

Yüzen Güneş Enerjisi Sistemlerinin İncelenmesi, Çevresel Katkıları ve Türkiye'deki Barajların Yüzen Güneş Enerjisi Potansiyeli

Investigation of Floating Solar Systems, Environmental Benefits and The Floating Solar Energy Potential of Dams in Turkey

Hüseyin ŞENLİ¹ 

¹Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye

Öz

Artan nüfus ve sanayileşme sebebiyle ihtiyaç duyulan enerji miktarı da sürekli artmaktadır. Bu enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan fosil yakıtlar çevre kirliliğine sebep olmakta ve giderek azalmaktadır. Tam bu noktada yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, su kaynakları üzerinde yenilenebilir enerji üretimine olanak sağlayan yüzen güneş enerjisi sistemleri incelenmiştir. Bu sistemlerin genel yapısından, uygulamalarından, olumlu ve olumsuz yönlerinden ve çevreye sağladığı faydalardan bahsedilmiştir. Kurulumu için bir araziye ihtiyaç duyulmayan yüzen güneş enerjisi sistemleri kısıtlı araziye sahip bölgeler için önemli hale gelmektedir. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olması CO₂ ve diğer zararlı gazların salınımını azaltmaktadır. Suyun soğutma özelliği sayesinde karasal sistemlere kıyasla daha fazla enerji üretimini mümkün kılmaktadır. Kuruldukları su kaynaklarında buharlaşma ile kaybolan su miktarını azaltmakta, gölgeleme etkisi sayesinde alglerin çoğalmasına engel olarak su kalitesini ve temizliğini arttırmaktadır. Enerji üretimi, içme, sulama suyu temini ve taşkın korunma sağlayan barajlar üzerine kurulacak bu yüzen güneş enerjisi sistemleri ile barajlar üzerinde yeni bir enerji kaynağı oluşturulması ve baraj sularının buharlaşma ile kaybının azaltılması sağlanabilmektedir. Türkiye'deki en büyük 5 baraj gölüne kurulacak farklı büyüklüklerdeki yüzen güneş enerjisi sistemleri ile üretilebilecek enerji miktarları ve buharlaşma ile kaybı önlenen su miktarları hesaplanmıştır. Baraj göllerinin yüzey alanlarının %0,1, %0,5 ve %1'ine kurulacak yüzen güneş sistemleri ile sırasıyla toplam 414,47 GWh, 2072,36 GWh ve 4144,72 GWh enerji üretilebileceği ayrıca 1,58x10⁶ m³/yıl, 7,88x10⁶ m³/yıl ve 15,75x10⁶ m³/yıl suyun buharlaşma ile kaybının önlenebileceği hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Barajlar, Buharlaşma, Su Kaynakları, Yenilenebilir Enerji, Yüzen Güneş Enerjisi Sistemleri

Abstract

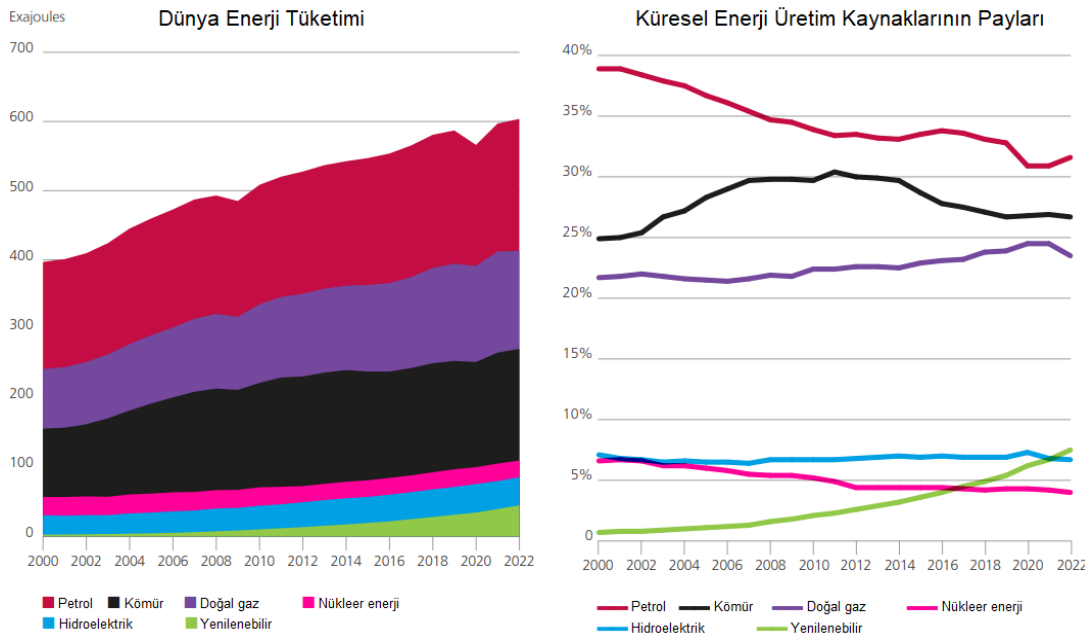
Due to the increasing population and industrialization, the amount of energy needed is also increasing. Fossil fuels meet most of energy need, are gradually decreasing and cause environmental pollution. At this point, renewable energy sources take over. In this paper, floating solar energy systems that enable renewable energy generation on water sources were researched. The general structure of these systems, their applications, advantages and disadvantages and their benefits to the environment were mentioned. Floating solar systems, which do not need land to install, are becoming important for regions with limited land. Being a renewable energy source reduces the release of CO₂ and other toxic gases. Owing to the cooling effect of the water, it makes it possible to generate more energy compared to terrestrial systems. These systems decrease the amount of water loss by evaporation and increases water quality by preventing the growth of algae by shading effect. With floating solar energy systems that will be installed on dams that provide energy, drinking, irrigation water supply and flood protection, it is possible to create a new energy source on the dams and reduce the loss of dam water by evaporation. It has been calculated that by floating solar systems to be installed on 0,1%, 0,5% and 1% of the surface areas of the 5 largest dam lakes in Turkey, total 414,47 GWh, 2072,36 GWh and 4144,72 GWh energy can be generated, respectively, also 1,58x10⁶ m³/year, 7,88x10⁶ m³/year and 15,75x10⁶ m³/year the loss of water by evaporation can be prevented.

