kalkınmada en önemli unsur yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaşmasıdır. Enerji sektöründe yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş farklı sahalarda uygulanmaya başlamıştır. Deniz, göl ve barajların su yüzeyleri üzerine yüzer güneş enerji santralleri (GES) kurularak elektrik enerjisi üretilmektedir. Ülkemizde yüzer GES kurulumu henüz bulunmayıp, bu alanda deneysel ve bilimsel çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile sanayi şehri olan Kayseri’de hidroelektrik üretimi yapan Yamula Barajının su yüzeyine kurulabilecek yüzer GES potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yüzer GES potansiyel gücü ile elektrik üretiminin belirlenmesinde Küresel Güneş Atlası (GSA) simülasyon programı ve sera gazı emisyon analizinde ise RETScreen Programı kullanılmıştır. Yamula Barajının minimum su seviyesindeki alanının %10’u kadar kısmında yüzer GES kurulması durumu incelenmiştir. Yapılan simülasyonda Yamula Barajına kurulacak olan yüzer GES’in toplam kurulu güç potansiyelinin 576,4 MW olacağı tespit edilmiştir. Ayrıca, yüzer GES’in bu güç ile yılda toplam 802,4 GWh elektrik üretimi yapacağı saptanmıştır. Bu elektrik üretimi ile yılda 378.336,3 tCO<sub>2</sub> emisyonunun önleneceği belirlenmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde enerji kullanımına bağlı olarak oluşan karbondioksit emisyonlarındaki artış iklim değişikliğine neden olmaktadır. Enerji üretiminde karbondioksit emisyonunun sebebi olan fosil yakıtların kullanımının

azalımı yenilenebilir enerjiye geçilmesi ile mümkün olabilmektedir. Günümüzde ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretmek için yatırımlarına hız vermektedir.

Enerji sektöründe yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş farklı sahalara yayılmış durumdadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan ırmaklar üzerine kurulan barajlar hidroelektrik üretimi yapmaktadır. Ayrıca, Baraj ve göller tarım üretiminde sulama, baraj içerisinde balık üretimi, teknelerle yolcu taşımacılığının yanı sıra su sporu festivalleri ile ekonomiye katkı sunmaktadır. Bunun yanı sıra dünyada açık deniz (offshore) göl ve barajların su yüzeyleri üzerine yüzer GES'ler kurularak elektrik enerjisi üretilmektedir.

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından yapılan bir araştırmaya göre, küresel olarak göl ve barajların su yüzeyleri üzerine toplam 7,6 TW'lık yüzer GES kurulabileceği ifade edilmektedir [1]. Bu ise 2018 yılındaki toplam küresel elektrik tüketiminin %50'sini karşılayacak olan yaklaşık 10.600 TWh'lık bir elektrik üretimine karşılık gelmektedir [2]. 2020 Ağustos itibarıyla yüzer GES'ler 35 ülkede, 350 adet santral ve 2,6 GW kurulu kapasite ile faaliyetini sürdürmektedir [3].

Literatür incelendiğinde dünyada kanallar, nehirler, baraj, göl ve denizlerin yüzeyinde GES'lerin kurulumuna ilişkin deneysel ve sayısal modeller kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Trapani ve Millar, (2013) mevcut bir fosil yakıt santrali ile entegreli yüzen bir PV santralin fizibilitesine ilişkin değerlendirme yapmışlardır [4]. Ferrer-Gisbert ve ark., (2013) su yüzeyindeki GES'ler için elastik bağlantı elemanlarının kullanılmasıyla dalgalı su seviyelerine uygun polietilen yüzer modül oluşturmuşlardır [5]. Trapani ve ark., (2013) doğrudan su hattı üzerinde yüzen esnek, ince bir PV panelin analizini yapmışlardır [6]. Golroodbari ve Sark, (2020) tarafından deniz suyunun soğutma etkisi nedeniyle yüzer PV'lerin performansını %18 oranına kadar artırdığı belirtilmiştir [7]. GES'lerin su üzerine kurulması, tarımsal faaliyetlerde kullanılan arazide tasarruf sağlandığı gibi su kütesinin doğal soğutması ve yüksek rüzgâr hızları nedeniyle PV performansını artırmakta olup, karasal alanda kurulan GES'lere kıyasla avantajlı hale gelmektedir [8]. Singapur'daki bir çalışmada deniz üstü GES'lerin çatılardaki GES'lere göre modül sıcaklığının 5-10 °C az olması nedeniyle performansın yaklaşık %10 daha fazla olduğu belirtilmiştir [9]. Güney Kore'deki bir araştırma projesinde, güneş ışınımı ve sıcaklığın aynı olduğu 100 kW'lık bir deniz üstü GES ile yakın konumda olan 1 MW'lık karasal bir GES'in verileri karşılaştırılmıştır. Deniz üstü GES'in karasal GES'e göre %11 daha yüksek verimliliğe sahip olduğu belirtilmiştir [10]. Ryu ve Lee, (2019) PV panel üzerindeki rüzgâr yükü etkisini hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak PV panelin eğim açısının artmasıyla rüzgâr yükünün arttığını hesaplamışlardır [11]. Yıldız ve Akgül, (2020) yaptıkları çalışmada, Akdeniz Bölgesinde 3 lokal bölge seçerek deniz yüzeyinde rüzgâr ve yüzer GES kurulumuna ilişkin karşılaştırmalar yapmışlardır [12]. Yıldız (2020) açık deniz santralleri ile ilgili yaptığı çalışmada, açık deniz PV enerjinin rüzgâr enerjisi ile rekabet edebileceğini, ayrıca açık denizler için yüksek güneş potansiyeli olan ama yeterli rüzgâr yoğunluğuna sahip olmayan kıyı şeritleri için uygulanabilir bir çözüm olduğunu belirtmiştir [13]. Yüzer GES'ler nehir ve barajlarda güneş panellerinin suyu gölgelemesi nedeniyle, buharlaşmayı ve sudaki yosun oluşumunu engellemektedir. Ayrıca, suyun soğutma özelliği nedeniyle güneş panellerinin verimini artırması ile yüzer GES çevresinde ağaç ve binaların olmaması nedeniyle de daha fazla güneş ışınımından faydalanılarak verimin artmaktadır [14]. Tarım ve Orman Bakanlığınca Burdur Gölü'nde Buharlaşmanın Azaltılması ARGE Projesi ile yapılan model havuzdaki çalışma sonucu yüzer GES panellerin yüzde 54,76 oranında buharlaşmayı engellendiği belirtilmiştir [15]. Rosa-Clot ve Tina, (2017) arazi tedarikinde yaşanan sorunlar nedeniyle deniz üstü GES kurulumu yapılmasını önermişlerdir [16]. Shama ve Kothari, (2016) tarafından dünyadaki yüzer GES uygulamalarında, su yüzeyine kurulan PV'lerin göl alanını kapsama oranının ~%43'e kadar çıktığını belirtmişlerdir [17]. Hollanda hükümeti tarafından büyük GES yatırımlarının açık denizlerde yapılması hakkında kararı olduğu ifade edilmiştir [18]. Ayrıca, GES kurulumunda araziye olan ihtiyaç diğer elektrik üreten santrallerinden daha fazla olmaktadır. Bu durumda GES ile elektrik üretiminde alan kısıtlaması olan tarımsal üretim yapan veya turizm bölgeleri için yüksek maliyetli arazilerin yerine barajlardaki su yüzeylerinin kullanılması bir avantaj olarak değerlendirilmelidir. Hidroelektrik santral bulunan barajlara yüzer GES için gerekli olan elektrik iletim hatlarının yakın olması barajları ön plana çıkarmaktadır. Yüzer GES'lerin dezavantajı ise dalga ve fırtınalara maruz kalmasıdır. Ayrıca, sualtı elektrik kabloları su ortamı biyoçeşitliliğini etkileyebilmektedir [19].

