

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Yüzer Güneş Enerjisi Santrallerinin Yeşil Enerjiye Geçişteki Rolü ve Türkiye Potansiyeli

İzzet ÖZTÜRK¹, Belkıs ÖĞRETMEK², Fatma Sude KARAPINAR³

Yazışma yazarı:

İzzet ÖZTÜRK,
ozturkiz@itu.edu.tr

Referans:

Öztürk, İ., Öğretmek, B. ve Karapınar, F.S. (2025), Yüzer Güneş Enerjisi Santralleri (YGES)'nin Yeşil Enerjiye Geçişteki Önemi ve Potansiyeli, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 26 (2), 97-108.Makale Gönderimi : 22 NİSAN 2025
Online Kabul : 15 EKİM 2025
Online Basım : 10 KASIM 2025¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0002-8274-5326²İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi, Genel Müdürlüğü, Kağıthane, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0009-0004-7105-0344³İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0009-0008-8307-9776

Özet Yüzer Güneş Enerjisi Santralleri (YGES), kara bazlı güneş enerjisi sistemlerine alternatif olarak, su yüzeyleri üzerine kurulan yenilikçi bir enerji üretim teknolojisidir. Bu sistemler, arazi kullanımına ihtiyaç duymadan güneş enerjisinden elektrik üretmeyi mümkün kılarak, suyun doğal soğutma etkisi sayesinde panel verimliliğini artırır ve buharlaşmayı azaltarak su kaynaklarının korunmasına katkı sağlar. Türkiye'deki 950'den fazla baraj gölü, yaklaşık 19.500 MW'lık bir kurulu güç potansiyeline sahiptir. Bu çalışma, YGES'lerin teknik bileşenleri, çevresel etkileri, maliyet analizleri ve Türkiye'deki mevcut uygulamalarını ele almaktadır. YGES'lerin fosil yakıtların yerine geçebilecek kapasitesi, karbon salımını azaltmadaki rolü ve enerji dönüşümüne katkısı, bu teknolojiyi yalnızca çevresel değil aynı zamanda stratejik bir enerji politikası aracı haline getirmektedir. Ulusal ve uluslararası enerji politikalarıyla uyumlu biçimde, YGES'in yeşil enerjiye geçişte kritik bir rol üstlenebileceği değerlendirilmektedir. Ancak, sucul ekosistemler üzerindeki olası etkileri nedeniyle dikkatli planlama gerekmektedir. Türkiye'de YGES'lerin yaygınlaştırılması için ilgili mevzuatın geliştirilmesi, teknik bilgi birikiminin artırılması ve yatırım teşviklerinin sağlanması önerilmektedir. Bu sistemlerin özellikle hidroelektrik santrallerle hibrit olarak kullanımı, enerji arz güvenliğini artırarak daha verimli ve sürdürülebilir bir enerji yönetimine katkıda bulunacaktır. YGES'lerin geniş çapta benimsenmesi, Türkiye'nin yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmasına ve su kaynaklarının korunmasına önemli ölçüde katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Yüzer Güneş Enerjisi Santrali, Yeşil Enerji, Hidroelektrik Santraller, Hibrit Enerji Sistemleri, İklim Değişikliği.

The Importance and Potential of Floating Solar Power Plants in the Transition to Green Energy

Abstract Floating Solar Power Plants (FSPP) are an innovative energy generation technology installed on water surfaces as an alternative to land-based solar power systems. These systems enable solar energy utilization without land use while enhancing panel efficiency through the natural cooling effect of water and reducing evaporation, thus contributing to water conservation. In Turkey, over 950 reservoirs are identified as suitable locations for floating solar installations, with an estimated total capacity of approximately 19,500 MW. This study examines the technical components, environmental impacts, cost analyses, and current applications of FSPPs in Turkey. The capacity of FPV systems to replace fossil fuels, their role in reducing carbon emissions, and their contribution to the energy transition make this technology not only an environmental solution but also a strategic energy policy instrument. In line with national and international energy policies, FPVs are considered to play a critical role in the transition to green energy. However, careful planning is necessary due to potential ecological impacts on aquatic ecosystems. To facilitate widespread adoption in Turkey, regulatory frameworks should be improved, technical expertise should be enhanced, and investment incentives should be provided. The integration of FSPPs with HPPs can enhance energy security, promoting a more efficient and sustainable energy management strategy. Their large-scale implementation would contribute significantly to Turkey's renewable energy goals and water resource protection.

Keywords: Floating Solar Power Plant, Green Energy, Hydroelectric Power Plants, Hybrid Energy Systems, Climate Change.

1. Giriş

Dünya'ya yaklaşık (~) 150 milyon km. mesafede bulunan güneş, yerküreye en yakın yıldız olma özelliğine sahiptir. güneşin % 92,1'i hidrojen, % 7,8'i helyum ve % 0,1'i diğer elementlerden oluşmaktadır (NASA, 2017). Gerçekleştirdiği füzyon (ışınım) neticesinde her saniye 650 milyon ton hidrojen, 646 milyon ton helyuma dönüşürken, aradaki 4 milyon tonluk fark enerji formu kazanarak, ışınımın oluşması için gereken 10.000 – 170.000 yıllık sürenin sonunda uzaya yayılmaktadır (Sharon, M., 2016). Her saniye tekrar eden bu enerji çıkışının büyüklüğü 106,4 milyar TWh'tir. Başka bir ifadeyle; 152.504 TWh olan 2013 yılı dünya enerji arzının yaklaşık olarak 700.000 katıdır (IEA, 2013). Açığa çıkan bu devasa enerjinin dünyaya ulaşan miktarı ise yıllık 3,05 milyar TWh olup Dünya enerji talebinin yaklaşık 20.000 mislidir (Kıncay, 2017).

Enerjinin uzaya yayılmasını ve dünyaya ulaşmasını sağlayan güneş radyasyonu (ışınım); birbirine dik düzlemlerde dalga hareketi yapan elektrik ve manyetik alanların meydana getirdiği elektromanyetik dalgalardır (DEKTMK, 2009). Atmosferin çeşitli katmanlarında fire verdikten sonra yeryüzüne ulaşan elektromanyetik dalgalardaki yüklü enerji, ısı üretimini mümkün kılan ısı güneş sistemleri ile elektrik üretimini sağlayan fotovoltaik (FV) ve odaklanmış güneş enerji sistemleriyle ayrıştırılarak insanlığın ihtiyacına hizmet edecek hale dönüştürülür.

Güneşten Dünyaya ulaşan 121.000 TW'lık gücün 81.000 TW (~%66,7)'lik kısmı doğrudan ısıya dönüşürken, 40.000 TW'lık (%32,9)'luk kısmı Hidrolojik Çevrim, 370 TW (%0,3)'lük kısmı rüzgar ve dalga hareketleri, 40TW'lık (%0,03) kısmı da bitkilerin fotosentezi için harcanmaktadır. Hidrolojik çevrim için harcanan 40.000 TW'lık gücün, nehir havzalarında üretilen brüt Su Gücü potansiyeline dönüşme oranı ~%0,2 (80 TW) olup Dünya'da tüketilen ~ 5 TW'lık gücün ~40 katı mertebesindedir (Şen, 2003).

Güneş enerjisinin, elektrik ve ısı elde edilmesini mümkün kılan güncel FV Panel Sistemleri ve çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır. Teknolojik ilerlemeler ve maliyet etkinliğinin öne çıkmaya başlamasıyla 1970'lerden itibaren yaygınlaşan Güneş enerjisi sistemlerinin (GES) başlıca kullanım alanları; su, sera, kapalı hacimlerin ve yüzme havuzlarının ısıtılması; buhar, buz ve tuz üretilmesi ile kapalı hacimlerin soğutulması gibi ısıtma faaliyetleri ve FV sistemlerin yanı sıra bazı ısı yöntemlerinin kullanımıyla elektrik üretimidir (Altıntop ve Erdemir, 2013).

Son yıllarda, özellikle 2014'ten itibaren, karasal GES'lerle birlikte baraj, göl, gölet ve kapalı koylarda Yüzer GES (YGES) tesisleri kurulumunda hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Küresel ölçekte yıllık Yüzer GES kurulu güç arzi 40 MWp seviyesine yaklaşmaktadır (Sachin vd., 2021). YGES sistemleri; karbon salımının azaltılması, su kaynaklarının buharlaşmasının önlenmesi, arazi kullanımının sınırlandırılması ve mevcut hidroelektrik altyapıyla entegrasyon gibi avantajları sayesinde yeşil enerjiye geçişte stratejik bir seçenek sunmaktadır (Sustainability Global Team, 2025). Yüzer GES'ler, 950'yi aşkın depolamalı HES'e sahip Türkiye için de yeşil enerji üretimi ve ülke karbon ayak izini azaltmaya yönelik önemli bir fırsattır. Bu çalışmada Yüzer GES çözümlerinin Dünya ve Ülkemiz ölçeğindeki potansiyeli ile

sağlanacak faydalar incelenmiştir. Bu kapsamda Dünya'daki iyi uygulamalar ile Türkiye'deki bazı pilot ölçekli ve akademik fizibilite çalışmaları derlenmiştir. Ayrıca Yüzer GES tesislerinin, su kalitesi ve sucul canlılar üzerindeki olası çevresel etkileri ile ilgili araştırma sonuçları ile kurulum maliyetleri de değerlendirilmiştir.

2. Fotovoltaik Güneş Panelleri'nin Özellikleri ve Sistem Bileşenleri

2.1. Fotovoltaik Sistemler

FV güneş hücreleri, üzerine düşen güneş ışınlarını içeriğinde bulunan yarı iletken silikon maddeler ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Genel olarak yüzeyleri kare, dikdörtgen veya 9 dairesel formlardadır. FV hücrelerle 1 cm²'lik alandan takriben 1 Watt elektrik enerjisi elde edilebilmektedir.