Keywords: Dams, Evaporation, Water Resources, Renewable Energy, Floating Solar Energy Systems

I.GİRİŞ

Her geçen gün Dünya'nın enerji ihtiyacı artan nüfus ve endüstriyel gelişmeler sebebiyle artmaktadır. Bu enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğunu karşılayan fosil yakıtlar ise hızla tükenmekte olup bunun yanı sıra bu yakıtlar CO₂ gibi sera gazları salınımından ötürü çevreye birçok zarar vermektedir. Aynı zamanda iklim değişiklikleri ve küresel ısınmaya sebep olan faktörlerin başında yer almaktadır. Bu sebeple enerji ihtiyacını çevre dostu ve temiz bir şekilde karşılayabilmek amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim hızla artmaktadır. Yıllardır bu enerji kaynaklarını teşvik edici birçok çalışma yapılmış, uluslararası anlaşmalar (Kyoto Protokolü vb.)

imzalanmıştır. Dünya'da 2022 yılı birincil enerji kaynaklarının paylarına bakıldığında petrol %32, kömür %26,6, gaz %23,4, yenilenebilir %7,5, hidrolik enerji %6,3 ve nükleer %4 olarak açıklanmıştır [1]. Türkiye 2022 yılı verilerine göre birincil enerji arzındaki dağılım ise %30,8 doğal gaz, %28 petrol, %25,5 kömür, %3 hidrolik enerji ve %12,6 diğer yenilenebilir kaynaklar (güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle) şeklinde gerçekleşmiştir (TMMOB Makine 2023 sunum) [2]. Enerji dağılımları göz önüne alındığında %80'e varan orana sahip fosil yakıtlar enerji üretiminde çok yüksek bir paya sahiptir. Dünya genelinde enerji kaynaklarına göre tüketilen enerji miktarları ve birincil enerji üretim kaynaklarının payları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Dünya enerji tüketimi ve enerji üretim kaynaklarının payları [1]

Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, hidrolik enerji, hidrojen enerjisi ve dalga enerjisi olarak sınıflandırılmaktadır [3]. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında; Dünya genelinde yenilenebilir enerji üretim kapasitesinde yüksek bir paya sahip olan güneş enerjisi sistemlerinin üretim kapasiteleri 2022 yılı verilerine göre 1053115 megawatts (MW) hesaplanmıştır [1]. Türkiye'de ise 2022 verilerine göre güneş enerjisine dayalı kurulu güç 8476 MW olarak verilmiştir. Bu da toplam kurulu gücün %8,35'ine denk gelmektedir [4].

Güneş enerjisi sistemleri, güneşten gelen ışınları fotovoltaik (FV) paneller aracılığıyla elektrik enerjisine ve termal enerjiye dönüştürmektedir. Fotovoltaik sistemler kurulumlarına göre 5 gruba ayrılmıştır. Bunlar toprak üstü/karasal sistemler, çatı üstü sistemler, kanal üstü sistemler, açık deniz sistemleri ve su kütleleri üzerine kurulan yüzen sistemlerdir [5].

Karasal sistemlerde paneller çelik veya beton ayaklar vasıtasıyla zemine monte edilir. En çok uygulaması

bulunan sistem türüdür. Çatı üstü sistemler konut veya ticari yapıların çatılarına yerleştirilen panellerden oluşmaktadır. Kanal üstü sistemler genellikle tarımsal arazilerde bulunan sulama kanalları üzerine kurulan ilave bir araziye ihtiyaç duymayan sistemlerdir. Açık deniz sistemleri güneş ışınlarını tam olarak almaya olanak sağlayan deniz ve okyanus üzerine kurulan sistemlerdir. Yüzen sistemler ise bir araziye ihtiyaç duymadan mevcut su kaynakları üzerine kurulan güneş enerjisi sistemleridir.

Bu çalışmada su kütleleri (göl, gölet, baraj gölü, lagün, sulama havuzları, su arıtma tesisleri, rezervuarlar vb.) üzerine kurulan yüzen güneş enerjisi sistemlerinin genel yapısı, uygulamaları, avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Üzerine kuruldukları su kaynaklarına ve çevreye ne gibi olumlu etkileri olduğunu anlatmak amaçlanmıştır. Ayrıca büyük bir su yüzey alanına sahip Türkiye barajlarına kurulacak

yüzen güneş enerjisi sistemlerinin potansiyelinden bahsedilmiştir. Bu sistemlerin barajlar üzerinde üretebileceği yenilenebilir enerji ve barajların su kaynaklarının korunmasına katkıları üzerine çalışılmıştır.

II. YÜZEN GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

Yüzen güneş enerjisi sistemleri (YGES), temiz ve yenilenebilir enerji üretimine olanak sağlayan ve bunun için bir araziye ihtiyaç duyulmayan fotovoltaik sistemlerdir. Bu sistemler; göller, göletler, lagünler, barajlar, kanallar, sulama havuzları, su arıtma tesisleri vb. gibi birçok su kütlesi üzerine kurulabilmektedir. Ayrıca suyun soğutma etkisi sayesinde karasal sistemlere göre daha fazla enerji üretebilmekte, su yüzeyine yaptığı gölgeleme sayesinde buharlaşma ile kaybedilen su miktarını azaltmaktadır.

2.1. Yüzen Güneş Enerjisi Sistemlerinin Bileşenleri

Karasal güneş enerjisi sistemlerine benzer bir şekilde yüzen sistemlerde de güneş panelleri, kablolar ve güç çeviricilerinden oluşmaktadır. Bunlara ek olarak panellerin su üzerinde kalmasını sağlayan yüzen bir platform ve yüzen platformun serbestçe hareketini engelleyen bağlama sistemleri bulunmaktadır. Yüzen

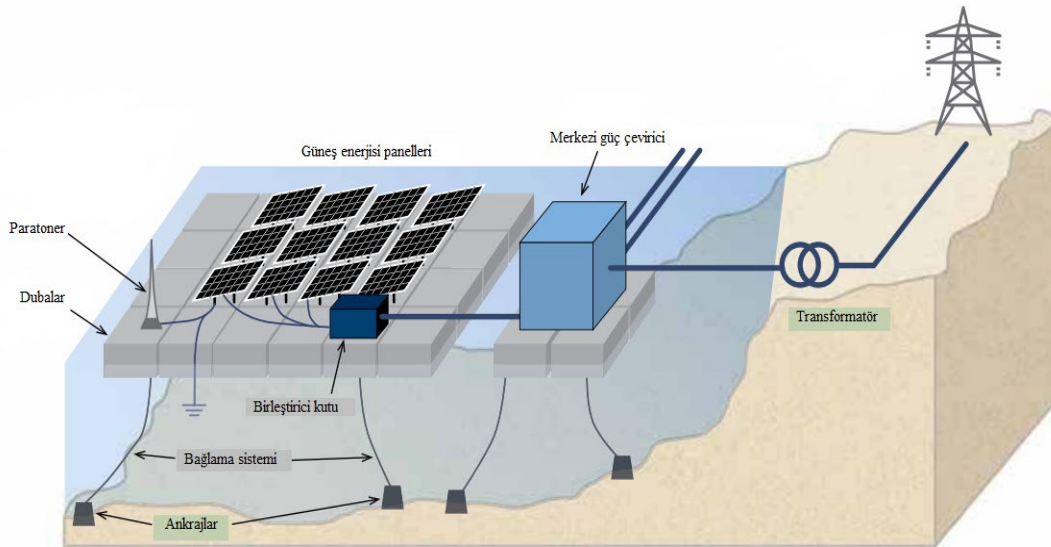
güneş enerjisi sistemleri bileşenleri aşağıdaki gibi gruplandırılmıştır [6].

