



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Küresel ısınma ve güneş enerjisi: Türkiye ve lider ülkeler üzerine bir analiz

Global warming and solar energy: An analysis on Türkiye and leading countries

Yazar(lar) (Author(s)): Abid USTAOĞLU¹, Süheyl Bilal SUNGUR²

ORCID¹: 0000-0003-3391-5015

ORCID²: 0009-0004-7571-0493

To cite to this article: Ustaoglu A., and Sungur S. B., “Küresel Isınma ve Güneş Enerjisi: Türkiye ve Lider Ülkeler Üzerine Bir Analiz”, *Journal of Polytechnic*, 29(3):290311:1-29 (2026).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Ustaoglu A., ve Sungur S. B., “Küresel Isınma ve Güneş Enerjisi: Türkiye ve Lider Ülkeler Üzerine Bir Analiz”, *Politeknik Dergisi*, 29(3):290311:1-29 (2026).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1720721

Küresel Isınma ve Güneş Enerjisi: Türkiye ve Lider Ülkeler Üzerine Bir Analiz

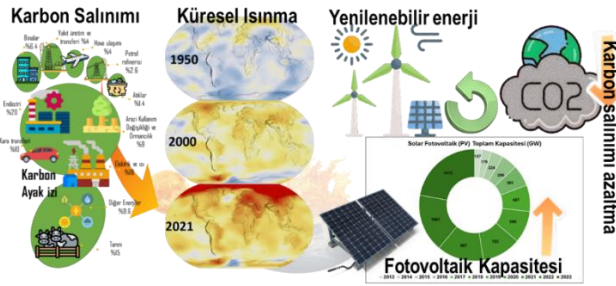
Global Warming and Solar Energy: An Analysis on Türkiye and Leading Countries

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Küresel ısınma güneş enerjisiyle ilişkilendirilmiştir. / Global warming is linked to solar energy.
- ❖ Güneş enerjisinin gelişimi ve Türkiye'nin durumu incelenmiştir. / Solar energy trends and Türkiye's position are examined.
- ❖ PV ve termal kapasite artışı karşılaştırılmıştır. / PV and thermal growth are compared.
- ❖ Türkiye'nin gelişim alanları vurgulanmıştır. / Türkiye's improvement areas are highlighted.
- ❖ Güneş enerjisinin stratejik rolü öne çıkarılmıştır. / The strategic role of solar energy is emphasized.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Türkiye'nin güneş enerjisi gelişimi, küresel liderlerle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. / Turkey's solar energy development has been compared with global leaders.



Şekil. Küresel Isınma ve Güneş Enerjisi /Figure. Global Warming and Solar Energy

Amaç (Aim)

Bu çalışma, küresel ısınmayla mücadelede güneş enerjisinin önemini inceleyerek, Çin, Almanya ve ABD'nin performanslarını Türkiye'nin gelişimiyle karşılaştırmakta ve politika önerileri sunmaktadır. / This study examines the importance of solar energy in combating global warming, comparing the performance of China, Germany, and the United States with Turkey's development, and offering policy recommendations.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Küresel ısınmada güneş enerjisinin rolünü inceleyerek, Çin, Almanya ve ABD'nin performanslarını Türkiye'nin gelişimiyle karşılaştırmakta ve Türkiye'nin küresel konumuna dair çıkarımlar sunmaktadır. / This study examines the role of solar energy in global warming, comparing the performance of China, Germany, and the United States with Turkey's development, and highlighting Turkey's position within global trends.

Özgünlük (Originality)

Küresel ısınma ve güneş enerjisi teknolojilerini bütüncül olarak ele alarak, Türkiye'nin performansını uluslararası liderlerle karşılaştırmalı göstergelerle değerlendirmekte ve politika hedefleriyle ilişkilendirerek literatüre özgün katkılar sunmaktadır. / This study takes a holistic approach to global warming and the development of solar energy technologies, evaluating Turkey's performance through comparative indicators with international leaders. By linking quantitative analyses to policy goals, it provides original contributions to both the literature and decision-makers.

Bulgular (Findings)

2013–2023 arasında küresel kapasite 10 kat arttı; Çin liderliğini korurken, Türkiye dikkate değer ilerleme kaydetmiş ancak hala gelişim alanları mevcuttur. / Between 2013 and 2023, global capacity grew tenfold; China maintained leadership, and Türkiye progressed but still has room for improvement.

Sonuç (Conclusion)

Güneş enerjisi teknolojilerinin küresel ısınmayla mücadeledeki önemi vurgulanmış; Türkiye'nin potansiyelini kullanması için güçlü teşviklere ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. / The study highlights solar energy's role in combating global warming and emphasizes the need for stronger incentives for Türkiye to realize its potential.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Küresel Isınma ve Güneş Enerjisi: Türkiye ve Lider Ülkeler Üzerine Bir Analiz

Derleme Makalesi / Review Article

Abid USTAOĞLU^{1,2*}, Süheyl Bilal SUNGUR^{3,4}

¹ Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, 74100, Türkiye

² Akışkan Bilimi Enstitüsü, Tohoku Üniversitesi, Sendai 980-8577, Japonya

³ Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bartın Üniversitesi, Bartın, 74100, Türkiye

⁴ Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Karabük, 74100, Türkiye

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017 ; Erken Görünüm/Early View : 28.10.2025)

ÖZ

Küresel ısınma, insan faaliyetlerine bağlı olarak atmosfere salınan sera gazlarının artışıyla birlikte dünya genelinde çevresel, ekonomik ve sosyal krizlere neden olmaktadır. Bu çalışmada, küresel ısınmanın nedenleri ve etkileri güneş enerjisi sistemleri çerçevesinde incelenmekte; güneş enerjisinin sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir gelecek için stratejik önemi vurgulanmaktadır. Artan sıcaklıklar, buzulların erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi, su ve gıda krizleri gibi olumsuzlukların önüne geçebilmek için temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek kaçınılmazdır. Dünya genelinde ve Türkiye özelinde güneş enerjisi teknolojilerinin gelişimi incelenmiş; fotovoltaik (PV) ve solar termal sistemlerdeki kapasite artışları analiz edilmiştir. 2013 yılında 137 GW olan küresel PV kapasitesi, 2023'te 1412 GW'a ulaşarak 10,3 kat büyümüştür. Çin 609,4 GW ile lider konumunu korurken, Türkiye 2015 sonrası hızlı bir artış göstermiştir. Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu gücü 2013–2023 döneminde belirgin şekilde artmış, 2025 yılı itibarıyla ise 22.5 GW seviyesine ulaşmıştır. Solar termal alanda ise Türkiye, 2020'de ABD'yi geride bırakarak dünya ikinciliğine yükselmiştir. Ancak sahip olduğu potansiyele kıyasla hâlâ kritik gelişim alanları mevcuttur. Türkiye özelinde yapılan karşılaştırmalı analiz, ülkenin güneş enerjisi alanındaki mevcut konumunu küresel liderlerle kıyaslayarak güçlü yönlerini ve geliştirilmesi gereken alanları somut ortaya koyması açısından özellikle değer taşımaktadır. Sonuç olarak, güneş enerjisi; düşük karbonlu bir ekonomi için vazgeçilmezdir. Güneş enerjisi teknolojileri çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesi açısından stratejik bir rol üstlenmektedir. Türkiye'nin sahip olduğu potansiyeli daha etkin değerlendirebilmesi için teşvik ve yatırım politikalarının kararlılıkla sürdürülmesi gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Küresel ısınma, güneş enerjisi, fotovoltaik sistemler, solar termal sistemler, Türkiye enerji politikası, yenilenebilir enerji.

Global Warming and Solar Energy: An Analysis on Türkiye and Leading Countries

ABSTRACT

Global warming, driven by the increase in greenhouse gas emissions resulting from human activities, has led to environmental, economic, and social crises worldwide. This study examines the causes and impacts of global warming within the framework of solar energy systems and highlights the strategic importance of solar energy for a sustainable, low-carbon future. Rising temperatures, melting glaciers, sea-level rise, and crises in water and food security make the transition to clean and renewable energy sources inevitable. The development of solar energy technologies worldwide and in Turkey has been analyzed, with particular focus on capacity growth in photovoltaic (PV) and solar thermal systems. Global PV capacity, which was 137 GW in 2013, reached 1,412 GW in 2023, marking a 10.3-fold increase. China maintained its leading position with 609.4 GW, while Turkey experienced rapid growth after 2015. Turkey's installed solar capacity increased significantly between 2013 and 2023 and reached 22.5 GW by 2025. In solar thermal energy, Turkey surpassed the United States in 2020 to become the world's second largest. Nevertheless, there remain critical areas for further development compared to its potential. The comparative analysis conducted for Turkey is particularly valuable as it clearly identifies the country's current position in the field of solar energy relative to global leaders, highlighting both its strengths and the areas that require further development. In conclusion, solar energy is indispensable for a low-carbon economy. Solar energy technologies play a strategic role in achieving environmental sustainability, reducing dependence on fossil fuels, and strengthening energy supply security. To make more effective use of its potential, Turkey must continue to pursue investment and incentive policies with determination.

Keywords: Global warming, solar energy, photovoltaic systems, solar thermal systems, Türkiye's energy policy, renewable energy.

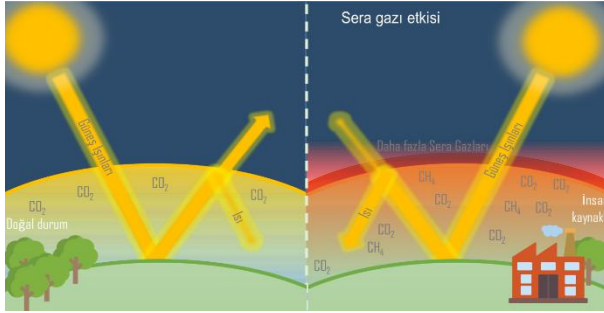
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sera gazları, yüksek ısı tutma kapasitesine sahip atmosfer bileşenleridir. Karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), diazot

monoksit (N₂O) ve kloroflorokarbonlar gibi gazlar, güneş ve yer radyasyonunu soğurarak atmosferin sera etkisiyle ısınmasında temel rol oynarlar. kWh/m² olmak üzere iyi değerlere sahiptir. Bu gazların miktarı insan

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : austaoğlu@bartin.edu.tr

kaynaklı olarak arttıkça, daha fazla ısı yeryüzünde hapsolmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. İnsan kaynaklı sera gazı etkisi (Anthropogenic greenhouse gas effect)

Küresel ölçekte başlıca sera gazları CO₂ (%69), CH₄ (%26) ve nitroz oksit (%5) şeklindedir [1]. CO₂, CH₄ ve N₂O gibi gazların ulusal düzeydeki salınımları, iklim üzerindeki uzun vadeli ve güçlü etkileri nedeniyle Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) kapsamında denetim altına alınmıştır [1]. Bunlara ek olarak, kloroflorokarbonlar, florlu gazlar, halokarbonlar ve su buharı (H₂O) da sera etkisine sahiptir. CO₂ atmosferde yaklaşık 100 yıl boyunca ısı tutma kapasitesine sahiptir. CH₄, 12 yıl boyunca kalıcı olup CO₂'ye kıyasla 25 kat daha fazla ısı tutabilir. Nitroz oksitler ise 120 yıl atmosferde kalır ve CO₂'den 298 kat daha fazla ısı tutma kapasitesine sahiptir. CO₂ ve H₂O, fosil yakıtların yanması sonucu oluşan temel ürünlerdir ve bu gazların atmosferdeki oranı fosil yakıt kullanımıyla birlikte artmaktadır.

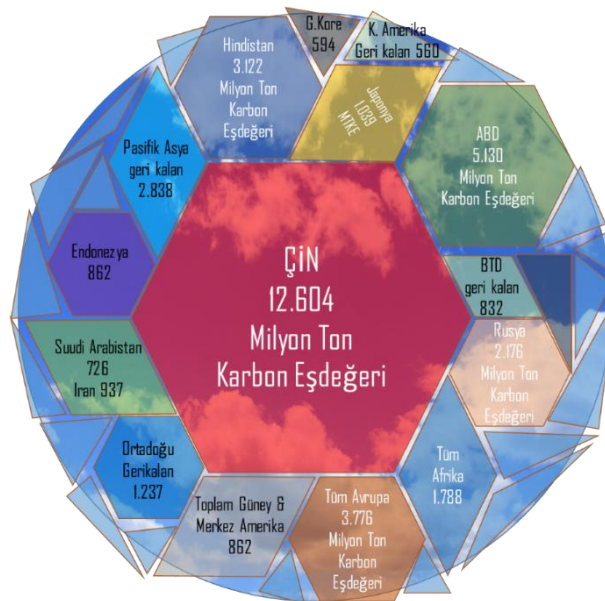
Fosil yakıtların tüketimi, ormansızlaşma, hızlı nüfus artışı ve enerji talebindeki artış gibi etkenler, atmosferdeki CO₂ yoğunluğunun sanayi devrimi öncesine kıyasla yaklaşık %25 oranında yükselmesine

neden olmuştur. Günümüzde bu yoğunluk her yıl ortalama %0,5 düzeyinde artmaya devam etmektedir.



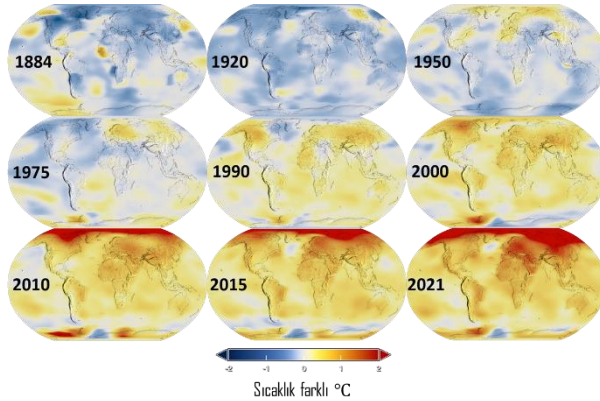
Şekil 2. Sektöre bağlı global karbon ayak izi oranları (Global carbon footprint ratios by sector)

Sektöre bağlı küresel karbon ayak izi oranları Şekil 2'de gösterilmiştir. Karbon emisyonuna neden olan başlıca sektörler; endüstriyel uygulamalar, ısı ve elektrik üretimi, tarımsal faaliyetler ve ulaşım sektörü olarak sıralanabilir [2,3].

