



Yüzer Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinin Teknik ve Çevresel Bakımdan İncelenmesi

Technical and Environmental Review of Floating Photovoltaic Energy Conversion Systems

Zehra Akcan Kocadağ*, Murat Ünlü

Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği, Kocaeli, Türkiye

Öz

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi, dünyanın sıfır emisyonlu gelecek hedefi için önde gelen yatırım tercihleri arasında yer almaktadır. Yüzer ve kara fotovoltaik (FV) enerji dönüşüm sistemleri, kurulum, bakım, elektriksel verimlilik, çevresel etkiler, maliyet, finansal geri dönüş açısından farklılıklara sahiptir. Yüzer sistemler, fotovoltaik modül taşıma sistemlerinde mekanik stresin azalması, suyun modülleri soğutma etkisi, gölge etkisinin az olması, güneş takip sistemleri kurulumlarının daha kolay olması, yüzey alanı başına daha verimli elektrik üretimi, buharlaşmanın azaltılması ve hidroelektrik santrallerle hibrit çalışma olanağı gibi birçok avantaja sahiptir. Kara sistemleri, yüzer sistemlere göre genellikle daha kolay kurulum, ancak kurulum yapılacak arazinin bulunması artık çok daha zor olmaktadır. Kara sistemlerinde, fotovoltaik modül sıcaklığı ve gölgelenme elektrik enerjisi üretiminde verimliliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, literatürde yer alan küresel ölçekte ve Türkiye'deki Kara ve Yüzer sistemlerin simülasyon ve deneysel araştırmaları kıyaslanarak Elâzığ bölgesinde FV çalışması gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde, coğrafi konum, modül verimliliği, sıcaklık, rüzgâr, reflektör kullanımı gibi değişken şartlarda, Yüzer FV kurulumlarında 7,384 - 10,204 dönüm/MW aralığında, Kara FV kurulumlarında 15 dönüm/MW düzeyinde elektrik üretilebilmektedir. Yapılan kıyaslama sonucunda, Yüzer FV avantajlarının değerlendirilmesiyle Elâzığ-Hazar Gölü üzerinde Yüzer FV kurulumu planlanmıştır. PVsyst simülasyon programında, Elâzığ-Hazar Gölü üzerinde yüzey alanının %0,1 (76000 m²)'lik kısmında modelleme yapılmıştır. Simülasyon sonucunda, 14° eğim açısıyla göl yüzeyine yerleştirilen 9672 adet fotovoltaik modül ile 11,72 dönüm/MW ile yıllık toplam 11997 MWh elektrik üretilmiştir. Kara FV kurulumunda ise 13,05 dönüm/MW değeri elde edilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalara paralel olarak ek soğutma ve reflektif malzeme eklenmeden dahi verimlilik artışı görülmüştür. 37° eğim açılı fotovoltaik modüllerden oluşan kara sistemlerine göre elektrik üretim verimliliği %2,84 artmıştır. Bununla birlikte yıllık CO₂ emisyonun 143,8 ton azalmakta ve 25330 m³ su buharlaşmasının önüne geçilmektedir. Çalışma kapsamı, mikro ölçekte belirlenen su yüzey alanının coğrafi özelliklerine bağlı olarak çevrenmiştir. Elde edilen bulgular ve materyallerle farklı bölgeler için de benzer yöntemler kullanılarak analiz yapılması mümkün olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Albedo, buharlaşma, CO₂ emisyonu, sıcaklık etkisi, yüzer fotovoltaik.

Abstract

Solar energy, one of the renewable energy sources, is among the leading investment choices for the world's zero-emission future goal. Floating and onshore photovoltaic (PV) energy conversion systems have differences in terms of installation, maintenance, electrical efficiency, environmental impacts, cost and financial return. Floating systems have many advantages such as reduced mechanical stress in photovoltaic module transportation systems, cooling effect of water on modules, less shadow effect, easier installation of solar tracking systems, more efficient electricity generation per surface area, reduced evaporation and hybrid operation with hydroelectric power plants. Land systems are generally easier to install than water, but finding land for installation is now much more difficult. In terrestrial systems, photovoltaic module temperature and shading cause a decrease in the efficiency of electricity generation. In this study, the simulation and experimental researches of Land and Floating systems in Turkey and on a global scale in the literature are

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: 255102018@kocaeli.edu.tr

Zehra Akcan Kocadağ orcid.org/0000-0002-3626-5620

Murat Ünlü orcid.org/0000-0002-7650-119X



compared and it is aimed to realize a PV study in Elazığ region. In the literature, under variable conditions such as geographical location, module efficiency, temperature, wind, reflector usage, floating PV installations can generate electricity in the range of 7.384 - 10.204 acres/MW, and onshore PV installations can generate electricity at the level of 15 acres/MW. As a result of the comparison, Floating PV installation was planned on Lake Elâzığ-Hazar by evaluating the advantages of Floating PV. In the PVsyst simulation program, modeling was performed on a 0.1% (76000 m²) of the surface area on Lake Elâzığ-Hazar. As a result of the simulation, with 9672 photovoltaic modules placed on the lake surface with a slope angle of 14°, a total of 11997 MWh of electricity was generated annually with 11.72 acres/MW. In the land PV installation, a value of 13.05 acres/MW was obtained. In parallel with the studies in the literature, an increase in efficiency was observed even without additional cooling and reflective material. Electricity production efficiency increased by 2.84% compared to land systems consisting of photovoltaic modules with 37° tilt angle. Annual CO₂ emission decreased by 143.8 tons. Annual water evaporation of 25330 m³ could be prevented. The scope of the study was circumscribed depending on the geographical characteristics of the water surface area determined at the micro scale. With the findings and materials obtained, it is possible to analyse using similar methods for different regions.

Keywords: Albedo, CO₂ emission, evaporation, floating photovoltaic, temperature effect.

1. Giriş

Dünya nüfusu artmaya devam ettikçe enerji talebi de artmakta, bu da sera gazı salan fosil yakıtların kullanımının artmasına neden olmaktadır (Olabi ve Abdelkareem, 2022). Fotovoltaik ve rüzgâr teknolojilerinin, yenilenebilir enerji pazarında 2020'lerin ortalarında fosil bazlı kaynakları geçmesine öncülük etmesi ve 2040 yılına kadar dünyanın elektrik ihtiyacının yarısından fazlasını karşılaması beklenmektedir (Gorjian vd. 2019, 2020, Gorjian ve Ghobadian 2015). Dünya bir iklim kriziyle karşı karşıya kalmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı (UEA), dünyanın 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşması için güneş enerjisi üretiminde yıllık ortalama 24%'lük bir büyüme olması gerektiğini bildirmiştir (Technical Report 2021). Solar FV'nin gelecekte dünyaya enerji sağlayacak öncü bir teknoloji olması beklenmektedir (Technical Report 2022). Solar FV'nin fiyatı büyük ölçüde azalarak geleneksel enerji kaynaklarının fiyatına benzer bir fiyata ulaşmıştır (Crago 2021, Ghosh 2022). Kurulu Solar FV'nin büyümeye devam etmesi beklenirken, büyük ölçekli karasal fotovoltaik çiftlikleri kurulacak arazi bulma sorunlarıyla karşılaşmaktadır (Chen vd. 2022). 1 MW'lık bir kara FV sisteminin yaklaşık 15000 m² araziye ihtiyacı bulunmaktadır (Cuce vd. 2022). Büyük arazi gereksinimleri ve artan arazi fiyatları nedeniyle, bir FV çiftliği için arazi satın almak giderek zorlaşmaktadır (Goswami vd. 2019). Fotovoltaik modül kurulumlarının karşılaştığı diğer zorluklar, enerji verimliliğini artırmak için modüllerin soğutulması ve tozdan arındırılmasıdır (Dwivedi vd. 2020). Bu zorluğa bir çözüm, göletler, göller, rezervuarlar, okyanuslar, kanallar, lagünler, atık su arıtma tesisleri veya sulama havuzları gibi su kütlelerine FV yerleştirmektir (Sahu vd. 2016). FV modüllerin su yüzeylerine yerleştirilmesine yüzer fotovoltaik veya yüzdürücü fotovoltaik denmektedir. FV çiftlikleri için arazi mevcudiyeti konusunda zorluklarla karşı karşıya olan ülkeler, Yüzer FV'nin potansiyeline bakmakta-

dır (H. Liu vd. 2018). 2007 yılında ilk Yüzer FV sistemi Aichi, Japonya'da konuşlandırılmıştır (Tina vd. 2021). Kurulu Yüzer FV, kara solar sistemlere göre daha verimli olmaktadır. Daha az kurulum alanı ile daha fazla elektrik üretebilmektedir. Yüzer FV örnekleri incelendiğinde, Bolivar (8,53 dönüm/MW), Goolwa (7,384 dönüm/MW), Lilydale (10,204 dönüm/MW) olmak üzere genellikle 10 dönüm/MW değerinin altında olduğu görülmektedir (Rosa-Clot vd. 2017). Türkiye'de ilk Yüzer FV projesi, 2014 yılında Mersin, Mut ilçesinde Azmak 2 Hidroelektrik Santralinde 20 kW kurulu gücüyle gerçekleştirilmiştir (Mardin Ticaret Odası 2023). Ardından 2017 yılında, İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından Büyükçekmece Gölüne 240 kW kurulu güç kapasiteli Yüzer FV santrali kurulmuştur (İBB 2017). 2024 yılında, DSİ Elâzığ Keban Barajı üzerinde faaliyete başlayan Kuzova tesisi, Yüzer FV projeleri arasında yer almıştır. Kuzova santrali, 1 MW Yüzer FV ve 2 MW Kara FV sistem kurulumu ile çalışmaktadır (DSİ 2024). Yüzer güneş fotovoltaikleri, sistemlerin doğrudan su kütleleri üzerine yerleştirildiği yeni ve giderek daha uygulanabilir bir seçim olmaktadır (Lee vd. 2020). Literatürde genellikle deneysel veya saha verilerine dayalı sınırlı sayıda karşılaştırma bulunurken, bu çalışma farklı kurulum tiplerini aynı koşullarda simüle ederek performans farklılıklarını sayısal olarak ortaya koymakta ve bu yönüyle çalışma, Yüzer FV ve Karasal FV sistem karşılaştırmasına özgün bir katkı sunulmaktadır. FV sistemlerde elektrik üretim verimliliğinin artırılması, emisyonların azaltılması ve su buharlaşmasının önüne geçmeyi amaçlamaktadır. Elâzığ-Hazar Gölünün %0,1 (76000 m²)'lik belirlenmiş yüzey alanında yüzer fotovoltaik sisteminin teknik ve çevresel etkileri PVsyst simülasyon ortamında incelenmiştir. Çalışmada, rüzgâr hızının modül yüzey sıcaklığına etkisi, gölgelenme, modül eğim açısı, albedo etkisi, su buharlaşmasının azaltılması, hidroelektrik santrallerle hibrit çalışmaya faydası değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar-

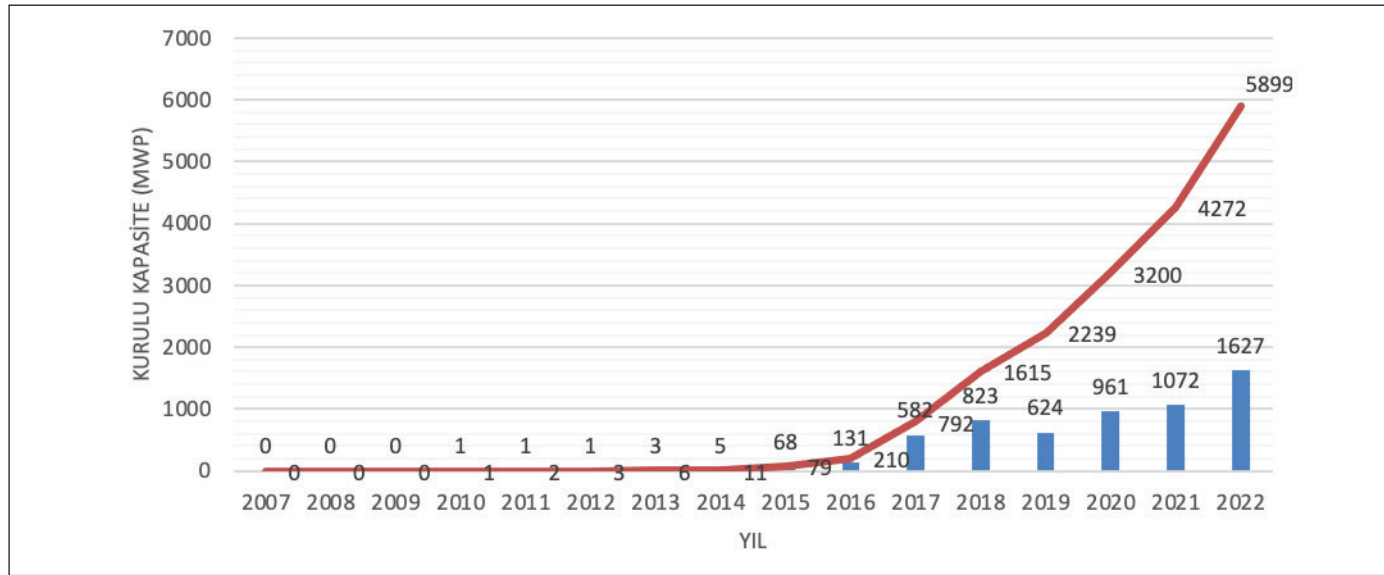
la Kara ve Yüzer FV sistemleri PVsyst programında simüle edilerek karşılaştırılmıştır. Benzer nitelikteki diğer su yüzeyleri için de aynı simülasyon metodolojisi kullanılabilir. Yüzer FV sistemi, yüzer platform, demirleme (ankraj) ve dağıtım sistemi ile FV modülü içermektedir (Van de Ven vd. 2021). Çizelge 1'de Yüzer FV erken gelişim kilometre taşları

yıllık bazda incelendiğinde bu alandaki gelişim ve çalışmaların ilerleyişi gözlemlenebilmektedir.