Dubalar: Birçok şamandıranın bir araya getirilmesi oluşturulan dubalar sistemi yüzdürme görevi üstlenmektedir. Dubalar, bakım gerektirmeyen, UV ve korozyon direncine sahip ve geri dönüştürülebilir bir malzeme olan yüksek yoğunluklu polietilenden (HDPE) üretilmektedir. Sistemin mekanik ve elektriksel aksamı da bu yüzen platformlara monte edilmektedir.

Bağlama sistemi: Bağlama sistemi yüzen platformları aynı konumda tutmakta ve serbestçe hareket etmelerini önlemektedir.

Güneş enerjisi modülü: Güneş ışınlarını enerjiye dönüştüren bu panellerde standart kristal güneş enerjisi modülleri kullanılmaktadır. Yüksek nemli bölgelerde ve tuzlu su üzerindeki sistemlerde korozyonu önlemek adına korozyona dayanıklı malzemeler tercih edilmelidir.

Kablolar ve konektörler: Panellerde üretilen enerjiyi güç çeviricilere kablolar ve konektörler iletmektedir. Kablolar su geçirmez ve UV ışınlarına dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır.

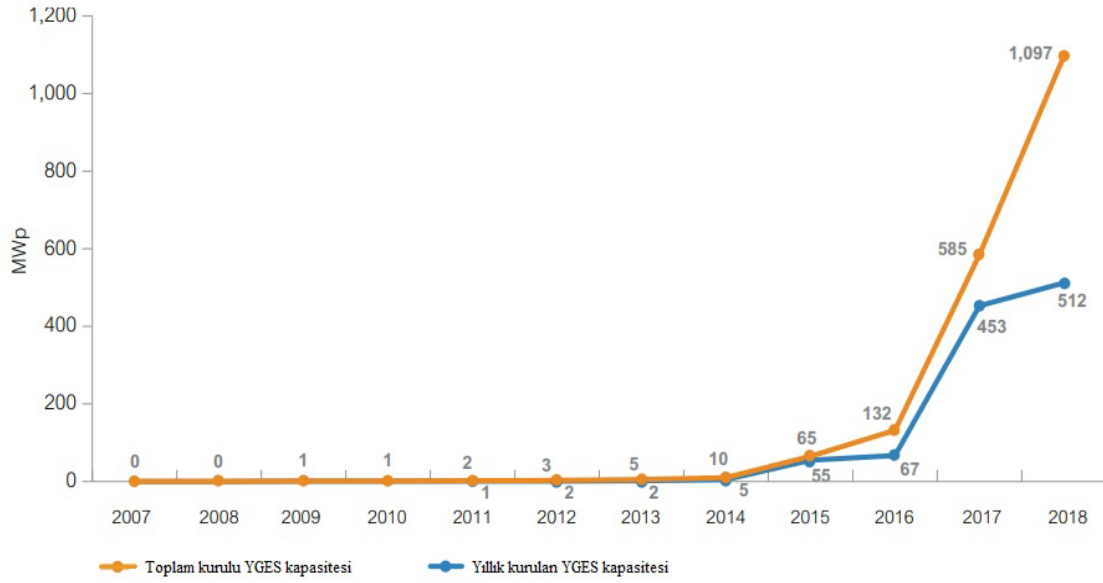


Şekil 2. Tipik bir yüzen güneş enerjisi sistemi şematığı (World Bank, ESMAP, SERIS) [7]

2.2. Yüzen Güneş Enerjisi Sistemi Uygulamaları

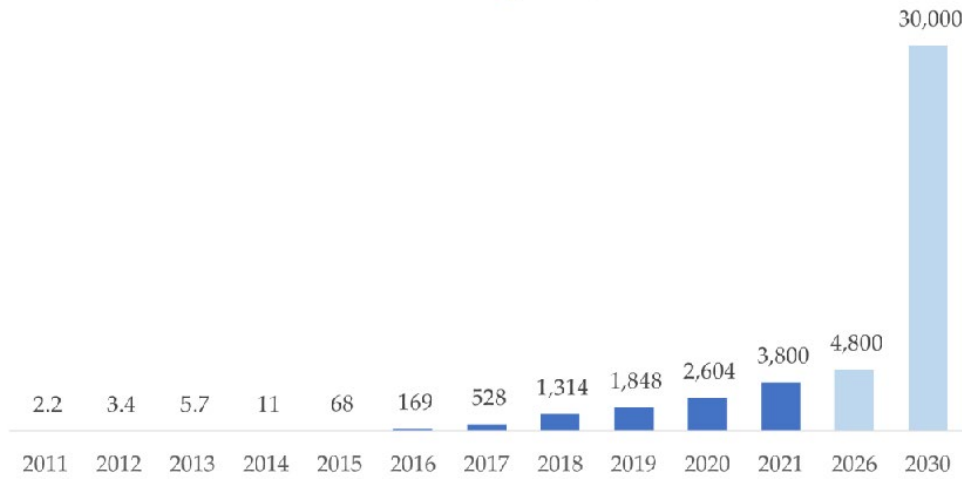
Yüzen güneş enerjisi sistemleri yeni sayılabilecek bir fikir olmasına karşın çevre dostu ve verimli bir enerji kaynağı olması, teknolojinin hızla gelişmesi, devletlerin yenilenebilir enerji faaliyetlerine

yönelinin ve teşviklerinin artması YGES'lere olan talebi de her geçen gün arttırmaktadır. Dünya genelinde YGES kapasitelerindeki yıllara göre artışı ve ileriki yıllarda öngörülen YGES kapasiteleri Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Dünya genelinde kurulu yüzen güneş enerjisi sistem kapasitelerinin yıllara göre değişimi (World Bank, ESMAP, SERIS) [7]

DÜNYA GENELİ YÜZEN GÜNEŞ ENERJİSİ KAPASİTESİ (MW)



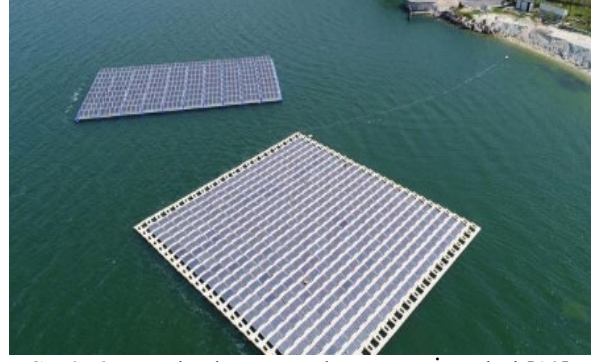
Şekil 4. Dünya genelinde yıllara göre mevcut ve ileriki yıllarda öngörülen yüzen güneş enerjisi kapasiteleri [8]