Diğer taraftan, GES kurulumunda en önemli parametrelerden biri de güneş ışınımıdır. Uygulamada PV panellerle toplanan güneş ışınımı miktarı; her ne kadar panelin teknik özelliğine ve konulduğu yöne bağlı olsa da PV panellerinden maksimum performans elde etmek için maksimum güneş ışınımı alan bölgelerin

seçilmesi önemlidir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Güneş Enerji Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre Kayseri'nin güneş enerji potansiyeli bakımından enerji yatırımları için uygun olan iller arasında yer aldığı anlaşılmaktadır [20].

Dünyada birçok ülke GES için uygun bir arazinin olmayışı nedeniyle farklı çözümler üretmeye başlamıştır. GES'ler için geniş çatıların üzerine kurulması bir çözüm olmasına rağmen büyük kapasiteli üretimler için çatı alanları yeterli olmamaktadır. Bu yüzden birçok ülkede göl, baraj ve açık deniz sahalarında yüzer GES'lerle ilgili yatırımlar yapılmaya başlanmıştır [17, 21]. Ülkemizde yüzer GES yatırımları henüz bulunmamaktadır. Ülkemizde güneş enerji potansiyeli yüksek olan illerde arazi kıtlığı ile ilgili sorunlar kendini göstermeye başlamıştır. Bunun temel nedenleri arasında; Akdeniz ve Ege Bölgelerinde denize kıyısı olan illerimizin orman, turizm, ekilebilir tarımsal üretim gibi alanların oranının oldukça fazla olmasıdır. İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde ise göl ve barajların çevresinde tarımsal üretimin yapıyor olması GES için uygun arazi bulmayı zorlaştırmaktadır. Diğer taraftan, elektrik üretimi için barajlar yağışlı mevsimlerde, yüzer GES'ler ise yazın kurak mevsimlerde maksimum seviye de elektrik üreterek bir denge oluşabilmektedir. Bu durum hidroelektrik santralleri ile yüzer GES'lerin aynı iletim hattını kullanılarak elektrik üretilmesine imkân sunmaktadır [22]. Bu çerçevede, arazi kıtlığı ve su yüzeyindeki GES'lerin veriminin yüksek olması açık deniz, göl ve barajlarda yüzer GES'leri ön plana çıkarmaktadır. Ülkemizde açık deniz, göl ve barajlarda yüzer GES'lerle ilgili deneysel ve bilimsel çalışmaların yeterli düzeyde olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada Yamula Barajı su yüzeyine kurulacak yüzer GES potansiyeli ve üretilen elektrik enerjisinin atmosfere sağlayacağı sera gazı emisyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

### 2.1. Yamula Barajı (Yamula DAM)

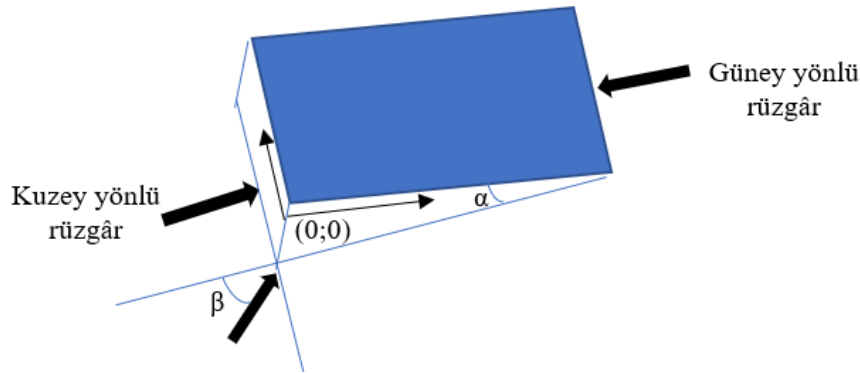
Son yıllarda ülkemizde hidroelektrik santrallerine olan yatırımlarda artış görülmektedir. Ülkemizin elektrik kurulu gücü 95.964 MW'a ulaşmıştır. Bu gücün %32,29'unu yenilenebilir enerji kaynağı olan ırmak ve barajlar üzerine kurulan hidroelektrik santralleri oluşturmaktadır [23]. Bu santrallerden birisi de Kayseri ili Kocasinan ilçesinden geçen ve Kızılırmak üzerine kurulan Yamula Barajı ve hidroelektrik santralidir. Söz konusu santral 100 MW kurulu güce sahip olup 2020 yılı içerisinde toplam 352.435 MWh elektrik üretimi yapmıştır [24].