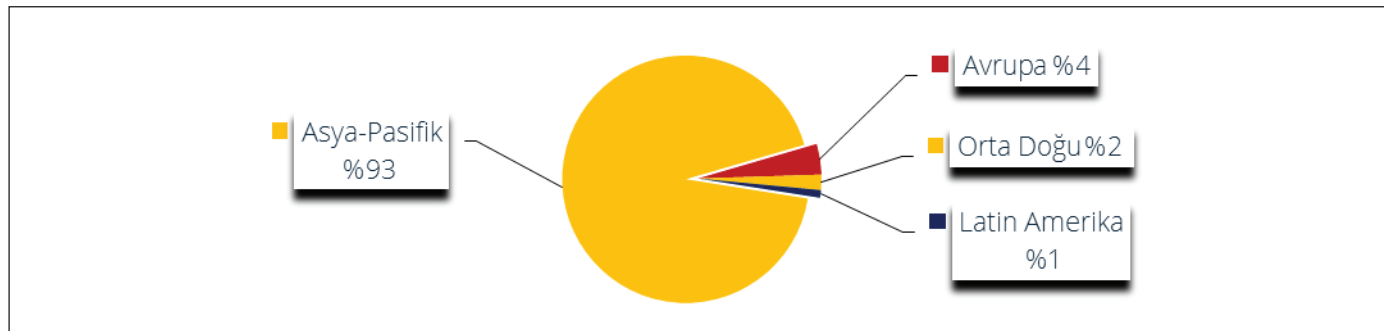
Şekil 1'de 2007-2018 yılları arasındaki kurulu Yüzer FV kapasitesinin büyümesi ve Şekil 2'de küresel dağılım gösterilmektedir.

Çizelge 1. Yüzer FV erken gelişim kilometre taşları (Reindl vd. 2019)

Kilometre Taşları	Yıl	Konum	Büyüklik (kWp)
İlk Yüzer FV kurulumu	2007	Aichi Eyaleti, Japonya	20
İlk Ticari Yüzer FV kurulumu	2008	Far Niente Winery, USA	175
İlk takipli (döner sistem) Yüzer FV kurulumu	2010	Petra Winery, Italy	200
İlk MW boyutunda Yüzer FV kurulumu	2013	Saitama Prefecture, Japan	1180
Mikro inverter kullanan ilk Yüzer FV kurulumu	2016	Fukuoka Prefecture, Japan	300
Hidroelektrik santralli (HES) ilk Yüzer FV hibrit sistem	2017	Alto Rabagao Dam, Portugal	220



Şekil 1. Global Yüzer FV kurulu kapasitesi (Rodríguez-Gallegos vd. 2025).



Şekil 2. 2022'de küresel çapta Yüzer FV sistemine yönelik küresel talebin bölgelere göre dağılımı (Statista ve Mackenzie 2022a, 2022b).

Kümülatif kurulu Yüzer FV kapasitesi doğrusunun eğimi, yeni Yüzer FV sistemlerinin kurulmasıyla 2015 yılından sonra hızla artmaktadır.

2. Gereç ve Yöntemler

Yüzer ve karasal sistemler için kullanılan FV teknolojileri farklıdır ve çalışma ortamındaki diğer ilgili koşullardaki değişikliklerden kaynaklanan çeşitli faktörlere bağlı olmaktadır. Ayrıca, her iki sistemin performansı farklıdır. Performansı etkileyen tüm parametrelerin kümülatif etkilerine göre değerlendirilmektedir (Golroodbari ve Van Sark 2020). Yüksek düzeyde stres ve titreşime neden olan dalga ve diğer dış kuvvetler, Yüzer FV sistemlerinde yaygındır ve bu da modüllerde olası mikro çatlakları beraberinde getirerek dayanıklılıklarını azaltmaktadır (Sahu vd. 2016). Ayrıca, açık deniz Yüzer FV sistemi, tatlı suların üzerine kurulanlara göre çok daha yüksek mekanik strese maruz kalmaktadır (Reindl vd. 2019).

FV sistemler, uygulama alanlarına göre karasal, kanal üstü ve yüzer sistemler olarak sınıflandırılmakta olup, her birinin farklı teknik, çevresel ve ekonomik avantajları ile sınırlılıkları bulunmaktadır. Karasal FV sistemler, güneş takip sistemlerinin düşük maliyetle entegre edilebilmesi, modül eğim açısının manuel olarak kolayca ayarlanabilmesi ve enerji nakil hatlarına erişimin kolay olması gibi avantajlar sunmaktadır. Aynı zamanda kırsal ve açık alanlarda geniş ölçekli kurulumlara uygunluğu ile dikkat çekerken, bakım ve temizlik işlemlerinin daha erişilebilir olması da önemli bir avantajdır. Ancak, özellikle yoğun nüfuslu kentsel bölgelerde yeterli arazi bulunamaması, altyapı ve mühendislik gereksinimlerinin kurulum süresini uzatması gibi dezavantajları da söz konusudur. Kanal üstü FV sistemler, kullanılmayan su kanallarını enerji üretim alanına dönüştürerek arazi kullanım baskısını azaltmakta, kanal suyunun soğutma etkisiyle modül verimliliğini artırmakta ve buharlaşma oranlarını düşürerek su verimini desteklemektedir. Buna karşılık, kanal yapısının karmaşıklığı, bakım zorlukları ve kablolama maliyetlerinin artması gibi çeşitli sınırlamalar mevcuttur. Yüzer FV sistemler ise göller, barajlar veya deniz yüzeyleri üzerinde enerji üretimi sağlayarak kara alanlarının korunmasına olanak tanımakta; suyun serinletici etkisi ile modül sıcaklığını düşürerek verimliliği artırmakta ve gölgeleme sayesinde su kalitesini korumaktadır. Ancak bu sistemler, yüksek malzeme maliyetleri, deniz koşullarına karşı dayanım gereksinimi, bakım ve enerji iletiminde zorluklar ile ekosistem üzerindeki olası olumsuz etkiler nedeniyle dikkatli planlama gerektirmektedir. Tüm bu sistem türleri, kurulacak bölgenin

fiziksel, ekonomik ve çevresel koşulları doğrultusunda bütüncül bir değerlendirme ile ele alınmalıdır.

2.1. Yüzer FV Sistemleri Teknik ve Çevresel Özellikleri

Yüzer FV ile ilgili ilk çalışmalar, Japonya Ulusal İleri Endüstri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü tarafından FV modüllerin su ve hava ile soğutulmasının elektrik üretimine etkisini incelemek için Aichi bölgesindeki hidroelektrik santral üzerine kurulum yapılmıştır (Trapani ve Redón Santafé 2015). Su üzerindeki sistem doğal bir soğutmaya sahiptir. Suyun sağladığı doğal soğutma etkisiyle, Yüzer FV'ler karasal sistemlere kıyasla daha yüksek verimliliğe sahip olmaktadır (Antonio vd. 2017). Yüzer FV sisteminin optimum eğim açısında 0° eğime kıyasla %43,5 daha fazla enerji ürettiğini belirtmektedir (Finch ve Calver 2008). Başka bir çalışmada, Yüzer FV sistemi için en iyi eğim açısının enleme eşit olduğu, ancak maksimum ısı transferinin 0° eğim açısında gerçekleştiği sonucuna varılmıştır (Yadav vd. 2017). FV modüller arası uzaklık, platform yerleşim açısı, modül verimliliği, buharlaşma, rüzgâr hızı, coğrafi konuma bağlı yıllık ışıyım miktarı doğrudan elektrik üretimi ve sistem bakımı üzerinde etkili olmaktadır. Diğer taraftan Yüzer FV sisteminin ekosisteme olan çevresel etkisi de göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Su yüzeyinden gelen güneş radyasyonunun artan yansıtıcılığı, FV modüle gelen ışık miktarını artırarak verimliliğin artmasına neden olmaktadır (Pringle vd. 2017). Uygun bir Yüzer FV lokasyonu seçmek için dikkate alınması gereken kriterlerin listesi Çizelge 2'de özetlenmektedir.

2.2. Sabit ya da Takip Sistemli Yüzer FV

FV modüllerden elde edilebilecek maksimum enerji kazancı, modüllerin maksimum güneş ışıyım yönünde hizalanmasını gerektirmektedir. Sabit ya da takip sistemler, enerji üretim optimizasyonu ile verimliliği artırmayı hedeflemektedir. Maliyet avantaj öngörülerine dayanarak sabit ya da takip sistemli kurulumlar gerçekleştirilmektedir. Enerji üretim verimliliğinin artırılması amacıyla güneş ışığının yansıtıcı reflektörlerle FV modüllere yoğunlaştırıldığı, izleme ve soğutma tasarımlarını içeren Yüzer FV sistemleri, yapay veya doğal su havzalarında kurulabilmektedir. Sistem dikey eksenli izleyici, aktif sistemli modül soğutma (su püskürtme) ve gün ışığını yoğunlaştıran bir dizi reflektörden oluşmaktadır. Kurulu gücün ortalama yıllık verimi, iklim koşullarına bağlı olarak reflektörlerle ışığın yoğunlaştırılması ve soğutma etkisiyle sabit bir yüzer FV sisteme göre %60-70 daha fazla olabilmektedir (Tina vd. 2011). Sistem verimliliğini ve maliyetini artıran reflektörlerin yıllık verimin sabit bir Karasal FV sistemine kıyasla Yüzer FV sistemiyle %30'luk bir artış beklendiği tespit edilmektedir (Cazzaniga vd. 2012).

Çizelge 2. Saha uygunluğu (Reindl vd. 2019).

Özellik	Kriterler
Hava durumu	Yüksek ışınlım Sınırlı yağmur veya sis Rüzgar hızları 30 m/s'nin altında
Konum	Dağlardan veya çevredeki binalardan gölgelenme olmaması Elverişli ulaşım Rahat kurulum ve bakım Elektrik bağlantısına yakın
Zemin koşulları	Tutarlı arazi yapısı Ankraj için kompakt toprak
Su şartları	Sınırlı dalga Tatlı su Düşük sertlik Düşük tuzluluk oranı

2.3. Hidroelektrik Santraller ile Yüzer FV Entegrasyonu

Elektrik üretimindeki faydanın yanında Yüzer FV için yan faydalar da çoktur. Diğer FV tesislerinin yanı sıra önlenen arazi-enerji çatışmaları, daha düşük arazi edinme maliyetleri ve saha hazırlama maliyetleri, suyun sıcaklığı düzenleyici etkisi nedeniyle artan FV modül verimliliği, daha az alg büyümesi, daha az buharlaşma, modüller üzerindeki gölgeleme etkilerinin azaltılması ve hidroelektrik ile kullanıldığında daha düşük sermaye maliyetlerini kapsamaktadır (Hernandez vd. 2014, L. Liu vd. 2017). Yüzer FV'nin su buharlaşmasını azalttığı ve dolayısıyla hidroelektrik verimliliğini artıracığı bulunmuştur (Cazzaniga vd. 2019, Rosa-Clot vd.

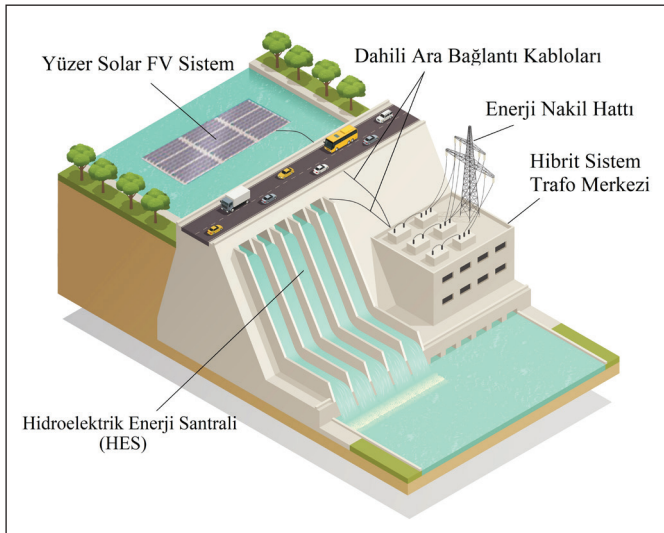
2021). Şekil 3'te, genel bir HES-Yüzer FV hibrit sisteminin gösterilmektedir. HES ve Yüzer FV'yi birleştirmenin temel faydaları; su tasarrufu, su kalitesi, şebeke bağlantısı, soğutma, güç dalgalanmasının azaltılması, arazi işgalinin olmaması, enerji depolama ve radyasyon dengesi olmuştur (Cazzaniga vd. 2019, Lee vd. 2020). İlk HES Yüzer FV hibrit sistemi, 2017 yılında Portekiz'deki Alto Rabagao rezervuarına kurulmuştur (Ciel et Terre 2024).