Yüzen güneş enerjisi sistemleri ile ilk patent girişimlerini Japon, İtalyan, Amerikan, Fransız ve Dan şirketler yapmıştır. İlk YGES yapımı 2007 yılında Japonya'nın Aichi şehrinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra İtalya, Kore, İspanya, Amerika gibi birçok ülkede de çalışmalar yapılmıştır. Bu projeler küçük ölçekli ve araştırma amacı güden projeler olmuştur. İlk ticari

YGES Amerika'da Oakville şehrinde Far Niente şarap imalathanesindeki bir rezervuar üzerine 2008 yılında kurulmuştur ve 175 kW kapasitesindedir [9]. Türkiye'de ilk YGES örneği 2017 yılında Büyükçekmece Gölü üzerinde hayata geçirilmiş olup 240 kW güce sahiptir [10].



Şekil 5. Far Niente şarap imalathanesi YGES, California [11]



Şekil 6. Büyükçekmece Gölü YGES, İstanbul [10]

Son 5 yılda yüzen güneş enerjisi sistemlerine yatırımların artmasıyla birlikte yapılan projeler daha büyük ölçekli projeler haline gelmekte sistemlerin güç kapasiteleri de büyük ölçüde artmaktadır. Bu sistemlere en büyük ilgiyi Asya ülkeleri (Japonya, Çin, Kore, Hindistan) göstermektedir. Kurulu güç kapasitesinin çok büyük bir kısmı bu bölge üzerindedir. Aşağıda kapasitelerine göre yapımı süren veya tamamlanmış olan en büyük 10 YGES projesi listelenmiştir [12].

1. Saemangeum floating solar energy project – 2.1 GW, Güney Kore, 2023
2. Omkareshwar Dam floating solar farm – 600 MW, Hindistan, 2023
3. Hangzhou Fengling Electricity Science Technology's solar farm – 320 MW, Çin, 2020
4. Three Gorges New Energy's floating solar farm – 150 MW, Çin, 2018
5. Cirata Reservoir floating photovoltaic power project – 145 MW, Endonezya, 2020
6. NTPC Kayamkulam solar project – 105 MW, Hindistan, 2019
7. NTPC Ramagundam solar power plant – 100 MW, Hindistan, 2020
8. CECEP's floating solar project – 70 MW, Çin, 2019
9. Sembcorp's Tuas floating solar project – 60 MW, Singapur, 2020
10. Hapcheon Dam floating PV power plant – 41 MW, Güney Kore, 2020

III. YÜZEN GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde yüzen güneş enerjisi sistemlerinin teknolojik, ekonomik ve çevresel olarak ne gibi olumlu yönlerinin olduğundan ve olası olumsuz yönlerinden bahsedilmiştir.

3.1. Olumlu Yönleri

- a) Arazi ihtiyacı duyulmadan mevcut su kaynakları üzerine kurulabilmektedir. Herhangi bir tarım veya orman arazisi kaybına sebebiyet vermemektedir. Toprak kıtlığı çekilen bölgelerde temiz enerji üretmek adına iyi bir seçenektir.
- b) Genel olarak hafif bir yapıya olması ve beton veya çelik bir temele sahip olmaması sayesinde kurulumu kolaydır. Ayrıca gerektiği durumlarda döndürülebilmektedir.
- c) Fotovoltaik panellerin aşırı ısınma hallerinde verimliliği düşmektedir. Yüzen güneş enerjisi sistemlerinde suyun panelleri soğutması %15'e varan enerji üretim artışı sağlamaktadır. Yapılan bir çalışmaya göre yüzen sistemlerin karasal sistemlere kıyasla %11 daha fazla enerji ürettiği tespit edilmiştir [13].
- d) Kurulduğu su kaynağında su yüzeyinin güneş ve hava ile temasını keserek suyun ısınmasını önler ve buharlaşma ile oluşan su kaybını azaltır. Buharlaşmayı doğal göllerde %33, yapay göllerde %50 azalttığı gözlemlenmiştir [5]. Sulama kanalları ve küçük akarsularda ise buharlaşmada %70'e varan düşüşler gerçekleşebilmektedir [14].
- e) Sistemin gölgeleme etkisi suyun ışıkla temasını keserek alg oluşumunu azaltmakta dolayısıyla su kirliliği azalmakta, su kalitesi artmaktadır [13].
- f) Barajlar, sulama kanalları ve havuzları vb. gibi halihazırda işlevselliği bulunan su kütleleri üzerine kurularak enerji üretimi sağlanıp işlevsellikleri artırılabilir.
- g) Yenilenebilir bir enerji kaynağı olması sayesinde CO₂ salınımı önlenmektedir.
- h) Tatlı su kaynakları üzerine kurulan sistemlerde panel temizliği için gerekli olan su üzerinde bulunduğu kaynaktan karşılanabilmekte ve panellerin enerji verimliliği artırılabilir [16].

3.2. Olumsuz Yönleri

- a) Yüksek ilk kurulum ve bakım maliyetine sahiptir. Karasal sistemlere kıyasla yüzen sistemler daha maliyetlidir. Maliyetler ülkeye ve projeye göre

- değişiklik göstermektedir. Ancak bu fiyat farkı gün geçtikçe azalmaktadır.
- Kurulumu rijit bir şekilde gerçekleştirilen karasal sistemlerle karşılaştırıldığında yüzen platformlar ne kadar sabitlenseler de su üzerinde hareketli bir yapıda olduklarından dolayı kırılmalara sahip paneller hasar alabilir.
 - Sabit bir yapıya sahip olmamasından ötürü zorlu hava şartlarında hasar alabilir.
 - Elektriğin su yüzeyinden karaya iletimi sırasında güvenlik sorunları yaşanabilir [16].
 - Yüksek nem ve tuz faktörü sistem verimliliğini etkileyebilmekte ayrıca korozyona sebep olabilmektedir [16].
 - Yüzen platformların plastik esaslı oluşu su kalitesini düşürebilmektedir [5]. İçme ve sulama suyu olarak kullanılan kaynaklarda plastik esaslı dubalardan ayrışacak mikroplastiklerin arıtılması için fiziksel (kum filtre, disk filtre vb.), kimyasal (koagülasyon/flokülasyon, adsorpsiyon, fotodegradasyon vb.) veya biyolojik (klasik aktif çamur, MBR vb.) arıtma sistemlerine ihtiyaç duyulabilir [17]. Bu da ekstra zahmet ve maliyet getirmektedir.
 - Balıkçılık ve ulaşım faaliyetlerine kurulu olduğu alanda engel olabilir [5].
 - Uzun vadede su ekosisteminde farklılıklar gözlemlenebilir [5].