Fotovoltaik hücreler, farklı türde yarı iletkenlerin bir araya getirilmesiyle elektriksel alan oluşturan ve güneş ışığındaki foton enerjisini elektrik akımına dönüştüren enerji üretim araçlarıdır. Bu hücrelerde en yaygın kullanılan yarı iletken malzemeler silisyum, galyum arsenit ve kadmiyum tellürdür. Bu malzemeler, p-tipi veya n-tipi yarı iletken özellik kazanacak şekilde katkı maddeleri ile işlenir. Örneğin, silisyumun değerlik elektron sayısı 4'tür; eriyik haldeki silisyuma 5A grubu bir element eklendiğinde fazladan bir elektron ortaya çıkar ve n-tipi yarı iletken elde edilir. Benzer şekilde, 3A grubu bir element eklenirse bir elektron eksikliği oluşur ve p-tipi yarı iletken oluşur. Bu n-tipi ve p-tipi plakalar bir araya getirilerek fotovoltaik hücreler oluşturulur. Hücreye düşen güneş ışığı n-tipi plaktaki serbest elektrona enerji vererek elektronun p-tipi plakaya geçmesini sağlar; bu hareket devrede doğru akım oluşmasına yol açar. Böylece güneş enerjisi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmüş olur.

FV Güneş Hücrelerinin Çalışma Prensipleri. Güneşten gelen ışınlar güneş hücresine temas ettiğinde hücrenin dış yüzeyindeki geçirgen tabakadan geçerek yarı iletken madde tarafından emilir. Işığın emilmesiyle serbest kalan elektronlar elektrik akımını oluşturur. Güneş pilinde çok elektrona sahip P tipi yarı iletken madde ve az elektrona sahip olan N tipi yarı iletken madde bulunur. Güneş ışığı P tipi yarı iletken maddeden elektron koparır ve enerji kazanan elektronlar N tipi yarı iletken maddeye doğru akarlar. Bu sabit ve tek yönlü elektron akışı DC doğru akımı oluşturur. Elektronlar kurulan devreler boyunca akarak pillerin şarj edilmesinde ya da farklı alanlarda kullanılır ve P tipi yarı iletken maddeye geri döner.

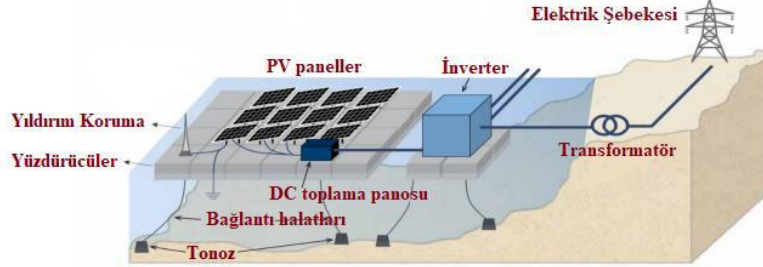
Yarı iletken eklemenin güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde FV dönüşümünü sağlaması gerekir. Bu dönüşüm P ve N bölgeleri arasında elektron akışıyla gerçekleşir.

FV Sistem Bileşenleri. Fotovoltaik modüller, FV sistemin en temel ve en önemli parçasıdır. FV güneş hücreleri, güneşten aldıkları güneş ışığından elektrik üreten yarı iletken malzemelerden üretilmişlerdir. Boyutları genelde kare, dikdörtgen ve daire formunda olup yüzey alanları 100 cm²'dir. Kalınlıkları 0,2 mm ile 0,4 mm arasında değişmektedir. Bir adet FV güneş hücresinden üretilen elektrik miktarı çok azdır. Bu nedenler FV güneş hücreleri seri ya da paralel bağlanarak FV modülleri, modüllerde birleşerek panelleri, panellerde birbirine bağlanarak dizileri oluştururlar (Çelebi, 2002).

YGES'lerin kurulumu karasal GES'lerden farklı değildir. PV panellerden üretilen enerji evirici devreye iletilir. Evirici çıkışında AA formunda şebeke gerilimi elde edilmiş olur.

Talep edilmesi durumunda, gerekli resmi izinler alınarak, gerilim yükseltip orta gelirli dağıtım şebekesine bağlantı yapılabilir. Şekil 1'de YGES sistemlerine ait genel bir kurulum şeması verilmiştir (Bozok, 2023). Şemada yüzer güneş enerjisi santralini temel bileşenleri gösterilmektedir. Güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren FV paneller, su yüzeyinde yüzer yapılar üzerine yerleştirilmiştir. Panellerden

elde edilen doğru akım (DC), bağlantı hatları aracılığıyla DC toplama panosuna aktarılır ve buradan invertere (evirici) iletilerek alternatif akıma (AC) dönüştürülür. Transformatör sayesinde gerilim şebeke seviyesine yükseltilir ve üretilen enerji elektrik şebekesine aktarılır. Sistemde ayrıca yıldırım koruma düzenekleri güvenliği sağlamaktadır.



Şekil 1. YGES sistem kurulum şeması (Bozok, 2023).

2.2. FV Güneş Hücresi Tipleri ve Verimleri

FV hücreler çeşitli malzemelerden üretilmektedir. Güneş hücrelerinin %98'i (Si) silisyumdan üretilmektedir ve silisyum dünyada bol miktarda (SiO₂ kuvars) bulunur. Üretilen malzeme çeşidine göre bu hücreler genel olarak kristal silisyum, ince film ve çok katmanlı güneş hücreleri olarak üç grupta incelenebilir.

Kristal Silisyum Güneş Hücreleri. Güneş pili yapımında en çok tercih edilen hücre tipidir. Güneş ışınlarını yutma oranı düşük olmasına karşın verimleri %12-16 arasındadır. Hücre ve modül verimlilikleri hücre tipine göre değişiklik gösterir. Bu hücre tipleri, monokristal ve polikristal olarak ikiye ayrılırlar (Yerebakan, 2010).

İnce Film Güneş Hücreleri. İnce film güneş hücreleri, cadmium tellür (CdTe) veya bakır indiyum galyum diselenür (CIGS) gibi ince yarı iletken katmanların cam, polimer veya metal gibi alt tabakalara depo edilmesiyle oluşur. CdTe, silisyumdan sonra en yaygın kullanılan fotovoltaik malzeme olup, düşük maliyetli üretim süreçleriyle üretilmesine rağmen, verimliliği geleneksel silisyum bazlı güneş hücreleri kadar yüksek değildir (EPA, 2025). CIGS paneller ince yapılarıyla yüksek verim sağlarken, CdTe paneller %17'ye kadar verimliliğe ulaşabilir. Her iki panel türü de koruyucu cam ve iletken oksit tabakaları ile kaplanır. Gelecekte cam oranı azalırken yarı iletken ve metal içeriğinin artması beklenmektedir (IRENA & IEA-PVPS, 2016)

Gelişme Aşamasındaki Güneş Hücreleri. Periyodik tablonun üçüncü ve beşinci grubu elementlerin bir araya gelmesiyle oluşan bileşik yarı iletkenin soğurma özelliği çok yüksektir. Bu hücrelere en iyi örnek galyum arsenit'ten (GaAs) yapılan güneş pilleridir. Bunun yanında ince kristal silisyum güneş hücresi, organik ve nano kristal güneş hücreleri

geliştirilme aşamasındaki diğer güneş hücreleridir.

Güneş Hücrelerinin Verimleri

FV hücre ve panel (modül) verimi aynı şey olmayıp birbirinden farklı kavramlardır. Diğer bir ifade ile değer olarak eşit değillerdir. Güneş enerjisi, FV hücre yapısına göre % 5 ile % 20 arasında bir verimle elektrik enerjisine dönüşebilir. Verim değeri %10'dan daha düşük FV hücreleri, uygulama açısından verimli ve ekonomik değildir. Verimi %10'un altında kalan FV hücreleri uygulama açısından ekonomik değildir. Yarı iletken malzemeden üretilmiş FV hücrelerinin verimi laboratuvar koşullarında %10-30, uygulamada ise %5-20 arasındadır. Uygulamada verimi %15 ve üzeri olan FV hücreler "iyi" olarak sınıflandırılmaktadır. FV hücrenin imal edildiği malzeme, akım-gerilim karakteristiği, şarj (dolum) kontrol cihaz kalitesi, inverter verimi, akümülatör verimi, gölgelenme durumu, sıcaklık, kablo kesiti, sistemdeki toz ve kir, sistemin eğim açısı gibi faktörler FV sistemin verimini etkileyen başlıca unsurlardır. Hücre verimi yüksek olan panellerde birim alan başına sağlanan güç değerleri de yüksek olup, bu tip hücreler yüzey alanı küçük kurulumlar için uygundur. Tablo 1 incelendiğinde, çok kristal silikon bir hücrenin verimi %21,3 iken, aynı hücrelerden oluşan panelin verimi %14-16 olabilir. Bunun sebebi ise panel verimi hesaplarında, tüm panel yüzeyinin hesaba katılmasıdır. Karasal FV GES (güneş enerji sistemi) kurulumlarında, toplam tutarın yaklaşık olarak %55-60'ını panel maliyetleri oluşturmaktadır. Tablo 1'de farklı tipteki FV hücrelerin karakteristik değerleri verilmiştir (Öztürk, 2017). Tablo 1'de görüldüğü gibi tek bir FV hücrenin verimi daima FV modül veriminden daha yüksektir.