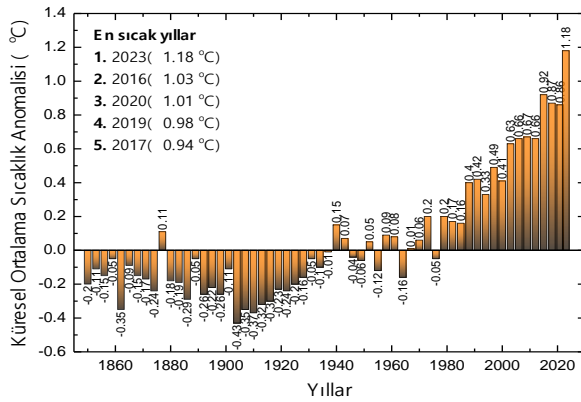


Şekil 3. 2023 yılında enerji sektörüne bağlı karbon emisyonlarının bölgesel dağılımı ile en yüksek emisyon üreten ilk 10 ülke (Regional distribution of carbon emissions from the energy sector in 2023 and the top 10 countries with the highest emissions)

2023 yılında enerji sektörüne bağlı karbon emisyonlarının bölgesel dağılımı ile en yüksek emisyon üreten ilk 10 ülke Şekil 3'te sunulmuştur. 2023 yılında, Çin enerji üretiminden kaynaklanan küresel çapta toplam karbondioksit emisyonlarının neredeyse üçte birini (%31) oluşturarak 12,6 milyar ton CO₂ salımı gerçekleştirmiştir [4]. Bu miktar, batı yarımküre ve Avrupa'nın toplam emisyonlarından daha fazladır. Emisyon rakamları, enerji üretimi, gaz yakma (flaring), endüstriyel süreçler ve fosil yakıtların taşınması ve dağıtımını kaynaklı emisyonları içermektedir. Bu gazların atmosferdeki yoğunluğunun artması, küresel ortalama sıcaklığın her geçen gün yükselmesine neden olmaktadır. NASA'nın raporuna göre dünya genelindeki yıllık ortalama sıcaklık değişimleri Şekil 4'te gösterilmektedir [5]. Normal sıcaklıklar, 1951-1980 yılları arasındaki 30 yıllık referans dönem üzerinden hesaplanmaktadır. 2021 yılına ait son görsel, 2017-2021 arasındaki beş yıllık küresel sıcaklık anomalilerini temsil etmektedir. NASA ve NOAA tarafından yapılan bağımsız analizlere göre, 2021 yılı, Dünya'nın küresel ortalama yüzey sıcaklığı açısından kaydedilen en sıcak altıncı yıl olmuş ve 2018 ile aynı seviyede gerçekleşmiştir [5].



Şekil 4. Küresel yüzey sıcaklık anomalilerindeki değişimin yıllara göre ilerleyişi (Progression of global surface temperature anomalies over the years)



Şekil 5. Küresel yüzey sıcaklık anomalilerindeki değişimin yıllara göre ilerleyişi (Progression of global surface temperature anomalies over the years)

Şekil 5 de 1961-1990 ortalama sıcaklık temel dönemine göre küresel ortalama kara-deniz sıcaklık anomalisinin 1850 ile 2023 arasında yıllara göre ilerleyişi gösterilmektedir [5]. Dünya'nın 2023'teki ortalama yüzey sıcaklığı, 1880'de kayıtların tutulmaya başlanmasından bu yana kaydedilen en sıcak yıl olmuştur. Ancak gelişen teknoloji ve El Niño hava olayının etkisiyle 2024 yılı, 2023'ü geride bırakarak tarihteki en sıcak yıl olarak kaydedilmiştir [6-8]. Avrupa Birliği İklim Değişikliği İzleme Servisi'nin açıklamalarına göre, 2024 Haziran ayı küresel ölçekte kaydedilen en sıcak ay olmuştur. Dolayısıyla, kayıtların 1850 yılında başlamasından bu yana 2024 yılı, şimdiye kadarki en sıcak yıl olarak kesinleşmiştir [9,10].

IPCC, NASA ve UN Çevre Programı gibi kuruluşların küresel ısınma ve küresel iklim değişiklikleri raporlarına göre dünya ortalama sıcaklığındaki artışa bağlı çeşitli çevresel sorunlar öngörülmektedir [11-14]. Küresel ısınmanın sıcaklığa bağlı etkileri Şekil 6'da gösterilmiştir. 1 °C'lik artışta deniz seviyeleri yükselmeye başlar ve özellikle denize yakın alçak kıyı bölgeleri ile ada ülkeleri için ciddi bir tehdit oluşturur. Orta enlem bölgelerinde sıcak hava dalgaları, kuraklık ve orman yangınları yaygınlaşmaya başlar. Alpler, Himalayalar ve And dağlarındaki buzullarda belirgin bir erime gözlenir. Okyanusların soğurduğu karbondioksit miktarı artar ve bu da suyun pH seviyesini düşürür. Bu da okyanusların asitlenmesine neden olur. Deniz ekosistemi zarar görmeye başlar. Mercanlar bundan belirgin ölçüde etkilenir.

1,5 °C'lik artışta, dünyadaki mercan resiflerinin yaklaşık %70 ila %90'ı yok olma tehlikesiyle karşı karşıya kalır. Deniz ekosisteminde olumsuz etkiler kıyı balıkçılığını zarar verir. Özellikle ekvatora yakın tropikal ve her iki yarım kürede 36°-44° paralelleri arasındaki subtropikal bölgelerde tarımsal verim düşer. Bu da gıda güvenliğini tehlikeye sokar. Su kıtlıkları daha geniş bölgelere yayılır. Tropikal ve subtropikal bölgelerde içme suyu sıkıntısı daha belirgin yaşanır. Daha sık ve yoğun bir şekilde sıcak hava dalgaları, kuvvetli fırtınalar ve yağışlar gibi ekstrem hava olayları daha sık ve yoğun şekilde yaşanır. Yaz aylarında kutup bölgelerinde buzlar tamamen eriyebilir. 2 °C'lik artışta, Grönland ve Antarktika'daki buzullar hızla erir ve deniz seviyesi 0.4-1 m arasında hızla yükselir. Bu yükselmeden kaynaklı olarak kıyı bölgeleri ve delta alanlarını su basabilir. Afrika, Orta Doğu ve Güney Asya'da şiddetli kuraklıklar görünürken, Kuzey Amerika ve Avrupa gibi yerlerde seller ve fırtınalar sıklaşır. Özellikle buğday, pirinç ve mısır gibi temel gıda maddelerinin üretim ciddi şekilde azalır. Çölleşme ve ormanların azalmasıyla birlikte canlı türlerinin yaklaşık %20'si yok olma tehlikesiyle karşı karşıya kalırlar.

3 °C'lik artışta deniz seviyesi 3 metreyi aşabilir. Miami, Bangladeş ve Hollanda gibi ülkelerin alçak kıyı bölgeleri sular altında kalırken yüz milyonlarca insan göçe zorlanır. Orta enlemde ölümcül hava dalgaları normalleşir. Avrupa ve Kuzey Amerika'da yaz ayları daha sıcak ve uzun sürer. Su kaynakları kurumasıyla küresel bir su krizi oluşur. Tropikal ve subtropikal

bölgelerde tarım büyük ölçüde azalır. Kuzey kutbunda buzlar tamamen erirken Antarktika'da erimeler hızlanır. Okyanuslarında daha fazla ısınması ve asitlenmesi balıkçılığı büyük ölçüde olumsuz etkiler.

4 °C'lik artışla Akdeniz, Güney Avrupa, Güneydoğu Asya ve Afrika'nın bazı bölgeleri çölleşir; tarım yapmak giderek zorlaşır. Deniz seviyesindeki yükselme artarken büyük göç dalgaları yaşanır. Ekstrem hava olayları daha şiddetli ve sık hale gelir. Birçok bitki ve hayvan türü sıcaklık değişimine uyum sağlayamayarak yok olur. Küresel gıda ve su krizleri olur.

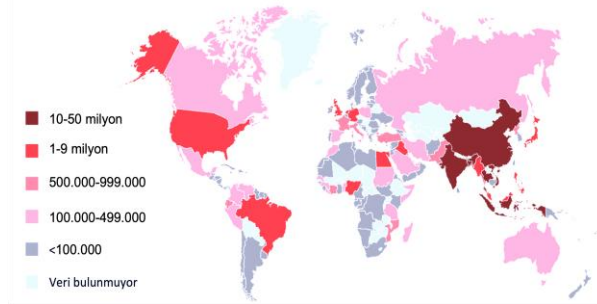
5 °C ve üzerindeki sıcaklık artışında kitlesel göçler, yoğun iklim felaketleri ve ekosistemlerin yok oluşu gibi sonuçlar ortaya çıkar; küresel ekonomik sistem çökebilir. Tarım, hayvancılık, su kaynakları ve enerji üretimi çökebilir. İnsanlık bu yüksek sıcaklık artışına uyum sağlamakta zorluklar yaşar.

Sıcaklık artışı arttıkça etkiler yıkıcı ve geri dönüşsüz hale gelir. 1,5-2 °C eşiği tehlikeli kabul edilen kritik sınırdır. Mevcut emisyon trendlerinin devam etmesi durumunda, 1,5 °C'lik artışın 2050 yılına kadar, 2 °C'lik artışın ise 2100 yılına kadar gerçekleşmesi beklenmektedir. Kyoto protokolü, Paris İklim Anlaşması gibi girişimlerde küresel ısınma hızının azaltılması ve bunun 1,5 °C de sınırlandırılması hedeflenmektedir.



Şekil 6. Küresel ısınmadan kaynaklı oluşacak çevresel problemler (Environmental problems resulting from global warming)

Kulp ve Strauss'ın [15] Nature Communications dergide yayımlanan araştırmalarına göre, 2100 yılına kadar dünya genelinde 200 milyon insanın yaşadığı bölgelerin deniz seviyesinin altında kalacağı öngörülmektedir. Ayrıca 160 milyon kişinin yaşadığı bölgelerde yükselen deniz seviyeleri nedeniyle daha sık su baskınlarına yaşanacağı tahmin edilmektedir. Deniz seviyelerinde, 2°C sıcaklık artışına bağlı olarak, buz tabakalarının kararsızlığı dikkate alınmaksızın, deniz seviyesinde 50 ila 70 cm arasında bir yükselme öngörülmektedir. 2100 yılına kadar yükselen deniz seviyelerinden en fazla etkilenen bölgeler ve deniz seviyesinin altında kalması öngörülen arazilerde yaşayan insan sayısı, Şekil 7'de gösterilmektedir [15,16].



Şekil 7. Yılına kadar deniz seviyesinin altında kalması beklenen arazilerde yaşayan insan sayısı [16] (Number of people living in areas expected to be below sea level by year)

Bu sıkıntılara ek olarak fosil yakıt rezervlerinde kritik düzeyde azalma yaşanmaktadır. Rezerv/Üretim Oranı (R/Ü), bilinen mevcut rezervlerin, mevcut yıllık üretim hızına dayanarak ne kadar süre yeteceğini gösteren bir ölçüttür. 2020 yılı itibarı ile R/Ü oranı referans alınarak tahmin edilen fosil yakıtların ömürleri kömür için 130-150 yıl, petrol için 45-55 yıl, doğalgaz için 50-60 yıl arasında değişmektedir [4]. Kömür, dünya çapında geniş rezervlere sahip olduğundan, mevcut üretim hızında diğer fosil yakıtlara göre daha uzun süre dayanması beklenmektedir. Yeni rezervlerin keşfi, yenilenebilir enerjiye geçiş çalışmaları ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) teknolojileri gibi faktörler bu süreleri etkileyebilir.

Bir diğer çarpıcı sorun ise çevresel kirliliğin artması ve buna bağlı olarak insan sağlığının ciddi şekilde zarar görmesidir. Dünya Sağlık Örgütü'nün raporuna göre, karbon salınımının en yüksek olduğu Çin'de her yıl 2 milyon kişi hava kirliliğine bağlı olarak Çin'de yaşamını yitirmektedir [4,17]. Türkiye'de hava kirliliği, en tehlikeli çevresel sorunların başında gelmektedir. Ülkemizde, Dünya Sağlık Örgütü'nün (DSÖ) belirlediği sınır değerlerin üzerinde hava kirliliğine maruz kalan kişi sayısı oldukça fazladır. Her yıl hava kirliliğine bağlı hastalıklardan 30.000'den fazla kişi hayatını kaybetmekte, bu da ülke ölümlerinin %8'inden fazlasını oluşturmaktadır [18]. Küresel ısınma, fosil yakıt rezervlerinin tükenmesi ve çevresel kirlilik gibi problemler artarken gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler bu problemlerin çözümünde enerjinin verimli kullanımı

ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması hedeflemiştir.

Rüzgâr, jeotermal, biyoenerji, hidroelektrik, dalga enerjisi ve güneş enerjisi gibi birçok yenilenebilir enerji kaynağı bulunmaktadır. Güneş enerjisi hem yüksek potansiyeli hem de en temiz enerji kaynaklarından biri olması nedeniyle özel bir öneme sahiptir. Güneş, güneş sisteminin merkezinde bulunan dünyamızdaki birçok enerji kaynağının temelini oluşturan bir yıldızdır. Esas olarak hidrojen ve helyumdan oluşur. Güneş sistemi kütlelerinin yaklaşık %99,68'ini oluşturur. Güneşin yüzey sıcaklığı 5500 °C ve çekirdek sıcaklığı ise 15,6 Milyon °C'dir. Saniyede 564 Milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmektedir. Güneşten çıkan toplam enerjinin 2,2 milyarda 1'i Dünya'ya ulaşmaktadır. Güneşten dünyana atmosferine ulaşan gelen 174 PW (1 PW=10E15 W) enerjinin atmosferde %6'sı yansıma %16'sı soğurma ile, bulutlarda %20'si yansıma ve %3'lük kısmı soğurma ile kaybolmakta ve diğer kayıplarla birlikte %51'lik kısmını oluşturan 89 PW'lık bir enerji yer yüzüne ulaşmaktadır. Dünya'dan ortalama 149.600.000 km uzaklıkta olmasına rağmen, Dünya'ya ulaşan güneş enerjisi miktarı insanlığın toplam enerji tüketiminin 10.000 katıdır. Daha anlaşılır bir ifadeyle, güneşten Dünya yüzeyine gelen 1 saatlik enerji, insanlığın bir yıllık enerji ihtiyacını karşılayacak düzeydedir.

Güneş enerjisi, artan enerji talebini karşılamak için yenilenebilir enerji kaynakları arasında ön plana çıkmaktadır. Elektrik üretiminden endüstriyel ve evsel ısıtmaya kadar birçok alanda güneş enerji teknolojileri kullanılmaktadır. Güneş enerjisi küresel ısınmaya katkısı bulunmayan en temiz enerji kaynaklarından biri konumundadır. Petrol ve kömür gibi fosil yakıtların alternatifini olarak sunulan güneş enerjisi, üretimiyle ilişkili minimum çevresel ve ekolojik riskler taşıması, ucuz ve bol enerji sağlaması nedeniyle yaşam kalitesini artıran kritik bir faktördür.