IV. YÜZEN GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN ÇEVREYE OLAN KATKILARI

Dünya'nın enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğunu karşılayan fosil yakıtlar bu süreçte havaya CO₂ ve birçok zehirli gaz salınımı yaparak hava kirliliğine sebep olmaktadır. Yıllardır artarak devam bu kirlilik küresel ısınmaya ve iklim değişikliklerine sebep olmaktadır. 2021 verilerine göre Dünya genelinde 37124 milyon ton CO₂, Türkiye'de ise 446 milyon ton CO₂ salınımı gerçekleşmiştir [18]. CO₂ salınımı her geçen artmaya devam etmektedir. Yenilebilir bir enerji kaynağı olan yüzen güneş enerjisi sistemleri de temiz ve çevre dostu enerji üretimine olanak sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda güneş enerjisi sistemlerinin salınan CO₂ miktarını 0,5-1 kg/kWh aralığında azalttığı raporlanmıştır [19, 20]. Kore'de yapılan bir proje göstermiştir ki 1 MW kapasitesindeki YGES projesi ile 971 MWh enerji üretimi yapıldığı ve havanın yıllık 471,21 ton CO₂'ten korunduğu tespit edilmiştir [21].

Dünya'nın %71'i sularla kaplıdır. Bu suyun %97,5'u tuzlu su, %2,5'u ise tatlı sudur. Ancak tatlı suyun sadece %0,5'i kullanılabilir durumdadır [22]. Kullanılabilir suyun yeryüzündeki temel kaynakları olan göllerden, barajlardan, nehirlerden her sene buharlaşma sebebiyle büyük ölçüde su kayıpları yaşanmaktadır. Avustralya'da yapılan bir çalışmaya göre açık bir rezervuarda bulunan suyun %40'ının buharlaşma sebebiyle kaybedilebileceği tespit edilmiştir [23].

Türkiye'de yapılan bir çalışmaya [24] göre su kaynaklarında yaşanan toplam su kaybının %90'ının buharlaşma kaynaklı olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada Türkiye'de ele alınan 352 su kaynağından (129 göl, 252 baraj ve rezervuar) buharlaşma sebebiyle yılda $6,8 \times 10^9$ m³ su kaybedildiği hesaplanmıştır. Bu miktar, yeraltı su kaynaklarından sağlanan su miktarından (6×10^9 m³) ayrıca evsel ($5,7 \times 10^9$ m³) ve endüstriyel (4×10^9 m³) kullanıma harcanan su miktarlarından bile fazladır [24]. YGES'ler bulunduğu su kaynağı yüzeyine yaptığı perdeleme etkisi ile güneş ışınları ve havayla temasını kesip suyu serin tutarak buharlaşma ile kaybedilen su miktarını azaltmaktadır. Buharlaşmayı doğal göllerde %33, yapay göllerde %50 oranında azaltabilmektedir [5]. Sulama kanalları ve küçük akarsularda ise buharlaşmada %70'e varan düşüşler sağlayabilmektedir [14].

Türkiye'de ilk YGES projesinin gerçekleştirildiği 43 km² yüzey alanına sahip Büyükçekmece Gölü'nden buharlaşma sebebiyle kaybedilen su miktarı yılda $24,977 \times 10^6$ m³ olarak verilmiştir [24]. Büyükçekmece Gölü'nün sadece %1'lik kısmına (0,43 km²) YGES kurulduğunu düşünürsek ve bu kurulu alandan buharlaşma ile yaşanan su kaybının %33 azaldığını varsayarsak (buharlaşmanın tüm yüzey alanında eşit olduğu kabul edilmiştir.) yılda $82,42 \times 10^3$ m³ su kaybı önlenmiş olur. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Türkiye'de bir kişi günlük ortalama 228 litre su tüketmektedir. Buna göre yılda tükettiği su miktarı 83,22 m³'e denk gelmektedir. Buharlaşma ile kaybı önlenen su miktarı ($82,42 \times 10^3$ m³), bir kişinin yıllık su tüketim miktarına (83,22 m³) bölündüğünde 990 kişinin yıllık su ihtiyacını karşılayacak kadar suyun buharlaşma yoluyla kaybının önlenebileceği görülür.

Ayrıca YGES'ler su yüzeyine yaptığı gölgeleme etkisiyle su kirliliğine sebep olan, birçok endüstriyel ve tarımsal faaliyette zorluk çıkaran alg popülasyonunu düşürerek su kalitesini ve temizliğini arttırmaktadır.

V. TÜRKİYE BARAJLARININ YÜZEN GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ

Türkiye'de artan nüfus ve gelişen sanayi ile birlikte enerji ve su tüketimi giderek artmaktadır. Enerji üretiminin büyük bir kısmını tükenmekte olan fosil yakıtlar ile gerçekleştiren Türkiye, sanıldığı kadar aksine su zengini bir ülke konumunda da değildir. Türkiye'de 2022 yılı verilerine göre 328,9 TWh olan elektrik üretimi, 326,2 TWh olan elektrik tüketiminin gerisinde kalmıştır [25]. Ayrıca 112 milyar m³ (yer üstü 94 milyar m³, yer altı 18 m³) su potansiyeline sahip olan Türkiye, bu kullanılabilir su potansiyelinin 44 milyar m³'ünü sulamada, 13 milyar m³'ünü ise içme, kullanma ve sanayide kullanmaktadır. Kişi başına düşen kullanılabilir yıllık su miktarı 2000 yılında 1652 m³, 2009 yılında 1544 m³, 2020 yılında 1346 m³, 2022 yılında ise 1313 m³ olmuştur [26]. Görüldüğü üzere Türkiye her geçen sene su kıtlığı artan bir ülke haline gelmektedir. Bu bölümde enerji üretimi ve su temini olmak üzere iki temel amaca hizmet eden barajlara

kurulacak yüzen güneş enerjisi sistemlerinin Türkiye potansiyelinden bahsedilecektir.

Yer üstü su kaynaklarından biri olan barajlar enerji üretimi, içme-sulama suyu sağlama ve taşkın koruma gibi birçok amaca hizmet etmektedir. DSİ verilerine göre Türkiye 861 adet baraj ve 714 tane hidroelektrik santraline (HES) sahip olup bu HES'ler toplam 31384,18 MW kurulu güce sahiptir. Bu HES'ler sayesinde yılda 107801,82 GWh/yıl yenilenebilir enerji üretimi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca mevcut tüm barajlar 4189577 hektar alanın sulanmasını ve 3370,90 h³/yıl içme suyu temini sağlamaktadır [27].