2.4. Albedo Etkisi

Albedo değeri, güneş radyasyonunun ulaştığı yüzeye bağlı olarak, mükemmel emiciliğe sahipse 0, mükemmel yansıtıcı bir yüzeyse 1 değerini almaktadır (Gul vd. 2018). Albedo, yansıyan ışık miktarının gelen ışık miktarına olan yüzdesel oranı ile hesaplanmaktadır. Yansıtıcılığı artırarak albedoyu yükseltmek için modül arkalarında kalan su yüzeyi yansıtıcı malzemelerle kaplandığında verimlilikte artış gözlenecektir. Yüzer FV'nin yüksek dağ göllerine yerleştirilmesi, karla kaplı dağların yüksek albedoya sahip olması ve güneş ışınlarını yansıtması avantajına sahiptir (Piana vd. 2021). Dağ göllerindeki Yüzer FV potansiyeli, Lac des Toules'de 1800 m yükseklikte 448 kWp'lik bir Yüzer FV sisteminin kurulduğu İsviçre'de incelenmiştir. Karla kaplı zemin enerji verimini %10 oranında artırabilmektedir (Kahl vd. 2019, Piana vd. 2021).

2.5. Gölgeleme ve Kirlenme Etkisi

Yüzer FV tesisler, daha az gölgeleme, daha az tozlanma ve albedo etkisi gibi diğer özelliklerle daha fazla enerji üretilmesine yardımcı olabilmektedir (H. Liu vd. 2018, Rosa-

**Şekil 3:** Hibrit HES-yüzer FV sistemi.

Clot ve Tina 2017). Kirlenme kayıpları, FV sistemlerinde biriken tozun bir sonucudur ve FV sisteminin güç üretimini azaltan önemli bir sorun olmaktadır (Chanchangi vd. 2021, Chanchangi vd. 2021, Ghosh 2020, Sengupta vd. 2021). Gölgeleme veya arıza olmayan normal çalışma koşullarında, yüksek çalışma sıcaklığı ve kirlenme nedeniyle gelen ısımanın azalması FV modüllerin verimliliğini azaltabilmektedir. Verimliliği etkileyen bu kayıpların enerji etkisi hem FV teknolojisine hem de çevresel koşullara bağlıdır (Sarver vd. 2013). Yüzer FV kurulumlarında, modüllerin yerleşim açıları, yakınlardaki ağaç veya yapılar, dalga hareketleri gibi fiziki faktörler gölgelemeye sebep olarak verimliliği düşürmektedir. Kirlilik açısından ise eğer tuzlu su üzerine kurulum yapıldıysa modül üzerinde tuz ve mineral tabakası oluşabilmektedir. Diğer taraftan kuş pisliği modül verimliliğini olumsuz etkileyen organik kirlilik kaynaklarındandır. Modül eğim açısı 5°'nin altında olduğunda yağmur temizleme etkisi azalmakta ve toz tutunma ihtimali artmaktadır. Kirliliğe bağlı yıllık kayıp faktörü literatürde genellikle, 0° eğim için %7-12, 5° eğim için %4-8, 10° eğim için %2-5, 14° eğim için %2-4 aralıklarında seçilmektedir.

2.6. Buharlaşma Etkisi

Sulak alanların su yüzeylerinin kaplanması buharlaşmanın azaltılması ile ilişkili olmaktadır (Hassan vd. 2015). Yüzer FV'ler tarafından sağlanan gölge nedeniyle su buharlaşması azalmaktadır. Deneyisel çalışmalar sonucunda su rezervuarının %90-100'ünün kaplanması halinde su buharlaşmasının yaklaşık %90'ından tasarruf edilebileceği görülmektedir (Rosa-Clot vd. 2017, Taboada vd. 2017). Brezilya'nın yarı kurak bir bölgesindeki 7 su rezervuarı için üç senaryo geliştirilmiştir. Üç senaryo, su yüzeylerinin sırasıyla %19,3; %50 ve %70'ini kapsayacak şekilde kaplanmasına dayanmaktadır. Sonuçta, beklenen toplam buharlaşmanın sırasıyla %7,3; %15,3 ve %55,2 önlendiğini ortaya koymuştur (Padilha Campos Lopes vd. 2020). Buharlaşmada matematiksel modellemenin kullanıldığı bir çalışmada Çizelge 3'teki değerler elde edilmiştir.

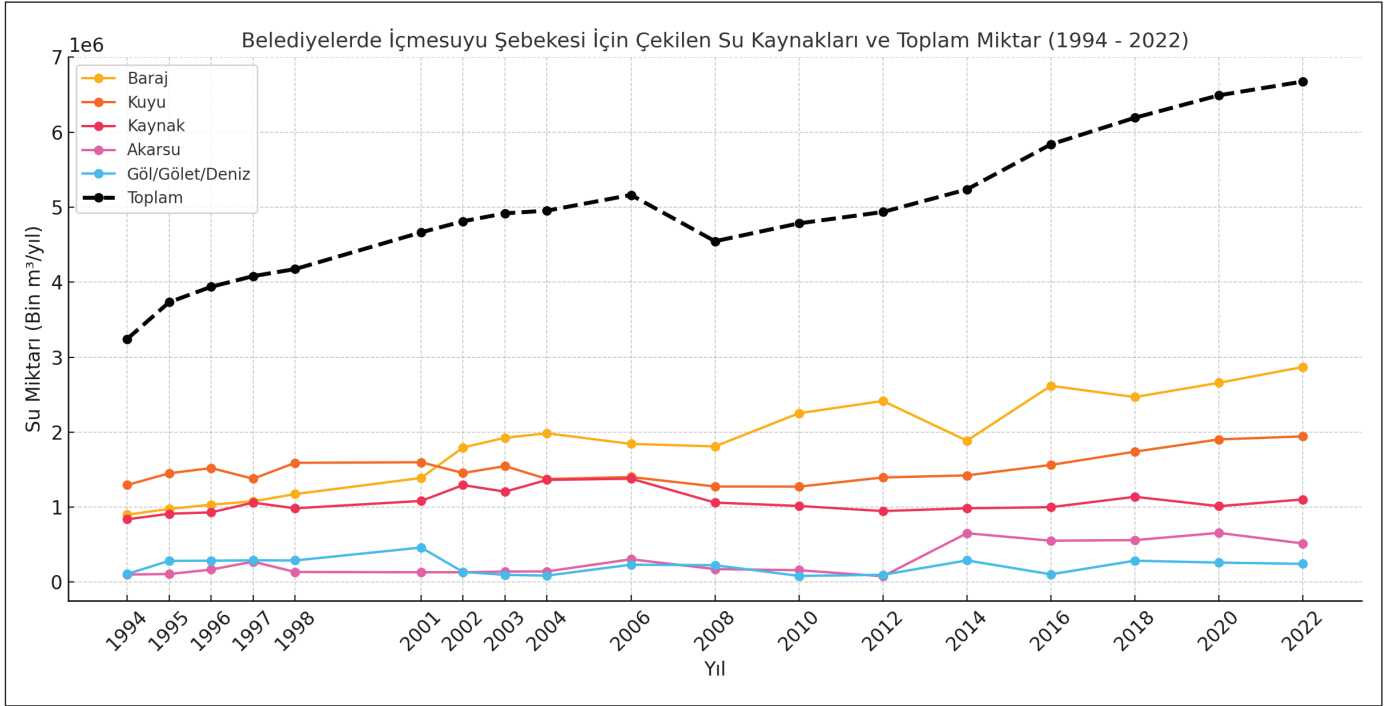
Çizelge 3. Yüzer FV ile ortalama buharlaşma azaltma oranı (Bontempo Scavo vd. 2021).

Yüzer FV ile Ortalama Buharlaşma Azaltma Oranı					
Yüzer FV ile Yüzey Kaplaması (%)	10	30	50	70	100
Ortalama Buharlaşma Azaltımı (%)	6	18	30	42	60

Türkiye'de yıllık buharlaşma etkisi azaltıldığında da benzer sonuçlar alınabilmektedir. Türkiye İstatistik Kurumu, 2022 yılı verilerine göre bir kişi günlük ortalama 229 litre su tüketmektedir. Bu tüketimin yıllık karşılığı 83585 m³ değerindedir. Türkiye, 2022 yılı içme suyu şebekesi için yıllık toplam çekilen su miktarı 6,676,197 x 10³ m³/yıldır. Günlük karşılığı ise 18290x10³ m³tür. Şekil 4'te 1994-2022 yılları arasında yıllık çekilen toplam su miktarı verilmektedir (TÜİK 2023). Yüzer FV ile uygun su yüzeylerinin tamamının %10'u modüllerle kaplandığında yıllık 1242.1 hm³ su buharlaşmasının önüne geçilmektedir (Kulat vd. 2023). Diğer bir ifadeyle 14.860.321 kişinin günlük su ihtiyacı karşılanabilmektedir. Türkiye'de 1985-2024 yılları arasında ortalama günlük buharlaşma miktarlarına göre Mayıs-Ekim ayları aralığında en fazla Temmuz ayında 8,1 mm değerindedir. Buharlaşmanın Fırat-Dicle havzasında daha fazla olduğu görülmektedir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2025). Bu bölgede kurulacak Yüzer FV santraller ile önemli miktarda su buharlaşmasının önüne geçilebilecektir. Hazar Gölü'nde toplam yıllık buharlaşma değeri 970 mm'dir. Göl yüzey alanı 76x10⁶ m² olduğundan yıllık toplam buharlaşma 73.72x10⁶ m³ seviyesindedir.

2.7. Çevresel Etkiler

Çevresel etkiler, ekosistemlerin Yüzer FV tesisler üzerindeki etkileri ve Yüzer FV sistemlerin ekosistemler üzerindeki etkileri olarak iki boyutta ele alınmaktadır. Ekosistemin biyolojik kirliliği ile Yüzer FV sistemi üzerindeki etkisi sonucu modül verimliliği azalmakta ve bakım maliyetleri artmaktadır (Hooper vd. 2021). Bu tesisler, CO₂ ve diğer zararlı gazların emisyon değerlerinin düşmesine katkı sağlamaktadır. Bunun yanında, kablolar ve tesisten yayılan ısı denizdeki organizmaların büyümesini olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca alg popülasyonunun büyümesini de azaltmaktadır. Su yüzeyinin FV modüllerden dolayı gölgede kalması ile alg büyümesi ve ötrofikasyon önlenmektedir. Bu da su kalitesinin artmasına yol açmaktadır (Farfan ve Breyer 2018, Ferrer-Gisbert vd. 2013, Li vd. 2011, Pimentel Da Silva ve Branco 2018, Sahu vd. 2016). Yüzer FV ve alg büyümesi arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak için daha fazla çalışmaya gerek vardır (Ranjbaran vd. 2019). Yüzer FV araştırmalarının ve tesislerinin çoğunluğu tatlı suda yapılmıştır ve bu yaklaşım deniz suyu tesislerine kolayca aktarılamamaktadır (Hooper vd. 2021). FV modüller su yüzeyini kaplayarak buharlaşmayı azaltmakta ve su kıtlığından kurtulmaya katkı sağlamaktadır. Büyük alana yayılan yüzer sistemler göl ekosistemleri için zararlı olabilmektedir (Haas vd. 2020). Yüzer FV tesis için kullanılan malzeme, kablolama, temizleme gibi



Şekil 4. Türkiye’de 1994-2022 aralığında içme suyu şebekesi için yıllık toplam çekilen su miktarı (TÜİK 2023).

işletme ve bakım süreçleri suyun kalitesini ve su altındaki yaşamı bozabilmektedir (Pimentel Da Silva ve Branco 2018). Yüzer FV, su kalitesi üzerindeki etkileri fiziksel, kimyasal ve biyolojik sistemler açısından olumlu ve olumsuz yanları Çizelge 4’te yer almaktadır.

Türkiye’de bulunan korunaklı alanlar Doğa Koruma ve Milli Parklar Müdürlüğü tarafından belirlenmiştir. Korunaklı alanlar haricinde kalan uygun baraj, gölet ve akarsu havza alanları Şekil 5’te gösterilmektedir. Ülkemizde özellikle Fırat-Dicle Havzasında tatlı su alanlarının fazlalığı göze çarpmaktadır. Ekolojik dengeye zarar vermeden, Yüzer FV sistemlerinin kurulması elektrik üretimi açısından fayda sağlayacaktır. Türkiye’de tatlı su kaynakları dikkate alındığında, Yüzer FV sistemlerle üretilebilecek potansiyel elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının yalnızca bu bölgeden sağlanabileceği öngörülmektedir.