Çalışma kapsamında yapılan saha ve literatür incelemesinde, ülkemizde özel çevre koruma bölgeleri, tarımsal üretim alanları, orman alanları ve turizm bölgeleri içerisinde yer alan çoğu araziler GES kurulumu içinde uygundur. Ancak sulama ve elektrik üretim amacıyla inşa edilen barajların çevresindeki alanlarda GES yapımında problemler yaşanmaktadır. Yamula Barajının bulunduğu bölge 31 Mart 2018 tarihli Resmî Gazete ile çevresel öncelikli sürdürülebilir kalkınma ilkesine uygun olarak arazilerin planlı kullanımını sağlamak amacıyla "büyük ova koruma alanı" olarak belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu koruma alanı içerisine giren bölgede tarımsal faaliyetlerin dışında herhangi bir çalışma yapılamamaktadır. Bu öngörü ile yıllık elektrik tüketimi 2.353 GWh [25] olan sanayi kenti Kayseri'de bulunan Yamula Barajının su yüzeyi üzerine yüzer GES kurulumu incelenmiştir.

### 2.2. GSA Programı (GSA program)

Bilimsel çalışmalarda deneysel uygulamaların yanında bilgisayar teknolojileri de kullanılmaktadır. Güneş ışınımı ve PV panellerle üretilen elektrik enerjisinin tahmininde simülasyon programları araştırmacıların tercihleri arasındadır. Dünya Bankası GES enerjisini desteklemek amacıyla kullanıcılara açık erişimli CBS tabanlı Global Solar Atlas 2.0 (GSA) simülasyon programını sunmaktadır. GSA, SOLARGIS algoritması ve veri tabanını kullanan bir programdır. Bu program belirlenen konumun güneş ışınım değeri, meteorolojik veriler ile PV sistem gücüne bağlı olarak aylık, yıllık elektrik üretim miktarını ve optimum eğim açısını tahmin edebilmektedir. GSA programının diğer bir özelliği yüzer GES'ler için simülasyon yapabilme opsiyonudur. Bu opsiyon; PV paneller arasındaki dalga ve kirlilik gibi uyumsuzlukları da dikkate almaktadır [26]. Yamula Barajına kurulacak yüzer GES'in üreteceği elektrik enerjisi hesaplanmasında GSA programının yüzer PV opsiyonu kullanılmıştır.

Güneş ışınımları güneş panelleri üzerine dik açıyla geldiği zaman bir panelin elektrik üretimi artmaktadır [27]. Ayrıca Asya’da yapılan çalışmada yüzer GES’ler PV panellerin  $10^\circ$ ’lik eğim açısının karadaki GES kurulumlarındaki  $30^\circ$ ’ye karşılık geldiğini belirtmişlerdir [28,29]. Diğer taraftan, Oh ve Jang, (2018)  $20^\circ$ ’lik bir panel eğim açısındaki bir yüzer GES’in karada kurulan  $30^\circ$ – $36^\circ$  eğimdeki panelden daha fazla güç ürettiğini belirtmişlerdir [30]. Yüzer GES’lerde dalga ve rüzgâr yükünden dolayı PV panellerin eğim açısının yüksek olması arzu edilmemektedir. Rüzgâr yönüne karşı PV panelin  $0^\circ$  eğimli konumundaki sürüklenme kuvveti  $90^\circ$  eğimli konumundakinden çok daha küçüktür [31]. Chou ve ark. (2019), Şekil 1’de görülen PV panelin eğim açısı ( $\alpha=10^\circ$ -  $80^\circ$ ), rüzgâr yön açısı ( $\beta =0^\circ$ -  $180^\circ$ ) ve rüzgâr hızı 14,5 m/s için deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında  $\alpha =10^\circ$ ’de rüzgâr yüklerinin en düşük seviyede olduğu,  $\alpha=30^\circ$ ’den büyük olması durumunda ise panelde oluşan kritik rüzgâr yüklerin  $\beta$  açısının düşük değerlerinde bile oluştuğunu göstermişlerdir. Aynı çalışmada, yüzer GES’lerde kullanılacak PV panellerin  $30^\circ$ ’den düşük açılarda projelendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [32].



Şekil 1. Bir panelin eğimi ve rüzgâr yönleri

Bu çalışmada, öncelikle Yamula Barajında ( $39,094^\circ$ ;  $35,274^\circ$ ) uygun konum seçilmiştir. Ayrıca, yüzer GES kullanılacak panellerin güneye yönlendirilmesi ve plastik yüzer dubalar üzerine monte edilmesi öngörülmektedir. Kayseri’de 2004–2013 yılları arasındaki ortalama rüzgâr hızı 0,6 ila 2,7 m/s arasında değişmektedir. 1975 – 2011 yılları arasındaki meteorolojik ölçümler neticesinde Kayseri’nin hâkim rüzgâr yönü güneyli rüzgarlardır [33]. Bu yöndeki rüzgarlar panelin üst yüzeyinde basınç yükü oluşturacaktır [11, 32]. Bu ise panelin sürüklenmesine neden olacaktır. Bu durum yüzer GES panel setlerinin çapa ile zemine sabitlenmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada Yamula Barajında yüzer GES’te kullanılacak PV panellerin optimum eğim açısı GSA programı ile simüle edilerek bulunmuştur. GSA programında belirlenen; modül verimi %16, inventer euro verimi %96,4, kirlenme %6 (DC), kablo %2,5(DC), uyumsuzluk %6,5 (DC), trafo %1 (AC) ve kablo %2 (AC) kayıp değerleri kabul edilerek büyük ölçekli yüzer PV yapısı seçilmiştir. Yamula Barajına kurulumu yapılacak olan yüzer GES için kullanılacak olan PV panellerin optimum eğim açısı ile bir yılda üreteceği elektrik enerjisi miktarı potansiyeli GSA simülasyon programı ile belirlenmiştir.

Yamula Barajı için yüzer GES’de kullanılan PV panelin teknik özellikleri Tablo (1)’de verilmiştir.