Önemli su kaynaklarından olan baraj gölleri üzerine kurulacak yüzen güneş enerjisi sistemleri ile bu yapılar daha da işlevsel hale getirilebilmektedir. Su seviyesi değişimlerine uyum sağlayabilen YGES'lerin, HES'lerle kombinasyonu sayesinde hali hazırda yenilenebilir enerji üretimi sağlayan barajların güneş enerjisinden de faydalanarak çevre dostu enerji üretimi artırılabilir. Bunun yanı sıra YGES'lerin suda oluşturduğu gölgeleme sayesinde baraj suyunun serin kalması sağlanarak buharlaşma ile kaybedilen su miktarı %50 oranında azaltılabilmekte, bu sayede baraj göllerinin korunmasına katkı sağlanabilmektedir.

Türkiye'nin en büyük yüzey alanına sahip 5 baraj gölüne sahip olan Atatürk Barajı, Keban Barajı, Karakaya Barajı, İlsu Barajı ve Hirfanlı barajı ele alındığında bu barajlar üzerine kurulacak farklı yüzey alanlarına kurulacak YGES'lerin yaklaşık ne kadar enerji üretebileceği hesaplanmıştır.

Potansiyel YGES güçleri, maliyet-güç üretimi optimizasyonu göz önünde bulundurularak 2279x1134x35 mm boyutlarında 545 watt maksimum güce sahip monokristal fotovoltaik panellere göre ve diğer kullanım alanları kayıplarını da göz önüne alarak enerji üretimi sağlayan etkin alanın %75 olması kabulüyle belirlenmiştir. Üretilen yıllık enerji miktarları Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır [28, 29]. Enerji üretim miktarları iklim şartları, güneş alma süresi, arazi topoğrafyası, sistem hasar ve arızaları vb. gibi durumlara göre değişkenlik gösterebilmektedir.

$$E = A \times r \times H \times PR \quad (1)$$

E: yıllık enerji kapasitesi (kWh)

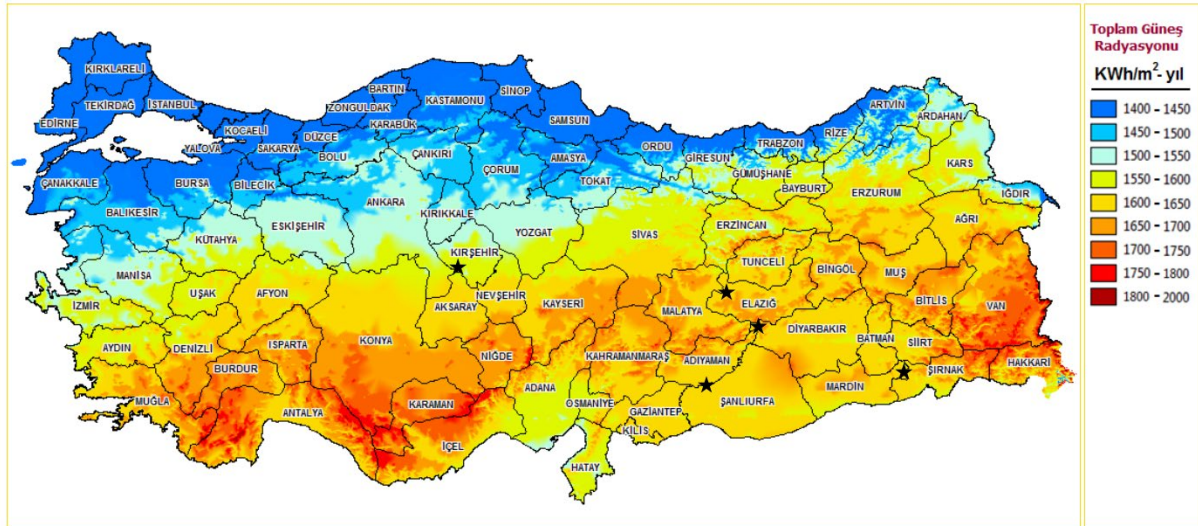
A: toplam güneş paneli alanı (m²)

r: güneş paneli verimliliği (%)

H= toplam yıllık güneş radyasyonu (kWh/m²)

PR= performans oranı (%)

Hesaplarda kullanılan 545 watt maksimum güce sahip monokristal fotovoltaik panellerin verimliliği %20'dir. Gölgeleme, tozlanma, yansıma, sıcak, ışınlım, kablo ve çevirici kayıpları vb. ile belirlenen performans oranı standart değer olan %75 olarak alınmıştır [29, 30]. Yıllık güneş radyasyon değerleri Enerji İşleri Genel Müdürlüğü [31] verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Yıllık güneş radyasyonu değerlerini gösteren harita Şekil 7'de gösterilmiştir.



*Yıldızlar barajların bulunduğu yerleri temsil etmektedir.

Şekil 7. Türkiye yıllık güneş radyasyonu haritası [31]

Hesaplanan potansiyel YGES güçleri ve yıllık enerji değerleri, mevcut olan HES kurulu güçleri ve yıllık

ortalama enerji değerleriyle birlikte Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye'nin en büyük yüzey alanına sahip 5 barajının mevcut HES ve potansiyel YGES kapasiteleri