Güneş enerjisi teknolojileri ısıtma, soğutma, doğal aydınlatma, elektrik ve bir ev uygulaması için yakıt sağlayabilmektedir. Güneş enerjisi teknolojisi, güneş ışığını fotovoltaik teknolojisi vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürebilir. Tüm ülkeler güneş enerjisine eşit ölçüde sahip olmamasına rağmen, güneş enerjisinden doğrudan büyük bir pay, her ülke için mümkündür [19,20]. Küresel düzeyde, güneş enerjisinin toplam enerji üretimindeki payı son yıllarda kayda değer ölçüde artmıştır. 2021 yılı itibarıyla güneş PV'nin küresel elektrik üretimindeki payı %5'e ulaşmıştır [21]. Bu büyüme, devlet teşvikleri, teknolojik ilerlemeler ve maliyetlerdeki düşüş gibi parametrelerle son yıllarda gittikçe hızlanmıştır. Çin, Hindistan ve Avrupa Birliği gibi büyük ekonomiler, güneş enerjisinin lider pazarları arasında yer almaktadır. Dünya solar fotovoltaik üretiminin %90'ı yalnızca beş ülkeye yoğunlaşmıştır [22].

Türkiye, güneş enerjisi kaynaklarının potansiyeli açısından oldukça avantajlı bir coğrafyada yer almaktadır. Ülkemizin özellikle Akdeniz ve Güneydoğu

Anadolu bölgeleri, gelen güneş radyasyonu oldukça yüksektir. Ayrıca güneşlenme süresi Avrupa Birliği ülkelerine kıyasla oldukça fazladır. Türkiye'deki güneş enerjisi sektöründe, enerji maliyetlerini azaltmak, dışa bağımlılığı düşürmek ve karbon ayak izini azaltmak adına dikkate değer gelişmeler olmaktadır. 2021 itibarıyla toplam güneş termal kapasitesi 18,9 GWth'e ulaşmıştır ve bu, küresel toplamın %4'üne denk gelmektedir [23,24]. Bu kapasite özellikle sıcak su uygulamalarında kullanılmaktadır. 1 Haziran 2025 tarihli TEİAŞ verilerine göre, Türkiye'nin toplam elektrik kurulu gücü yaklaşık 119 GW'ye yükselmiştir [25]. Bu kapasitenin belirgin bir bölümünü oluşturan 22,5 GW'lık kısmı güneş enerjisinden sağlanmaktadır. Söz konusu güneş enerjisi kapasitesinin büyük çoğunluğu, yani 20,26 GW lisanssız üretim tesislerinden elde edilirken; geriye kalan 2,24 GW'lık bölüm lisanslı güneş enerji santrallerinden oluşmaktadır [25,26]. Bu durum, güneş enerjisi yatırımlarında lisanssız sistemlerin hala baskın olduğunu göstermektedir. Türkiye'nin sahip olduğu yüksek güneşlenme süresi ve radyasyon düzeyi, güneş enerjisi kullanımını yaygınlaştırmak için büyük bir fırsat sunmaktadır. Mevcut kapasite artışı ve politika desteğine rağmen, bu potansiyelin henüz tam anlamıyla değerlendirilemediği görülmektedir. Bu çalışmada, güneş enerji teknolojilerinin Türkiye'deki ve dünyadaki yeri hakkında bir inceleme yapılacaktır. Bu karşılaştırmalı analiz, Türkiye'nin mevcut konumunu anlamının ötesinde, enerji politikalarının geliştirilmesine yön vermekte ve lider ülkelerin başarılı uygulamalarından alınacak derslerle stratejik planlamalara katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, dünya genelindeki yenilenebilir enerji politikalarının ve uygulamalarının incelenmesi, Türkiye'nin konumunu anlamak ve karşılaştırmalı değerlendirme yapmak için temel bir zemin sunmaktadır.

2. DÜNYADA YENİLENEBİLİR ENERJİ (RENEWABLE ENERGY IN THE WORLD)

2.1. Dünya Yenilenebilir Enerji Politikaları

Yenilenebilir enerji, Paris Anlaşması'nın temel dayanaklarından biri olarak öne çıkmakta ve küresel ölçekte düşük karbonlu ekonomiye geçişte kilit rol oynamaktadır. Paris Anlaşması'na taraf olan 194 ülkenin tamamı Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkılarını (NDC'ler) sunarak sera gazı emisyonlarını azaltma ve yenilenebilir enerji kullanımını artırma taahhüdünde bulunmuştur [27]. 2022 itibarıyla, 183 ülkenin NDC'lerinde yenilenebilir enerji bileşenlerine yer verildiği, ancak yalnızca 143'ünün bu alanda sayısal hedef belirlediği görülmektedir [27]. Bu durum, ülkeler arası uygulama kararlılığı açısından farklılıkların bulunduğunu göstermektedir.

Net sıfır karbon emisyonu hedefleri, giderek daha fazla ülke tarafından benimsenmekte ve bu hedeflere ulaşmak amacıyla çeşitli yasal, politik ve stratejik belgeler yayımlanmaktadır. Mayıs 2023 itibarıyla 146 ülke net sıfır hedefini ya duyurmuş ya da benimsemiştir. Bu

ülkelerden 26'sı bu hedefi yasal bir çerçeveye oturtmuş, 47'si politika belgeleri ile desteklemiş, 52'si öneri aşamasına taşınmış ve 15'i ise deklarasyon veya taahhüt düzeyinde bırakmıştır. Ayrıca 94 ülke, yalnızca net sıfır hedefi değil, aynı zamanda ekonominin tamamını kapsayan yenilenebilir enerji hedefleri de belirlemiştir [28]. 2022 itibarıyla Benin, Bhutan, Komor Adaları, Gabon, Guyana ve Surinam net sıfır hedeflerine ulaştıklarını ilan ederek bu alandaki ilerlemelerini tescillemişlerdir [27].

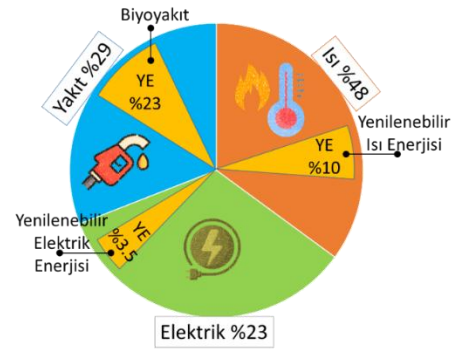
Karbon fiyatlandırma politikaları, ülkelerin düşük karbon teknolojilerine geçişini teşvik eden ve yenilenebilir enerji yatırımları için ekonomik kaynak sağlayan kritik araçlar arasında yer almaktadır. 2023 yılı itibarıyla 55 ülke karbon fiyatlandırma sistemlerini ya uygulamaya koymuş ya da değerlendirme aşamasına almıştır [29]. Bu ülkelerden 24'ü karbon vergisi, 21'i emisyon ticaret sistemi (ETS) uygulamakta olup, 10'u her iki mekanizmayı bir arada yürütmektedir [29]. Avrupa Birliği, 2022 yılında kabul ettiği Karbon Sınır Ayarlama Mekanizması (CBAM) ile karbon fiyatlandırması olmayan ülkelere ithal edilen belirli ürünlere karbon maliyeti getirmeyi planlamaktadır [30]. Bunun yanında AB, ETS 2 adıyla bilinen ve binalar, ulaşım ile küçük sanayileri kapsayacak yeni bir emisyon ticaret sistemi üzerinde çalışmakta; bu sistemin 2027'de devreye alınması ve Sosyal İklim Fonu ile desteklenmesi öngörülmektedir [31].

Küresel gelişmeler, karbon nötrliğe yönelik farklı ülkelerde izlenen politika çeşitliliğini ortaya koymaktadır. Güney Kore, 2023 yılında yürürlüğe giren Karbon Nötrlük Yasası ve Yeşil Büyüme Yasası ile 2030 yılına kadar %35 emisyon azaltımı ve 2050 yılına kadar net sıfır hedefi doğrultusunda yasal bir taahhütte bulunmuştur [32]. Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (AB ETS), 2021 yılından bu yana dördüncü fazında olup halen dünyanın en kapsamlı karbon fiyatlandırma sistemidir [33,34]. Öte yandan Meksika, 2022'de iklim değişikliği yasasını güncelleyerek kendi ETS sisteminin uygulanmasına açıklık getirmiştir [35]. Buna karşılık, Slovenya gibi bazı ülkeler, 1996'dan bu yana uygulamakta olduğu karbon vergisi politikasını 2023'te iptal ederek geri adım atmıştır [36].

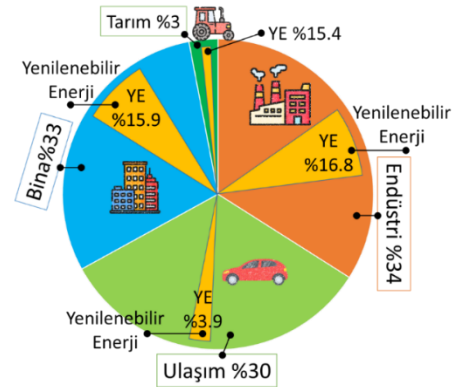
Bu gelişmeler ışığında, yenilenebilir enerji ve karbon fiyatlandırma politikalarının küresel düzeyde çeşitlilik arz ettiği, ülkelerin farklı siyasi, ekonomik ve yapısal koşullar doğrultusunda bu mekanizmaları şekillendirdiği görülmektedir. Net sıfır hedeflerine ulaşmada yenilenebilir enerji temel araç olarak öne çıkarken, karbon fiyatlandırma sistemleri bu dönüşüm sürecine ekonomik yön vermektedir. Avrupa Birliği gibi bazı aktörler bu konuda liderlik üstlenirken, bazı ülkelerin politikalarını geri çekmesi küresel ilerlemeyi yavaşlatabilecek potansiyel riskler arasında yer almaktadır.

2.2. Enerji Taşıyıcıları ve Sektörler Bazında Yenilenebilir Enerji Kullanımı

2021 yılı itibarıyla dünya genelinde toplam nihai enerji tüketiminin enerji taşıyıcılarına (ısı, yakıt, elektrik) göre dağılımını ve her taşıyıcı içerisindeki modern yenilenebilir enerji payı Şekil 8'de gösterilmektedir. Tüm nihai enerji tüketiminin %48'lik kısmını ısı, %29'unu yakıt, %23'ünü ise elektrik oluşturmaktadır. Ancak bu taşıyıcılar içerisinde yenilenebilir enerjinin payı oldukça farklıdır. Elektrik enerjisinde yenilenebilir kaynakların oranı %30 gibi görece yüksek bir seviyede, ısıda bu oran %10 ve yakıtlarda ise yalnızca %3,5 olarak kalmıştır. Bu durum, ısıtma ve ulaşım gibi sektörlerde yenilenebilir enerji dönüşümünün elektrik sektörüne kıyasla çok daha yavaş ilerlediğini ortaya koymaktadır. Politika yapımcılar açısından bu alanların yenilenebilir kaynaklarla entegre edilmesi, enerji dönüşümünün başarısı için kritik bir gerekliliktir.



Şekil 8. Enerji taşıyıcısına göre dünya toplam enerji tüketiminin dağılımı ve modern yenilenebilir enerji oranları [37] (Global total energy consumption by energy carrier and share of modern renewable energy)



Şekil 9. Sektörlere göre dünya toplam enerji tüketiminin dağılımı ve modern yenilenebilir enerjinin (YE) ilgili sektör içindeki oranları [37] (Global total energy consumption by sector and the share of modern renewable energy (RE) within each sector)

Şekil 9, dünya genelinde toplam nihai enerji tüketiminin sektörel dağılımını (bina, sanayi, ulaşım ve tarım) ve her sektör içerisindeki modern yenilenebilir enerjinin (YE) payını göstermektedir. Enerji tüketiminin en büyük payını %34 ile endüstri, onu takiben %33 ile binalar ve

%30 ile ulaşım sektörü oluşturmaktadır. Tarım sektörü, yalnızca %3'lük bir payla en düşük enerji tüketen sektör konumundadır. Yenilenebilir enerjiye geçiş oranları incelendiğinde, endüstri (%16,8) ve bina (%15,9) sektörlerinde YE oranlarının daha yüksek olduğu, buna karşılık ulaşım sektöründe bu oranın yalnızca %3,9 olduğu görülmektedir. Bu dağılım, ulaşım sektörünün hala büyük ölçüde fosil yakıtlara bağımlı olduğunu ve bu alanda enerji dönüşümünün yavaş ilerlediğini göstermektedir. Tarım sektörü ise hem toplam enerji tüketimi hem de yenilenebilir enerji katkısı bakımından oldukça sınırlı kalmaktadır. Şekil, küresel enerji dönüşümünün başarıya ulaşabilmesi için yalnızca elektrik üretimi değil, aynı zamanda binalarda ısıtma-soğutma sistemleri ve ulaşımındaki fosil bağımlılığının da yenilenebilir kaynaklarla değiştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Türkiye, güneş enerjisi kaynaklarının potansiyeli açısından oldukça avantajlı bir coğrafyada yer almaktadır.

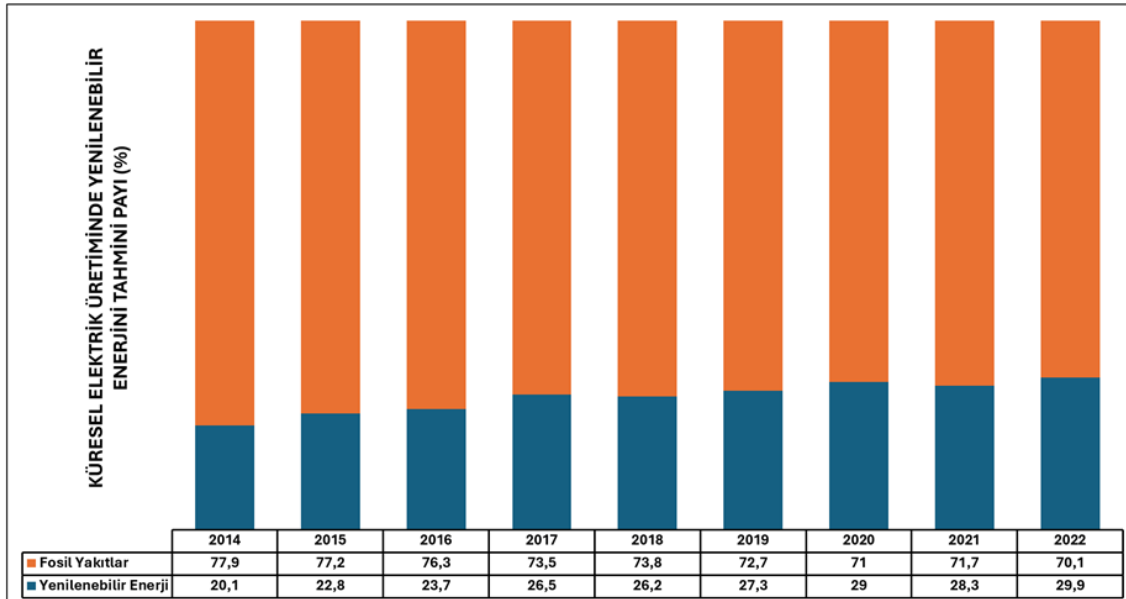
2.3. Küresel Elektrik Üretiminde Yenilenebilir Enerjinin Payı (2014-2022)

Şekil 10, 2014-2022 yılları arasında küresel elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin tahmini payındaki değişimi göstermektedir. Çalışmada genel kapsam 2014–2024 yıllarını içermektedir; ancak yalnızca Şekil 10'da kullanılan veriler güvenilir kaynakların 2022 yılına kadar veri sağlaması nedeniyle 2014–2022 dönemi ile sınırlı tutulmuştur. Verilere göre, fosil yakıtların toplam elektrik üretimindeki payı azalma eğiliminde iken, yenilenebilir enerjinin payı kademeli olarak artmaktadır. Bu durum, dünya genelinde yenilenebilir enerjiye yönelik yatırımların arttığını, fosil yakıtlardan uzaklaşma sürecinin devam ettiğini ve birçok ülkenin enerji politikalarını sürdürülebilirlik eksenini yeniden şekillendirdiğini ortaya koymaktadır.