Tablo 1. Yüzer GES’de kullanılan PV panelin özellikleri

PV Panel	Teknik özellik
Modeli	Polikristal
Güç (P)	280 W/panel
Hücre boyutu	157x157 mm
Panel alanı	$b = 1,652 \text{ m}$ , $L = 1 \text{ m}$ ( $b \times L$ )
Panel ağırlığı	20 kg
Mekanik dayanım	5400 Pa
Çalışma sıcaklığı	$-40 \text{ }^\circ\text{C}$ - $+85 \text{ }^\circ\text{C}$

### 2.3. RETScreen Programı (RETScreen Program)

RETScreen; Kanada Doğal Kaynaklar Bakanlığının desteklediği temiz enerji projesi kapsamında CANMET Enerji Çeşitlendirme Araştırma Laboratuvarı tarafından geliştirilen simülasyon programıdır [34]. Ayrıca, bu program bilgisayar ortamında yapılan fizibilite ile hem zaman açısından hem de mali açıdan kullanıcılara önemli avantajlar sağlamaktadır [35]. Söz konusu program açık erişimli olup enerji ve sera gazı emisyon analizleri yapmaktadır. Yamula Barajına kurulacak olan yüzer GES'in sera gazı emisyonu salımı hesaplanmasında RETScreen programı kullanılmıştır.

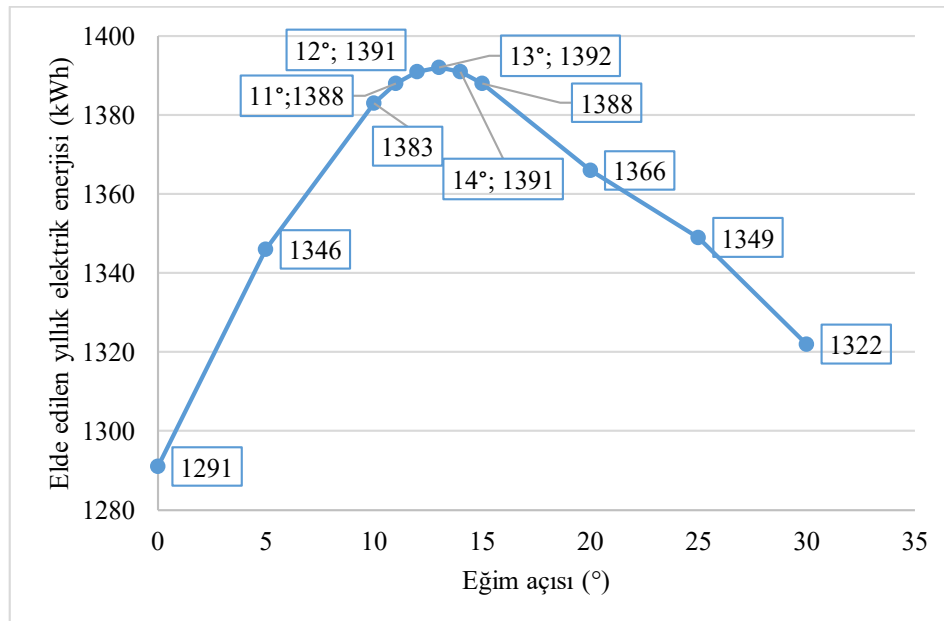
## 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

### 3.1. Yamula Barajında Kurulacak Olan Yüzer GES'in Optimum Eğim Açısı (Optimum Tilt Angle of Floating SPP to be Established at Yamula Dam)

Bir PV panelin konumlandırıldığı enlem açısı ve panelin yüzey ile yaptığı eğim açısı panelin üreteceği elektrik enerjisi miktarını etkilemektedir. Araştırmacılar açık deniz, göl ve barajlarda farklı açılarda rüzgâr yüklerine maruz kalan bir PV panelin eğim açısının  $30^\circ$ 'den büyük olmasını önermemektedirler. Ayrıca yapılan çalışmalarda yüzer GES için  $10^\circ$  eğim açılı PV panelin veriminin karadaki  $30^\circ$  eğim açılı panele karşılık geldiğini belirtmişlerdir [28, 29].

Bu kapsamda, GSA simülasyon programı ile 1 kW gücündeki bir PV panelin farklı eğim açılarda üreteceği yıllık elektrik enerjisi Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 2 incelendiğinde, Yamula Barajına kurulacak olan 1 kW kurulu gücündeki yüzer GES'den bir yılda elde edilecek olan elektrik enerjisi miktarının  $13^\circ$ 'de maksimum seviyeye ulaşacağı görülmüştür. Bu eğim açısı ile PV panele gelen güneş ışınımı değeri yılda 1890,5 kWh olarak tespit edilmiştir. GSA ile bulunan bu açı değerinin literatürde ve uygulamadaki yüzer GES'lerde kullanılan eğim açısı ile uyumlu olduğunu göstermiştir [28, 29].



Şekil 2. Yamula Barajında 1 kW kurulu gücündeki yüzer GES'in yılda üreteceği elektrik enerjisi

Diğer taraftan, GSA programında aynı enlem ve boylamın karasal PV durumu seçilmiştir. Yapılan simülasyonda optimum panel eğim açısının  $31^\circ$  ve bu eğim açısında elde edilecek olan güneş ışınımı değerinin yılda 1963,8 kWh olduğu belirlenmiştir. Eğim açısının artması elektrik enerjisi artışını beraberinde getirmesine rağmen PV panele gelecek olan rüzgâr yüklerini de artırmaktadır. Bu durum panelde dayanım ve panel sürüklenme sorununu oluşturacaktır [32]. Ayrıca, eğim açısının  $31^\circ$  olması

durumunda paneller arası mesafe büyüyecektir. Bu durum PV panellerin su yüzeyinde kaplayacağı alanının büyümesine neden olacaktır. PV panellerin su yüzeyinde oluşturduğu alan artışı barajda daha az panelin kullanılmasına ve dolayısıyla barajda kurulacak olan yüzer GES'in kurulu gücünün azalmasına neden olacaktır. Güçteki azalma ise daha az elektrik enerjisi üretmek anlamına gelmektedir.