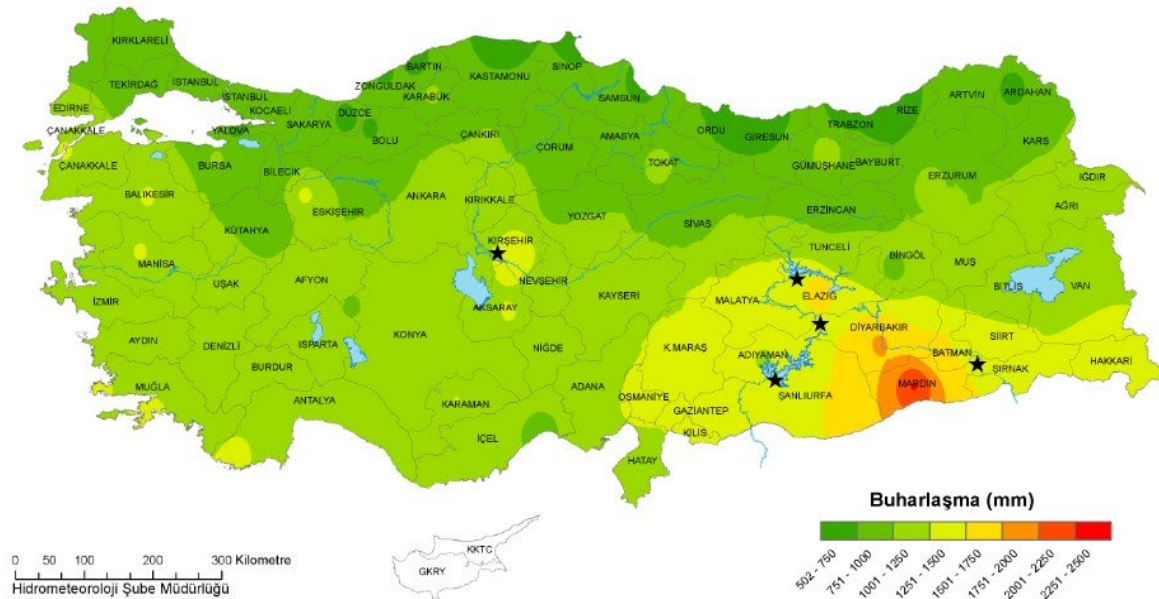
Baraj Adı	Bulunduğu Yer	Yüzey Alanı (km ²)	Mevcut HES Gücü (GW)	HES Yıllık Ort. Enerji (GWh/yıl)	Potansiyel YGES Gücü (GWp)			Ortalama yıllık güneş radyasyonu (H) (kWh/m ²)	Yıllık Ort. Enerji (GWh)		
					YGES alanı yüzdesi				YGES alanı yüzdesi		
					0,10%	0,50%	1%	0,10%	0,50%	1%	
Atatürk Barajı	Şanlıurfa	817	2,40	8900	0,13	0,65	1,29	1587,14	145,88	729,39	1458,78
Keban Barajı	Elâzığ	675	1,33	6600	0,11	0,53	1,07	1579,55	119,95	599,74	1199,47
İhsu Barajı	Mardin	313	1,20	4120	0,05	0,25	0,50	1585,17	55,82	279,09	558,18
Karakaya Barajı	Diyarbakır	268	1,80	7354	0,04	0,21	0,42	1596,27	48,13	240,64	481,28
Hirfanlı Barajı	Kırşehir	263	0,13	400	0,04	0,21	0,42	1510,81	44,70	223,51	447,01
Toplam		2336	6,86	27374	0,37	1,85	3,69	7858,94	414,47	2072,36	4144,72

Tabloda verilen 5 barajın HES'leri tarafından üretilen toplam 27374 GWh/yıl enerji ile yaklaşık 7400000 kişinin günlük tüm elektrik ihtiyacı (kişi başına günlük 3700 kW) karşılanabilmektedir. Buna ek olarak sadece %0,1'lik alana YGES kurulduğu da düşünülürse toplam 414,47 GWh/yıl daha fazla enerji üretimine olanak sağlanmış olur. Bu da 112018 kişinin daha günlük tüm elektrik ihtiyacının karşılanabileceği anlamına gelmektedir.

Son yıllarda küresel ısınmanın sebep olduğu iklim değişiklikleri ve kuraklıkla beraber bilinçsiz yapılan su tüketimi barajlardaki su miktarını ciddi anlamda düşürmektedir. Bunun yanı sıra buharlaşma sebebiyle

de büyük miktarlarda su kaybı yaşanmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi yüzen güneş enerjisi sistemleri kurulduğu alandaki su yüzeyini kaplayan bir perde görevi görerek suyu serin kalmasını sağlayıp buharlaşma ile kaybedilen su miktarını azaltmaktadır. Barajlar gibi yapay göllerde buharlaşmanın %50 oranında azaldığı gözlemlenmiştir [5].

Şekil 8' de verilen Türkiye açık yüzey buharlaşma normalleri haritasına göre ele alınan barajlar buharlaşmanın yoğun olduğu bölgelerde bulunmaktadır. Buharlaşma ile kaybedilecek su kaybının azaltılması bu bölgelerde daha büyük önem arz etmektedir.



*Yıldızlar barajların bulunduğu yerleri temsil etmektedir.

Şekil 8. Türkiye açık yüzey buharlaşma normalleri haritası [32]

Ele alınan barajlar için buharlaşma ile kaybolan yaklaşık su miktarları ve farklı alanlara sahip YGES'ler

sayesinde barajlardan buharlaşma ile kaybı önlenen tahmini su miktarları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Türkiye'nin en büyük yüzey alanına sahip 5 barajının yaklaşık buharlaşma değerleri ve YGES'lerle buharlaşması önlenen tahmini su miktarları

Baraj Adı	Bulunduğu Yer	Yüzey Alanı (km ²)	Yıllık Açık Yüzey Buharlaşma Normalleri (mm)	Yaklaşık Buharlaşma (10 ⁶ m ³ /yıl)	Buharlaşması Önlenen Tahmini Su Miktarı (10 ⁶ m ³ /yıl)		
					YGES Kurulu Yüzey Alanı Yüzdesi		
					0,1%	0,5%	1%
Atatürk Barajı	Şanlıurfa	817	1400	1143,80	0,57	2,86	5,72
Keban Barajı	Elâzığ	675	1300	877,50	0,44	2,19	4,39
İlisu Barajı	Mardin	313	1400	438,20	0,22	1,10	2,19
Karakaya Barajı	Diyarbakır	268	1400	375,20	0,19	0,94	1,88
Hirfanlı Barajı	Kırşehir	263	1200	315,60	0,16	0,79	1,58
Toplam				3150,30	1,58	7,88	15,75

*Buharlaşma değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2022 yılı açık yüzey buharlaşma değerlendirmesi [32] ve [24]'deki verilerden faydalanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 2'den görüldüğü üzere toplam yüzey alanının %0,1'lik kısmına kurulacak YGES ile 1,58x10⁶ m³/yıl suyun buharlaşma ile kaybının önlenebileceği tahmin edilmektedir. Bu değer 2022 yılı kişi başına düşen yıllık su miktarına (1313 m³) oranlandığında 1203 kişiye denk gelen su miktarı kadar suyun buharlaşma ile kaybı önlenebileceği görülmektedir.

VI. SONUÇ

On yılı aşkın süredir su kaynaklarına kurulan yüzen güneş enerjisi sistemleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Çok yönlü, işlevsel, verimli, uygulanabilir ve çevreci bir enerji sistemi olması yüzen güneş enerjisi sistemlerini öne çıkarmaktadır.

Herhangi bir kara parçasına ihtiyaç duyulmaması bu sayede değerli arazilerin kaybını önlemesi bu sistemlerin en büyük özelliklerindedir. Suyun doğal soğutma etkisi sayesinde karasal sistemlere göre %10-15 daha fazla enerji üretimi potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olması CO₂ salınımını azaltmaktadır. Ayrıca su kaynaklarından buharlaşma ile kaybedilen su miktarını azaltarak su kaynaklarının korunmasına yardımcı olmaktadır. Tarımsal sulamanın ve buharlaşmanın arttığı yaz aylarında bu sisteme sahip su kaynaklarında büyük miktarlarda su kazanı sağlanabilir.