2014 yılında yenilenebilir enerjinin küresel elektrik üretimindeki payı %20,1 iken, 2022 yılında bu oran %29,9'a yükselmiştir. Yaklaşık 9 yıllık süreçte, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı %50'ye yakın bir artış göstermiştir [24,38–46]. Yenilenebilir enerji üretiminde yaşanan bu artışa, teknolojik gelişmeler, ülke teşvikleri, çevresel sorunlar sebep olarak gösterilebilir. Teknolojik gelişmeler kapsamında, Güneş ve rüzgâr enerjisi teknolojilerinde yaşanan hızlı ilerlemeler, maliyetlerin düşmesini sağlamış [47,48] ve bu kaynakların daha geniş çapta kullanılmasını mümkün kılmıştır.

Ülke teşvikleri kapsamında, özellikle Avrupa Birliği, ABD ve Çin gibi büyük ekonomiler, yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik eden politikalar yürürlüğe koymuş, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik hedefler belirlemiştir [49,50]. Çevresel sorunlar yani küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında, birçok ülke fosil yakıt kullanımını azaltmayı ve yenilenebilir enerjiye yönelmeyi stratejik bir hedef olarak benimsemiştir.

Fosil yakıtların payında 2014 yılında %77,9 seviyesinde başlayan bir düşüş trendi görülmektedir. 2022 yılına gelindiğinde bu oran %70,1'e kadar gerilemiştir. Bu düşüş, yenilenebilir enerjinin yükselişiyle ters orantılı bir şekilde ilerlemektedir. Ancak bu gerilemenin nispeten yavaş gerçekleşmesi, fosil yakıt kullanımının hala küresel enerji sisteminde baskın bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle kömür, petrol ve doğalgaz gibi kaynaklar, elektrik üretiminde büyük bir paya sahiptir. Fosil yakıtlardaki bu düşüş eğilimi devam etse de tamamen yenilenebilir enerjiye geçişin uzun vadeli bir süreç gerektirdiği anlaşılmaktadır [24,38–46].



Şekil 10. Küresel Elektrik Üretiminde Yenilenebilir Enerjinin Payı [24,38–46] (Share of Renewable Energy in Global Electricity Generati

2018-2019 ve 2020-2021 yılları arasında yenilenebilir enerji üretiminde geçici bir düzensizlik görülmektedir. Bu dalgalanmanın fosil yakıt kullanımındaki artıştan kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır. Bu tür dalgalanmalar normaldir, iklim, ekonomi ve enerji politikaları gibi faktörlerin etkisine bağlı olarak kısa vadeli değişimler gözlemlenebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel elektrik üretimindeki artan rolünü net biçimde ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji payındaki yükseliş, sürdürülebilir enerji sistemlerine olan küresel yönelimi destekler niteliktedir. Ancak, fosil yakıtların hala %70'lik bir paya sahip olması, küresel enerji dönüşümünün tam anlamıyla gerçekleşmesi için daha fazla yatırıma ve politika değişikliğine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir [24,38-46].

Şekil 11'de, 2014-2022 yılları arasında yenilenebilir enerji kapasitesini (GW) ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllara göre dağılımını (%) göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları hidrolik (hidroelektrik), güneş (Solar PV ve CSTP), rüzgâr, biyokütle ve jeotermal enerji olarak beş ana kategoriye ayrılmıştır. Grafikler, bu kaynakların her birinin küresel enerji kapasitesinde yıllara göre nasıl bir gelişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Görselde her yıl için en büyük payın hidroelektrik enerjiye ait olduğu açıkça görülmektedir. 2014 yılında küresel hidroelektrik enerji kapasitesi 1000 GW seviyesindeyken, 2022 yılında bu kapasite 1195 GW'a ulaşmıştır [24,38-46]. Hidroelektrik santraller, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla çok daha istikrarlı ve güvenilir üretim profiline sahiptir. Hidroelektrik santraller genellikle 50 yılın üzerinde kullanım ömrüne sahiptir ve uzun vadeli bir enerji çözümü sunmaktadır [28]. Bu sebepler hidroelektrik enerjinin en büyük yenilenebilir enerji kaynağı olarak kalmasını sağlamaktadır.

Solar PV ve CSTP teknolojileri (fotovoltaik güneş panelleri ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri), yenilenebilir enerji kaynakları içinde en hızlı büyüyen teknolojilerden biri olmuştur. 2014 yılında küresel güneş enerjisi kapasitesi 142,4 GW seviyesindeyken, 2022 yılında bu kapasite 948 GW'a ulaşmıştır. Yaklaşık 8 yıl içinde güneş enerjisi kapasitesi 6,6 kat artmıştır. Bu artışın sebepleri olarak, Solar PV hücrelerinde yaşanan verimlilik artışları ve maliyetlerin azalması, PV teknolojilerinin büyük ölçekli santrallerden bireysel konutlara kadar geniş bir kullanım alanına sahip olması gösterilebilir. Ayrıca %32,8 ile en yüksek artışın 2016-2017 yılları arasında gerçekleştiği görülmektedir. Bu artışta Çin'in güneş enerjisi politikaları ve devasa kapasite yatırımları belirleyici rol oynamıştır [24,38-46]. Özellikle Türkiye gibi güneş ışınımı açısından avantajlı ülkelerde, bu büyüme trendinin önümüzdeki yıllarda da sürmesi beklenmektedir. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli oldukça yüksek olmasına rağmen, bu alanda halen yeterince hızlı bir büyüme gerçekleşmemektedir. Ancak ulusal enerji politikalarındaki değişimlerle birlikte, bu durumun iyileştirilmesi mümkün görünmektedir.

Rüzgâr enerjisi de dikkate değer bir büyüme göstermiştir. 2014 yılında 318 GW olan küresel rüzgâr enerjisi kapasitesi, 2022 yılında 948 GW'a yükselmiştir. Bu artış, yaklaşık üç katlık bir büyümeye karşılık gelmektedir. Rüzgâr enerjisi, hidroelektrik ve güneş enerjisinin ardından dünyanın en büyük üçüncü yenilenebilir enerji kaynağı konumundadır.

Biyokütle ve jeotermal enerji kaynaklarının toplam yenilenebilir enerji kapasitesi içindeki payı diğerlerine kıyasla daha sınırlı kalmaktadır. Biyokütle enerjisi kapasitesi 2014'te 88 GW seviyesindeyken, 2022'de 143 GW'a ulaşmıştır. Jeotermal enerji kapasitesi ise 12 GW seviyesinden 14,5 GW'a yükselmiştir [24,38-46].

Sonuç olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllar içinde nasıl çeşitlendiği ve özellikle güneş ile rüzgâr enerjisinin hızlı büyüme gösterdiği açıkça görülmektedir. Gelecekte enerji sektörünün fosil yakıtlardan uzaklaşarak, güneş ve rüzgâr teknolojileri ağırlıklı bir yapıya dönüşmesi öngörülmektedir. Yukarıda sunulan veriler, 2014-2022 döneminde küresel elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payının istikrarlı biçimde arttığını göstermektedir. Bu eğilim, fosil yakıtların payındaki azalma ile değerlendirildiğinde, dünya genelinde sürdürülebilir enerjiye geçişin stratejik bir öncelik haline geldiğini ortaya koymaktadır. Türkiye gibi güneş ışınımı açısından avantajlı ülkeler için bu dönüşüm süreci hem teknik kapasite artışı hem de çevresel fayda üretimi açısından çarpıcı olmaktadır.

Bu bağlamda, Türkiye'nin güneş enerjisi yatırımları yalnızca kapasite artışıyla sınırlı kalmamaktadır. Aynı zamanda karbon emisyonlarının azaltılmasına da doğrudan katkı sağlamaktadır. 2023 yılı boyunca güneş enerjisinden aylık ortalama 1.565.735.083 kWh elektrik üretilmiştir [51]. Bu üretim sayesinde yaklaşık 727.418 ton CO₂ emisyonunun engellendiği tahmin edilmektedir [52].

Bu miktardaki CO₂ azaltımı, çevresel etkileri açısından oldukça anlamlıdır. ABD Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA) sera gazı eşdeğerlik hesaplayıcısına göre, 727.418 ton CO₂ emisyonunun engellenmesi, yaklaşık 12.027.919 adet ağacın bir yıl boyunca atmosferden karbon tutmasına, 169.674 adet benzinle çalışan binek aracın bir yıl boyunca üreteceği emisyonun ortadan kaldırılmasına veya 151.591 adet konutun yıllık elektrik tüketimine eşdeğer bir karbon azaltımı sağlamaktadır [53]. Bu eşdeğerlikler, güneş enerjisi yatırımlarının yalnızca enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve iklim değişikliğiyle mücadele açısından da stratejik bir araç olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Ayrıca IRENA'nın 2023 raporunda belirtildiği üzere, küresel ölçekte yenilenebilir enerji dönüşümü 1,5°C senaryosu kapsamında 155 gigaton CO₂ azaltımı sağlayabilir [54]. Dolayısıyla Türkiye'nin güneş enerjisi atılımları hem ulusal hem de küresel düzeyde iklim uyumlu enerji sistemlerinin inşasına katkı sunmaktadır.



Şekil 11. 2014 ile 2022 yılları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllara göre dağılımları (%) [24,38–46] (Annual Distribution of Renewable Energy Sources between 2014 and 2022)

2.4. Karşılaştırmalı Analiz Yöntemi ve Nicel Göstergeler

Türkiye'nin güneş enerjisindeki performansı yalnızca toplam kurulu güç üzerinden değil, aynı zamanda nicel göstergeler üzerinden değerlendirilmiştir. Bu kapsamda iki temel metrik kullanılmıştır:

(i) Hektar başına kurulu güç yoğunluğu (MW/ha):

Fotovoltaik sahalar için gerekli arazi miktarı, ülkeler arasında belirgin farklılıklar göstermektedir. Bu farklılığın başlıca nedeni, güneş ışığının geliş açısının coğrafi konuma göre değişmesidir. Ekvator kuşağından kutuplara doğru ilerledikçe ışınlar daha yatay açıyla geldiğinden, paneller arasında gölgeleme riski artmakta ve bu durum yerleşim aralığını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, düşük güneş açısına sahip bölgelerde paneller daha seyrek yerleştirilmekte ve bir dönüm araziye düşen panel sayısı azalmaktadır. Ayrıca,

kullanılan güneş hücresi teknolojisi de arazi verimliliğini belirleyen belirleyici bir faktördür. Monokristal hücreler, polikristal hücrelere kıyasla daha yüksek verim sunduğundan, aynı alanda daha fazla elektrik üretimi sağlanabilmektedir.

Bu bağlamda, Türkiye'de fotovoltaik sahalar için ortalama arazi gereksinimi yaklaşık 2 ha/MW düzeyindedir [55]. ABD'de bu değer yaklaşık 1,54 ha/MW [56], Çin'de ise yaklaşık 3,3 ha/MW olarak bildirilmektedir [57].

Ülkelerin 2023 yılı kurulu güç kapasiteleri ise Bölüm 4.2'de sırasıyla Çin için 609,4 GW, ABD için 137,7 GW ve Türkiye için 11,3 GW olarak verilmiştir. Bu veriler dikkate alındığında, hektar başına kurulu güç yoğunluğu Çin'de 0,30 MW/ha, ABD'de 0,65 MW/ha ve Türkiye'de 0,50 MW/ha düzeyindedir.

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, hektar başına kurulu güç yoğunluğunun 0,50 MW/ha düzeyinde olması, Çin'e kıyasla daha verimli bir arazi kullanımı sunduğunu, ancak ABD'ye göre daha düşük bir yoğunlukla çalıştığını göstermektedir; bu durum, Türkiye'nin coğrafi konumu ve teknoloji tercihleri doğrultusunda arazi verimliliğini artırma potansiyeline işaret etmektedir.

(ii) Nüfus başına kurulu güç (W/kişi):

Türkiye'nin 2023 yılı 11,3 GW kurulu gücü esas alınarak TÜİK nüfus verileriyle eşleştirilmiştir [58]. Nüfus başına kurulu güç, toplam PV kurulu gücün nüfusa bölünmesiyle hesaplanmıştır. Türkiye için hesaplanan yaklaşık değer 132 W/kişi iken, Çin'de yaklaşık 432 W/kişi, ABD'de yaklaşık 408 W/kişi, Almanya gibi lider ülkelerde bu değer 973 W/kişi düzeyindedir [59].

Fotovoltaik enerji yatırımlarının toplumsal yaygınlık düzeyini gösteren kayda değer bir gösterge olan nüfus başına kurulu güç (W/kişi), ülkeler arasında dikkat çekici farklılıklar sergilemektedir. Türkiye'nin 2023 yılı itibarıyla 11,3 GW düzeyindeki kurulu gücü, TÜİK verilerine göre yaklaşık 132 W/kişi değerine karşılık gelmektedir [58]. Bu oran, Çin'de 432 W/kişi, ABD'de 408 W/kişi, Almanya'da ise 973 W/kişi düzeyindedir [59]. Türkiye'nin bu alandaki konumu, fotovoltaik kapasitenin henüz geniş ölçekli toplumsal erişime ulaşmadığını ve kişi başına düşen güneş enerjisi altyapısının sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu durum, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeline rağmen, dağıtık üretim modelleri ve bireysel uygulamaların yaygınlaştırılması yoluyla nüfus düzeyinde kurulu güç yoğunluğunu artırma gerekliliğini göstermektedir.

Yukarıda sunulan iki temel gösterge, Türkiye'nin fotovoltaik enerji alanındaki konumunu hem arazi verimliliği hem de toplumsal yaygınlık açısından ortaya koymaktadır. Hektar başına kurulu güç yoğunluğu bakımından Türkiye, Çin'e göre daha verimli bir arazi kullanımı sergilemekte; ancak ABD'nin gerisinde kalmaktadır. Bu durum, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeline rağmen, mevcut kurulu gücün hem mekânsal hem de toplumsal düzeyde daha etkin yaygınlaştırılması gerektiğini göstermektedir. Dolayısıyla, arazi planlaması, teknoloji seçimi ve üretim modelleri gibi stratejik alanlarda yapılacak iyileştirmeler, Türkiye'nin fotovoltaik performansını nicel olarak güçlendirme potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde güneş enerjisi, yüksek potansiyeli ve maliyet avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Bu nedenle bir sonraki bölümde, güneş enerjisinin özellikleri ve teknolojik gelişimi ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Kullanılan uluslararası raporların çoğu, ülkelerin kendi enerji otoriteleri tarafından sağlanan beyanlara dayanmaktadır. Bu durum, verilerin güvenilirliğini artırsa da hükümetlerin farklı raporlama standartları veya siyasi öncelikleri nedeniyle karşılaştırılabilirliği

sınırlamaktadır. Maliyet IEA ve IRENA'nın projeksiyonları genellikle sabit ekonomik büyüme ve sürekli maliyet düşüşü gibi varsayımlara dayalıdır; bu da enerji piyasasındaki dalgalanmaları yeterince yansıtmamaktadır. Dolayısıyla, bu raporların bulguları küresel eğilimler için yol gösterici olmakla birlikte, kısa vadeli öngörülerde ihtiyatla değerlendirilmelidir.

3. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ ENERJİ TEKNOLOJİLERİ (SOLAR ENERGY AND SOLAR ENERGY TECHNOLOGIES)

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçler aracılığıyla birincil enerji biçimlerine dönüşerek çeşitli teknik sistemlerle kullanılabilir enerjiye çevrilmiştir. Güneş, bu dönüşüm zincirinin temel kaynağı olarak hem doğrudan hem de dolaylı yollarla çok sayıda enerji biçiminin oluşumuna katkı sağlamaktadır. Tablo 1, Güneş, Dünya ve Ay gibi ana enerji kaynaklarının farklı doğal süreçler aracılığıyla nasıl birincil enerji kaynaklarına dönüştüğünü ve bu kaynakların teknik sistemlerle nihai kullanım enerjisine nasıl çevrildiğini sistematik olarak ortaya koymaktadır.

Güneş ışınımı sonucu gerçekleşen suyun buharlaşması ve yağış döngüsü sayesinde barajlar dolmakta ve hidroelektrik santrallerde elektrik üretimi sağlanmaktadır. Benzer şekilde, yeryüzündeki sıcaklık ve buna bağlı basınç farkları atmosferde hava hareketlerini tetikleyerek rüzgâr oluşumuna neden olmaktadır; bu rüzgârlar türbinlerde elektrik, yel değirmenlerinde ise mekanik enerji üretimi için kullanılmaktadır. Dalga enerjisi de yine rüzgâr etkisiyle oluşmakta ve dalga enerji tesislerinde elektrik ve mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Biyokütle ise güneş ışınlarının bitkiler aracılığıyla besine dönüşmesi ve biyolojik materyal üretimiyle elde edilmekte olup; odun, tarımsal atıklar ve biyoyakıtlar gibi geleneksel ve modern yakıt biçimlerini kapsamaktadır. Bu kaynaklar, ısı dönüşüm tesislerinde ısı ve elektrik üretimi amacıyla kullanılabilirlerdir.

Güneş ışınları doğrudan da değerlendirilebilir: güneş toplayıcılarında ısı ve elektrik üretimi, güneş pillerinde ise doğrudan elektrik üretimi sağlanmaktadır. Ayrıca güneş enerjisi, kullanım şekline göre pasif ve aktif olmak üzere ikiye ayrılır. Pasif kullanım, yapıların doğal ışık ve ısıdan faydalanacak şekilde tasarlanmasıyla (örneğin bina yönlendirmesi, sera ısıtması, ürün kurutma gibi) gerçekleşirken; aktif kullanımda ise güneş kolektörleri ve fotovoltaik paneller gibi sistemlerle doğrudan ısı ve elektrik üretimi sağlanmaktadır. Bunlara ek olarak, Dünya'nın iç ısısından elde edilen jeotermal enerji ve Ay'ın çekim etkisiyle meydana gelen gel-git hareketlerinden üretilen enerji de yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almakta ve çeşitli teknik dönüşüm sistemleriyle elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülmektedir.

Tablo 1. Enerjinin ana kaynaktan başlayarak birincil kaynaklara, doğal ve teknik dönüşüm süreçlerine uğrayarak nihai kullanım enerjisine ulaşma aşamaları [60] (Stages of Energy Flow from Primary Sources through Natural and Technical Transformation Processes to Final Energy Use)

Ana Kaynak	Birincil Enerji Kaynakları	Doğal Enerji Dönüşümleri	Teknik Enerji Dönüşümü	Kullanım Enerjisi
Güneş	Su	Buharlaştırma, Yağış	Su Güç Tesisleri	Elektrik Enerjisi
	Rüzgâr	Atmosferdeki Hava Hareketi	Rüzgâr Enerjisi Tesisleri	Elektrik ve Mekanik Enerji
		Dalga Hareketi	Dalga Enerjisi Tesisleri	Elektrik ve Mekanik Enerji
	Güneş Radyasyonu	Yer ve Atmosferin Isınması	Isı Pompaları	Isı Enerjisi
		Güneş Işınları	Toplayıcılar	Isı ve Elektrik Enerjisi
			Güneş Pilleri	Elektrik Enerjisi
	Biyokütle	Biyokütle Üretimi	Isıl Güç Tesisleri	Isı ve Elektrik Enerjisi
Dönüşüm Tesisleri			Yakıt Enerjisi	
Dünya	Yer Küre Isısı	Jeotermal Enerji	Jeotermal Güç Tesisleri	Isı ve Elektrik Enerjisi
Ay	Ay Çekim Gücü	Gel-Git Olayı	Gel-Git Güç Tesisleri	Elektrik Enerjisi

Temel olarak, düzlemsel ve yoğunlaştırıcı güneş kolektörleri ısı üretiminde; fotovoltaik sistemler ise elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Ülkemizde güneş enerjinin ısı üretiminde düzlemsel kolektörler yaygın biçimde tercih edilmektedir. Gelişen teknoloji ile sistem üretim ve kurulum maliyetlerinin ucuzlaması sonucu tüm dünyada özellikle fotovoltaik sistemlere ilgi büyük ölçüde artmıştır. Fotovoltaikler sistemler, gelen güneş ışığını yarı iletken malzemeler aracılığıyla doğrudan elektriğe çeviren teknolojilerdir. Yoğunlaştırıcı güneş enerji teknolojileri ise, gelen güneş ışınlarını yansıtıcı aynalar ya da mercekler yardımıyla daha küçük bir alana odaklayarak ısı enerjisinin kalitesini arttıran sistemlerdir. Bu teknolojilerin kullanımını düzlemsel kolektörler ya da fotovoltaik sistemler kadar yaygın olmamakla birlikte bu alandaki yatırımlar da giderek artmaktadır.

Şekil 12’de düzlemsel güneş kolektörlerine ait örnekler gösterilmektedir. Yoğunlaştırıcı olmayan sistemler genel olarak; düzlemsel güneş toplayıcıları, vakum tüplü güneş toplayıcıları, fotovoltaik toplayıcılar ve fotovoltaik termal toplayıcılar olarak sınıflandırılabilir.

Düzlemsel güneş toplayıcıları, düz bir yüzey üzerinde güneş ışığını toplayarak ısı enerjisine dönüştüren, basit ve yaygın kullanılan sistemlerdir. Genellikle sıcak su elde edilmesinde tercih edilirler. Ekonomik olmaları ve düşük bakım maliyetleri nedeniyle bireysel uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaktadırlar. Dış yüzeylerinde

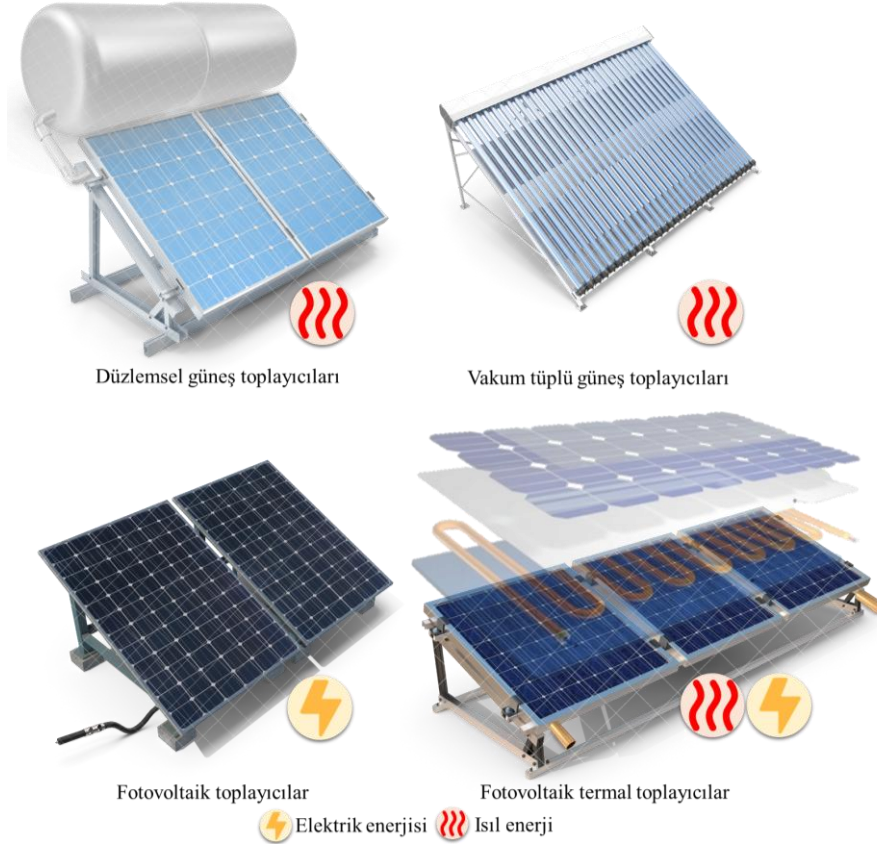
genellikle cam kaplama bulunur ve içinde su veya antifriz taşıyan borular yer alır. Çalışma sıcaklık aralıkları 40-80°C [61,62]. Düzlemsel güneş toplayıcılar güneş ısıtıcıları arasında en yaygın kullanılan sistemlerdir [63] ve beklenen ömürleri 20–30 yıl arasındadır [64]. Vakum tüplü güneş toplayıcıları, ısı kaybını minimuma indirmek amacıyla iki cam tüp arasındaki boşluğu vakumla izole eden özel bir tasarıma sahiptir. Bu sayede taşınım ve ışıma yoluyla oluşan ısı kayıpları engellenmektedir. Ayrıca, alıcı yüzeyde kullanılan seçici boya sayesinde termal radyasyon bölgesindeki yayılım katsayısı azaltılarak ışıma ısı kaybı minimize edilmekte ve performans belirgin şekilde arttırılmaktadır. Yüksek verimlilikleri sayesinde soğuk iklimlerde ve düşük ışıma koşullarında bile etkili çalışabilirler. Endüstriyel süreçler ve yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalar için uygundur. Çalışma sıcaklık aralıkları 50-200°C’dir [65,66]. Düzlemsel yoğunlaştırıcılar düşük maliyetleri nedeniyle daha yaygın olsa da vakum tüplü kolektörler çok daha yüksek verimlilik sunmaktadır [67]. Minimize edilen ısı kayıpları göz önüne alındığında, vakum tüplü sistemlerin en verimli kolektörler olduğu söylenebilir [68].

Fotovoltaik toplayıcılar, güneş ışığını yarı iletken malzemeler aracılığıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir [69,70]. Konutlardan büyük ölçekli enerji santrallerine kadar farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Fosil yakıtlara kıyasla çevre

dostu olmaları ve enerji depolama sistemleriyle entegre edilebilmeleri nedeniyle giderek daha fazla tercih edilmektedirler. Bununla birlikte literatürde bu sistemlerin gelişimi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır [71–74].

Fotovoltaik sistemlerin kurulum maliyetleri düşmeye devam etmektedir. 2010 yılında 0,417\$/kWh iken 2021

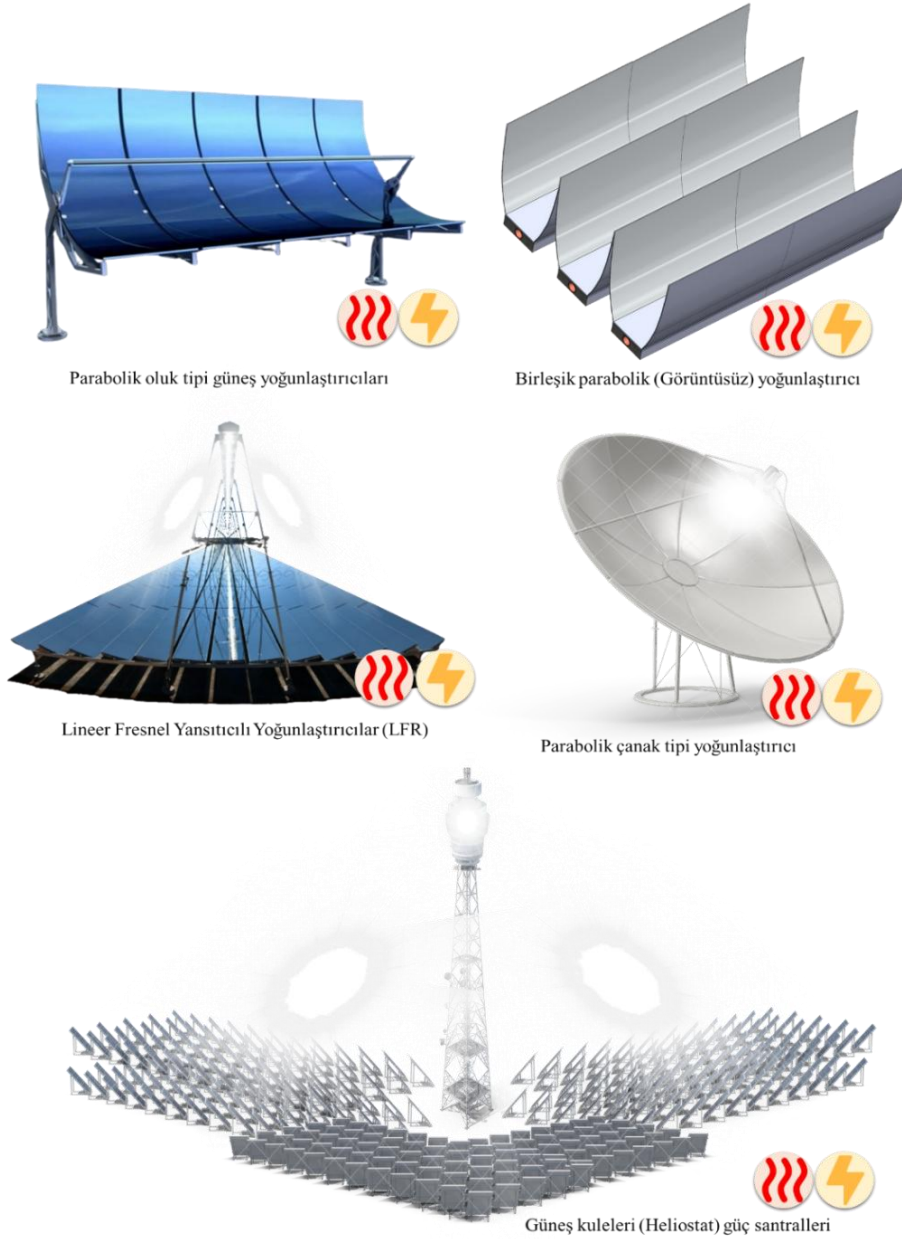
yılında bu oran 0,048\$/kWh değerlerine kadar gerilemiştir. [75]. BloombergNEF'e göre, grid ölçeğinde sabit eksenli PV sistemlerin Dengelenmiş Elektrik Maliyeti 2025'te yaklaşık 0,035 \$/kWh' kadar düşmüştür [76]. Dünya genelinde hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler güneş enerjisi yatırımlarını büyük ölçüde bu sistemler üzerine yoğunlaştırmaktadır.