Çevresel emisyon değerleri Türkiye özelinde incelendiğinde kişi başına CO₂ ve diğer gazların bileşke emisyon eşdeğer grafiği Şekil 6 ve sektörel olarak dağılımı Şekil 7’de görüldüğü gibi giderek artış göstermektedir. 1990–2023 dönemine ait veriler, Türkiye’nin toplam sera gazı emisyonlarının sürekli artış eğilimi sergilediğini göstermektedir. Emisyon bileşenlerine göre değerlendirildiğinde, toplam artışın büyük oranda karbon dioksit (CO₂) kaynaklı olduğu; metan (CH₄), diazot monoksit (N₂O) ve florlu gazlar (F-gazları) emisyonlarının ise sınırlı düzeyde artış gösterdiği gözlen-

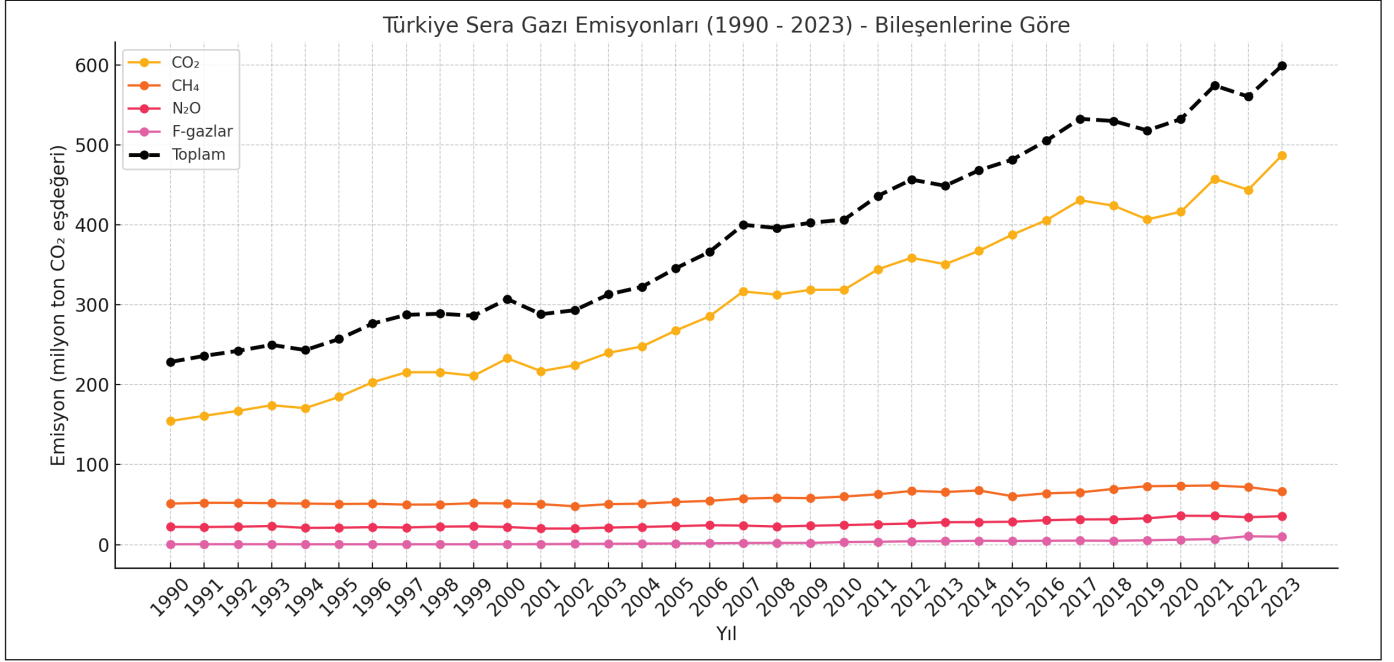
mektedir. Sektörel bazda incelendiğinde ise enerji sektörünün, sera gazı emisyonları içindeki dominant payını yıllar içinde artırdığı, sanayi, tarım ve atık sektörlerinin ise toplam emisyonlar içindeki paylarının nispeten sabit kaldığı görülmektedir. Bu durum, Türkiye’nin sera gazı emisyon envanterinde fosil yakıt temelli enerji üretiminin belirleyici rolünü sürdürdüğünü ve sürdürülebilir emisyon azaltım politikalarının enerji sektörü odaklı olması gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.8. Türkiye Yüzer FV Enerji Potansiyeli

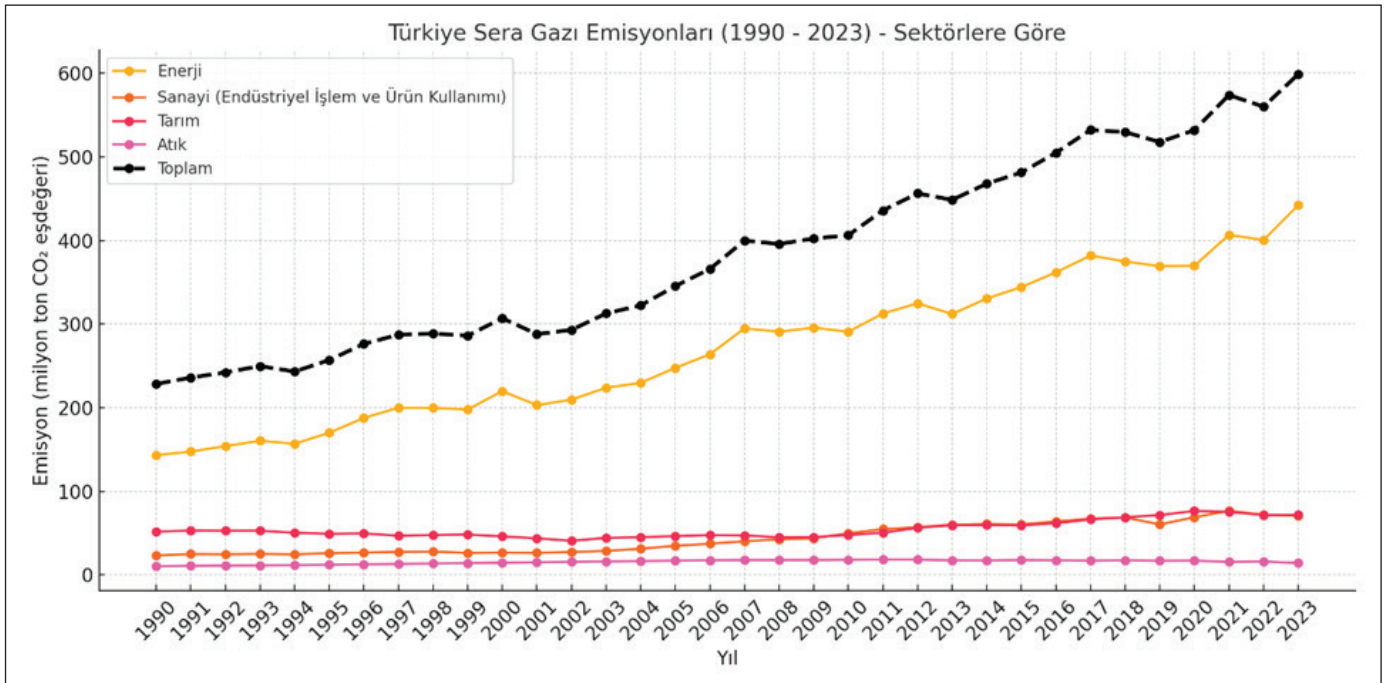
Türkiye’nin 2025 yılı ocak ayı itibarıyla elektrik kurulu gücü 116,516 GW; elektrik üretimi 348,9 TWh olmuştur. 2025 yılı kurulu gücüne, güneş enerjisiyle elektrik üretiminin katkısı %17,4 ile 20,27 GW seviyesindedir. Türkiye’deki su rezervuar alanlarının %10 oranında Yüzer FV ile örtülmesiyle 69,6 GW kurulu güç potansiyeli ve buna bağlı olarak 125,34 TWh enerji üretilebileceği, su buharlaşmasının azaltılarak 1242,1 hm³ suyun tutulabileceği; 77,7 Mton değerinde CO₂ emisyonunun azaltılabileceği senaryosu oluşturulmuştur. Su rezervuar alanları %20 oranında kaplandığında ise 139,7 GW güç, 251,484 TWh üretilebilecek enerji, 2412,1 hm³ su tutulumu ve 155,9 Mton CO₂ emisyonunun azaltılabileceği öngörülmüştür (Kulat vd. 2023). Çizelge 5’te Türkiye’de Yüzer ve Karasal FV’nin Güçlü ve Zayıf Yönleri ile Fırsat ve Tehditleri (GZFT) analizine yer verilmiştir.

Enerji üretim potansiyeli Şekil 8'de görüleceği üzere özellikle Fırat-Dicle havzasında yoğunlaşmıştır. Fırat-Dicle Havzasında, Yüzer FV kurulabilecek uygun su yüzeylerinin %10'unun kaplanmasıyla; 28,4 GW kurulu güç; 52,93 TWh enerji üretimi; 660,5 hm³ su tutulumu ve 32,8 Mton CO₂ emisyon azaltımı sağlanabilmektedir. Türkiye geneli Yüzer FV ile üretilebilecek enerjinin %42'sini karşılayarak en fay-

dalı Yüzer FV kurulum alanı bu bölge olmaktadır (Kulat vd. 2023). Çalışma kapsamında Hazar Gölü'nde belirlenen bir alanda simülasyon yapılarak araştırma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon ön çalışmasında seçilen bölgenin uygunluğu için ArcGIS 10.8 programı bölge verilerinden faydalanılmıştır.



Şekil 6. Sera gazı emisyonları, 1990 – 2023 (TÜİK 2025).



Şekil 7. Sektörlere göre toplam sera gazı emisyonları, 1990 – 2023 (TÜİK 2025).

Çizelge 5. Türkiye’de yüzer ve karasal FV GZFT analizi

	Yüzer FV Sistemleri	Karasal FV Sistemleri
Güçlü Yönler	Su yüzeyindeki serinleme etkisi sayesinde modül sıcaklığı düşer ve elektriksel verim artar. Arazi kullanımı gerektirmediği için tarım alanları korunur. Su yüzeyindeki buharlaşmayı azaltarak su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine katkı sağlar. Baraj ve rezervuar işletmecileri için ek gelir potansiyeli sunar.	Teknolojisi olgunlaşmış ve yaygın olarak uygulanmaktadır. Kurulum, işletme ve bakım süreçleri açısından geniş tecrübe birikimi mevcuttur. İlk yatırım ve işletme maliyetleri genellikle daha düşüktür. Yerel tedarik zinciri ve istihdam potansiyeli yüksektir.
Zayıf Yönler	Yatırım ve bakım maliyetleri karasal sistemlere kıyasla daha yüksek olabilmektedir. Dalgalanma, yosunlaşma ve su kalitesi gibi çevresel faktörlere bağlıdır. Uzman mühendislik ve özel ekipman gerektirir.	Tarım arazileri ve doğal alanlarda arazi kullanım baskısı yaratabilir. Arazi edinimi ve mülkiyet problemleri yaşanabilir. Yanlış arazi kullanımı erozyon ve habitat kaybı riskini artırabilir.
Fırsatlar	Türkiye’deki baraj, gölet ve içme suyu rezervuarlarının geniş potansiyeli değerlendirilebilir. İklim değişikliğiyle mücadele politikalarına ve su yönetimi stratejilerine uyum sağlar. Küresel düzeyde Yüzer FV teknolojilerine yönelik Araştırma Geliştirme yatırımları artmaktadır.	Verimsiz, çorak veya düşük tarım değerine sahip arazilerin enerji üretiminde kullanılması mümkündür. Depolama teknolojileriyle bütünleştirilerek şebeke esnekliğine katkı sağlayabilir. Ulusal ve uluslararası teşvik mekanizmalarından yararlanma imkânı güçlüdür.
Tehditler	Mevzuat ve izin süreçleri henüz netleşmemiş olabilir. Yerel halk ve ekosistem üzerinde olası olumsuz etkiler toplumsal kabul sorunlarına yol açabilir. İklim değişikliğine bağlı ekstrem hava olayları fiziksel risk unsuru oluşturabilir.	Tarımsal üretim ile arazi kullanımında çatışma riski mevcuttur. İmar düzenlemeleri ve arazi planlama kısıtlamaları yatırımları zorlaştırabilir. Yerel toplulukların projelere karşı çıkma eğilimi görülebilir.

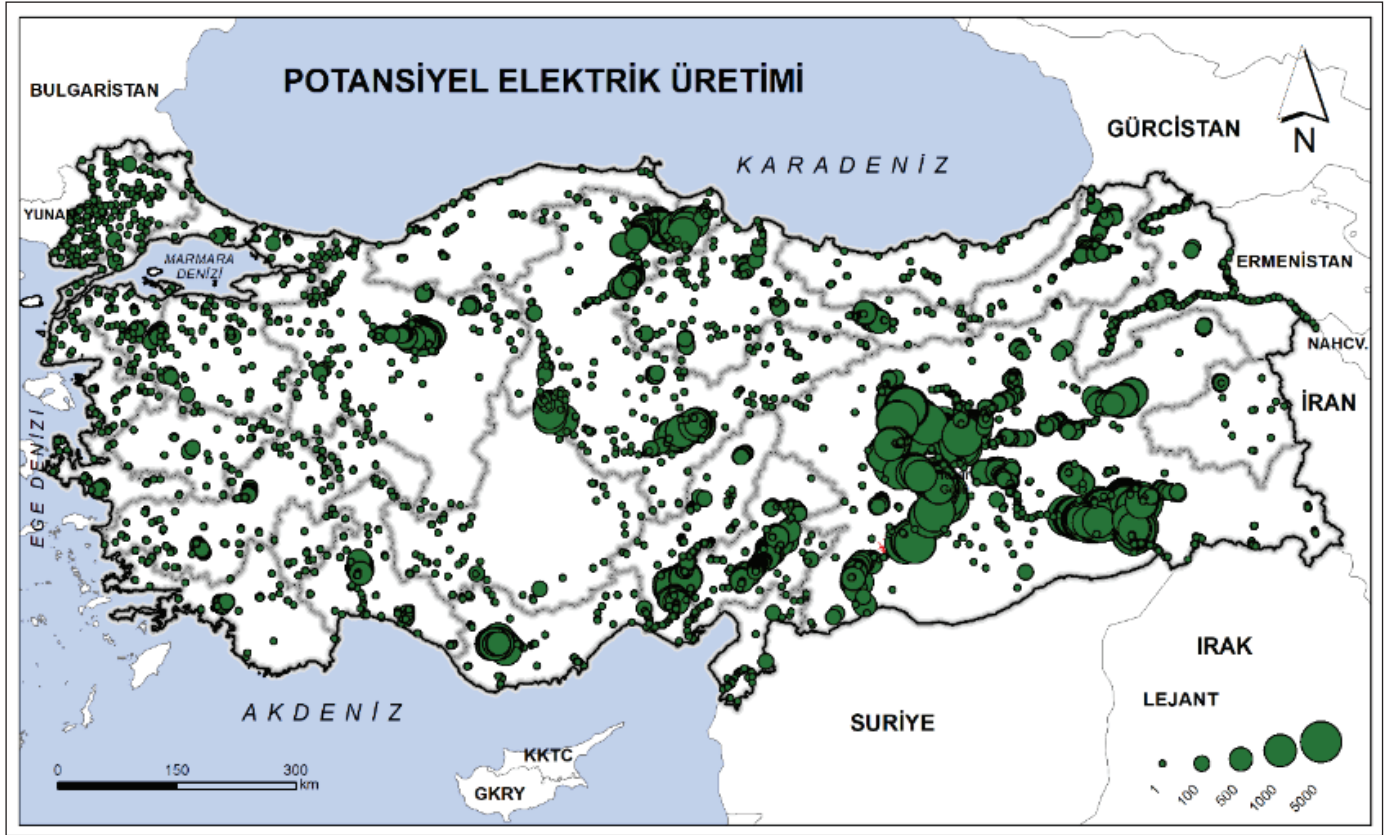
Çalışma yapılan alan, Yüzer FV kurulabilecek en ideal bölgelerden olduğundan elde edilen verimlilik artış sonucu, kurulum yapılmak istenilen bölgelerde göz önüne alınarak yatırımların hızlanmasını kolaylaştıracaktır. Belirlenen bir alan için kurulan FV sistemin yıllık enerji miktarı potansiyeli hesaplanırken Denklem 1’den yararlanılmaktadır.