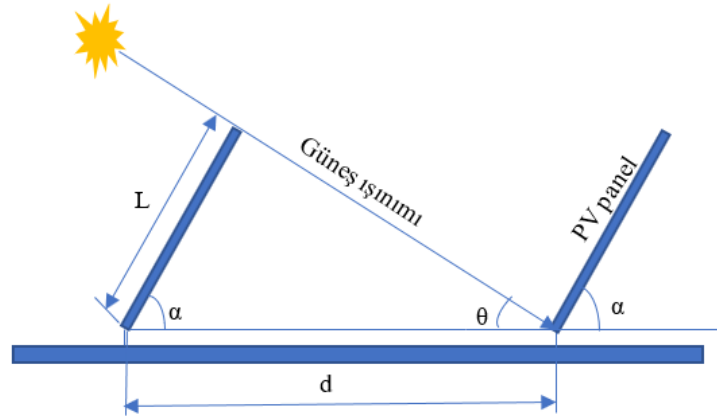
### 3.2. Yamula Barajında Kullanılabilecek Yüzey Alanın Tespiti (Determination of Surface Area That Can Be Used in Yamula Dam)

Çalışmada, Yamula Barajının minimum seviyede su bulundurması ile kurulacak yüzer GES'lerden üretilecek olan elektriğin hidroelektrik santralin bağlı olduğu iletim hattının da kullanması öngörülmüştür. Bu kapsamda, yüzer GES'in konumlandırılacağı yerin kıyıya yakın, gölge oluşturmayan ve iletim hattına 5 km mesafede olması planlanmıştır. Söz konusu barajın minimum işletme kotu göl alanı 51,67 km<sup>2</sup>'dir [36]. Ayrıca, barajda balık çiftlikleri, turizm amaçlı tekne seyahatleri, plaj ve diğer aktivitelerinde olumsuz engellenmemesi gerekir. Bu yüzden yüzer GES kurulumu için minimum göl alanının %10'u kadar bir alan belirlenmiştir. [37] Bu alan Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır.

$$A_{GES} = \frac{A_B}{10} \quad 1$$

Burada,  $A_{GES}$  baraja kurulacak olan yüzer GES alanını,  $A_B$  ise barajın minimum işletme kotundaki göl alanını ifade etmekte olup,  $A_{GES} = 5,167 \text{ km}^2$  olarak bulunmuştur.

GES'lerde kullanılan PV panellerden maksimum derecede güneş ışınımından fayda sağlanması önemlidir. PV panellerin dizi halinde birbirini ardışık şekilde takip etmektedir. Bu nedenle Şekil 3'de görüldüğü gibi iki ardışık panel arasındaki mesafe panelin eğim açısının değeri ile ilgilidir. PV paneller üzerinde gölge oluşmaması güneş ışınımından daha fazla faydalanma anlamı taşımaktadır. PV panellerinin üzerine daha fazla düşen güneş ışınımı o panel diziliminin verimini artırmaktadır. Bu yüzden panel eğimine bağlı olarak iki ardışık panel arasındaki mesafe Eşitlik 2 ile bulunmaktadır.



Şekil 3. İki ardışık PV panel arası mesafenin tespiti

$$d = L. (\cos \alpha + \sin \alpha / \tan \theta) \quad 2$$

Burada,  $L$  PV panelin boyunu (m),  $d$  iki panel arası mesafeyi (m),  $\alpha$  panel eğim açısını ve  $\theta$  dizi halinde sıralanmış PV panellerin birbirlerine gölge oluşturmadan güneşi görmeye başladıkları güneş yükseklik açısını ifade etmektedir.

Ayrıca, yüzer PV santralde kullanılan panelin tam güneşe baktığı kabul edilmiştir. Güneş yükseklik açısının en yüksek olduğu ve saat 12 olarak belirlendiği zamana güneş saati (yerel saat) denir. Ülkemize güneş ışınları 21 Aralık tarihinde en düşük açı ile gelmektedir [38]. Bu yüzden güneş yükseklik açısı PV panelin bulunduğu bölgeye göre değişim göstermektedir. GEPA verilerine göre Yamula Barajının bulunduğu ilçenin Aralık ayındaki ortalama güneşlenme süresi 3:49≈4 saattir [18]. Birçok araştırmacı tarafından bu

sürenin en uygun sabah 10:00 ila öğleden sonra 14:00 saatleri arasında olduğu belirtilmektedir. Bu süre dikkate alınarak güneş yükseklik açısı Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$\sin\theta = [\cos\delta\cos\varphi\cos\omega + \sin\delta\sin\varphi] \quad 3$$

Burada,  $\varphi$  panelin bulunduğu konumun enlemini ( $38,094^\circ$ ),  $\delta$  deklinasyon açısını ve  $\omega$  saat açısını ifade etmektedir.

Güneş ışınlarının dünyaya geliş doğrultusunun ekvator düzlemi ile yaptığı açıya deklinasyon açısı denir. Deklinasyon açısı  $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$  arasında değişmektedir. Cooper eşitliği olarak bilinen deklinasyon açısı Eşitlik 4 ile saat açısı ise Eşitlik 5 kullanılarak bulunmuştur.

$$\delta = 23.45 \sin[360(284 + n)/365] \quad 4$$

$$\omega = 15(GS - 12) \quad 5$$

Burada,  $n$  gün sayısı ifade etmekte olup, hesaplama yapılan günün yılbaşından itibaren kaçınıcı gün olduğunu,  $GS$  güneş saati olarak ifade edilmektedir.

Eşitlik 3, Eşitlik 4 ve Eşitlik 5 kullanılarak  $\delta = 23,4498^\circ$ ,  $\omega = -30^\circ$ ,  $\theta = 22,32^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Akabinde Eşitlik 2 ile yüzer GES dizilimindeki iki ardışık panel arasındaki mesafe  $d = 1,52$  m olarak tespit edilmiştir.