Bu çalışma kapsamı dışında tutulan; YGES tesisleri panel, taşıyıcı platform, çapa, halat, şamandıra vb. ile ilgili sistem elemanları tasarımı ile ilgili detaylı bilgi için, Öğretmek (2017), Bulut (2024), Sachin vd. (2021), Güner ve Özgür (2023) ve Ghigo vd. (2022) kaynaklarına başvurulabilir.

Tablo 1. Farklı tip FV hücre ve modül verimlerinin karşılaştırılması (Öztürk, 2017).

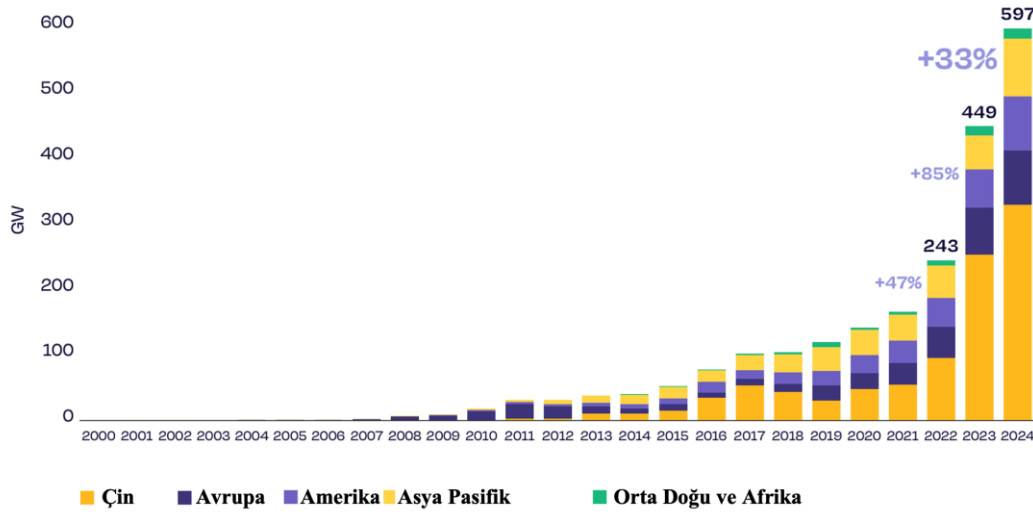
FV Teknolojisi	Hücre Verimi (%)	Modül Verimi (%)	
Kristal Silikon	Monokristal Si	25	14-16
	Polikristal Si	21,3	14-16
	Monokristal GaAs	27,5-29,1	21-24
İnce Film	Amorf Silikon	13,6	6-9
	Kadmiyum Tellür	22,1	9-12
	CIS/CIGS	22,3	8-14

3. Küresel Ölçekte FV Panelli GES Kapasitesi

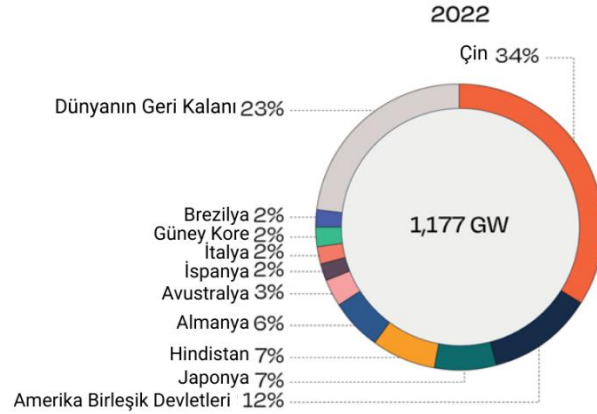
3.1. Dünya’da GES ile Yeşil Enerji Üretim Kapasitesi Görünümü

2000’li yılların başından 2022 yılına kadar dünyada güneşten elektrik enerjisi üretimi kapasitesi yaklaşık %1000’den fazla artmıştır. Özellikle 2007 yılından itibaren ülkeler, yalnızca güneş enerjisi değil genel olarak yenilenebilir enerji kapasitesini artırmaya yönelmiş; santral inşası, araştırma ve geliştirme faaliyetleri için dünya çapında yüz milyarlarca ABD doları yatırım yapmışlardır. Bu yatırımlar, teknolojik ilerlemelerin hızlanması, maliyetlerin düşmesi ve güneş enerjisi

teknolojilerinin daha verimli hâle gelmesi ile desteklenmiş; ayrıca fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar ve küresel enerji krizleri gibi ekonomik ve jeopolitik faktörler de güneş enerjisine olan ilgiyi artırmıştır. Dolayısıyla FV GES kurulu kapasitesindeki artış, yalnızca yatırım miktarına değil, bu teknolojik, ekonomik ve politik etkenlerin bir araya gelmesiyle açıklanabilir. Sonuç olarak, FV GES yıllık kurulu üretim kapasitesi 2024 yılında dünya genelinde yaklaşık 597 GW’a ulaşmış, bu da 2022’ye göre %33’lük bir artış anlamına gelmiştir (Şekil 2). Ayrıca, Şekil 3’te gösterildiği üzere, 2022 itibarıyla dünya FV GES kurulu kapasitesinin yaklaşık üçte biri Çin’de bulunmaktadır; bu durum, küresel dağılım ve ülkeler arasındaki stratejik yatırımların önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Yıllık Güneş Enerjisi (F) Kurulu Gücü (2000-2024) (Solarpower Europe,2025).



Şekil 3. İlk 10 Güneş Enerjisi (FV) Pazarı Toplam Kurulu Güç Payları (2022) (Solarpower Europe,2023).

3.2. Türkiye’nin Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Kurulu Tesisler

Ülkemiz, coğrafi konumu dolayısıyla sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre oldukça şanslı durumdadır. Türkiye’nin yıllık enerji üretiminin 100 milyon MW olduğu düşünülürse bir saniyede dünyaya gelen güneş enerjisi, Türkiye’nin enerji üretiminin 1.700 katıdır (Varınca ve Gönüllü, 2006).

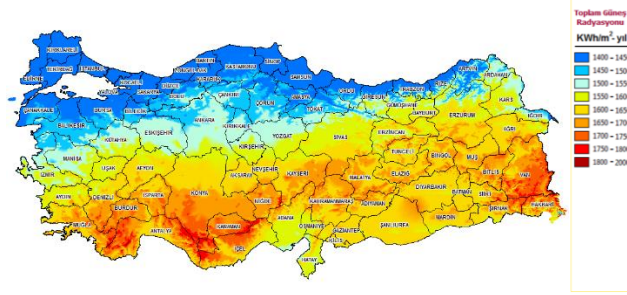
Türkiye, Şekil 4’te görülen Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)’na göre, ortalama, 2.741 saat/yıl güneşlenme süresine

sahiptir ve bu güneşlenme süresi için 1.527,46 kWh/m² ortalama yıllık ışınım değeri hesaplanmıştır (URL-1).

Türkiye’de en uzun yıllık güneşlenme süresi, 3.045 saat/yıl olarak Güneydoğu Anadolu bölgesinde olmasına rağmen, metrekare başına düşen en yüksek yıllık güneş ışınım değeri ise 1.650 kWh/m²-yıl ile Akdeniz Bölgesine aittir (Tablo 2).

Bu veriler, özellikle Güneydoğu Anadolu’daki su rezervuarları ve HES barajları ile YGES sistemlerinin entegrasyonu açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır. Mevcut baraj ve göletlerin yüzey alanları, yüksek güneşlenme süreleri ile birleştiğinde, YGES yatırımlarının enerji üretim kapasitesini

artırması ve bölgesel enerji güvenliğine katkı sağlaması açısından önemli fırsatlar doğurmaktadır.



Şekil 4. Bölgelere göre toplam güneş radyasyonu durumu (kWh/m²-yıl) (URL-1).

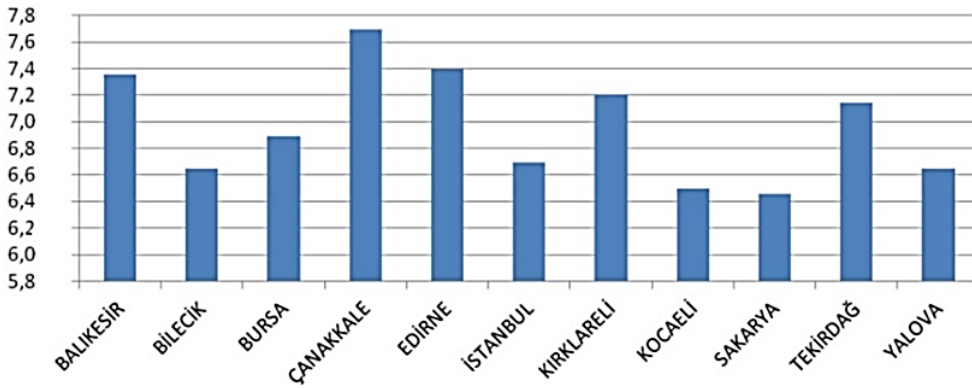
Tablo 2. Coğrafi bölgelere ait güneş ışınım değerleri (Batur, 2022).