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

FV sistemlerin yıllık enerji üretim potansiyelinin hesaplanması, yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımının belirlenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu hesaplama, çeşitli sistem parametrelerinin dikkate alınmasıyla gerçekleştirilmektedir. Yıllık enerji potansiyeli E (kWh) cinsinden ifade edilmekte olup, öncelikli olarak FV modül alanı (A , m^2) ve modül verimliliği (r , %) ile ilişkilidir. Bunun yanı sıra, ilgili coğrafi bölgeye ait yıllık ortalama güneş radyasyonu (H , kWh/m^2) ve sistemin performans oranı (PR , %) hesaplamada kullanılan temel değişkenlerdir. Ayrıca, sonuçların karşılaştırılabilir ve standart bir çerçevede değerlendirilebilmesi amacıyla standart test koşulları da dikkate alınmaktadır. Bu standart test koşulları; nominal ışınlam değeri 1000 W/m^2 , modül hücre sıcaklığı 25°C , rüzgâr hızı 1 m/s ve hava kütlesi $1,5$ olarak tanımlanmaktadır. Tüm bu parametrelerin bir araya getirilmesiyle, FV sistemlerin potansiyel enerji çıktıları güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmektedir.

2.9. Yüzer FV Modül Kurulumu

Proje tasarımına göre modüller farklı açılarla platform üzerine yerleştirilmektedir. Zemin ile yapılan açı değeri küçük olduğunda modüllerin rüzgâra karşı daha dirençli hale gelerek devrilme riski azalmaktadır. Ancak toz ve kir oluşumu artarak verimlilikleri azalmaktadır. Daha büyük açılarda ise rüzgâra bağlı devrilme ihtimali artarken modül yüzeyinde kirlenme daha az olmaktadır. Ayrıca küçük açılı tasarımlarda modül, suyun etkisi ile daha hızlı soğutulabilmektedir. Suya yakın olan modül yüzeyinin daha az, sudan uzak noktaların ise daha fazla ısındığı literatürdeki uygulamalarda gözlenmektedir. Modüller arası uzaklık, platform yerleşim



Şekil 8. Türkiye’de Yüzer FV kurulumuna uygun su yüzeyinin %10’unun kaplanması ile elektrik üretim öngörüsü (GWh) (ArcGIS 10.8, 2025).

açısı, modül verimliliği, buharlaşma, rüzgâr hızı, coğrafi konuma bağlı yıllık ısıtım miktarı doğrudan elektrik üretimi ve sistem bakımı üzerinde etkilidir. Diğer taraftan Yüzer FV sisteminin ekosisteme olan etkisinin de göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

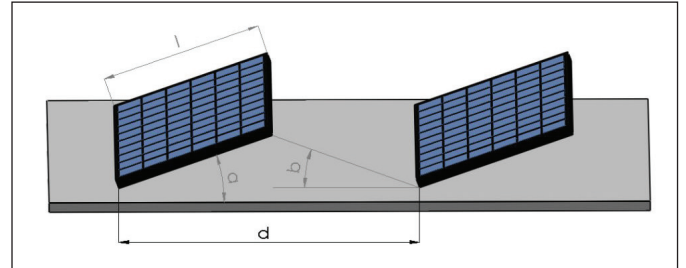
Şekil 9’da Yüzer FV modül genişliği l , modülün eğim açısı a , diğer modül üzerinde gölgelenmenin olmadığı güneş açısı b , modül sırasındaki kenarlar arası mesafe d değişkenleriyle temsil edilmektedir. Modüllerin güneşe baktığı durum için yerleşimleri belirtilen değişkenlerin Denklem 2’de kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir.

$$d = \left(\frac{\sin a}{\tan b} + \cos a \right) l \quad (2)$$

FV modül dizilerinin tasarımında, modüller arasındaki kenar mesafesi (d , m) ve modül eğim açısı (a , °) sistemin geometrik düzenini belirleyen temel parametrelerdir. Ayrıca, gölgelenme oluşmaması için dikkate alınması gereken güneş açısı (b , °) ve FV modül genişliği (l , m), sistem verimliliğinin ve alan kullanımının optimize edilmesinde kritik rol oynamaktadır.

2.10. Modül Sıcaklığı

FV modülün elektrik dönüşüm verimliliği, ortam sıcaklığı, güneş yoğunluğu, ısı kayıpları, biriken toz ve bağıl nem gibi çeşitli faktörlere bağlı olmaktadır (Gorjian vd. 2020, Kant vd. 2016). Hücrenin yüzey sıcaklığındaki her 1°C’lik artış, verimlilikte %0,5’lik bir düşüşe neden olmaktadır (Rosa-Clot ve Marco Tina 2020). Karasal FV modül sıcaklığı ile



Şekil 9. Yüzer FV modül yerleşimi (PVsyst 2025).

Yüzer FV modül sıcaklığı arasında deneysel ve simülasyon çalışmalarına göre lineer bir denklem kurulmaktadır. Denklem 3’te görüleceği üzere Yüzer FV modül sıcaklığı yaklaşık olarak Karasal FV modül sıcaklığından 5°C daha düşüktür (Choi vd. 2016).

$$T_{YFV} = 0,947T_{KFV} - 4,407 \quad (3)$$

FV modüllerin sıcaklık davranışı, kurulum tipine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu kapsamda, yüzer fotovoltaik modül sıcaklığı (T_{YFV} , °C) ve karasal fotovoltaik modül sıcaklığı (T_{KFV} , °C), sistem performans analizlerinde karşılaştırmalı olarak dikkate alınan temel parametrelerdir.

Ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızının FV modüller üzerindeki sıcaklık değişimine etkisi, literatürde matematiksel ve deneysel yöntemlerle elde edilmiştir. Yüzer FV Modül Sıcaklığı, Denklem 4, 5 (Kamuyu vd. 2018) ve Denklem 6 (Muzathik ve Muzathik 2014, Tim Umoette 2016) ile hesaplanabilmektedir. Karasal FV Modül Sıcaklığı ise Denklem 7 (Skoplaki ve Palyvos 2009)'de gerçekleştirilen matematiksel modellemeye göre hesaplanabilmektedir. Denklem 4-7 özetlendiğinde elde edilen Denklem 8 ve 9'dan görüldüğü üzere ortam sıcaklığı ile su sıcaklığı arasında 5°C'nin üzerinde bir farklılık oluşmaktadır. Su yüzeyindeki fiziksel pürüzlülüğün karaya göre çok daha az olmasından dolayı sudaki rüzgâr hızının kara rüzgâr hızından daha fazla olduğu çıkarımı yapılmaktadır. Denklem 11, PVsyst simülasyonunda rüzgâr hızına bağlı olarak modül dizilerindeki termal kayıp faktörünün elde edilmesinde kullanılmaktadır (PVsyst 2025).

$$T_{YFV} = 2,0458 + 0,9458T_a + 0,0215G - 1,2376WS_w \quad (4)$$

$$T_{YFV} = 1,8081 + 0,9282T_a + 0,0215G - 1,221WS_w + 0,0246T_w \quad (5)$$

$$T_{YFV} = 0,943T_a + 0,0195G - 1,528WS + 0,3529 \quad (6)$$

$$T_{KFV} = 3,81 + 0,0282G + 1,31T_a - 1,65 WS \quad (7)$$

$$T_w = 5 + 0,75T_a \quad (8)$$

$$WS_w = 1,62 + 1,17WS \quad (9)$$

$$T_{YFV} = 0,947T_{KFV} - 4,40 \quad (10)$$

Isıl sistemlerin performansı; ortam sıcaklığı (T_a , °C), su sıcaklığı (T_w , °C), su yüzeyindeki rüzgâr hızı (WS_w , m/s), kara rüzgâr hızı (WS , m/s) ve güneş radyasyonu (G , W/m²) gibi çevresel parametrelere bağlıdır.

Yüzer FV santral, kara kurulumlu sisteme göre %3 daha verimli elektrik üretebilmektedir.

$$U = U_c + U_v \times v \quad (11)$$

Termal kayıp faktörü (U , W/m²K⁰), sabit termal bileşen (U_c , W/m²K⁰) ve rüzgâr hızına bağlı değişken bir katsayıdan (U_v , W/m²K·s/m) oluşur ve bu katsayı rüzgâr hızı (v , m/s) ile ilişkilidir.

2.11. Elâzığ-Hazar Gölü Simülasyonu

Simülasyon çalışması, PVsyst programı üzerinde gerçekleştirilmektedir. Türkiye'nin Yüzer FV ile elektrik üretim potansiyelinin en yüksek olduğu Fırat-Dicle Havzasında yer alan Hazar Gölü, Sivrice, Elâzığ'da bulunan tektonik bir göldür. Gölün su yüzey rezervuar alanının tamamı 76000000 m²'dir. Yüzer FV tesisinin modellenmesi ve analizi için su yüzeyinin %0,1'i olan 76000 m²'lik bir alan kullanılacaktır. Planlanan bu kurulum alanı tamamen kapanırsa %0,1; sadece FV modüllerin kapladığı alan üzerinden hesaplanırsa %0,034 buharlaşma azaltımı olması planlanmaktadır. Yüzer FV için belirlenen 76000 m²'lik alan Karasal FV sistem için de tasarlanarak iki sistemin birbirlerine göre verimlilikleri ve literatürle karşılaştırılması incelenmiştir. Çizelge 6'da Yüzer ve Karasal FV sistemlerinin avantaj-dezavantaj durumları listelenmiştir. Kurulum için seçilen alanda üretilen elektrik, tarımsal faaliyet ve civardaki konutların tüketimi için elverişlidir.

Bölgede, küresel ısınma, buharlaşma ve yağış yetersizliği nedeniyle su rezervuarının kullanım oranı %18 değerlerine gerilemiştir. Göl üzerine kurulacak Yüzer FV santrali buharlaşmanın etkisini azaltarak su kaybını önleyebilecektir. Hazar Gölünün seçilmesinin bir diğer nedeni de coğrafi konumu nedeniyle yüksek ortalama güneş radyasyonu dağılımına sahip olmasıdır. Bölgedeki ortalama küresel güneş radyasyon dağılımı 4,7-5,3 kWh/m²/gün aralığında olarak ölçülmüştür (Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2024). Yüzer FV simülasyon kurulum sahası Elâzığ şehir merkezine 25 km uzaklıktadır. Şehrin güneyinde, 38,4675° kuzey enlem ve 39,3931° doğu boylamları arasında yer almaktadır. Deniz seviyesinden yüksekliği 1232 m'dir. Önerilen hedef konunun uydu görüntüleri Şekil 10'da gösterilmiştir.

Güneş radyasyonu, rüzgâr ve sıcaklık, FV santralının verimliliğini ve performansını etkileyen iklim değişkenleridir. Bu nedenle verimliliği ve performansı belirlemek için kullanılmaktadır. İklim verileri PVsyst veri tabanındaki hedef bölge için Meteororm 8,2 meteoroloji dosyasından elde edilmiştir. Hedef bölge için 2006-2013 yılları arasına ait 12 aylık ortalama değerler veri tabanından elde edilerek Çizelge 7'de güneş radyasyon dağılımı 5,22 kWh/m²/gün olarak gösterilmiştir. Yıllık bazda yapılan değerlemede ortalama solar radyasyon değeri 217,5 W/m² (5,22/24) olmaktadır.