### 3.3. Yüzer GES Kurulu Güç Potansiyelinin Belirlenmesi (Determination of the Installed Power Potential of Floating SPP)

Bir yüzer GES’de iki ardışık PV panel arasındaki mesafeye bağlı olarak panel alanı belirlenmiştir. PV panelin (gölgeleme dahil) kapladığı alan  $A_{HPV}$  ( $m^2$ ) Eşitlik 6 ile yüzer GES’te kullanılacak olan PV panel sayısı ( $N$ ) Eşitlik 7 ile yüzer GES’in toplam kurulu gücü  $P_{GES}$  (kW) ise Eşitlik 8 ile hesaplanmıştır.

$$A_{HPV} = d \cdot b \quad 6$$

$$N = \frac{A_{GES}}{A_{HPV}} \quad 7$$

$$P_{GES} = P \cdot N \quad 8$$

Bir panelin kaplamış olduğu alan  $A_{HPV} = 2,51$   $m^2$ , yüzer GES’te kullanılacak olan toplam panel sayısı 2.058.566 adet ve Yamula Barajında kurulacak olan yüzer GES’in toplam kurulu güç potansiyeli ise 576,4 MW olacağı tespit edilmiştir. Yamula Barajı üzerine 576,4 MW kurulu gücünde kurulacak olan bir yüzer GES’in bu potansiyel ile aylık ve yıllık üreteceği elektrik enerjisi miktarı GSA programında simüle edilerek bulunmuş olup Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Yamula barajına kurulacak yüzer GES’in aylık/yıllık elektrik üretimi (GWh)

<i>Aylar</i>	<i>Elektrik üretimi</i>
<i>Ocak</i>	32,9
<i>Şubat</i>	43,7
<i>Mart</i>	62,1
<i>Nisan</i>	72,4
<i>Mayıs</i>	86,3
<i>Haziran</i>	92,8
<i>Temmuz</i>	101,9
<i>Ağustos</i>	97,1
<i>Eylül</i>	80
<i>Ekim</i>	61,2



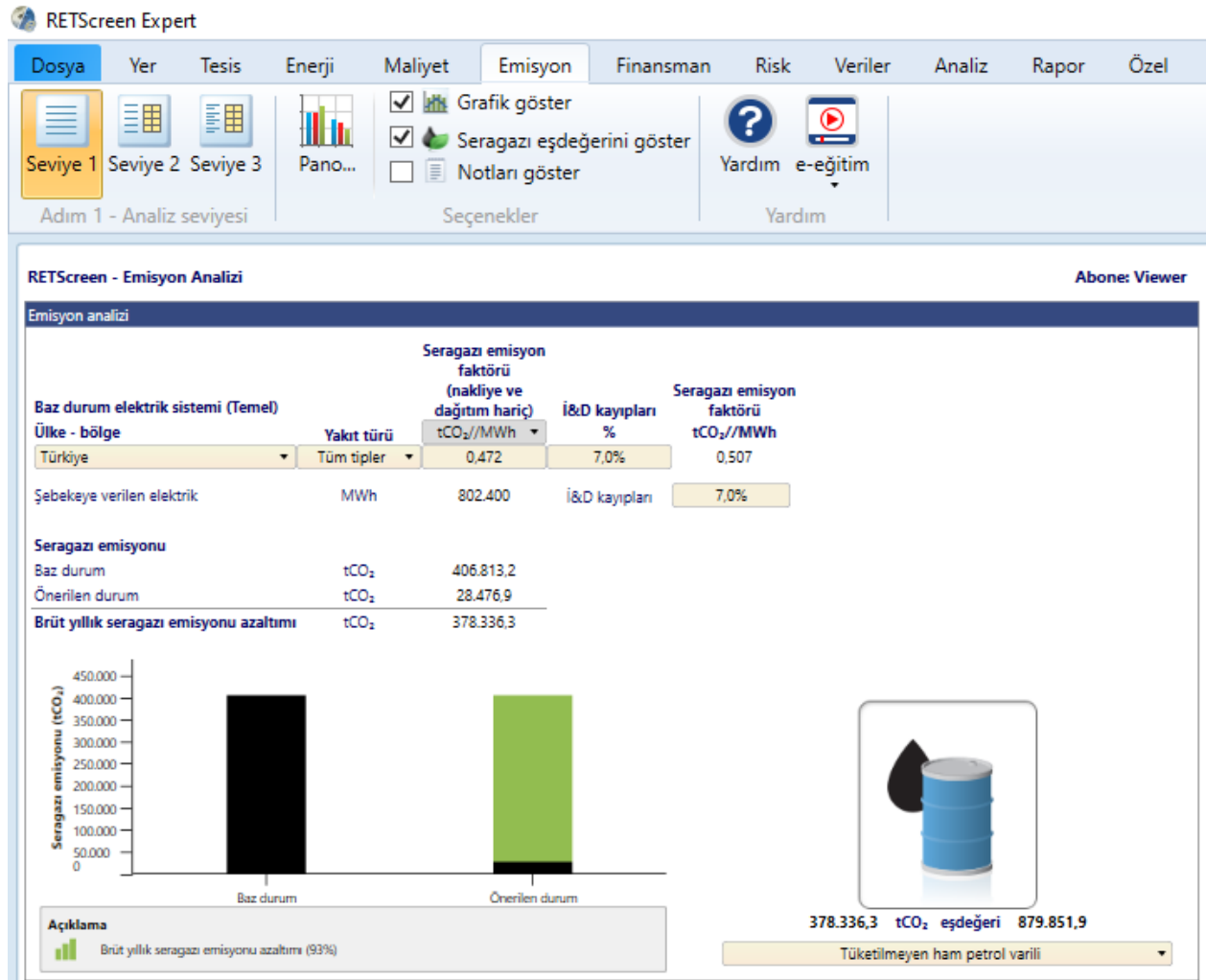
Kasım	42,9
Aralık	29
<b>Toplam</b>	<b>802,4</b>

Tablo 2 incelendiğinde; yüzer GES'in 29 GWh ile en düşük Aralık ayında, 101,9 GWh ile en yüksek Temmuz ayında ve 802,4 GWh ile yıllık toplam elektrik üretimi yapacağı öngörülmektedir.

Yamula Barajındaki mevcut hidroelektrik santrali 2020 yılı içerisinde toplam 352.435 MWh elektrik üretimi yapmıştır [24]. Söz konusu barajın minimum su seviyesi alanının sadece %10'u kadar bir yüzer GES kurulması durumunda 2,28 kat daha fazla elektrik üretimi gerçekleşeceği saptanmıştır. Ayrıca, Yamula Barajına yüzer GES kurulması durumunda Kayseri civarında tüketilen yıllık 2.353 GWh elektriğin %34,1'i yüzer GES tarafından üretilecek olan elektrik enerjisinden karşılanabilecektir.