Coğrafi Bölgeler	Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m ² -yıl)	Güneşlenme Süresi (Saat/yıl)
Marmara Bölgesi	1.324	2.632
Karadeniz Bölgesi	1.338	2.317
Doğu Anadolu Bölgesi	1.573	2.741
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	1.590	3.045
İç Anadolu Bölgesi	1.582	2.892
Akdeniz Bölgesi	1.650	3.014
Ege Bölgesi	1.561	3.017

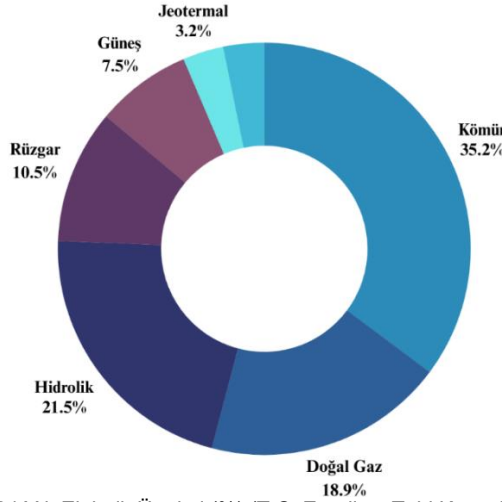
GEPA 2017 yılı verilerine göre Marmara Bölgesi'ndeki 11 ilin ortalama güneşlenme süresi değeri ~7 saattir. Bölgedeki en yüksek ve en düşük güneşlenme süreleri ise sırası ile 7,2 saat (Çanakkale) ve ~6,5 saat (Sakarya) illerine gözlemlenmektedir (Şekil 5).

Türkiye'nin 2024 yılında elektrik üretimi bir önceki yıla göre %5,4 artarak 348,9 TWh seviyesine çıkmıştır, elektrik tüketimi ise %3,8 oranında artış göstererek 347,9 TWh olarak

gerçekleşmiştir. 2025 yılı ocak ayı itibarıyla Türkiye'nin toplam kurulu gücü 116.516 MW'a ulaşmıştır. Türkiye Ulusal Enerji Planı doğrultusunda, elektrik tüketiminin 2025 yılında 380,2 TWh'ye, 2030 yılında 455,3 TWh'ye ve 2035 yılında 510,5 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir. FV GES tesisleri 2024 yılı itibarı ile, ülke enerji ihtiyacının ~% 7,5'ini karşılamıştır (Şekil 6) (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025).



Şekil 5. Marmara Bölgesi Günlük Ort. Güneşlenme Süresi Değerleri (GEPA, 2017).



Şekil 6. Türkiye 2024 Yılı Elektrik Üretimi (%) (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025).

4. Dünya ve Türkiye’de Yüzer GES’ler ile Yeşil Enerji Üretim Potansiyeli

Dünya’daki durum. Özellikle nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu büyük kentsel yerleşimler yakınında, büyük kapasiteli GES’lerin kurulumu için yeterli arazi temininde sorunlar yaşanmakta olup bu durum karasal FV enerji uygulamalarını kısıtlamaktadır. Mevcut baraj, göl ve göletler üzerine kurulan yüzer GES’lerin en önemli üstünlükleri, arazi ihtiyacının bulunmayışı ve kurulu enerji dağıtım şebekelerine yakın olmalarıdır. Bunların yanında suyun soğutma etkisinin yol açtığı ~%10’a varan enerji verimi artışı, buharlaşma kayıpları ve alg oluşumunun azaltılması, panellerin tozlarla çok daha az kirlenmesi ve fosil yakıtlarla üretilen enerji ikamesi dolayısıyla CO₂ salımının azaltılması gibi ek faydalar da söz konusudur. Küresel ölçekte Yüzer GES kurulu kapasitesinin 2026 yılında kadar 4.8 GW’a ulaşacağı öngörülmektedir (World Bank Group, ESMAP, SERIS, 2019; ReportLinker, 2022). Yüzer GES tesisleri henüz genellikle 40 MWp (maksimum 150 MWp) gücü geçmeyen kapasitelerde kurulmakta olup, elde edilen tecrübeler ışığında, yakın gelecekte daha büyük kurulu güçteki tesis sayılarında önemli derecede artış beklenmektedir.

Jin vd. (2023) dünya genelindeki 114.555 rezervuar yüzeyinin % 30’unu kaplayan (ancak 30km²’yi de geçmeyen) Yüzer GES sistemleriyle, iklim verileri ile ilişkili FV Sistem Similasyon Paket Yazılımı yardımıyla, üretilebilecek toplam enerji

miktarını 9434 ± 29 TWh/yıl olarak hesaplamışlardır. Türkiye’deki mevcut kurulu Yüzer Güneş Enerji Sistemleri (YGES) kapasitesi ve pilot projeler, ülkenin Yüzer GES potansiyelinin daha gerçekçi ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Örneğin, Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından Keban Barajı’nda kurulan 1 MW kapasiteli Kuzova Yüzer GES, yıllık yaklaşık 1.806.000 kWh enerji üretimi hedeflemektedir (DSİ, 2024; Öztürk, 2024). Aynı bölgede 2 MW kapasiteli yeni bir YGES projesinin de kurulumu planlanmaktadır.

Anılan çalışmalarda, Yüzer GES’ler ile üretilen Yeşil enerji ile 124 ülkedeki 154 metropol dahil 6256 şehrin elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanabileceği; ayrıca baraj göllerinden buharlaşma ile kaybedilecek 106 ± 1 km³/yıl’lık suyun da önlenebileceği belirtilmektedir. Jin vd. (2023) tarafından aralarında Türkiye’nin de yer aldığı bazı ülkeler için hesaplanan Yüzer GES’lerle üretilen enerji potansiyelleri Tablo 3’te verilmektedir.

Bununla birlikte, Yüzer GES’lerin sağlayacağı yeşil enerji potansiyeli yalnızca teknik ve çevresel faydalar bağlamında değil, aynı zamanda Türkiye’nin 2053 Net Sıfır stratejisi ve karbon nötr hedefleri ile uyumlu ulusal enerji dönüşümüne katkısı açısından da değerlendirilmektedir. Bu çerçevede, Yüzer GES uygulamaları, AB Yeşil Mutabakatı ve uluslararası iklim politikalarıyla doğrudan ilişkilendirilerek, sürdürülebilir enerji geçişi sürecinde kritik bir rol oynamaktadır.

Tablo 3. Mevcut Baraj Göl Yüzeylerinin %30’undan (30ha’ı aşmamak üzere) Yüzer GES’ler ile Üretilebilecek Enerji Miktarları (Jin vd.,2023)

Ülke	Rezervuar Sayısı	Rezervuar (km ²)	Alanı	FPV (km ²)	Alanı	FPV (TWh/yıl)*	Üretimi	Birim FPV (kWh/m ² /yıl)*	Alan	Başına Üretimi
Amerika Birleşik Devletleri	25.902	64.145		11.164		1.911 ± 18		177 ± 2		
Çin	15.616	29.213		6.967		1.107 ± 17		154 ± 3		
Meksika	1.685	5.035		1.057		228 ± 3		223 ± 3		
Avustralya	3.441	5.089		1.054		210 ± 4		202 ± 3		
Türkiye	957	4.853		931		171 ± 2		179 ± 3		
Güney Afrika	4.54	2.785		670		144 ± 2		215 ± 2		
İspanya	2.081	2.468		731		132 ± 2		182 ± 3		
İran	480	1.331		399		85 ± 1		209 ± 2		
İsveç	285	9.289		844		80 ± 1		249 ± 3		
Venezuela	86	5.307		322		80 ± 1		103 ± 2		

Türkiye görünümü. Tablodan da görüldüğü üzere, Türkiye’deki mevcut 957 adet baraj gölünde, su yüzeyinin %30’unu kaplayan (hiçbirinin alanı 30 km²’yi geçmeyen) Yüzer GES’lerle üretilebilecek yeşil enerji potansiyeli 171 ± 2 TWh/yıl (179 ± 3 kWh/m².yıl) olarak öngörülmektedir. Bu veriden

hareketle söz konusu baraj gölleri üzerinde tesis edilebilecek toplam Yüzer GES kurulu gücü 19.500 MW civarında olup ~ 15 adet Keban HES tesisine eşdeğerdir.

Küresel enerji talebinin 2050 yılına kadar ikiye katlanacağı tahmin edilmektedir. Güneş enerjisi, en yaygın mutabakatla,

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

gezegenimizin en bol ve sınırsız enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Klasik Karasal GES'lerin toprak ve orman kaybı, kuş ölümleri, erozyon, yüzeysel akış ve mikroiklim değişikliği gibi mahzurları bilinmektedir. Ortalama değerler itibarı ile 0,5 ~ 0,7 MWp kurulu güç için ~ 1 ha'lık alan gerekmektedir. Yüzer GES tesislerinde söz konusu olumsuzlukların hiçbirini bulunmamaktadır.

Yüzer GES tesislerinin mevcut baraj gölleri üzerinde, Hidro Elektrik Santral (HES)'lerle entegre şekilde (Hibrit tesisler), kurulumu ile enerji arz güvenliğinin önemli ölçüde artırılması mümkündür. Özellikle yağış ve nehir akışlarının iyice azaldığı kurak dönemlerde, Hibrit işletme mantığı ile gündüzleri Yüzer GES, geceleri ise HES işletilerek üretilebilecek enerji maksimize edilebilir. Bu türden hibrit uygulamalarla mevcut depolamalı HES tesislerinin çok maksatlı ve daha sürdürülebilir işletimi ile ilgili farklı seçenekler de söz konusu olabilecektir. Ayrıca mevcut HES kapasiteleri daha etkin ve verimli şekilde kullanılarak yeni baraj ve HES yapılmasının önüne geçilebilir.

YGES'lerin Tasarım ve İşletme Sorunları.

YGES'lerle ilgili başlıca tasarım ve işletim sorunları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Tasarım Sorunları:

İşinim Kaynaklı Sınırlamalar. Tasarım, bölgedeki güneş işinim miktarına bağlıdır. Yetersiz işinim alan bölgelerde yatırımın geri dönüş süresi uzayabilir.