Gölgeleme analizi, FV modülleri birbirlerini gölgelemesini önlemek gerçekleştirilmektedir. Yıl boyunca maksimum gölgeleme tarihi 21 Aralık, orta değerde gölgeleme tarihi 21 Mart, minimum gölgeleme tarihi ise 21 Hazirandır. Si-

Çizelge 6. Yüzer ve Karasal FV Karşılaştırması

	Karasal FV	Yüzer FV
Kurulum Alanı (m ²)	%11,24 Daha Fazla	
Modül Sıcaklığı (°C)	%39,3 Daha Fazla	
Albedo		%12,35 Daha Az
Rüzgâr Hızı (m/s)		%90,63 Daha Fazla
Modül Aralığı (m)	%11,25 Daha Fazla	
Kirlenme Kaybı	%50 Daha Fazla	
Termal Kayıplar (W/m ² K ⁰)		%18,9 Daha Fazla
Performans Oranı		%3,4 Daha Fazla
Önlenen Buharlaşma (m ³)	-	25330
Yıllık Önlenen CO ₂ Emisyonu (ton)		%3,14 Daha Fazla
Yıllık Üretilen Enerji (GWh)		%2,92 Daha Fazla

**Şekil 10.** Hazar Gölü yüzer FV kurulum alanı (Google Earth 2025).

mülasyon analizinde en doğru sonucu alabilmek için güneşin en düşük olduğu açı ve gölge boyunun en uzun olduğu kış gün dönümü tarihi olan 21 Aralık günü seçilmiştir. Bu tarih yıl boyunca elde edilebilecek en kötü elektrik üretim senaryosunu sunmaktadır. NASA, 21 Aralık 2024 tarihi verilerine göre Hazar Gölü üzerindeki albedo değeri gün içinde değişmekle birlikte ortalama 0,178 değerinde olmaktadır (NASA 2024). Yüzer FV Maksimum Güç değeri hesaplanırken alan bazlı maksimum üretim 1 MW/12000 m² olarak varsayılmaktadır (GreenPowerHybrid LLC Company, 2021). Ortalama yıllık güneş ışıınım değerleri aylık değerlerin toplanmasıyla elde edilmiştir (Enerji ve Tabii Kaynaklar

Bakanlığı 2025). Çizelge 7'ye göre seçilen çalışma bölgesinin, yıllık ortalama ortam sıcaklığı $T_a=13,1$ °C ve kara rüzgâr hızı, $WS=2,2$ m/s değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Aralık ayı saatlik güneş ışıınım miktarı $G=217,5$ W/m²'dir. Denklem 9'a göre su yüzeyindeki rüzgâr hızı $WS_w=4,194$ m/s olacaktır. Denklem 8'e göre su sıcaklığı $T_w=14,825$ °C'dir. Hazar Gölü yıllık ortalama ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı ve güneş ışıınım miktarı değerlerine göre, Yüzer FV modül sıcaklık değerleri ve bu değerlere bağlı olarak Denklem 3 ile Yüzer ve Karasal FV modül sıcaklıkları Çizelge 8'de elde edilmektedir. Simülasyon kurulum aşamasında bu değerlerin ortalamaları kullanılmıştır.

Çizelge 7. Hazar Gölü meteonorm 8,1 aylık meteoroloji verileri (PVsyst 2025).

Ay	Küresel yatay ışıınım (kWh/m ² /ay)	Yatay dağınık ışıınım (kWh/m ² /ay)	Sıcaklık ortalaması (°C)	Rüzgâr hızı (m/s)
Ocak	72,9	26,9	-2,2	1,9
Şubat	87,3	36,3	-0,3	2
Mart	140,5	53,8	5,9	2,5
Nisan	177,6	53,4	11,4	2,4
Mayıs	216,2	68	16,9	2,4
Haziran	251,9	47,5	23,4	2,59
Temmuz	256,5	46,7	28,6	2,69
Ağustos	232,4	43,6	28,5	2,4
Eylül	184,4	38,3	22,3	2,29
Ekim	131,6	35,0	14,9	2,01
Kasım	87,2	25,9	6,7	1,91
Aralık	67,0	25,8	0,7	1,89
Yıl	1905,5	501,2	13,1	2,2

Çizelge 8. Yüzer ve karasal FV modül sıcaklıkları (°C).

$T_a=13,1\text{ }^{\circ}\text{C}$	T_{KfV}	T_{YfV}
Denklem 4	19,35 °C	13,92 °C
Denklem 5	19,31 °C	13,88 °C
Denklem 6	18,99 °C	13,58 °C
Ortalama	19,21°C	13,79 °C

2.12. Simülasyonda Kullanılan FV Modül

PVsyst simülasyonunda kullanılan çift yüzü FV modül 24.11% verimlilikle 650 W maksimum çıkış gücüne sahiptir. FV modülün; marka-model, tip, boyut, çalışma sıcaklığı aralığı, maksimum güç noktası gerilim ve akım değerleri, sıcaklık değişimine bağlı güç, akım, gerilim çıkışlarındaki yüzdesel farklılıklar ve verim detaylı teknik özellikleri Çizelge 9’da verilmiştir.

2.13. Simülasyonda Kullanılan İnvertör Özellikleri

PVsyst simülasyonunda kullanılan invertörün; marka-model, boyut, çalışma modu, maksimum güç çıkışı, çalışma frekansları, maksimum güç noktasındaki minimum ve maksimum gerilim değerleri, maksimum FV gerilimi, maksimum akım ve verimlilik değerleri Çizelge 10’da verilmiştir.

2.14. Simülasyon Tasarımı ve Veri Girişleri

Karasal FV santral simülasyon tasarımında, albedo değeri 0,20; minimum çalışma sıcaklığı -10 °C, maksimum çalışma sıcaklığı 60 °C olarak alınmaktadır. FV modül eğim açısı

Çizelge 9. FV modül özellikleri (PVsyst 2025).

FV Modül Teknolojisi	Si-mono
Üretici Marka-Model	Longi Solar, LR7-72HYD-650M
Tip	Çift yüzü (Bi-facial)
Boyutlar (En x Boy x Kalınlık)	2382 x 1133 x 30 mm
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ~ +80°C
Maksimum Güç (W)	650 W
MPP Gerilim	45.2 V
MPP Akım	14.4 A
Açık Devre Gerilimi (V)	54.22 V
Kısa Devre Akımı (A)	15.12 A
Modül Verimliliği (%)	24.11
Sıcaklık Katsayısı P_{max}	-0,26%/°C
Sıcaklık Katsayısı I_{sc}	+0,050%/°C
Sıcaklık Katsayısı V_{oc}	-0,20%/°C
Verimlilik	%24,1

bölge enlem derecesine bakılarak optimuma göre kayıp değerinin 0 olduğu modül eğim açısı $a=37^{\circ}$, seçilen konum için en düşük güneş açısı $b=27,9^{\circ}$ ve azimut açısı 0° seçilmektedir. Azimut değerinin sıfır olması, modüllerin yüzeyinin kuzey yarım küre için güneye baktığı anlamına gelmektedir.

Karasal FV kurulumunda, seçilen modül boyu, 2 mm çerçeve genişliği dahil edildiğinde $l=1,15\text{m}$ olmaktadır. Denk-

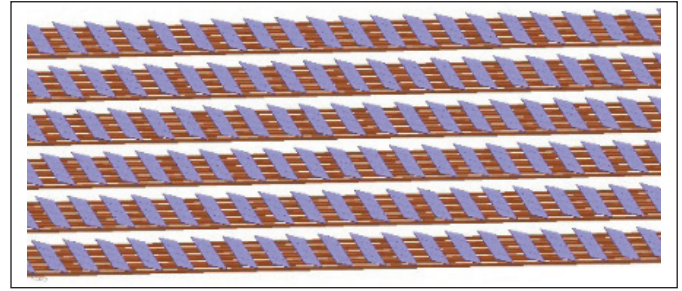
lem 2'ye göre modüller arası mesafe $d=2,225$ m olmaktadır. Modül kurulum yüzeyi eğimsiz kabul edilmektedir. Tasarım alanında gölgeleme yapabilecek farklı herhangi bir cisim bulunmamaktadır. Yüzer FV santral simülasyon tasarımı-nda, albedo değeri 0,178, minimum çalışma sıcaklığı -10°C , maksimum çalışma sıcaklığı 60°C olarak alınmıştır. FV modül eğim açısı, çift yüzölümlü FV modül verimliliğini arttırmak için 14° seçilmiştir.

Çizelge 10. İnvertör özellikleri (PVsyst 2025)

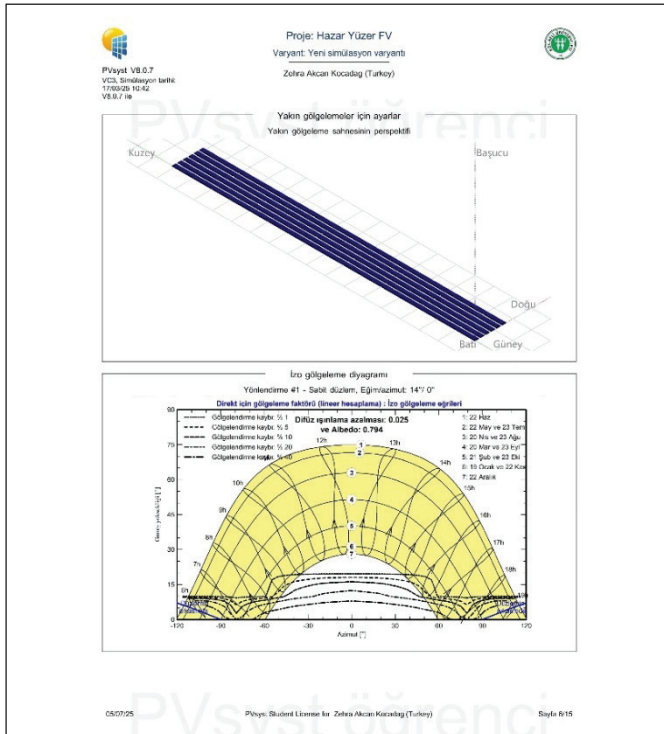
Üretici Marka-Model	Santerno Sunway TG 900 1500V TE - 650 EV
Boyutlar (En x Boy x Kalınlık)	2024x1075x2375 mm
Çalışma modu	MPPT
Maksimum AC güç	1013 kVA
Çalışma Frekansı	50/60 Hz
Minimum MPP Gerilimi	930 V
Maksimum MPP Gerilimi	1300 V
Mutlak Maksimum FV Gerilimi	1500 V
Maksimum FV Akımı	1500 A
Maksimum AC Akımı	900 A
Maksimum verim (%)	98,7

PVsyst arayüzünde, Şekil 12 ve Şekil 14'te görülen modül eğimi ve yerleşime bağlı yıllık gölgeleme kayıpları Şekil 11 ve Şekil 13'te karşılaştırılmıştır. Yüzer FV'de çevre etkisinin düşük olması ve eğim açısının düşük olması nedeniyle kayıplar daha az olmaktadır.

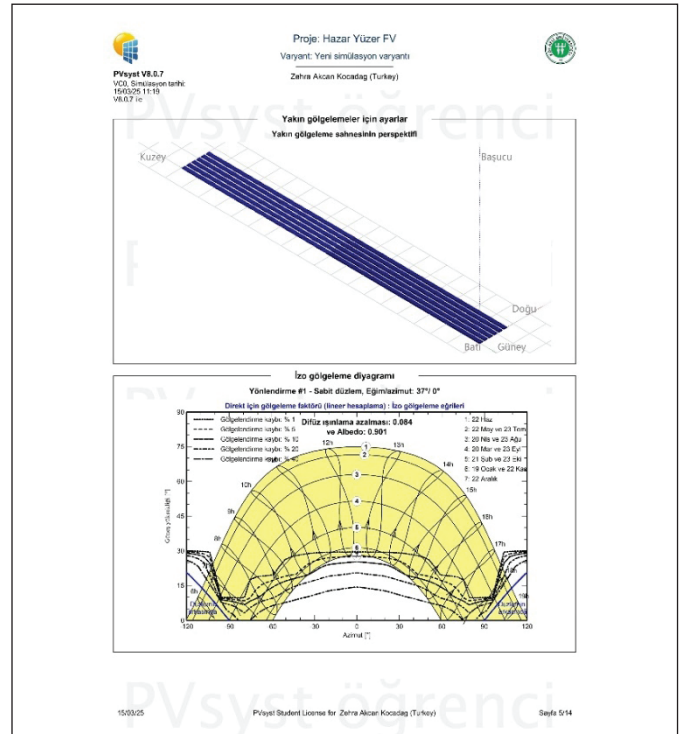
Simülasyon çalışmasında termal kayıp faktörü hesaplanırken, Denklem 11'e göre U_c sabit olarak $25 \text{ W/m}^2\text{K}^0$ ve $U_v=3 \text{ W/m}^2\text{K}^0/\text{m/s}$ alınmaktadır. Buna göre Karasal FV sistemi için $2,2 \text{ m/s}$ rüzgâr hızına karşılık termal kayıp değeri $31,6 \text{ W/m}^2\text{K}^0$ olmaktadır. Yüzer FV sistemi için $4,194 \text{ m/s}$ rüzgâr hızına karşılık termal kayıp değeri $37,58 \text{ W/m}^2\text{K}^0$ olmaktadır. Karasal ve Yüzer FV sistem karşılaştırması aynı FV modül, invertör ve 6330 MWp planlanan kurulu gücü ile yapılmaktadır.