### 3.4. RETScreen Programı ile Sera Gazı Emisyonu Hesabı (Calculation of Greenhouse Gas Emissions with RETScreen Program)

Enerji üretiminde geleneksel fosil yakıt yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla sera gazı salımı azalmaktadır. Bu çalışmadaki sera gazı emisyonu salımı RETScreen programı ile yapılmıştır. Sera gazı salımındaki azalmayı hesaplamak için, iletim ve dağıtım kayıpları %7 ve sera gazı emisyon faktörü 0.507 t/MWh CO<sub>2</sub> olarak alınmıştır. Resim 1'de görüldüğü üzere sera gazı emisyonu azalım miktarı hesaplanarak verilmiştir.



Resim 1. Yamula Barajına kurulacak yüzer GES'in sera gazı emisyonuna katkısı [34]

Resim 1 incelendiğinde; Yamula Barajına kurulacak yüzer GES ile yılda 378.336,3 tCO<sup>2</sup> emisyonu önlenecektir. Bu sayede 879.851,9 varil ham petrol kullanılmayarak döviz tasarrufu sağlanacaktır. Yüzer GES kaynaklı sera gazı emisyonunun etkisinin ise yılda 28.476,9 tCO<sup>2</sup> olacağı belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışma ile Kayseri ili Kocasinan ilçesinde bulunan Yamula Barajı hidroelektrik santraline ek olarak baraj üzerinde kurulabilecek yüzer GES potansiyeli ve üretim miktarı incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda; yüzer GES'in 13°'lik panel eğim açısında maksimum elektrik enerjisi üreteceği, bu açı ile barajın %10'luk alanının kullanılması ile 576,4 MW PV sistemi kurulabileceği ve bu gücün yılda 802,4 GWh elektrik üretimi yapacağı tespit edilmiştir.

Yüzer GES'lerin elektriğin yoğun olarak kullanıldığı saatlerde enerji ihtiyaçlarını karşılamak, ayrıca hidroelektrik enerjisinden tasarruf sağlamak bir fırsat olarak değerlendirilmelidir. Yamula Barajında kurulması öngörülen yüzer GES ile en düşük Aralık ayında en yüksek Temmuz ayında üretimin gerçekleşebileceği anlaşılmaktadır (Bkz. Tablo 2). Bu ise Yamula barajı elektrik üretiminin kışın yağışların fazla olması nedeniyle artacağı, yazın ise kurak ve buharlaşma olması nedeniyle düşeceği, bu durum ise yüzer GES için elektrik arzında alternatif bir dengeleme unsuru olarak ortaya çıkacaktır.

Yamula Barajına kurulacak olan yüzer GES'in barajın minimum su seviyesi alanının sadece %10'unun kullanılması halinde hidroelektrik santralden 2,28 kat daha fazla elektrik üretimi gerçekleşeceği öngörülmektedir.

Yamula Barajına kurulacak olan yüzer GES ile yılda 378.336,3 tCO<sup>2</sup> emisyonu önlenecektir.

Hidroelektrik santral olan barajlarda yüzer GES'in iletim hattına yakınlığı sistemin kurulumuna olumlu yönde etki edecektir.

Sonuç itibariyle; yüzer GES'lerin genel olarak elektrik üretimi ile beraber sera gazı emisyonuna olumlu etkisinin olduğu ve dolayısıyla ülkemizdeki barajlarda kullanımının teşvik edilmesine yönelik düzenlemelerin yapılmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Ülkemiz barajlarında GES sistemi ile elektrik üretimi ve kullanımının henüz bulunmayışı ve sadece hidrolik santralin, tarım üretiminde sulama, balık üretimi ve teknelerle yolcu taşımacılığı amacıyla faydalandığı düşünüldüğünde, bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, barajlarla ilgili GES sistemi konusunda bilimsel çalışma yapılmasına gereksinim olduğu görülmüştür.

#### SEMBOLLER VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

$A_B$	Barajın minimum işletme kotundaki göl alanı [m <sup>2</sup> ]	$N$	PV panel sayısı
$A_{GES}$	Baraja kurulacak yüzer GES alanı [m <sup>2</sup> ]	$P$	PV panel gücü (W)
$A_{HPV}$	PV panelin kapladığı alan [m <sup>2</sup> ]	$P_{GES}$	Toplam kurulu güç (W)
$b$	PV panel genişliği [m]	$PV$	Fotovoltaik
$d$	İki PV panel arası mesafe [m]	$\alpha$	PV panelin eğim açısı [°]
$GEPA$	Güneş Enerji Potansiyeli Atlası	$\beta$	Panele gelen rüzgâr yön açısı [°]
$GES$	Güneş enerji santralleri	$\theta$	Güneş yükseklik açısı [°]
$GS$	Güneş saati [h]	$\delta$	Deklinasyon açısı [°]
$GSA$	Küresel Güneş Atlası	$\varphi$	PV panelin bulunduğu konumun enlem açısı [°]
$L$	PV panel boyu [m]	$\omega$	Saat açısı [°]
$n$	Yılbaşından itibaren gün sayısı		