Şekil 12. Düzlemsel güneş toplayıcıları (Flat plate solar collectors)

Fotovoltaik termal toplayıcılar, güneş enerjisini hem elektrik hem de ısı enerjisine dönüştüren hibrit sistemlerdir. Fotovoltaik sistemlerde karşılaşılan en büyük problemlerden biri PV sıcaklıklarının aşırı yükselmesidir. Piyasadaki geleneksel bir fotovoltaik hücrenin elektrik dönüşüm verimliliği %13-22 civarındadır. Bu enerjinin geri kalanı ısıya dönüşür ve PV sıcaklığını artırır [77]. PV panel sıcaklığındaki her 2 °C'lik artış güç üretiminde %1'lik bir azalmaya sebep olur [77,78]. Güneş hücrelerinin çalışma sıcaklığının artması; doldurma faktörü, maksimum çıkış gücü ve açık devre geriliminde azalmaya yol açmaktadır [79]. Ayrıca uzun süreli yüksek sıcaklık koşulları, geri döndürülemez termal stres hasarına neden olabilir [80]. Bu yüzden PV sistemlerin soğutulması zorunlu hale gelmektedir.

PV panellerin altına entegre edilen bakır serpantinler, hava kanalları gibi termal toplayıcılar sayesinde, fazla ısı değerlendirilerek sıcak akışkan elde edilir; bu da sıcak su eldesi veya ortam ısıtmasında kullanılır. Bu sistemler, alan kullanımını optimize ederek hem elektrik hem de ısı talebini karşılamak amacıyla kullanılmaktadır. PV sistemlerin soğutulmasında birçok yöntem uygulanmaktadır [81]. Belirli uygulamalar arasında, su püskürtme [82], mini kanal [83], jet darbesi [84], zorlanmış hava soğutma [85], nano akışkan [86] ve iki fazlı akış [87] gibi yöntemler yer almaktadır. Pasif soğutma sistemleri, ekstra enerji girişi gerektirmez ve güneş panellerinin sıcaklığı; soğutma ortamının doğal konveksiyonu [88], faz değiştiren malzeme (PCM) [89], sıvı daldırma [90], radyatif soğutma [91], buharlaşmalı soğutma [92], ısı borusu [93] gibi yöntemlerle kontrol altına alınır.



Şekil 13. Yoğunlaştırıcı güneş toplayıcıları (concentrating solar collector)

Şekil 13'te bazı yoğunlaştırıcı güneş toplayıcı sistemler gösterilmektedir. En genel kullanılan yoğunlaştırıcılar; parabolik oluk tipli, birleşik parabolik, parabolik çanak tipi ve Heliostat tipi güneş kuleleri olarak sıralanabilir. Yoğunlaştırma türüne göre yoğunlaştırıcılar çizgisel, noktasal ve düzlemsel yoğunlaştırıcılar olarak 3 gruba ayrılır.

Parabolik oluk tipi yoğunlaştırıcılar, gelen güneş ışığını uzunlamasına bir odak çizgisine yönlendiren parabolik yansıtıcı yüzeylerden oluşur. Odak çizgisi boyunca yerleştirilen boru aracılığıyla boru içinden geçen ısı transfer akışkanına gelen güneş enerjisini yoğunlaştırır. Geometrik yoğunlaştırma oranı 15-20 civarındadır. Bu sistemler; endüstriyel proses ısıtma, evsel sıcak su kullanımı, ortam ısıtma, yüzme havuzu ısıtma, ısı

kaynaklı soğutma (100-250 °C) gibi kullanılır. Ayrıca yoğunlaştırılmış güneş enerjisi güç santrallerinde buharlı güç çevrimine doğrudan veya dolaylı olarak bağlanarak değerlendirilir (300-400 °C) [94].

Bir diğer güneş yoğunlaştırıcı tipi görüntüsüz yoğunlaştırıcıdır. Bu tür sistemler düzlemsel yoğunlaştırıcı kategorisindedir. V-oluk, birleşik hiperbolik, birleşik parabolik yoğunlaştırıcı gibi çeşitli alt türleri bulunmaktadır [77,95,96]. Bunlar arasında en bilineni birleşik parabolik yoğunlaştırıcıdır [97-99]. Birbirinin odak noktasına yerleştirilmiş iki parabolik yoğunlaştırıcının birleşiminden oluşan bu sistemler, mümkün olan en yüksek yoğunlaştırma oranını sağlayabilirler [100].

Birleşik Parabolik Güneş Yoğunlaştırıcıları (BPGY) hem doğrudan hem de dağınık güneş ışığını toplayabilen gelişmiş optik tasarımlara sahiptir. Bu sistemler, düşük konsantrasyon oranıyla yüksek verimlilik sunar ve güneş takibi gerektirmez. Daha düşük sıcaklıklarda çalışan BPGY sistemleri, fotovoltaik sistemlerle entegre biçimde çalışabilir [96,101,102]. Kompakt yapılarıyla küçük ve orta ölçekli uygulamalarda kullanılabilirler.

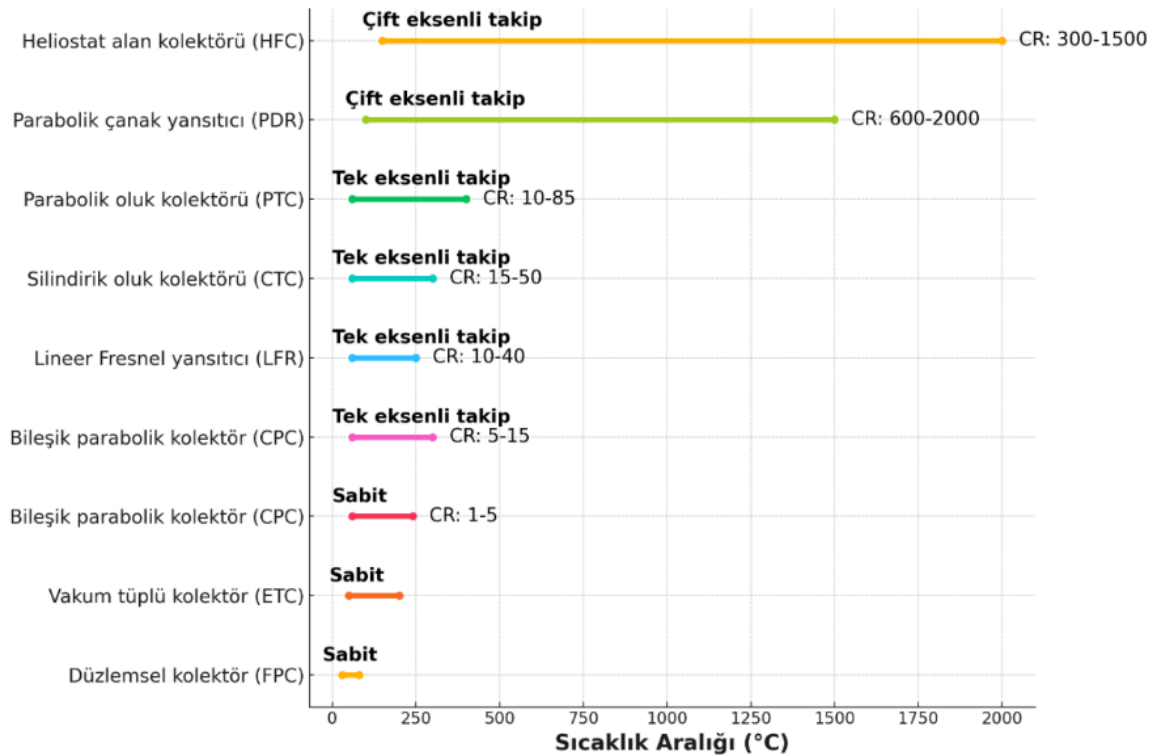
Lineer Fresnel Yansıtıcı (LFY), güneş ışığını odaklamak için uzun ve hafifçe eğilmiş düzlemsel aynalardan ve benzer tasarım sahip lenslerden oluşan sistemlerdir [103]. Aynalar, paralel olarak uzanan ve tek eksenli dönüşle güneşi takip eden bir düzlem üzerinde kesik parabolik veya silindirik bir geometriyi oluşturacak şekilde düz veya hafif eğimli aynalar yerleştirilir [104,105]. Güneş radyasyonu, bu aynalar veya lensler aracılığıyla yukarıda bulunan lineer alıcı bölgeye yoğunlaştırılır. Aynaların uzun odak uzaklığına ve neredeyse düz yapıya sahip olması, büyük boyutlu ve düşük maliyetli dizilerin kolayca inşa edilmesini sağlar. Bu sistemler endüstriyel ısıtma veya buhar üretimi gibi uygulamalarda kullanılır (60-250 °C) [106].

Bir diğer yoğunlaştırıcı tipi, Parabolik Çanak Tipi Yoğunlaştırıcılarıdır. Bu sistemler, güneş ışığını bir odak noktasına yoğunlaştıran parabolik çanak şeklinde yansıtıcı yüzeylerden oluşur [107]. Odak noktasındaki bir motor veya alıcı, yoğunlaştırılan güneş radyasyonunu elektrik enerjisine dönüştürür. Genellikle elektrik üretimi ve termal enerji uygulamaları için uygundur. Ancak, karmaşık yapıları nedeniyle bakım ve maliyet açısından diğer sistemlerden daha zordur. Düşük sıcaklık

uygulamalarında 80-320 °C aralığında çalışırken [108], hava ısıtmalı güneş termal çanak sistemlerde 1000 1200°C [109] ve büyük santrallerde 1500 °C'ye kadar ulaşabilmektedir [106]. Güneş Kuleleri (Heliostat Güç Santralleri), geniş bir alana yerleştirilmiş hareketli aynalar (heliostatlar) kullanarak güneş ışığını kule üzerindeki alıcıya yoğunlaştıran sistemlerdir [110,111]. Bu yoğunlaştırılmış enerji, genellikle bir ısı taşıyıcı sıvıyı ısıtarak buhar türbinlerini çalıştırmak için kullanılır. Geniş çaplı elektrik üretiminde ve enerji depolama entegrasyonunda kullanılır. 1000 °C üzerindeki çalışma sıcaklığı elde etmek için kullanılır [110]. Büyük ölçekli projeler için uygundur ve genellikle çöl gibi yüksek doğrudan normal ışınım (DNI) bölgelerinde inşa edilmektedir. Kolektör ayna çapı 3,5 milyon metrekare alana yayılan, solar kule yüksekliği 263 m'ye ulaşan sistem örnekleri mevcuttur [112].

Şekil 14'te, yaygın olarak kullanılan güneş enerjisi sistemlerinin sıcaklık aralıkları, güneş takip durumu ve yoğunlaştırma oranları gösterilmektedir. Güneş enerjisi teknolojilerinin temel prensipleri anlaşıldığında, bu teknolojilerin küresel ölçekte nasıl geliştiğini ve farklı ülkelerde nasıl uygulandığını incelemek, Türkiye'nin gelecekteki stratejilerini şekillendirmek açısından önemlidir.

İncelenen çalışmaların çoğu, fotovoltaik sistemlerin maliyet etkinliğini ortaya koyarken, panel ömrü, geri dönüşüm potansiyeli veya üretim süreçlerindeki çevresel etkiler gibi boyutlara sınırlı yer vermektedir.



Şekil 14. Termal güneş enerji kolektörlerinin çalışma sıcaklık aralıkları, güneş takip ve yoğunlaştırma oranları (Operating temperature ranges, solar tracking, and concentration ratios of thermal solar energy collectors)

Ayrıca, kullanılan veriler genellikle laboratuvar koşullarındaki verimlilik değerlerine dayalıdır; bu da gerçek saha koşullarında ortaya çıkan performans farklılıklarını göz ardı etmektedir. Laboratuvar koşullarına dayalı verimlilik değerlerinin saha koşullarındaki performansı tam olarak yansıtmaması, elde edilen bulguların enerji planlamasında karar verici kurumlar ve kamu otoriteleri açısından doğrudan uygulanabilirliğini sınırlayabilmektedir.

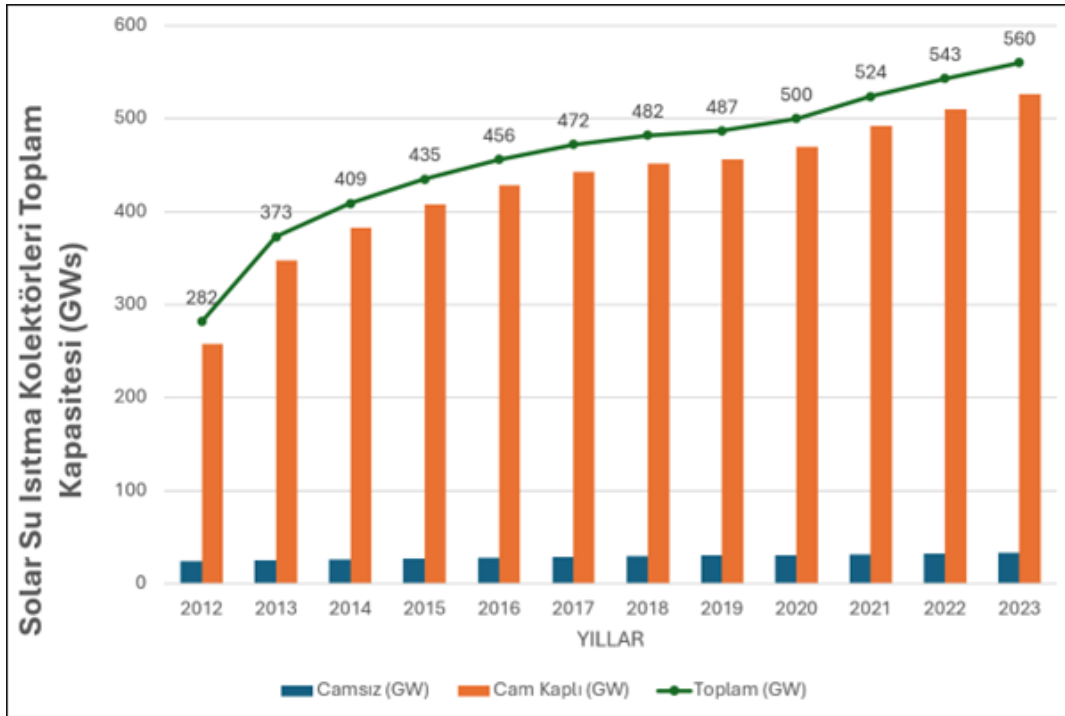
4. DÜNYADA GÜNEŞ ENERJİ TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞİMİ (DEVELOPMENT OF SOLAR ENERGY TECHNOLOGIES IN THE WORLD)

Bölüm 3'te güneş enerjisinin farklı teknolojilerle (düzlemsel, vakum tüplü, fotovoltaik, yoğunlaştırıcı sistemler) nasıl kullanıldığını, çalışma prensiplerini, verimliliklerini ve sınırlılıklarını açıklayarak küresel gelişimi ve Türkiye'nin stratejik önemi anlatılmaktadır. Bu bölümde ise 2012–2023 arasında dünyada güneş enerjisi teknolojilerinin (solar termal, fotovoltaik, CSP) gelişimini, kapasite artışlarını, ülke sıralamalarını ve Türkiye'nin bu alandaki performansını karşılaştırmalı olarak analiz edilmektedir.