Zorlu hava şartları, yüksek nem, enerji transferin sırasında oluşabilecek güvenlik sorunlarına tasarım ve uygulama aşamasında mutlaka dikkat edilmeli, korozyona ve UV ışınlarına dayanıklı, mukavemeti yüksek malzemeler seçilmelidir. Yüzen sistemlerin kurulum ve bakım masrafları karasal sistemlere göre daha yüksektir. Ancak maliyetler arasındaki fark her

geçen yıl pazar büyüklüğünün artmasıyla azalmaktadır. Ayrıca arazi masrafının olmaması ekonomik bir avantaj sağlamaktadır.

Enerji ve su ihtiyacının giderek arttığı Türkiye'de yüzen güneş enerjisi sistemleri ile çevre dostu enerji üretimi sağlayıp enerjide dışa bağımlılığı azaltmaya, suların korunmasına katkıda bulunulabilir. Barajlara kurulacak yüzen güneş enerjisi sistemleri barajların işlevselliğini arttırmaktadır. Bu HES-YGES kombinasyonu daha fazla yenilenebilir enerji üretimine olanak sağlamakla birlikte, barajlarda suyun korunmasına da birçok katkı sağlamaktadır. Türkiye'deki barajlara kurulacak bu sistemlerin önemli bir potansiyelinin olduğu düşünülmektedir.

Çevreye olan katkıları, enerji verimliliği, teknolojinin gelişmesi, bu sistemlere yapılan yatırım ve teşviklerin artması ve izlenen politikalar yüzen güneş enerjisi sistemlerine olan talebi gün geçtikçe arttırmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Energy Institute, Statistical Review of World Energy 72nd Edition, 2023.
- [2] TMMOB Makine Mühendisleri Odası Enerji Çalışma Grubu, Türkiye Enerji Görünümü 2023 Sunumu. <https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2020/05/TurkiyeEnerjiSorunumuSunumu2020.pdf> (Mayıs 2023).
- [3] Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Kaynakları <https://eusolar.ege.edu.tr/tr-3482/yenilenebilir-enerji-kaynaklari.html>

- [4] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Bilgi Merkezi-Enerji- Güneş, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>. (Ağustos 2022).
- [5] Alok S., Neha Y., Sudhakar K. (2016). Floating photovoltaic power plant: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 815-824.
- [6] Düzenli M., Koçar G., Eryaşar A., A Review Of Floating Solar Power Plants. *SolarTR 2018 Conference & Exhibition*, 281-287, İstanbul, Türkiye, 29-30 November 2018.
- [7] WorldBank, ESMAP, SERIS, Where Sun Meets Water Floating-Solar Market Report Executive Summary, 2018.
- [8] Silalahi D.F., Blakers A. (2023), Global Atlas of Marine Floating Solar PV Potential, *Solar 2023*, 3(3), 416-433.
- [9] Trapani K., Santafe M. R. (2014). A Review of Floating Photovoltaic Installations: 2007–2013, *Progress In Photovoltaics: Research and Applications*. 24, 524-532.
- [10] Enerji Atlası, İstanbul Büyükçekmece Gölü Yüzer Güneş Enerjisi Santrali, <https://www.enerjiatlası.com/gunes/buyukcekmece-golu-yuzer-g%C3%BCnes-enerji-santrali.html>
- [11] Gamarra C. Ronk J. J. (2019). Floating Solar: An Emerging Opportunity at the Energy-Water Nexus, *Texas Water Journal*, 10, 32-45.
- [12] Power Technology, World Biggest Floating Solar Farms, <https://www.power-technology.com/features/worlds-biggest-floating-solar-farms>
- [13] Choi Y. K. (2014). A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 8, 75-84.
- [14] Sen D., Design Parameters of 10kW Floating Solar Power Plant. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2, May 2015.
- [15] Tina G.M., Rosa Cloy M., Rosa Clot P., Electrical Behavior and Optimization of Panels and Reflector of a Photovoltaic Floating Plant, *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, January 2011.
- [16] Kumar V., Shrivastava R.L., Untawale S.P. (2015). Solar Energy: Review of Potential Green & Clean Energy for Coastal and Offshore Applications. *Aquatic Procedia*, 4, 473-480.
- [17] Köker B., Cebeci M.S., Yılmaz Z., Selçuk S.F. (2022). Mikroplastiklerin Atıksu Arıtma Tesislerindeki Etkileri ve Arıtma Yöntemleri. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 5(2), 84-91.
- [18] Global Carbon Atlas. CO₂ Emissions, <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- [19] De Marco A., Petrosillo I., Semeraro T., Pasimeni M. R., Aretano R., Zurlini G. (2014). The contribution of Utility-Scale Solar Energy to the global climate regulation and its effects on local ecosystem services. *Global Ecology and Conservation*, 2, 324-337.
- [20] Tsoutsos T., Frantzeskaki N., Gekas V. (2005). Environmental Impacts from The Solar Energy Technologies. *Energy Policy*, 33, 289-296.
- [21] Song J., Choi Y. (2016). Analysis of the Potential for Use of Floating Photovoltaic Systems on Mine Pit Lakes: Case Study at the Ssangyong Open-Pit Limestone Mine in Korea. *Energies*, 9, 1-13.
- [22] TÜBİTAK Bilim Genç, Dünya'daki Su, <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/dergimiz/dunyada-ki-su>
- [23] Helfer F., Lemckert C., Zhang H. (2012). Impacts of climatechange on temperature and evaporation from a large reservoir in Australia. *Journal of Hydrology*, 475, 265-378.
- [24] Gökbülak F., Özhan S. (2006). Water loss through evaporation from water surfaces of lakes and reservoirs in Turkey. *Official Publication of the European Water Association (EWA)*.
- [25] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Bilgi Merkezi-Enerji-Elektrik, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (Ağustos 2023).
- [26] Devlet Su İşleri, Toprak Su Kaynakları, <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/754>
- [27] Devlet Su İşleri, İllere Göre Yapımı Tamamlanan Barajlar ve Faydaları 1936-2019, 2020.
- [28] Radosevic N., Liu G.J., Tapper N., Zhu X., Sun Q. (2022). Solar Energy Modeling and Mapping for the Sustainable Campus at Monash University, *Frontiers in Sustainable Cities*, Volume 3.
- [29] Sunbase, Photovoltaic Software, How to calculate solar energy power of PV systems <https://photovoltaic-software.com/principle-resources/how-calculate-solar-energy-power-pv-systems> (Şubat 2022).
- [30] Deniz E., Güneş Enerjisi Santrallerinde Kayıplar, Akademi Enerji, İzmir.
- [31] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA), <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator>
- [32] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022 yılı Açık Yüzey Buharlaşma Değerlendirmesi, <https://www.mgm.gov.tr/arastirma/buharlasma.aspx?s=2022>