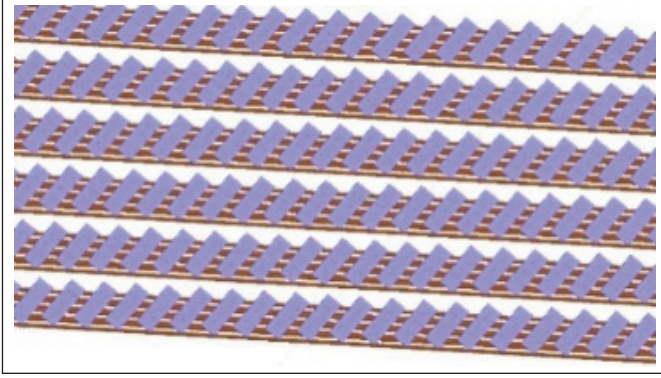
Şekil 12. Yüzer FV 14° modül eğim açısı (PVsyst 2025).



Şekil 11. Yüzer FV 14° modül eğim açısı ve yıllık gölgeleme (PVsyst 2025).



Şekil 13. Kara FV 37° modül eğim açısı ve yıllık gölgeleme (PVsyst 2025).



Şekil 14. Karasal FV 37° modül eğim açısı (PVsyst 2025).

3. Bulgular ve Tartışma

Literatürde, Yüzer FV sistemlerin ortalama 1 MWp kurulu güç için 10 dönüm alana ihtiyaç duyduğu ve 10000 m³ su buharlaşmasının engelleneceği çıkarımı bulunmaktadır. Çalışmada gerçekleştirilen simülasyonda 6,33 MWp kurulu güce sahip iki sistem kurulmaktadır. Yüzer FV sistemi ile 74250 m² (11,72 dönüm/MW) alanda yıllık 11997 MWh, Kara FV sistemi ile 82603 m² (13,05 dönüm/MW) alanda yıllık 11656 MWh üretim gerçekleştirilmektedir. Yüzer FV ile 25330 m³ su buharlaşmasının önüne geçilmiştir. Bölge-lerin yıllık buharlaşma değerleri farklılık gösterdiğinden literatürdeki 10000 m³/10 dönüm değeri çalışmada 25330 m³/74,25 dönüm olarak sağlanabilmektedir. Buna göre,

Yüzer FV ile aynı adette FV modül ile %10 daha az alan kullanılarak %2,84 daha fazla elektrik üretilmektedir. Yüzer FV modül eğim açısı, Kara FV sistemine göre az olduğundan modüller arası mesafe daha az olmaktadır. Böylece aynı alanda daha fazla FV modül kullanılarak 7,048 MWp kurulu güç ile 13357 MWh üretim gerçekleştirilebilmektedir. Buna göre yıllık elektrik üretiminde %12,7 artış oluşmaktadır. Literatürde elde edilmiş olan sonuçlarla simülasyon sonuçlarının benzer olarak Yüzer FV sistemlerinin verimliliğe fayda sağladığı anlaşılmaktadır. Yüzer FV sistemi, rüzgâr hızı, albedo etkisi, çift yüzölçümlü FV modülün arka yüzünün daha verimli kullanılması, FV modül yüzey sıcaklığının suyun soğutma etkisi sayesinde daha düşük olması nedeniyle Kara FV sisteme göre verimliliğini arttırabilmektedir. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 11’de detaylandırılmaktadır. Şekil 15’te Yüzer FV Simülasyonu kayıp diyagramı verilmektedir.

Karasal ve Yüzer FV sistemlerinin karşılaştırmasının hakaniyetli olması amacıyla kullanılacak modül sayısı, maksimum kurulu güç ve yıllık ortalama ortam sıcaklığı aynı seçilmiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

Yenilenebilir enerji kaynaklarının teknik açıdan faydalarının yanında çevresel boyutta da incelenerek ekosisteme zarar verilmemesi günümüz ve geleceğimiz için önem arz etmekte-

Çizelge 11. Simülasyon kurulum ve sonuç değerleri.

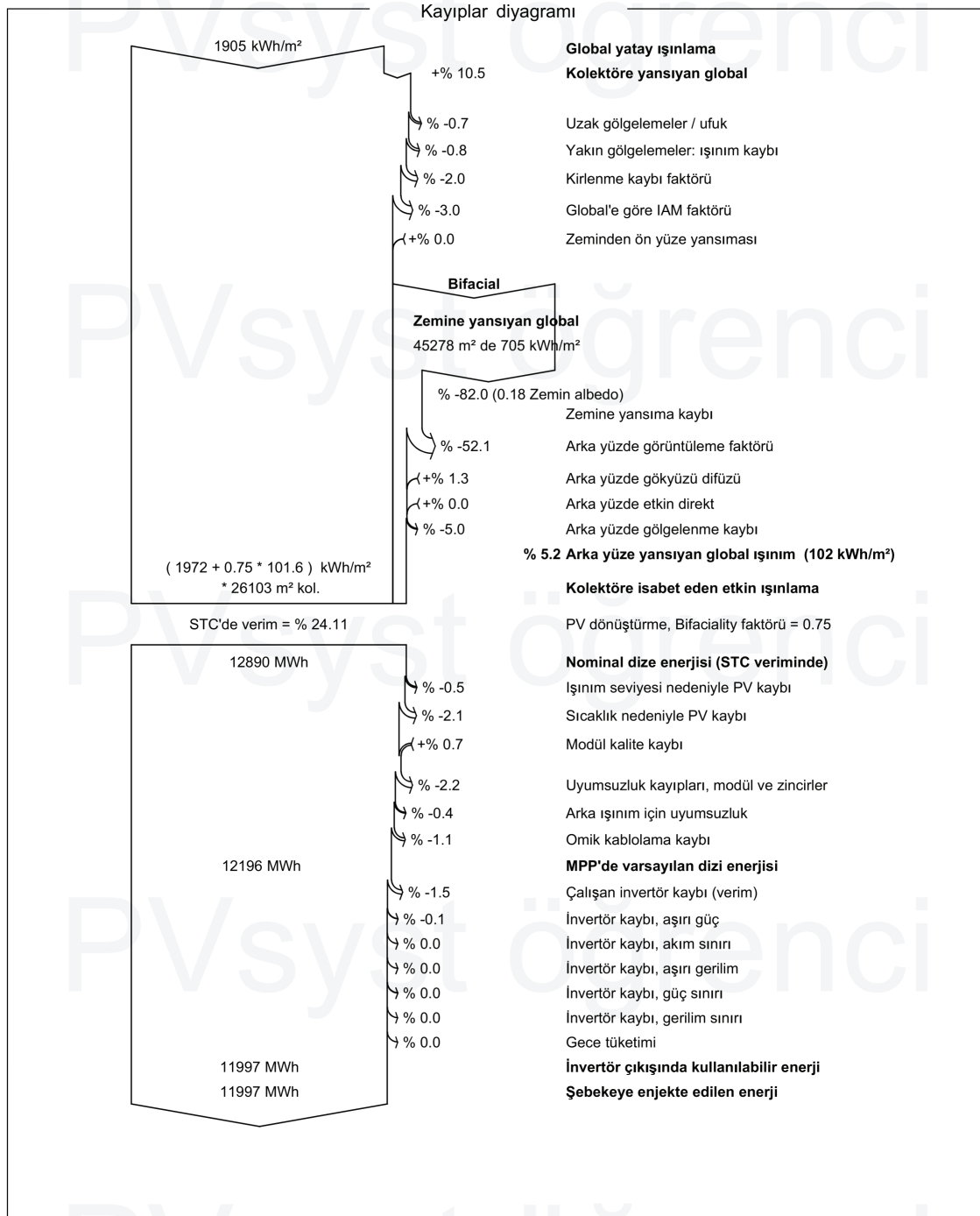
	Karasal FV	Yüzer FV
Kurulu Güç (MWp)	6330	6330
Modül Bağlantısı	24 seri, 403 paralel	24 seri, 403 paralel
Modül Adedi	9672	9672
Toplam Modül Yüzey Alanı (m ²)	26103	26103
Kurulum Alanı (m ²)	82603	74250 (82.5*900)
Yıllık Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	13,1	13,1
Modül Sıcaklığı (°C)	19,21	13,79
Albedo	0,2	0,178
Rüzgâr Hızı (m/s)	2,2	4,194
Modül Aralığı (m)	2.225 (37° eğim açısı)	2 (14° eğim açısı)
Kirlenme Kaybı	%3	%2
Termal Kayıplar (W/m ² K ⁰)	31,6	37,58
Performans Oranı	0,8397	0,869
Önlenen Buharlaşma (m ³)	-	25330
Yıllık Önlenen CO ₂ Emisyonu (ton)	4576	4720
Yıllık Üretilen Enerji (GWh)	11,656	11,997



PVsyst V8.0.7
VC3, Simülasyon tarihi:
17/03/25 10:42
V8.0.7 ile

Proje: Hazar Yüzer FV
Varyant: Yeni simülasyon varyantı

Zehra Akcan Kocadağ (Turkey)



05/07/25

PVsyst Student License for Zehra Akcan Kocadağ (Turkey)

Sayfa 8/15

Şekil 15. Yüzer FV Simülasyonu kayıplar diyagramı.

dir. Hazar Gölü için yapılan değerlendirmede Yüzer FV'nin Karasal FV'ye kıyasla önemli avantajlar sunduğunu ortaya konulmuştur. Simülasyonda Karasal FV ile üretim yapılabilir en uygun modül eğim açısı olan 37° ile Yüzer FV'de en uygun açı değeri olan 14°'de yansıma etkisi katkısıyla karşılaştırma yapılmaktadır. Rüzgâr hızının su yüzeyinde fazla olması modül yüzey sıcaklığının azalarak modül verimliliğinin yükselmesine neden olmuştur. Modüller arası mesafe kısa olmasına rağmen çevre etmenlerinin olmaması dolayısıyla gölgelenme gün doğumu ve batımında minimum seviyede gerçekleşmiştir. Buna göre elektrik üretiminde %2,84 artış, CO₂ emisyon değerinde %3,05 azalma ve 25,330 m³ su buharlaşmasının önüne geçilerek genel anlamda fayda sağlanmaktadır. Elektrik üretiminde fosil kaynaklardan uzaklaşarak emisyon değerlerinin azaltılması ekolojik denge için faydalı olmaktadır. Modüller arasına ilave yansıtıcılar kullanıldığında yansımadan elde edilen elektrik üretimi artacaktır. Ayrıca daha fazla su buharlaşmasının önüne de geçilebilecektir. Su yüzeylerinin kullanımıyla, yüzer sistemler enerji verimliliğini artırmakta, çevresel olumsuz etkileri azaltmakta ve arazi kullanımını optimize etmektedir. Hazar Gölü'ndeki sonuçlar yorumlandığında, yüzer sistemlerin elektrik üretim verimliliğini artırmasının sonucunda CO₂ emisyonlarını da önemli ölçüde azaltarak çevreye verilen zararın azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan yöntemler, kurulum planlaması yapılan farklı su alanlarında da kullanılarak verim kıyaslamasında bulunabilmektedir. Kurulumun fiziki tasarımı, kullanılan FV modül ve invertör verimlilikleri, modül ve zemin albedo değerleri, ortam sıcaklığı, rüzgâr değişkenleri yapılan analizlerde farklı sonuçlar verebilmektedir. Literatürde farklı bölgelerde yapılan deneysel ve simülasyon ortamındaki çalışmalar değerlendirildiğinde Yüzer FV sistemlerin Karasal FV sistemlerine göre daha verimli olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, yüzer fotovoltaik sistemlerin kara tipi sistemlere kıyasla daha yüksek verimlilik sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, özellikle su yüzeyine sahip alanlarda güneş enerjisi santrali planlamalarında Yüzer FV sistemlerin tercih edilmesi önerilmektedir. Böylece hem arazi kullanımının optimize edilmesi hem de sistem verimliliğinin artırılması mümkün olmaktadır. Küresel ölçekte Yüzer FV sistemlerine olan talebin artmasıyla birlikte, kara arazileri daha verimli kullanılabilen, çevreye verilen zarar azaltılmaktadır. Enerji üretiminde sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği açısından bu nitelikler kritik almaktadır.