Modül Yerleşimi ve Açılı Optimizasyonu. Panellerin açısının ve yönünün en uygun şekilde ayarlanması gerekir. Hatalı tasarım enerji verimliliğini düşürebilir.

Enerji Depolama ve Şebeke Entegrasyonu. Güneş enerjisi üretimi, gün ışığı saatleriyle sınırlıdır. Depolama sistemleri yetersiz olursa kesintisiz enerji sağlanamayabilir.

İklim ve Çevresel Faktörler. Toz, kar, buz ve yoğun bulutlanma gibi faktörler tasarımda dikkate alınmalıdır. Panellerin uzun vadeli dayanıklılığı için çevresel etkiler önceden öngörülmalıdır.

Taşıyıcı Platform. FV panelleri taşıyan yüzer platform veya taşıyıcı sistemin, rüzgâr, dalga, akıntı, biyolojik büyüme vb. etkiler dikkate alınarak, uzman müşavir mühendislerce tasarlanması kritik önemdedir.

İşletme ve Bakım Sorunları:

Bakım ve Temizlik. GES'lerde panel yüzeylerinde toz, kir veya kuş pislikleri birikmesi enerji üretimini azaltabilir; düzenli temizlik işlemleri gerekir. Su tasarruflu robotik temizleme veya özel kaplama teknolojileri tercih edilebilir.

Performans İzleme. Her panelin doğru çalışıp çalışmadığını belirlemek için sürekli izleme sistemlerine ihtiyaç duyulur; arızalı paneller enerji kaybına yol açabilir. Anlık veri takibi ve arıza tespitini kolaylaştıran akıllı izleme sistemleri kullanılabilir.

Sıcaklık Dalgalanmaları. Panellerdeki sıcaklık artışı enerji verimliliğini düşürebilir; bu, özellikle sıcak bölgelerde görülen önemli bir sorundur. Yeni teknoloji ürünü yüksek verimlilikle paneller tercih edilebilir.

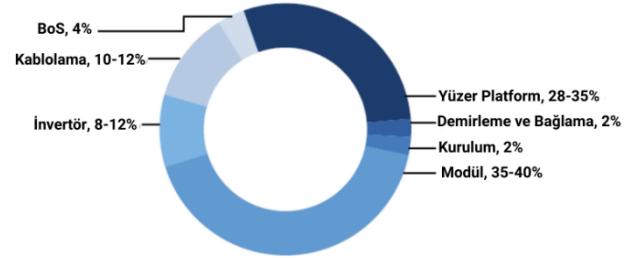
Enerji Depolama Problemleri. Depolama sistemleri (örneğin, bataryalar) hem maliyetli hem de sınırlı ömre sahiptir; bu, enerji güvenliğini olumsuz etkileyebilir.

Şebeke Dengesizliği. Güneş enerjisi üretimi doğası gereği değişkendir; ani enerji dalgalanmaları, şebekede kararlılık sorunlarına yol açabilir.

Hayvanlar ve Doğal Etkenler. Özellikle geniş su yüzeylerinde kurulan GES'lerde, hayvanların panellere zarar verme olasılığı vardır; ayrıca, fırtına veya dolu gibi doğal olaylar panellere zarar verebilir.

Yüzer GES Tesisleri Maliyeti.

Yüzer GES tesisleri maliyeti; proje yeri, su derinliği, su seviyesi değişimi, arazi şartları (rüzgâr yönü ve şiddeti, güneş radyasyonu seviyesi, ortam sıcaklığı ve rutubet seviyesi vb.) ile tesis büyüklüğüne göre geniş sayılabilecek bir aralıkta değişmektedir. Sachin vd. (2021) tarafından açık kaynaklardan derlenen verilerle yürütülen bir çalışmaya göre, KWP kurulu güç başına ilk yatırım maliyetinin, 2~170 MWp aralığındaki kurulu tesisler için, Hindistan'da 400~800\$, Çin'de 750~1000\$, Japonya'da ise 700~2000\$ aralığında değerler aldığı önerilmektedir. Yatırım maliyetinin tesis bileşenlerine göre dağılımının da genel itibarı ile Şekil 7'deki gibi alınabileceği belirtilmektedir. Şekil incelendiğinde, Yüzer GES'lerde maliyet bileşenleri arasındaki en belirgin farklılığın yüzer platform, çapa ve şamandıra maliyetlerinden (toplam maliyetin ~%38'i) kaynaklandığı görülmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Yüzer GES Tesisleri Kurulum İçin Maliyet Bileşenleri Dağılımı (Sachin vd., 2021).

World Bank Group, ESMAP ve SERIS (2019) verilerine göre, yüzer GES sistemlerinin toplam yatırım maliyeti, sistemin büyüklüğüne ve konumuna bağlı olarak 0.8–1.2 \$/Wp aralığında değişmektedir. Büyük ölçekli GES projeleri (50 MWp) için ise bu değer 0.7–0.8 \$/Wp seviyesinde raporlanmıştır. Bu maliyetler, yüzer sistemlerin bulunduğu su kütlelerinin özelliklerine, kullanılan modüllerin tipine ve bölgesel faktörlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. World Bank Group, ESMAP ve SERIS (2019) tarafından yapılan analizlerde, tatlı su kaynakları üzerinde, maksimum 10 metre derinliğe ve düşük su seviyesi değişimine sahip bir rezervuar için yapılan varsayımlar temel alınarak, kara tipi GES sistemleri ile karşılaştırmalı değerlendirme yapılmıştır (Tablo 4). Bu mukayesede yer almayan arazi temin maliyetleri ile YGES'lerde sağlanan yaklaşık %6–10'luk soğutma kaynaklı verim artışı gibi faktörler dikkate alındığında, 50 MWp kapasiteli Yüzer GES'in toplam yatırım maliyeti 0,73 \$/Wp, karasal GES'in maliyeti ise 0,62 \$/Wp olarak hesaplanmıştır; modül ve invertör maliyetleri eşit olmasına rağmen Yüzer GES'in montaj ve BOS maliyetleri daha yüksektir. Buna rağmen, verim artışı, işletme ve bakım kolaylığı ile arazi maliyeti avantajları göz önüne alındığında, Yüzer GES tesislerinin karasal GES'lere göre (~%15–25 daha ekonomik ve sürdürülebilir olduğu) görülmektedir.

Tablo 4. Yatırım Maliyetlerinin Karşılaştırması: Yüzer ve Kara Tipi FV Sistemler (World Bank Group, ESMAP ve SERIS, 2019).

Yatırım Maliyeti (CAPEX) Bileşenleri	YGES 50 MWp (\$/Wp)	Kara Tipi GES 50 MWp (\$/Wp)
Modüller	0,25	0,25
İnverterler	0,06	0,06
Montaj sistemi (iskelet)*	0,15	0,10
BOS**	0,13	0,08
Tasarım, inşaat, T&C	0,14	0,13
Toplam Yatırım Maliyeti	0,73	0,62

* Montaj sistemi (iskelet): Güneş panellerinin kurulumunu destekleyen yapı

** BOS (Balance of System): Güneş enerjisi sistemindeki ek bileşenler ve altyapı (kablolar, bağlantılar vb.).

Tablo 5 Türkiye'deki YGES Pilot Tesisleri ve Fizibilite Çalışmaları (DSİ., 2024, Durmaz vd.,2024, Enerji Ajansı, 2024, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı., 2016, Temelsu, (n.d.), YeniEnerji Dergisi., 2021).

Yer	Rezervuar Alanı	YGES Tesisi Alanı	FV GES Kurulu Gücü (MW) ve Enerji Üretimi (MWh/yıl)	FV Hücre Tipi	Toplam FV Panel Sayısı (Adet)	Hizmet Verilen /Verilecek Kurum
Keban Barajı Gölü (P)	675,00 km ²	6000 m ²	1 MW 1.806 MWh/yıl		1840	DSİ
B.Çekmece (Pilot)	24,20 km ²	100 m ²	250 kWp 315 MWh/yıl	Polikristal Silisyum	960.00	İSKİ
İst. Pendik Marina (P)	-	375 m ²	50 kWp	Çift Yüzlü ve Çift Camlı Paneller	104.00	Pendik Marina İşletmesi
Mersin Azmak-1-2 HES (P)	-	-	20 kWp	-	-	BM HOLDİNG
B.Çekmece Baraj Gölü (F)	24,20 km ²	340 m ²	27 MWp ~ 42.000 MWh/yıl	Polikristal Silisyum	104.150 (1,65 m x 0,992 m)	İSKİ
Terkos Baraj Gölü (F)	10,70 km ²	417 m ²	~108 MWp, ~146.000 MWh/yıl	Polikristal Silisyum	428.880 (1,65 m x 0,992 m)	İSKİ
Eğirdir Gölü (F)	468,00 km ²	~300 m ²	412 kWp 992 MWh/yıl	Polikristal Silisyum	12 (2,095 x 1,039 m)	-
Kocaeli Körfez ilçesi, Sevindikli Göleti (F)	0,134 km ²	444 m ²	100 kWp ~120 MWh/yıl	Çift Yüzlü 710 Wp'lik FV	143	-

P: Pilot Ölçekli Tesis, F: Fizibilite Çalışması Yapılan Projeler Tablodan da görüldüğü üzere Türkiye'deki en yüksek kapasiteli YGES, Keban Baraj Gölü üzerinde kurulu 1MWp kurulu güçteki pilot tesisidir. Bunun dışında, 2017 yılında İstanbul B.Çekmece baraj gölünde tesis edilen 250 kWp kurulu güçteki diğer bir pilot uygulama da önem taşımaktadır. Su yüzeyleri oldukça geniş lagün göl olan B.Çekmece ve Terkos göllerinin daha sonra içme suyu barajlarına dönüştürüldüğü bu iki alandaki çok yüksek buharlaşma ile alg ve Zebra Midye çoğalmasını önlemek üzere yürütülen söz konusu pilot uygulama ve Fizibilite Çalışmaları ile Göl yüzeylerinin %1~4'ünü kaplayan YGES tesisleri ile B.Çekmece Su Arıtma ve Atıksu İleri Biyolojik Arıtma Tesisleri ile Terkos'taki Kağıthane ve İkitelli Terfi Merkezlerinin, yıllık enerji ihtiyacının tamamının karşılanması mümkün olmaktadır (Öğretmek ,2017). Türkiye'de DSİ tarafından işletilen 861 adet depolamalı HES'te, baraj gölü yüzeyinin %3'ünü kaplayan YGES kurulması halinde 11.000 MWp'lik kurulu güç potansiyelinin mümkün olduğu belirtilmektedir (Bulut, 2024).