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İnternet: “International Renewable Energy Agency”, <https://www.irena.org/publications/2021/Jul/Offshore-Renewables-An-Action-Agenda-for-Deployment>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [2] İnternet: Hopson, C, “Floating Solar Going Global With 10GW More by 2025: Fitch. Recharge”, [www.rechargenews.com/transition/floating-solar-going-globalwith-10gw-more-by-2025-fitch/2-1-894336](http://www.rechargenews.com/transition/floating-solar-going-globalwith-10gw-more-by-2025-fitch/2-1-894336), Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [3] İnternet: Haugwitz, F, “Floating Solar PV Gains Global Momentum. PV Magazine”, [www.pv-magazine.com/2020/09/22/floating-solar-pv-gains-global-momentum](http://www.pv-magazine.com/2020/09/22/floating-solar-pv-gains-global-momentum), Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [4] Trapani, K., and Millar, D.L. (2013). Proposing Offshore Photovoltaic (PV) Technology to The Energy Mix of The Maltese Islands. *Energy Conversion Management*, 67, 18–26.
- [5] Ferrer-Gisbert, C., Ferrán-Gozálvez, J.J., Redón-Santafé, M., Ferrer-Gisbert, P., Sánchez-Romero, F.J. and Torregrosa-Soler, J.B. (2013). A New Photovoltaic Floating Cover System for Water Reservoirs. *Renewable Energy*, 60 (C), 63-70.
- [6] Trapani, K., Millar, D.L. and Smith, H.C.M. (2013). Novel Offshore Application of Photovoltaics in Comparison to Conventional Marine Renewable Energy Technologies. *Renewable Energy*, 50, 878-879.
- [7] Golroodbari, S.Z. and van Sark, W. (2020). Simulation of Performance Differences Between Offshore and Land-Based Photovoltaic Systems Progress in Photovoltaics Research Applications, 28, 873-886.
- [8] Tina, G.M., Scavo, F.B., Merlo, L. and Bizzarri, F. (2021). Comparative Analysis of Monofacial And Bifacial Photovoltaic Modules for Floating Power Plants. *Applied Energy*, 281, 116084. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116084>
- [9] Liu H., Krishna V., Leung J.L., Reindl T. and Zhao L. (2018). Field Experience and Performance Analysis of Floating PV Technologies in The Tropics. *Progress in Photovoltaics*, 26(12): 957- 967. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.3039>
- [10] Choi Y-K. (2014). A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact. *International Journal Software Engineering Applied*, 8, 75- 84.
- [11] Ryu, D.G. and Lee, K.B. (2019). Flow Characteristics and Wind Loads on The Solar Panel and Floating System of Floating Solar Generato. *Journal Korea Academia Industrial Cooperation Society*, 20, 229–235.
- [12] Yıldız, C. ve Akgül M.A. (2020). PV Açık Deniz Santralleri: Güney Türkiye Denizleri için Üretim Kapasitelerinin İncelenmesi. Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Kongresi, Şanlıurfa, 102–105.
- [13] Yıldız, C., “PV Açık Deniz Santralleri: Tasarım çalışması”, Yüksek Lisans Tezi, Yeditepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [14] Cazzaniga, R., Cicu, M., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G.M. and Ventura, C. (2018). Floating photovoltaic plants: Performance Analysis and Design Solutions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1730–1741.
- [15] İnternet: “Yeraltı Haber”, <https://www.yeraltihaber.com/haber/yuzer-gunes-panelleri-barajlarda-kurakligi-onleyecek-1249>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [16] Rosa-Clot, M. and Tina, G.M. (2017). *Submerged and Floating Photovoltaic Systems: Modelling Design and Case Studies*, London, Academic Press.

- [17] Sharma, A.K. and Kothari, D.P. (2016). Floating Solar PV Potential in Large Reservoirs in India, *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2 (11), 2349-6010.
- [18] Folkers, W., van Sark, W., de Keizer, C., van Hooff, W., van den Donker, M. (2017). Roadmap PV Systems and Applications, TKI Urban Energy.
- [19] Melvin G.K.X. (2015). Experimental Study of The Effect of Floating Solar Panels on Reducing Evaporation in Singapore Reservoirs., Engineering Department of Civil and Environmental Engineering of University of Singapore, A Thesis Submitted for the Degree of Bachelor of Engineering.
- [20] İnternet: “Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı”, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [21] İnternet: “Ciel & Terre International, Floating Solar Plants References”, <https://www.ciel-terre.net/our-references/>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [22] Lee, N., Grunwald, U., Rosenlieb, E., Mirletz, H., Aznar, A., Spencer, R. and Cox, S. (2020). Hybrid Floating Solar Photovoltaics-Hydropower Systems: Benefits and Global Assessment of Technical Potential. *Renewable Energy*, 162, 1415-1427.
- [23] İnternet: “Elektrik Üretim A.Ş., EÜAŞ Yıllık Raporu 2020”, <https://www.euas.gov.tr/tr-TR/yillik-raporlar>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [24] İnternet: “Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.”, <https://seffaflik.epias.com.tr>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [25] İnternet: “Kayseri ve Civarı Elektrik Türk A.Ş.”, <https://www.kcetas.com.tr/bolgemizde-tuketilen-enerji-miktarlari/>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [26] İnternet: “World Bank Group”, <https://globalsolaratlas.info/map?c=11.609193,8.261719,3>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [27] Vasarevicius, D., & Martavicius, R. (2011). Solar İrradiance Model for Solar Electric Panels and Solar Thermal Collectors in Lithuania. *Electronics and Electrical Engineering*, 108, (2), 3-6.
- [28] Joo, H.J., Lee, N.H. and Lee, S.W. (2013). Floating Photovoltaic Power Generation System. *The magazine of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 4, 31–39.
- [29] Trapani, K. and Millar, D.L. (2013). Proposing Offshore Photovoltaic (PV) Technology to The Energy Mix of The Maltese Islands. *Energy Conversion Management*, 67, 18–26.
- [30] Oh, J.S. and Jang, J.H. (2018). A Study on The Installation Angle of The Marine Solar Power Generation System. *Journal of Navigation Port Research*, 42, 167–176.
- [31] Durković V, Đurišić Ž. (2017). Analysis of The Potential for Use of Floating PV Power Plant on The Skadar Lake for Electricity Supply of Aluminium Plant in Montenegro. *Energies*, 10(10), 1505.
- [32] Chou, C-C., Chung, P-H. and Yang, R-Y. (2019). Wind Loads on a Solar Panel at High Tilt Angles. *Applied Sciences*, 9(8), 1594, <https://doi.org/10.3390/app9081594>
- [33] İnternet: “Çevre ve Şehircilik Bakanlığı”, <https://webdosya.csb.gov.tr/db/kayseri/webmenu/webmenu13251.pdf>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [34] İnternet: “The RETScreen Clean Energy Management Software”, <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.

- [35] Martin, K. (2021). Environmental and Financial Analysis of Solar Swimming Pool Heating System for 3 Different Regions of Turkey Using RETScreen Clean Energy Management Software. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9 (3), 505-515. doi: 10.29109/gujsc.982564
- [36] İnternet: “Tarım ve Orman Bakanlığı”, <https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/KonuIcerik/767/1115/DosyaGaleri/yamula-baraj-golu-limnolojisi.pdf>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [37] Kumar A., Purohit I. and Kandpal T.C. (2021). Assessment of Floating Solar Photovoltaic (FSPV) Potential in India. Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Energy Research. Springer Proceedings in Energy, Singapore, 973-982. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5955-6\\_93](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5955-6_93)
- [38] İnternet: “Abuşka, M. Güneş Enerjisi ve Uygulamaları Ders Notları”, <https://docplayer.biz.tr/2698177-Yrd-doc-dr-mesut-abuska.html>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.