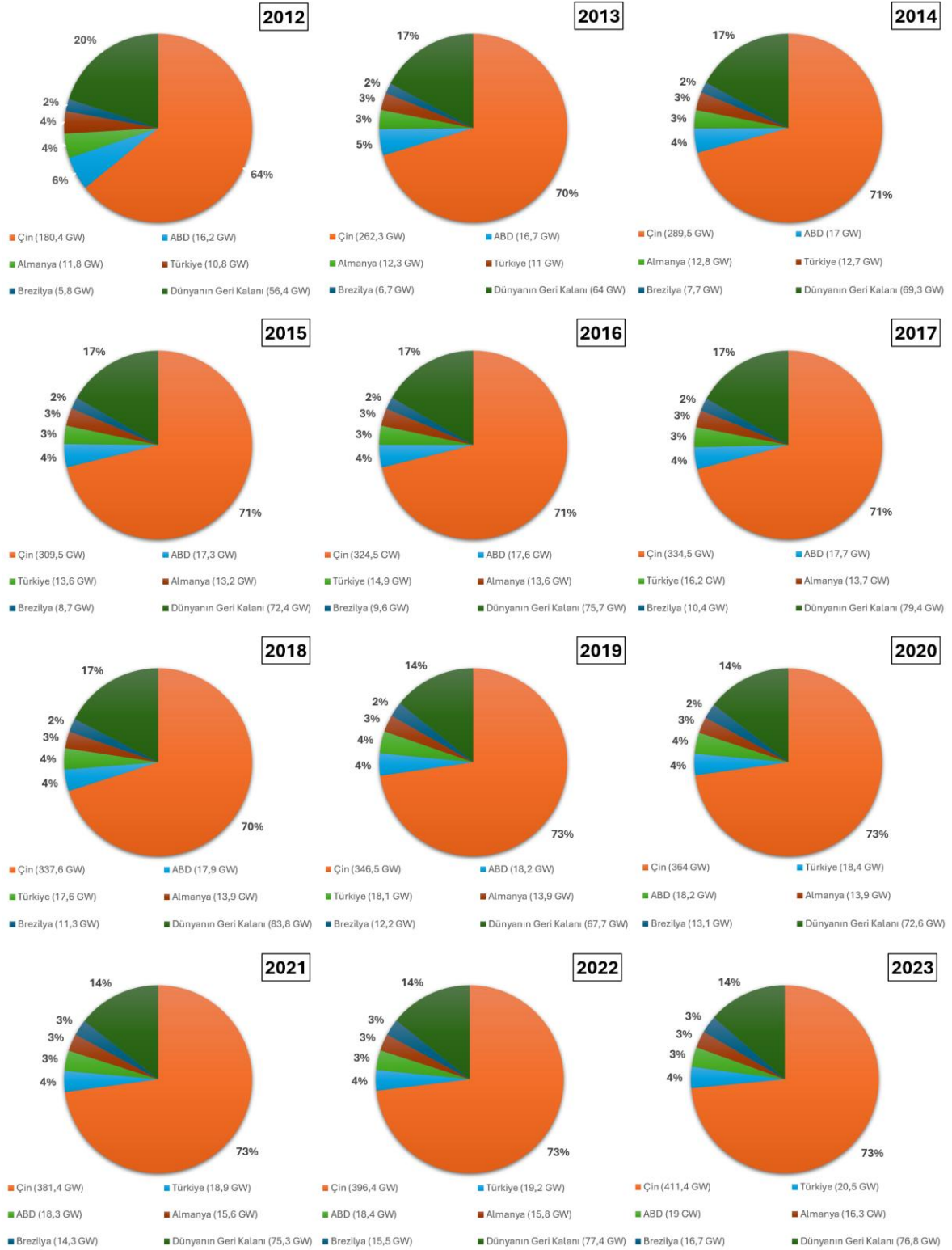
4.1. Solar Termal Güneş Kolektörleri

Güneş enerjisinin doğrudan ısı enerjisine dönüştürülmesini sağlayan sistemler, yenilenebilir enerji teknolojileri arasında dikkate değer bir yere sahiptir. Bu sistemlerin en yaygın örneklerinden biri olan solar su ısıtma kolektörleri, özellikle konutlarda ve endüstriyel tesislerde sıcak su ihtiyacının karşılanmasında ekonomik ve çevre dostu bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ve artan enerji talebiyle birlikte, bu sistemlerin küresel ölçekte kurulu kapasitesi yıllar içinde sürekli artış göstermiştir.

Bu bölümde, 2012-2023 yılları arasında solar su ısıtma kolektörlerinin dünya genelindeki kapasite büyüme eğilimleri, cam kaplı ve camsız kolektörlerin dağılımları ile ülke bazlı gelişmeler ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır. Özellikle Çin'in liderliği, Türkiye'nin yükselişi ve pazarın genel doygunluk eğilimi bu değerlendirme kapsamında analiz edilmiştir. Şekil 15 ve 16'da 2012–2023 dönemi tercih edilmiştir. Bunun nedeni, özellikle 2012–2013 yıllarında küresel ölçekte güneş enerjisi teknolojilerinde kritik bir büyümenin yaşanmış olmasıdır. Bu dönem başlangıç noktası olarak alınarak, kapasite artışlarındaki kırılma noktaları daha net vurgulanmıştır.



Şekil 15. Solar su ısıtıcı kolektörlerin toplam kapasitesi (GWs) [24,38–46] (Total capacity of solar water heating collectors (GWs))



Şekil 16. Solar su ısıtma kolektörleri toplam kapasitesi, en iyi 5 ülke sıralaması [24,38–46] (otal capacity of solar water heating collectors, top 5 countries ranking)

Güneş enerjisi, sürdürülebilir enerji kaynakları arasında kayda değer bir konuma sahip olup, özellikle yenilenebilir enerji dönüşümünde kritik bir rol üstlenmektedir. Solar su ısıtma kolektörleri, güneş enerjisinin doğrudan termal enerjiye dönüştürülmesini sağlayarak sıcak su ihtiyacını karşılayan sistemlerdir. Bu

bağlamda, Şekil 15’te sunulan grafik, 2012-2023 yılları arasında dünyadaki solar su ısıtma kolektörlerinin toplam kapasitesinin değişimini göstermektedir.

Şekil 15 verileri, solar su ısıtma kolektörleri kapasitesinin yıllar içinde düzenli olarak arttığını ortaya koymaktadır. 2012 yılında 282 GW olan toplam kapasite, 2023 yılına

gelindiğinde 560 GW seviyesine ulaşmıştır. Bu, 11 yıllık süreçte yaklaşık %98,6'lık bir büyümeye işaret etmektedir. Yıllık artış oranlarına bakıldığında, özellikle 2012-2015 yılları arasında kapasitede hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Kapasite büyüme oranları 2013,2014,2015 için sırasıyla, %32,3, %9,7, %6,3 iken, 2016 ve sonrasında büyüme ortalama %3,21 oranında seyretmiştir. 2013-2015 döneminde küresel ölçekte güneş enerjisi teknolojilerine yapılan yatırımların artması ve hükümetlerin yenilenebilir enerji politikalarını teşvik etmesi bu büyümeyi destekleyen faktörler arasında yer almaktadır [45,113]. 2016 sonrası dönemde ise artış devam etmekle birlikte görece daha düşük bir hızla gerçekleşmiştir. Özellikle 2018 yılından sonra yıllık artış miktarının daha stabil hale geldiği görülmektedir. Bu durum, bazı bölgelerde pazarın doyumluğa ulaşması ve maliyet-etkinlik analizlerinin daha fazla önem kazanması ile ilişkilendirilebilir [28].

Cam kaplı kolektörler 2012 yılında 258 GW kapasiteye sahipken bu değer 2023 yılına gelindiğinde 526,5 GW'a ulaşmıştır. Cam kaplı kolektörler de en fazla büyüme oranı %35 ile 2012-2013 yılları arasında gerçekleşmiştir. Camsız kolektörler de ise, 2012 yılında 24 GW iken, 2023 yılına gelindiğinde kapasite 33,5 GW'a yükselmiştir. Yani, 2012-2023 yılları arasında %39,6'lık artış görülmüştür. Toplam kapasite içerisinde, camsız kolektörler camsız kolektörlerin payı yalnızca %5,9'dur. Bu durum cam kaplı kolektörlerin daha fazla tercih edildiğini göstermektedir.

Şekil 16'da solar su ısıtma kolektörleri kapasitesi için en iyi 5 ülkeni 2012-2023 yılları arasındaki sıralamaları verilmiştir. Kapasite değerleri ülke bazında yıllara göre farklılık göstermektedir; bazı ülkeler toplamın büyük bir kısmını oluştururken, bazıları oldukça sınırlı kapasiteye sahiptir. Çin, 2012 yılında toplam kapasitenin %64'ünü oluştururken; 2023'te bu oran %75'e yükselmiştir. 2012 yılında ilk 5 sırada Çin, Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Almanya, Türkiye ve Brezilya yer alırken; 2023 yılında sıralama Çin, Türkiye, ABD, Almanya ve Brezilya şeklinde değişmiştir. Bu ülkeler, 11 yıl boyunca her yıl ilk 5'te yer almayı sürdürmüştür.

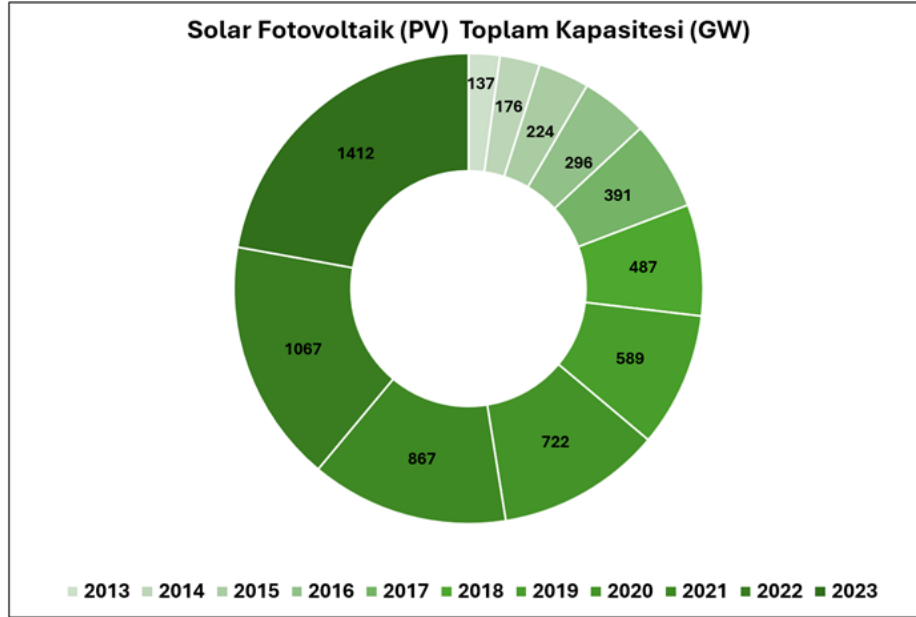
Küresel sıralamada dikkat çekici değişiklikler özellikle 2015 ve 2020 yıllarında yaşanmıştır. Kapasite artışında Türkiye öne çıkmaktadır. 2014 yılında 12,8 GW kapasite ile üçüncü sırada yer alan Almanya, 2015'te 13,2 GW ile dördüncü sıraya gerilemiştir. Türkiye ise 13,6 GW kapasite ile üçüncü sıraya yükselmiştir. Sonuç olarak, Almanya bir önceki yıla göre %3 kapasite artışı sağlarken; Türkiye'de bu oran %7 olmuştur. Türkiye, 2020 yılında sıralamada bir basamak daha ilerleyerek ABD'yi geride bırakmıştır. ABD, 2019-2020 yılları

arasında kapasite artışı gerçekleştirememiş ve 18,2 GW ile üçüncü sıraya gerilemiştir. Türkiye ise 18,4 GW kapasite ile ikinci sıraya çıkmıştır. İlk 5'te yer alan ülkeler, 2021, 2022 ve 2023 yıllarında sıralamalarını korumuştur. Ayrıca, kapasite artışının en fazla yaşandığı yıllar Çin, Türkiye ve ABD için sırasıyla 2013, 2014 ve 2023'tür. Türkiye, 2014-2019 ve 2023 yıllarında her iki ülkeden daha fazla kapasite artışı gerçekleştirmiştir. Ortalama artış oranları Türkiye için %6,4; Çin için %4,6; ABD için ise %1,5 olarak hesaplanmıştır.

Solar su ısıtma kolektörleri küresel ölçekte istikrarlı bir kapasite artışı göstermiş; özellikle 2012-2015 öneminde kaydedilen hızlı büyüme dikkat çekmiştir. Ancak 2016 sonrasında artış hızı görece yavaşlamış ve sektör daha dengeli bir büyüme eğilimine girmiştir. Cam kaplı kolektörler, daha yüksek verimlilikleri ve geniş kullanım alanları nedeniyle pazarın büyük bir bölümünü oluştururken, camsız kolektörlerin toplam kapasite içindeki payı sınırlı kalmıştır. Ülke bazında değerlendirildiğinde, Çin sektördeki lider konumunu güçlendirirken, Türkiye'nin 2014 yılından itibaren gerçekleştirdiği kapasite artışı kritik bir gelişme olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Türkiye'nin 2020 yılında ABD'yi geride bırakarak ikinci sıraya yükselmesi, ülkenin güneş enerjisi alanındaki büyüme potansiyelini ortaya koymaktadır. Önümüzdeki yıllarda, pazar doyumluğu ve maliyet faktörleri büyüme hızını etkileyebilecek unsurlar arasında yer alsada küresel enerji dönüşümü ve iklim değişikliği ile mücadele kapsamında solar su ısıtma sistemlerinin yaygınlaşmaya devam etmesi beklenmektedir.