Tablo 5'teki YGES projeleri incelendiğinde, kurulu güç/alan verimliliği açısından Büyükkçekmece ve Terkos Barajları öne çıkmakta olup, sınırlı alanlarda yüksek MWp kapasite ve enerji üretimi sağlanabilmektedir. Hücre tipi analizi, polikristal silisyum panellerin çoğu projede standart performans sağladığını, çift yüzlü ve çift camlı panellerin ise yansyan ışığı değerlendirerek enerji verimliliğini artırdığını göstermektedir. Dolayısıyla, alan verimliliği ve panel tipi, YGES yatırımlarının teknik performansı ve ekonomik geri dönüş süreleri açısından

5. Türkiye'de Yüzer GES Kullanımı ile İlgili Çalışmalar

Türkiye'de YGES faaliyetleri, ilk pilot uygulama 2013 yılında Mersin ili Mut İlçesi Azmak 2 HES baraj gölünde 20 kWp'lik bir pilot tesis ile başlatılmasına rağmen, bugüne kadar önemli bir ivme ve yaygınlık kazanamamıştır. Türkiye'deki pilot ölçekli kurulu ve fizibilite çalışması yapılan planlama aşamasındaki YGES projeleri Tablo 5'te verilmiştir (Öğretmek, 2017; Bulut,2024 ve Güner, 2023).

kritik belirleyiciler olarak değerlendirilmektedir.

Türkiye'nin 2035 için belirlediği yaklaşık 53 GW güneş enerjisi hedefi dikkate alındığında, 11.000 MWp'lik YGES potansiyeli bu hedefin yaklaşık %20'sine karşılık gelmektedir. Bu büyüklük, hedefe ulaşma sürecinde kayda değer bir hızlandırıcı etki yaratmakta ve gerekli kapasitenin önemli bir bölümünün mevcut baraj gölleri kullanılarak sağlanabileceğini göstermektedir. Bu analiz, YGES yatırımlarının 2035 güneş enerjisi hedeflerine ulaşmada stratejik bir rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır.

6. YGES'lerin Su Kalitesi ve Sucul Ekosisteme Olası Etkileri

Yüzer FV güneş santralleri (YGES'ler) genellikle, içme suyu temini, sulama, rekreasyon ve Hidroelektrik enerji üretimi gibi maksatlarla kullanılan iç su kütleleri (baraj gölü, gölet ve göller) üzerinde kurulmaktadır. Söz konusu potansiyel etkiler; güneş ışığının sınırlanması dolayısıyla yerel su canlıları üzerinde olumsuz etki, balık (göç) hareket rotalarına etki, su yüzeyindeki gölgeleme dolayısıyla sıcaklık ve çözünmüş oksijen tabakalaşması üzerindeki etkiler, su kalitesine etkiler, sucul ortamdaki doğal süreçlerle TOK ayrışmasında olası azalma, taşıyıcı platform ve diğer yüzdürücü teçhizatın suya madde geçme riski, dalarak avlanan su kuşlarının avlanma alanlarının kısıtlanması ve göçmen kuşlar üzerindeki olası kısıtlayıcı etkiler olarak sıralanabilir. Bu tür etkiler, öncelikle YGES kurulacak toplam su yüzeyi alanı (azami ≤ %30 ~ 33)

sınırlanarak, genellikle alan modüler kurulum yaklaşımı ile su yüzeyi alanının %1 ~ 10'unu kapsayan modüllerden başlanıp, çevresel etkiler izlenerek, 2 ~ 4 aşamada nihai kapasiteye ulaşılabilecek şekilde bir planlama ile en aza indirilebilir.

Şu ana kadar, YGES'lerin olası menfi çevresel etkileri ile ilgili, büyük ölçekli uygulamalardan elde edilmiş, uzun süreli kanıtlanmış veri ve bilgiler son derece sınırlıdır. Konu ile ilgili mevcut bazı araştırma sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

YGES'ler, suyun sağladığı doğal soğutma etkisi sayesinde kara üzerindeki panellere kıyasla %10'a varan daha yüksek verimlilik sunmaktadır. Bunun yanı sıra, su yüzeyi belli oranda (<%30-33) kaplanarak buharlaşma %70'e kadar azaltılabilmekte ve su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunmaktadır (Sharma vd., 2015). YGES'ler aynı zamanda, fotosentezi kısıtlayarak yosun oluşumunu engelleyip su kalitesini iyileştirmekte, panellerde daha az toz birikimi sayesinde bakım maliyetlerini düşürmekte ve arazi kullanımına gerek bırakmadığı için ekolojik dengeye de olumlu katkılar sağlamaktadır (Mittal vd., 2017; Gokmener vd., 2023).

Singapur'daki 2 küçük (Tengeh ve Poyan) Rezervuarda bir yıl boyunca ölçülen su kalitesi parametrelerinin analizine göre, YGES'lerin bulunduğu kısımlarda toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) konsantrasyonlarında artış gözlemlenirken, toplam klorofil-a (TChla) ve çözünmüş oksijen (ÇO) seviyelerinde azalma tespit edilmiştir. Yüzer FV panellerin altındaki su yüzeyi, ışık sınırlayıcı koşullara maruz kaldığından fotosentez engellenmiş ve bu durum yüzeyde %20, dip bölgelerde ise yaklaşık %30 oranında TChla (Alg) azalmasına yol açmıştır. Bununla birlikte, su kolonundaki karışım azalırken solunum faaliyetleri devam ettiği için, ÇO seviyeleri yüzeyde %30, dip bölgelerde %50 oranında düşmekte ve panellerin hemen altında 2 mg/L seviyesine kadar gerileyerek oksijen eksikliğine yol açmaktadır. Ayrıca, toplam organik karbon (TOK) konsantrasyonlarında %15'lik bir azalma görülürken, azalan ışık konsantrasyonu nedeniyle alg metabolizması ve besin alımı zayıflamakta, bunun sonucunda toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) konsantrasyonlarında sırasıyla %30 ve %10 oranında artış meydana gelmektedir. Alg büyümesinin baskılanması su kalitesini iyileştirebilirken, düşük oksijen seviyeleri özellikle balık ve diğer sucul organizmalar için sorun oluşturabilmektedir. Besin elementlerindeki artışın, rezervuarın besin dinamiklerini değiştirerek uzun vadede ekosistemin dengesini, sınırlı düzeyde de olsa, etkileyeceği belirtilmektedir (Yang vd. (2022)). Tropik iklim koşullarının hâkim olduğu anılan 2 küçük rezervuarda yürütülen bu çalışma sonuçlarının, yerel şartlar dolayısıyla, kendine özgü olduğu ve başka çalışmalarla doğrulanmadan, bu çalışmada, genelleştirilmemesi gerektiği düşünülmektedir.

Lima ve ark. (2021) tarafından yürütülen diğer bir çalışmada, büyük ölçekli yüzer güneş enerjisi santrallerinin su kalitesi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla sensörler ve insansız su altı araçları ile gözlem yapılmıştır. Araştırma sonuçları, yüzer FV panellerinin su kalitesine bazı olumlu etkileri olduğunu ortaya koymaktadır. Elektriksel iletkenlik verileri, panellerin altındaki suyun açık su alanlarına kıyasla daha istikrarlı bir yapı sergilediğini göstermekte, özellikle ani hava değişimlerine karşı tampon görevi yaparak suyun sıcaklık ve iletkenlik dalgalanmalarından daha az etkilenmesini sağlamaktadır. Ayrıca, çözünmüş oksijen seviyeleri izleme dönemi boyunca makul değerler arasında kalmış ve 6,48 mg/L'nin altına düşmemiş olup, bu durum sucul yaşam için uygun koşulların sürdürülebilir olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yüzer panellerin su hareketini kısmen engellemesi dolayısıyla, durağan su koşulları oluşturarak bazı bölgelerde besin maddelerinin birikmesine ve potansiyel olarak su kalitesinin bozulmasına yol açabileceği ifade edilmektedir (Lima vd., 2021).

Hollanda'da 2020 yılında yürütülen bir çalışmada su biriktirme haznelерinde YGES'lerin su kalitesi ve çevre üzerindeki potansiyel etkileri incelenmiştir. Özellikle, panellerin patojenler ve madde geçişi açısından yaratabileceği olası riskler ele alınmıştır. Patojenler konusunda, YGES'lerin su yüzeyini kaplaması nedeniyle güneş ışığının suya ulaşımının azalabileceği, bunun da su sıcaklığı ve mikrobiyal aktiviteyi etkileyerek su kalitesini değiştirebileceği belirtilmektedir. Madde geçişi açısından ise, taşıyıcı platformlarda kullanılan malzemelerden ağır metaller ve diğer kirleticilerin suya geçme riski değerlendirilmiştir. Çalışmada, bu etkileri analiz etmek için içme suyu mikrobiyolojik güvenliğinin analizi (AMSD) protokolü kullanılmış ve yüzer güneş panellerinin potansiyel çevresel etkilerini tam olarak anlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır (Mathijssen. vd., 2020).