5. Kaynaklar

- Antonio, M., Galdino, E., Maria, M., Olivieri, A. (2017).** Some Remarks about the Deployment of Floating PV Systems in Brazil. *Journal of Electrical Engineering*, 5, 10–19. <https://doi.org/10.17265/2328-2223/2017.01.002>
- ArcGIS 10.8 (10.8).** (2025).
- Bontempo Scavo, F., Tina, GM., Gagliano, A., Nizetić, S. (2021).** An assessment study of evaporation rate models on a water basin with floating photovoltaic plants. *International Journal of Energy Research*, 45(1), 167–188. <https://doi.org/10.1002/er.5170>
- Cazzaniga, R., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, GM. (2012).** Floating tracking cooling concentrating (FTCC) systems. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 514–519. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2012.6317668>
- Cazzaniga, R., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, GM. (2019).** Integration of PV floating with hydroelectric power plants. *Heliyon*, 5(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01918>
- Chanchangi, YN., Ghosh, A., Baig, H., Sundaram, S., Mallick, TK. (2021).** Soiling on PV performance influenced by weather parameters in Northern Nigeria. *Renewable Energy*, 180, 874–892. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.08.090>
- Chanchangi, YN., Ghosh, A., Sundaram, S., Mallick, TK. (2021).** Angular dependencies of soiling loss on photovoltaic performance in Nigeria. *Solar Energy*, 225, 108–121. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.07.001>
- Chen, YK, Kirkerud, JG, Bolkesjö, TF. (2022).** Balancing GHG mitigation and land-use conflicts: Alternative Northern European energy system scenarios. *Applied Energy*, 310, 118557. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.118557>
- Choi, YK., Choi, WS., Lee, JH. (2016).** Empirical research on the efficiency of floating PV systems. *Science of Advanced Materials*, 8(3), 681–685.
- Ciel et Terre. (2024).** *The Floating Solar Company*. Retrieved December 15, 2023, from <https://ciel-et-terre.net/>
- Crago, CL. (2021).** Economics of Solar Power. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. <https://doi.org/10.1093/ACREFORE/9780199389414.013.491>
- Cuce, E., Cuce, PM., Saboor, S., Ghosh, A., Sheikhnejad, Y. (2022).** Floating PVs in Terms of Power Generation, Environmental Aspects, Market Potential, and Challenges. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 2626, 14(5), 2626. <https://doi.org/10.3390/SU14052626>

- DSİ. (2024).** Yüzer Ges'lerle Hem Temiz Enerji Hem Su Tasarru. <https://Dsi.Gov.Tr/Haber/Detay/12128>.
- Dwivedi, P., Sudhakar, K., Soni, A., Solomin, E., Kirpichnikova, I. (2020).** Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100674. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2020.100674>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025).** Türkiye Elektrik Enerjisi. <https://Enerji.Gov.Tr/Bilgi-Merkezi-Enerji-Elektrik>.
- Exley, G., Hernandez, RR., Page, T., Chipps, M., Gambro, S., Hersey, M., Lake, R., Zoannou, KS., Armstrong, A. (2021).** Scientific and stakeholder evidence-based assessment: Ecosystem response to floating solar photovoltaics and implications for sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111639. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111639>
- Farfan, J., Breyer, C. (2018).** Combining Floating Solar Photovoltaic Power Plants and Hydropower Reservoirs: A Virtual Battery of Great Global Potential. *Energy Procedia*, 155, 403–411. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2018.11.038>
- Ferrer-Gisbert, C., Ferrán-Gozálvez, JJ., Redón-Santafé, M., Ferrer-Gisbert, P., Sánchez-Romero, FJ., Torregrosa-Soler, JB. (2013).** A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs. *Renewable Energy*, 60, 63–70. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2013.04.007>
- Finch, J., Calver, A. (2008).** Methods for the quantification of evaporation from lakes prepared for the World Meteorological Organization's Commission for Hydrology.
- Ghosh, A. (2020).** Soiling Losses: A Barrier for India's Energy Security Dependency from Photovoltaic Power. *Challenges* 2020, Vol. 11, Page 9, 11(1), 9. <https://doi.org/10.3390/CHALLE11010009>
- Ghosh, A. (2022).** Fenestration integrated BIPV (FIPV): A review. *Solar Energy*, 237, 213–230. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2022.04.013>
- Golroodbari, SZ., Van Sark, W. (2020).** Simulation of performance differences between offshore and land-based photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(9), 873–886. <https://doi.org/10.1002/PIP.3276>
- Google Earth. (2025).** <https://earth.google.com/>
- Gorjian, S., Ebadi, H., Calise, F., Shukla, A., Ingrao, C. (2020).** A review on recent advancements in performance enhancement techniques for low-temperature solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 222, 113246. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.113246>
- Gorjian, S., Ghobadian, B. (2015).** Erratum: Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran (*Renew. Sustain. Energy Rev.* (2015) 48 (571–584)). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1323. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.009>
- Gorjian, S., Zadeh, BN., Eltrop, L., Shamshiri, RR., Amanlou, Y. (2019).** Solar photovoltaic power generation in Iran: Development, policies, and barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106, 110–123. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.02.025>
- Goswami, A., Sadhu, P., Goswami, U., Sadhu, PK. (2019).** Floating solar power plant for sustainable development: A techno-economic analysis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(6), e13268. <https://doi.org/10.1002/EP.13268>
- GreenPowerHybrid LLC Company. (2021).** Floating solar system. <https://www.greepowerhybrid.com/floating-solar-system/>
- Gul, M., Kotak, Y., Muneer, T., Ivanova, S. (2018).** Enhancement of albedo for solar energy gain with particular emphasis on overcast skies. *Energies*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/EN11112881>
- Haas, J., Khalighi, J., de la Fuente, A., Gerbersdorf, SU., Nowak, W., Chen, PJ. (2020).** Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility. *Energy Conversion and Management*, 206, 112414. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.112414>
- Hassan, MM., Peirson, WL., Neyland, BM., Fiddis, NMQ. (2015).** Evaporation mitigation using floating modular devices. *Journal of Hydrology*, 530, 742–750. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2015.10.027>
- Hernandez, RR., Easter, SB., Murphy-Mariscal, ML., Maestre, FT., Tavassoli, M., Allen, EB., Barrows, CW., Belnap, J., Ochoa-Hueso, R., Ravi, S., Allen, MF. (2014).** Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 766–779. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.08.041>
- Hooper, T., Armstrong, A., Vlaswinkel, B. (2021).** Environmental impacts and benefits of marine floating solar. *Solar Energy*, 219, 11–14. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2020.10.010>
- İBB. (2017).** Türkiye'nin ilk yüzer güneş enerji santrali. Suncalc. Org. <https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/ibb-turkiyenin-ilk-yuzer-gunes-enerji-santralini-kurdu/876616>
- Kahl, A., Dujardin, J., Lehning, M. (2019).** The bright side of PV production in snow-covered mountains. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(4), 1162–1167. https://doi.org/10.1073/PNAS.1720808116/SUPPL_FILE/PNAS.1720808116.SAPP.PDF
- Kamuyu, WCL., Lim, JR., Won, CS., Ahn, HK. (2018).** Prediction model of photovoltaic module temperature for power performance of floating PVs. *Energies*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/en11020447>

- Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., Biwole, PH. (2016).** Thermal response of poly-crystalline silicon photovoltaic panels: Numerical simulation and experimental study. *Solar Energy*, 134, 147–155. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2016.05.002>
- Kulat, Mİ., Tosun, K., Karaveli, AB., Yucel, I., Akinoglu, BG. (2023).** A sound potential against energy dependency and climate change challenges: Floating photovoltaics on water reservoirs of Turkey. *Renewable Energy*, 206, 694–709. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.058>
- Lee, N., Grunwald, U., Rosenlieb, E., Mirlletz, H., Aznar, A., Spencer, R., Cox, S. (2020).** Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. *Renewable Energy*, 162, 1415–1427. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.08.080>
- Li, W., Guo, Y., Fu, K. (2011).** Enclosure Experiment for Influence on Algae Growth by Shading Light. *Procedia Environmental Sciences*, 10(PART B), 1823–1828. <https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2011.09.285>
- Liu, H., Krishna, V., Lun Leung, J., Reindl, T., Zhao, L. (2018).** Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(12), 957–967. <https://doi.org/10.1002/PIP.3039>
- Liu, L., Wang, Q., Lin, H., Li, H., Sun, Q., Wennersten, R. (2017).** Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems. *Energy Procedia*, 105, 1136–1142. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.483>
- Mardin Ticaret Odası. (2023).** İlsu Barajı Fizibilite Raporu Rev-2 – 2.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024).** Türkiye Global Güneş Radyasyonu Uzun Yıllar Ortalaması (2004-2021) Heliosa Model Ürünleri. https://Mgm.Gov.Tr/Kurumici/Radyasyon_iller.aspx?Il=elazig.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2025).** Türkiye (5-10) Ayları Günlük Açık Yüzey Buharlaşma. <https://mgm.gov.tr/FILES/resmi-istatistikler/parametreAnalizi/2024-buharlasma.pdf>
- Muzathik, AM., Muzathik, AM. (2014).** Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation. In *International Journal of Energy Engineering* (Vol. 4, Issue 4). <https://www.researchgate.net/publication/267911000>
- NASA. (2024, December).** Surface Albedo. <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>
- Olabi, AG., Abdelkareem, MA. (2022).** Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112111. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112111>
- Padilha Campos Lopes, M., de Andrade Neto, S., Alves Castelo Branco, D., Vasconcelos de Freitas, MA., da Silva Fidelis, N. (2020).** Water-energy nexus: Floating photovoltaic systems promoting water security and energy generation in the semi-arid region of Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122010>
- Piana, V., Kahl, A., Saviozzi, C., Schumann, R. (2021).** Floating PV in mountain artificial lakes: a checklist for site assessment. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 6, 4. <https://doi.org/10.1051/REES/2021002>
- Pimentel Da Silva, GD., Branco, DAC. (2018).** Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 36(5), 390–400. <https://doi.org/10.1080/14615517.2018.1477498>
- Pringle, AM., Handler, RM., Pearce, JM. (2017).** Aquavoltaics: Synergies for dual use of water area for solar photovoltaic electricity generation and aquaculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 572–584. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.191>
- PVsyst. (2025).** Array Thermal losses. Retrieved May 6, 2025, from https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/thermal_loss.htm
- Ranjbaran, P., Yousefi, H., Gharehpetian, GB., Astaraci, FR. (2019).** A review on floating photovoltaic (FPV) power generation units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 332–347. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.05.015>
- Reindl, T., Paton, C., Kumar, A., Liu, H., Krishnamurthy, V. A., Zhang, J., Tay, S., Zhan, Y., Dobrotkova, Z., Chavez, S., Jackson, C., Knight, O., Cornieti, S., Audinet, P., Draugelis, G., Goyal, S., Lorillou, P., Tavoulareas, S., Malovic, D., ... SERIS, at the N. U. of S. (NUS). (2019).** Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/670101560451219695/pdf/Floating-Solar-Market-Report.pdf>
- Rodríguez-Gallegos, CD., Gandhi, O., Sun, H., Paton, C., Zhang, J., Moideen Yacob Ali, J., Alvarez-Alvarado, MS., Zhang, W., Rodríguez-Gallegos, CA., Chua, LHC., Reindl, T. (2025).** Global floating PV status and potential. *Progress in Energy*, 7(1). <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ad9074>
- Rosa-Clot, M., & Marco Tina, G. (2020).** Floating PV Plants. https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=yKXM-DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&cots=W8i8L6jw9A&sig=-JPI1mh9BeARAXb-x51RsH9mTrq8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Rosa-Clot, M., Pistocchi, A., Quaranta, E., Rosa-Clot, M., Pistocchi, A. (2021).** The role of floating PV in the retrofitting of existing hydropower plants and evaporation reduction. <https://www.researchgate.net/publication/353043174>

- Rosa-Clot, M., Tina, GM. (2017).** Submerged and Floating Photovoltaic Systems: Modelling, Design and Case Studies. Submerged and Floating Photovoltaic Systems: Modelling, Design and Case Studies, 1–242. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03291-6>
- Rosa-Clot, M., Tina, GM., Nizetic, S. (2017).** Floating photovoltaic plants and wastewater basins: an Australian project. *Energy Procedia*, 134, 664–674. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.09.585>
- Sahu, A., Yadav, N., Sudhakar, K. (2016).** Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 815–824. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.08.051>
- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., Kazmerski, LL. (2013).** A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 698–733. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.12.065>
- Sengupta, S., Ghosh, A., Mallick, TK., Chanda, CK., Saha, H., Bose, I., Jana, J., Sengupta, S. (2021).** Model Based Generation Prediction of SPV Power Plant Due to Weather Stressed Soiling. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 5305, 14(17), 5305. <https://doi.org/10.3390/EN14175305>
- Skoplaki, E., Palyvos, JA. (2009).** Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, 34(1), 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.009>
- Statista, Mackenzie, W. (2022a).** Breakdown-of-global-floating-solar-pv-installations-demand-2022-by-region.
- Statista, Mackenzie, W. (2022b).** Projected global demand of annual floating solar PV energy 2018–2031.
- Taboada, ME., Cáceres, L., Graber, TA., Galleguillos, HR., Cabeza, LF., Rojas, R. (2017).** Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling. *Renewable Energy*, 105, 601–615. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.12.094>
- Technical Report. (2021).** Solar, P.V.
- Technical Report. (2022).** Smart Electrification with Renewables: Driving the Transformation of Energy Services.
- Tim Umoette, A. (2016).** Design of Stand Alone Floating PV System for Ibeno Health Centre. *Science Journal of Energy Engineering*, 4(6), 56. <https://doi.org/10.11648/j.sjee.20160406.12>
- Tina, GM., Bontempo Scavo, F., Merlo, L., Bizzarri, F. (2021).** Analysis of water environment on the performances of floating photovoltaic plants. *Renewable Energy*, 175, 281–295. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.04.082>
- Tina, GM., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, GM., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P. (2011).** Electrical Behavior and Optimization of Panels and Reflector of a Photovoltaic Floating Plant. <https://doi.org/10.4229/26thEUPVSEC2011-5BV.2.54>
- Trapani, K., Redón Santafé, M. (2015).** A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013. In *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* (Vol. 23, Issue 4, pp. 524–532). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/pip.2466>
- TÜİK. (2023).** Belediyelerde İçmesuyu Şebekesi İçin Çekilen Toplam Su. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Su-ve-Atiksu-Istatistikleri-2022-49607>
- TÜİK. (2025).** Çevre İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=sera&dil=1>
- Van de Ven, DJ., Capellan-Peréz, I., Arto, I., Cazcarro, I., de Castro, C., Patel, P., & Gonzalez-Eguino, M. (2021).** The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-021-82042-5>
- Yadav, N., Gupta, M., Sudhakar, K. (2017).** Energy assessment of floating photovoltaic system. *International Conference on Electrical Power and Energy Systems, ICEPES 2016*, 264–269. <https://doi.org/10.1109/ICEPES.2016.7915941>