Konu ile ilgili diğer araştırmalar, YGES'lerin çevresel etkilerinin daha detaylı incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ocean Sun ve BayWa tarafından yürütülen çalışmalarda, yüzer güneş panellerinin su kalitesi ve biyolojik çeşitlilik üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Zwolle'deki Bomhofspas tesisinde gerçekleştirilen izleme çalışmaları, panellerin taşıyıcı platformları altında oksijen seviyelerinde yalnızca minimal değişiklikler olduğunu ve balık popülasyonu üzerinde olumsuz bir etki gözlemlenmediğini göstermektedir. Ayrıca, panellerin su buharlaşmasını azaltarak su tasarrufuna katkı sağladığı ve alg büyümesini önlediği belirlenmiştir. YGES bileşenlerinin çevresel uyumluluğunu değerlendiren testlerde, ağır metal geçişinin sınırlı olduğu ve organik mikro kirleticilerin tespit edilmediği sonucuna varılmıştır. Mevcut bulgular, YGES'lerin kontrollü uygulamalarla çevreye zarar vermeden kullanılabileceğini göstermekte olup, uzun vadeli etkilerin daha kapsamlı araştırmalarla desteklenmesi gerektiğini göstermektedir (YUGES., 2023).

7. Hibrit YGES Uygulama Seçenekleri

YGES tesisleri kurulum maliyeti aynı kapasitedeki karasal GES'lere göre ~ %15 daha yüksek kalmaktadır (Öztürk, 2024). Ancak bu mahzur, suyun doğal soğutma etkisi ile panel veriminin %6 ~ 10 oranında artması, buharlaşmanın ~ %70'e varan oranda azaltılması ve panellerin ekonomik hizmet ömrünün uzaması dolayısıyla, giderilerek YGES'lere potansiyel üstünlük sağlamaktadır. YGES'lerin diğer yenilenebilir enerji tesisleri ile eş zamanlı birlikte kullanımı (karasal GES, HES, Rüzgar Enerjisi Santralleri (RES), biyokütle enerjisi santralleri vb.) başlıca aşağıdaki faydaları sağlayacaktır; Solomin vd. (2021):

- Mevcut enerji (iletim, trafo vb.) şebekesine bağlanarak sistem daha güvenli ve dirençli hale getirilir.
- İlave enerji temini ile mevcut sistemin güvenilirliği ve verimliliği artırılmış olur.
- Eş zamanlı olarak kullanıldıklarında, özellikle HES ve YGES'lerden üretilen enerji birbirini çok iyi şekilde dengeleyip telafi edebilir.

Hibrit YGES'ler; karasal GES'ler, depolamalı veya nehir tipi HES'ler, pompajlı HES'ler, denizdeki RES'ler ve Jeotermal Enerji Tesisleri ile eş zamanlı planlanıp işletilebilmektedir.

Türkiye'nin ilk Yüzer GES'i Keban Barajı rezervuarında kurulmuştur. 1 MW kurulu güce sahip Kuzova Yüzer GES, 1.840 panel ile 4.783 hektarlık tarım arazisinin sulanmasına katkı sağlamakta ve yıllık 1,8 milyon kWh elektrik üretmektedir. Aynı alanda kurulan 2 MW karasal GES ile yıllık 4,22 milyon kWh enerji üretilmekte ve çiftçilerin enerji masrafları %40 azalmaktadır (DSİ, 2024).

Türkiye'deki 944 işletme barajının 5.300 km²'lik rezervuar

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

yüzey alanının %10'u Yüzer GES ile kaplandığında, yaklaşık 53 bin MW kurulu güç ve yıllık 79,5 milyar kWh elektrik üretimi sağlanabilir; yıllık 540 milyon m³ su tasarrufu ve 51 milyon ton CO₂ azaltımı mümkün olmaktadır (DSİ, 2024).

Bu veriler, Türkiye'de hibrit YGES + HES projelerinin uygulanabilirliğini ve yüksek enerji üretim potansiyelini göstermektedir.

Küresel iklim modelleri ile yapılan çoklu projeksiyonlar, Türkiye'nin de içinde yer aldığı Akdeniz havzasının, iklim değişikliği etkilerinden (sıcaklık ve buharlaşmada çok önemli artışlar, yağışlarda ve nehir akışlarında azalmalar...) en fazla etkilenecek coğrafyalardan biri olacağı yönündedir. Küresel İklim Modelleri ile eşleştirilmiş Hidrolojik Modelleme Çalışmaları, Türkiye'deki akarsu havzalarındaki nehir akışlarının (mavi su), özellikle 2050 yılı sonrasında, %20 ~ 35'e varan oranlarda azalabileceği yönündedir (OSİB, 2016). Bu durum ülke hidroelektrik enerji üretimini önemli ölçüde azaltması yanında sınır aşan nehirler üzerindeki HES'lerden mansap ülkelerine bırakılacak su miktarlarını da kısıtlayıcı yönde etkileyecektir. Hibrit YGES çözümleri ile, YGES + HES (± GES) entegrasyonuna gidilerek İklim Değişikliğinin HES'ler üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirilebilir. YGES ve GES entegrasyonuna gidilip, üretilecek ihtiyaç fazlası enerji, Katalitik Elektroliz Prosesi ile sudan üretilecek H₂, yakıt; Oksijen ise sıvılaştırılıp sıvı O₂ ve/veya Ozon üretiminde değerlendirilebilir (Götz vd., 2015; Bensmann vd., 2014; Erşahin vd., 2022)

YGES'lerde ortaya çıkan fazla enerji ile deniz suyu, acı su ve arıtılmış atıksu gibi geleneksel olmayan kaynaklardan Ters Osmoz teknolojisi ile içme/kullanma suyu üretimi de mümkündür.

8. Sonuçlar ve Öneriler

Baraj, göl, gölet ve yarı kapalı koylardaki su kütlesi yüzeylerine kurulabilen Yüzer Güneş Enerjisi Sistemleri (YGES'ler) Dünya genelinde giderek yaygınlaşmaktadır.

Yüzer GES'ler Karasal GES'lere göre başlıca; arazi kaybının önlenmesi, buharlaşmanın %70'lere varan oranlarda azaltılması, fotosentezin kısıtlanması sonucu Alg ve Midye (özellikle Zebra Midye) kontrolü sağlanması, Alg kaynaklı tat ve koku kontrolü ile doğal soğutma etkisiyle enerji verimlerinin %6 ~ 10 oranında daha yüksek olması gibi önemli üstünlüklere sahiptir.

Yakın tarihli bilimsel araştırmalar, Türkiye'deki mevcut baraj gölleri yüzeyinin %30'unda YGES kurulması halinde ~ 19.500 MWp'lık kurulu güç potansiyeli olduğunu göstermektedir.

YGES'lerin sığ ve geniş göl yüzeyli (B. Çekmece, Terkos, Eğirdir vb.) baraj veya göllerde, aşırı buharlaşma ve yeşil enerji üretimi maksatlı olarak kurulmaları halinde, fotosentezin kısıtlanması ve gölgelenmenin yol açabileceği olası olumsuzlukları en aza indirmek üzere, yüzer FV panellerle kaplı alanın; göl yüzeyinin %15 ~ 20'sini aşmaması sağlanabilir. Bu tür kısıtların olmadığı diğer durumlarda ise, yerel şartlar dikkatle gözetilerek, baraj göl yüzeyinin %30'lara kadar varan oranlarda yüzer GES'lerle kapatılabileceği belirtilmektedir.

Türkiye'deki YGES uygulamaları oldukça sınırlı olup 1MWp kurulu güçteki ilk tesis, pilot tesis olarak, DSİ Genel Müdürlüğüne Keban baraj gölünde kurdurulmuştur. Bunun dışında yine Pilot ve Fizibilite Projesi aşamasındaki az sayıda uygulama teşebbüsü bulunmaktadır. YGES'lerle ilgili proje ve uygulamaların, karasal GES'lere kıyasla çok yavaş ilerlemesindeki başlıca sorunlar; ilgili mevzuatın henüz hazırlık aşamasında oluşu, tasarım, kurulum ve hibrit işletimle

ilgili standart ve tecrübe eksikliği ile kurulu (çalışır) HES, GES ve RES'ler için çok sayıda özel sektör firmasıyla yapılmış sözleşmelere dayalı olarak verilmiş lisansların mevcudiyeti sayılabilir.

Mevcut HES'ler ile birlikte, Hibrit tarzda, işletilecek YGES'lerle; özellikle 2050 sonrası, sıcaklık ve buharlaşmadaki aşırı artışlar ile yağış ve nehir akışlarındaki azalmalar şeklinde belirginleşecek Küresel İklim Değişikliği kaynaklı etkilere karşı dirençliliğin artırılarak uyum kapasitesi sağlanması mümkündür.

- *YGES uygulamalarının, küresel iklim değişikliği etkilerinin şiddetle hissedileceği Güneydoğu Anadolu, İç Anadolu ve Ege Bölgesi'ndeki mevcut baraj gölü yüzeylerine öncelik verilerek olarak yakın gelecekte hibrit YGES + HES (± RES) çözümleri halinde, yaygınlaştırılması teşvik edilmelidir.*
- *Hibrit (Karasal ve/veya Yüzer) GES entegre edilmiş HES tesislerinde, özellikle uzun süreli ardışık kurak yıllarda, mansaba daha uzun süreyle (hatta kesintisiz şekilde) çevresel akışın da üzerinde debi bırakılması sağlanabilir.*

9. Kaynaklar

- Altıntop N. ve Erdemir, D. (2013). Dünya ve Türkiye'de Güneş Enerjisi ile İlgili Gelişmeler, *Mühendis ve Makina*, Cilt: 54, Sayı:639, 69-77.
- Batur, E. (2022). Fotovoltaik Hücrelerin Verimlerinin Karşılaştırılması ve Türkiye'de Farklı İllere Göre Makine Öğrenme Yöntemiyle Güneş Işınımı Modellerinin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, 766268.
- Bensmann, A., Hanke-Rauschenbach, R., Heyer, R., Kohrs, F., Benndorf, D., Reichl, U., & Sundmacher, K. (2014). Biological methanation of hydrogen within biogas plants: A model-based feasibility study. *Applied Energy*, 134, 413-425. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.047>
- Bozok, M. M. (2023). Yüzer Güneş Enerjisi Sistemleri: Enerji Verimliliği Açısından Yüzer Güneş Enerjisi Sistemlerinin Dizayn Optimizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, Enerji Bilim ve Teknoloji Programı.
- Bulut, K. (2024). Körfez İlçesi Sevindikli Göleti için Yüzer Güneş Enerji Santrali Uygulanabilirliğinin Araştırılması. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Çelebi, G. (2002). Bina Düşey Kabuğunda Fotovoltaik Panellerin Kullanım İlkeleri. *Gazi Üniversitesi Müh.-Mim. Fakültesi Dergisi*, Ankara: Cilt 17, No:3.
- Çelik, A., & Koç, F. (2020). Polikristal Tür bir Fotovoltaik Panelin I-V Karakteristiğinin Analitik Modellenmesi ve Deneysel Validasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 8(4), 2491-2515. <https://doi.org/10.29130/dubited.789691>
- De Lima, R. L. P., Paxinou, K., Boogaard, F. C., Akkerman, O., & Lin, F. (2021). In-Situ Water Quality Observations under a Large-Scale Floating Solar Farm Using Sensors and Underwater Drones. *Sustainability*, 13(11), 6421. <https://doi.org/10.3390/su13116421>

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2024). Yüzer GES'lerle hem temiz enerji hem su tasarrufu. <https://www.dsi.gov.tr/Haber/Detay/12128>

Durmaz, B. C., & Üçgül, İ. (2024). Tatlı Su Kaynaklarında Temiz Enerji Üretimi için Eğirdir Gölü Üzerinde Hibrit Yüzer Enerji Santral Tasarımı Örneği ve GZFT Analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(3),400-414. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1499363>

Erşahin, M.E., Güven, H. & Öztürk, İ. (2022). Atıksu Arıtma Tesisinden Atıksu Rafinerisine. M.Bulut ve C. Korkut (eds). *Döngüsel Ekonomi ve Sürdürülebilir Hayat (s. 385-410)*. Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları. DOI: 10.53478/TUBA.978-605-2249-97-0.ch15

End-of-Life solar panels: Regulations and management | US EPA. (2025, 13 Ağustos). US EPA. <https://www.epa.gov/hw/end-life-solar-panels-regulations-and-management>

Enerji Ajansı. (2024, Ekim 30). Elazığ Keban Barajı Gölü'ne ilk yüzer GES kuruldu. Enerji Ajansı. <https://enerjiajansi.com.tr/elazig-keban-baraji-golune-ilk-yuzer-ges-kuruldu/>

Ghigo, A. vd. (2022). Design and Analysis of a Floating Photovoltaic System for Offshore Installation: The Case Study of Lampedusa. *Energies*, 15, 8804, <https://doi.org/10.3390/en15238804>

Gokmener, Serkan & Çiçek, Doğa & Oguz, Elif & Haspolat, Emre & Melek, Abiddin & Deveci, Muhammet. (2023). Yüzer Güneş Enerjisi Santralleri İçin Uygun Yer Seçiminde Kullanılan Kriterler.

Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., Koch, A. M., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., & Kolb, T. (2015). Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*, 85, 1371–1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>

Güner, S. ve Özgür, A. E. (2023). Eğirdir Gölü Üzerinde Yüzer Güneş Enerji Santrali Uygulanabilirliğinin Araştırılması. *Journal of YEKARUM*, Cilt: 8, Sayı: 2, 80-93. E- ISSN:1309-9388 <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.062>

IRENA & IEA-PVPS. (2016). End-of-life management: Solar photovoltaic panels (IEA-PVPS Report No. T12-06:2016). International Renewable Energy Agency; IEA Photovoltaic Power Systems Programme.

Jin, Y., Hu, S., Ziegler, A.D. et al. Energy production and water savings from floating solar photovoltaics on global reservoirs. *Nat Sustain* 6, 865–874 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01089-6>

Kıncay, O. Güneş Enerjisi, Yıldız Teknik Üniversitesi Ders Notları, 04.04.2017 tarihinde <http://www.yildiz.edu.tr/~okincay/den.html>.

Koryürek, E. (2008). Fotovoltaik Sistemlerin Binalarda Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi. FBE.

Mathijssen, D. vd. (2020). Potential impact of floating solar panels on water quality in reservoirs. *Water Practice and Technology (2020)* 15(3): 807-811.

Mittal, D., Saxena, B.K., Rao, K.V.S. (2017). 'Floating solar photovoltaic systems: An overview and their feasibility

at Kota in Rajasthan', Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2017.

Öğretmek, B. (2017). Su ve Atıksu Tesislerinin GES Üretim Potansiyeli, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi (İZU), Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Kent Çalışmaları ve Yönetimi Programı.

Öztürk, H.H. (2017). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmeler. V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, İzmir, Türkiye, 18-21 Ekim 2017.

Öztürk, S. (2024, 28 Mayıs; güncelleme 29 Mayıs). Türkiye'nin ilk yüzer güneş enerjisi santrali, elektrik üretimine hazırlanıyor. Anadolu Ajansı. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/turkiyenin-ilk-yuzer-gunes-enerjisi-santrali-elektrik-uretimine-hazirlananda-basliyor/3232756>

ReportLinker. (2022). Global Floating Solar Panels Industry

Sachin J. M. vd. (2021). Design and Implementation of Floating Solar Power Plant. *Open Access International Journal of Science & Engineering* 6(2), DOI 10.51397/OAIJSE02.2021.0003

Sen, Z. (2003). Su Bilimi ve Yöntemleri. İstanbul: Su Vakfı Yayınları

Sharma, P., Muni, B., Sen, D. (2015). 'Design parameters of 10 kW floating solar power plant,' *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2: 85–89.

Sharon, M. (2016). Global warming Vs Helium fusion in Sun. *Journal of Advances in Physics*, 4126–4128. <https://doi.org/10.24297/jap.v11i8.6822>

Solarpower Europe (2025). https://api.solarpowereurope.org/uploads/Global_Market_Outlook_2025_v1_aaebd9698b.pdf

Solomin, E., Sirotkin, E., Cuce, E., Selvanathan, S. P., & Kumarasamy, S. (2021). Hybrid Floating Solar Plant Designs: A review. *Energies*, 14(10), 2751. <https://doi.org/10.3390/en14102751>

Sustainability Global Team (2025). Floating Solar for Renewable Energy. Climate Action & Carbon Reduction. Sustainability Global. https://sustainabilityglobal.org/article/floating-solar-for-renewable-energy/?utm_source=chatgpt.com

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2016). *Mersin İç Dairesel Raporu 2016* [PDF]. https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/Mersin_icdr2016.pdf

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025). Enerji – Elektrik. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>

Temelsu (n.d.). Keban Barajı Dolusavağı İyileştirme Yapıları Mühendislik Hizmeti – Türkiye. Temelsu Mühendislik A.Ş. <https://temelsu.net/keban-baraji-dolusavagi-iyilestirme-yapilari-muhendislik-hizmeti/#:~:text=Baraj%20g%C3%B6vdesi%2C%20ka ya%20dolgu%20ile,m3%20ve%20675%20km2'dir.>

URL-1: <https://Gepa.Enerji.Gov.Tr/Mycalculator/>, (Ziyaret Tarihi: 18 Mart 2025).

- Varınca, K., Gönüllü T. (2006). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımının Çevresel Olumlu Etkileri, VI. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES 2006), Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 25-27 Mayıs 2006.
- World Bank Group, ESMAP, SERIS. (2019). Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners.
- Yang, P., Chua, L. H. C., Irvine, K. N., Nguyen, M. T., & Low, E. (2022). Impacts of a floating photovoltaic system on temperature and water quality in a shallow tropical reservoir. *Limnology*, 23(3), 441–454. <https://doi.org/10.1007/s10201-022-00698-y>
- YeniEnerji Dergisi. (2021, Mayıs 6). GTC ve HSB güç birliği ile tasarlanan yerli yüzer GES Pendik Marina'da sergileniyor. YeniEnerji. <https://www.yenienerji.com/haberler/gtc-ve-hsb-guc-birligi-ile-tasarlanan-yerli-yuzer-ges-pendik-marina-da-sergileniyor>
- Yerebakan, M. (2010). Güneş Kolektörü Uygulamaları. İstanbul Ticaret Odası Yayınları. İstanbul:Yayın No:2010-22.
- YUGES. (2023, 24 Eylül). Çevresel Etkiler- YUGES. YUGES- Yüzer Güneş Enerjisi Sistemleri. <https://yuzerges.net/cevresel-etkiler/>