4.2. Solar Fotovoltaik Güneş Kolektörleri

Son yıllarda artan enerji talebi, iklim değişikliğiyle mücadele ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması yönündeki küresel hedefler, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi belirgin ölçüde artırmıştır. Bu dönüşümün merkezinde güneş enerjisi yer almakta olup, özellikle fotovoltaik (PV) sistemler yüksek verimlilikleri ve çevre dostu yapılarıyla öne çıkmaktadır. PV teknolojileri; azalan kurulum maliyetleri, artan verimlilik oranları ve devlet destekli teşvik programları sayesinde birçok ülkede hızla yaygınlaşmıştır. Bu bağlamda, 2013-2023 yılları arasında küresel PV kapasitesinde yaşanan gelişmeler, güneş enerjisi teknolojilerinin ulaştığı seviyeyi ortaya koymakta ve geleceğe yönelik projeksiyonlar açısından kritik veriler sunmaktadır. Aşağıda, bu on yıllık süreçte PV kurulu gücündeki değişim ve başlıca ülkelerin sektördeki konumları detaylı olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 17. Solar fotovoltaik (PV) toplam kapasitesi (GW) grafiği [24,38–46] (Total capacity of solar photovoltaic (PV) (GW) graph)

Şekil 17, 2013-2023 yılları arasında küresel ölçekte solar fotovoltaik (PV) toplam kapasitesinin yıllara göre değişimini göstermektedir. Veriler incelendiğinde, PV kapasitesinin yıllar içinde istikrarlı bir şekilde arttığı ve özellikle belirli dönemlerde büyüme hızının daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. 2013 yılında 137 GW olan toplam kapasite, 2023 yılına gelindiğinde 1412 GW seviyesine ulaşarak on yıllık süreçte yaklaşık 10,3 katlık bir artış göstermiştir. Bu, küresel ölçekte yenilenebilir enerjiye olan yönelimin ve güneş enerjisi yatırımlarındaki hızlı artışın bir göstergesidir.

PV kapasitesindeki yıllık artış oranları incelendiğinde, 2013-2015 döneminde görece daha yavaş bir büyüme gözlemlenirken, 2016 yılından itibaren büyüme hızında kayda değer bir ivmelenme yaşanmıştır. 2016-2023 yılları arasında her yıl ortalama 100 GW'ın üzerinde kapasite eklenmiştir. En büyük sıçrama ise 2023 yılında gerçekleşmiştir. 2022'de 1129 GW olan küresel kapasite, 2023 yılı itibarıyla 1412 GW'a ulaşarak sadece bir yıl içinde 283 GW'lık bir artış göstermiştir. Bu sıçrama, güneş enerjisi sektöründe büyük ölçekli yatırımların ve teknolojik gelişmelerin belirleyici etkisini ortaya koymaktadır.

Büyüme oranlarına bakıldığında, 2013–2015 yıllarında artış görece düşük seviyelerde kalmış, ancak 2016'dan itibaren büyük projelerin devreye girmesiyle birlikte yükselmiştir. 2020 sonrasında ise küresel ölçekte teşvik politikalarının artması, teknolojik gelişmelerin hızlanması ve maliyetlerin düşmesi PV kapasitesinde mühim sıçramalar yaşanmıştır [39].

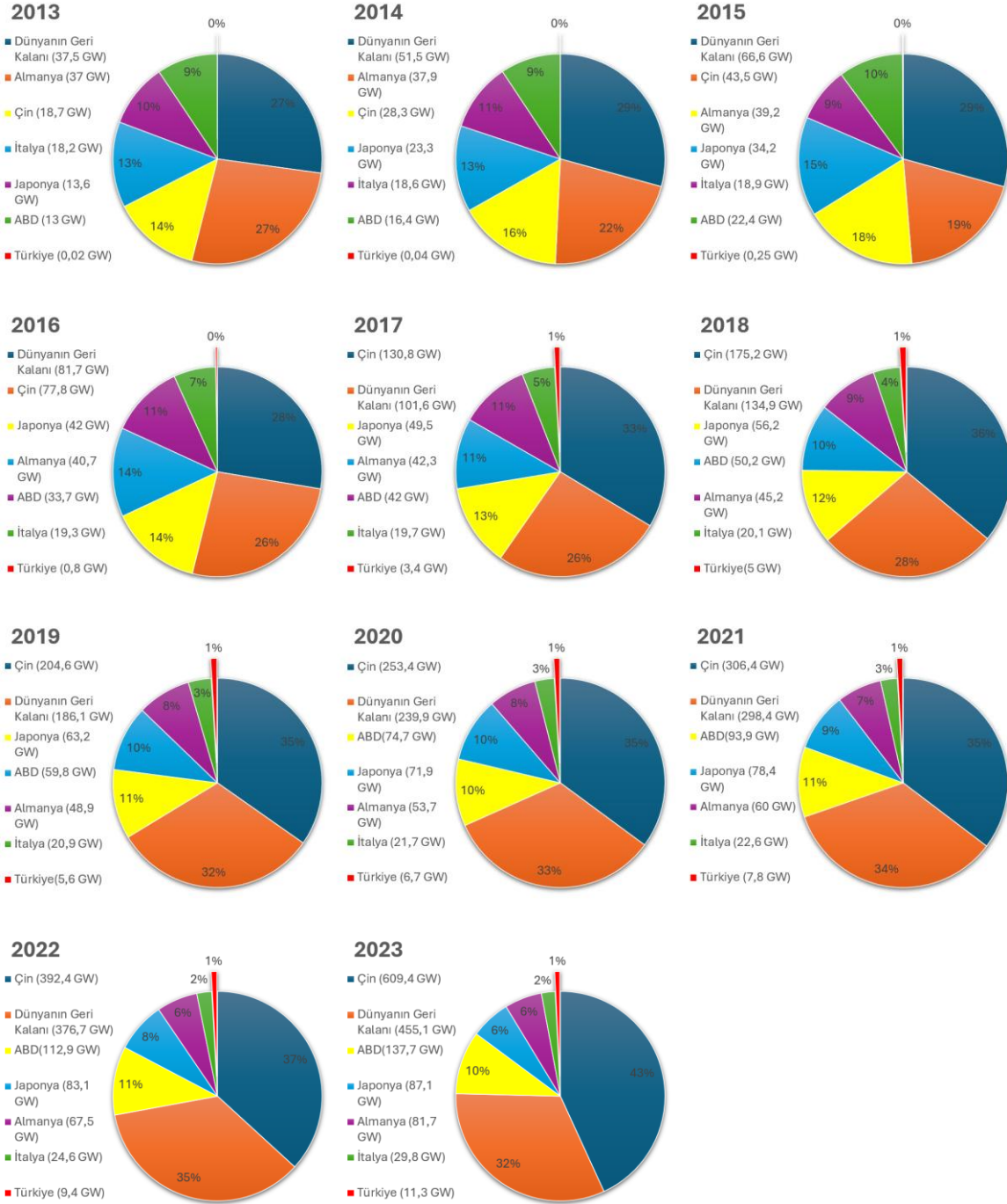
Özellikle gelişmiş ülkelerde sürdürülebilir enerji hedefleri doğrultusunda PV sistemlerine yapılan yatırımların artması ve büyük ölçekli enerji projelerinin

hayata geçirilmesi, kapasite artışında belirleyici rol oynamıştır. Ayrıca, gelişmekte olan ülkelerin de güneş enerjisine yönelmeye başlamasıyla birlikte küresel çapta PV kapasitesinin coğrafi dağılımı genişlemiştir.

Genel olarak, güneş enerjisi teknolojilerindeki ilerlemeler ve maliyetlerin düşmesi, PV kapasitesindeki büyümenin devam edeceğine işaret etmektedir. Yenilenebilir enerjiye yönelik küresel politikalar ve iklim değişikliği ile mücadelede güneş enerjisinin oynadığı kritik rol göz önünde bulundurulduğunda, önümüzdeki yıllarda kapasitenin daha da artacağı öngörülmektedir [114].

Şekil 18, 2013-2023 yılları arasında solar fotovoltaik (PV) kapasitesi en yüksek 5 ülke ve Türkiye'nin konumunu göstermektedir. Veriler, farklı ülkelerde güneş enerjisi yatırımlarının nasıl şekillendiğini ve küresel ölçekte PV kapasitesinin nasıl dağıldığını ortaya koymaktadır.

Almanya, 2013 ve 2014 yıllarında toplam kapasitede sırasıyla 37 (GW), 37,9 (GW) ile lider konumdaydı. 2013 yılında Almanya toplam PV kapasitesinin %27'sini oluştururken bu oran 2014 yılına gelindiğinde %22 oranına gerilemiştir. Çin kapasitesini 2015 yılında bir önceki yıla göre %53 arttırarak 43,5 (GW) ile Almanya'yı geride bırakarak listede birinci sıraya yükselmiştir. 2015–2023 arasında liderliğini sürdüren Çin, toplam küresel PV kapasitesindeki payımı %19'dan %43'e çıkararak 609,4 GW'a ulaşmıştır. Bu durum, Çin'in enerji politikaları ve yatırımlarının etkinliğini açıkça göstermektedir.



Şekil 18. Solar fotovoltaik (PV) toplam kapasitesi, en iyi 5 ülke ve Türkiye sıralamaları grafiği [24,38–46] (Total capacity of solar Photovoltaic (PV), top 5 countries and Türkiye rankings graph)

2015 yılında, Almanya, Japonya, İtalya ve ABD gibi ülkeler, başlangıçta Çin'in ardından sıralanırken, ilerleyen yıllarda Çin'in kapasitesindeki hızlı artış nedeniyle aralarındaki fark büyümüştür. Almanya, 2015 yılında 39,2 GW kapasiteyle dünya sıralamasında önde gelen ülkelerden biri olmasına rağmen, 2023 yılına gelindiğinde 81,7 GW kapasite ile sıralamada Çin'in oldukça gerisinde kalmıştır. ABD, başlangıçta en iyi 5 ülke sıralamasında, beşinci sırada yer alırken, kapasitesini 10,5 kat artırarak 2023 yılında ikinci sıraya

çıkmıştır. Dünyanın geri kalanı 101,6 GW ile 2013-2016 yılları arasında en iyi 5 ülke ve Türkiye'nin önünde bulunurken, bu durum 2017 yılında Çin'in toplam kapasitesini 130,8 GW çıkarmasıyla değişmiştir. Böylece Çin, ilk 5 ülke ve dünyanın geri kalan ülkelerini 2023 yılına kadar geride bırakmıştır. Ayrıca, dünyanın geri kalan ülkelerin PV toplam kapasitesi, 2013-2019 yılları arasında, Japonya, Almanya, ABD, İtalya toplam kapasitelerinin gerisinde kalırken bu durum 2020 ve sonrası yıllar için değişmiştir. Dünyanın geri kalan

ülkeleri, 2013 yılında 37,5 (GW) kapasiteye sahipken, 2023 yılına gelindiğinde toplam kapasitesi yaklaşık 12 kat artarak 455,1 GW'a ulaşmıştır.

Türkiye'nin PV kapasitesindeki artış da dikkat çekicidir. 2013-2015 yılları arasında oldukça düşük seviyelerde seyreden kapasite, 2015 itibaren büyüme ivmesi kazanmış ve 2023 yılında 11,3 GW'a ulaşmıştır. 2015 yılında bir önceki yıla göre %525 oranında artış kaydedilmiştir. Türkiye, 2015-2023 döneminde yatırımlarını artırarak sıralamada daha üst konumlara çıkmıştır. Özellikle 2020 sonrasında Türkiye'nin kapasitesinde yaşanan büyüme, hükümet teşvikleri ve güneş enerjisine yönelik politikalar sayesinde hızlanmıştır [115,116].

Sonuç olarak, güneş enerjisi yatırımlarının küresel çapta hız kazandığı, özellikle Çin'in liderliğini pekiştirdiği ve Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin sektöre giderek daha fazla yöneldiği görülmektedir. Önümüzdeki dönemde, yeni yatırımların artmasıyla birlikte PV kapasitesinin daha da büyümesi beklenmektedir [117,118].

4.3. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Sistemleri

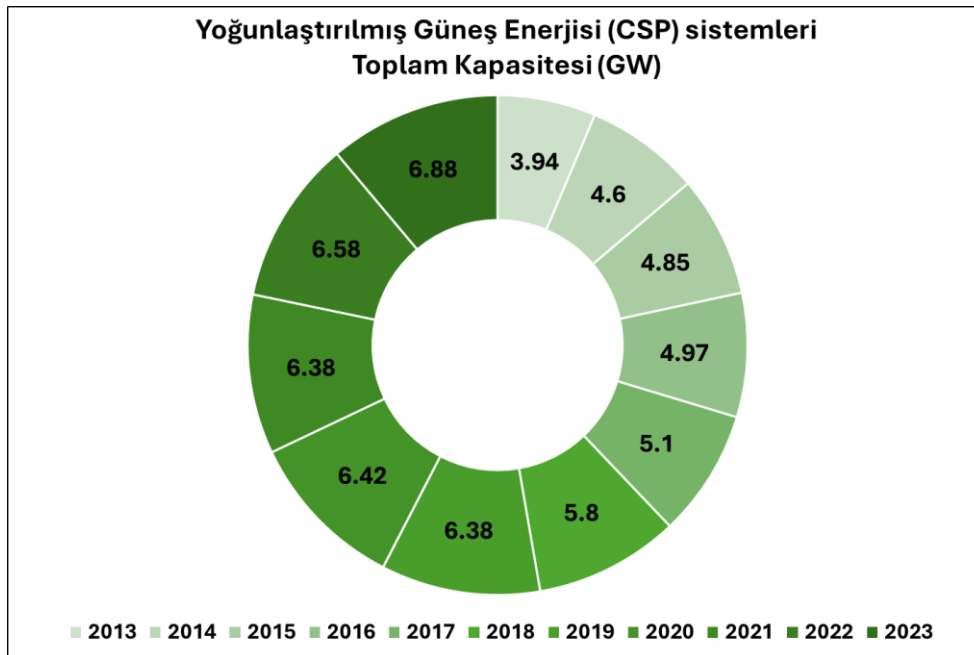
Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (CSP – Concentrated Solar Power) sistemleri, güneş enerjisinin ısı dönüşümü yoluyla elektrik üretiminde kullanılan kayda değer teknolojik alternatiflerden biridir. Bu sistemleri, aynalar veya mercekler yardımıyla güneş ışığını bir odak noktasında toplayarak yüksek sıcaklıklara ulaşan ısı enerjisi üretir ve bu enerji, termal güç çevrimleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür.

Doğrudan normal ışınımın (DNI) yüksek olduğu bölgelerde geniş alanlara kurulan CSP sistemleri daha

verimli çalışmakta; enerji depolama teknolojileriyle entegre edildiklerinde kesintisiz elektrik üretme potansiyeli sunmaktadır. Bu bağlamda, 2013–2023 yılları arasında CSP teknolojisinin küresel ölçekte kapasite artışı, büyüme eğilimleri ve bölgesel dağılımları incelenerek, sistemin gelişim dinamikleri analiz edilmiştir.

Ayrıca İspanya, ABD, Çin, Fas ve Güney Afrika gibi ülkelerin lider konumları ve Türkiye'nin CSP yatırımlarındaki durumu karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

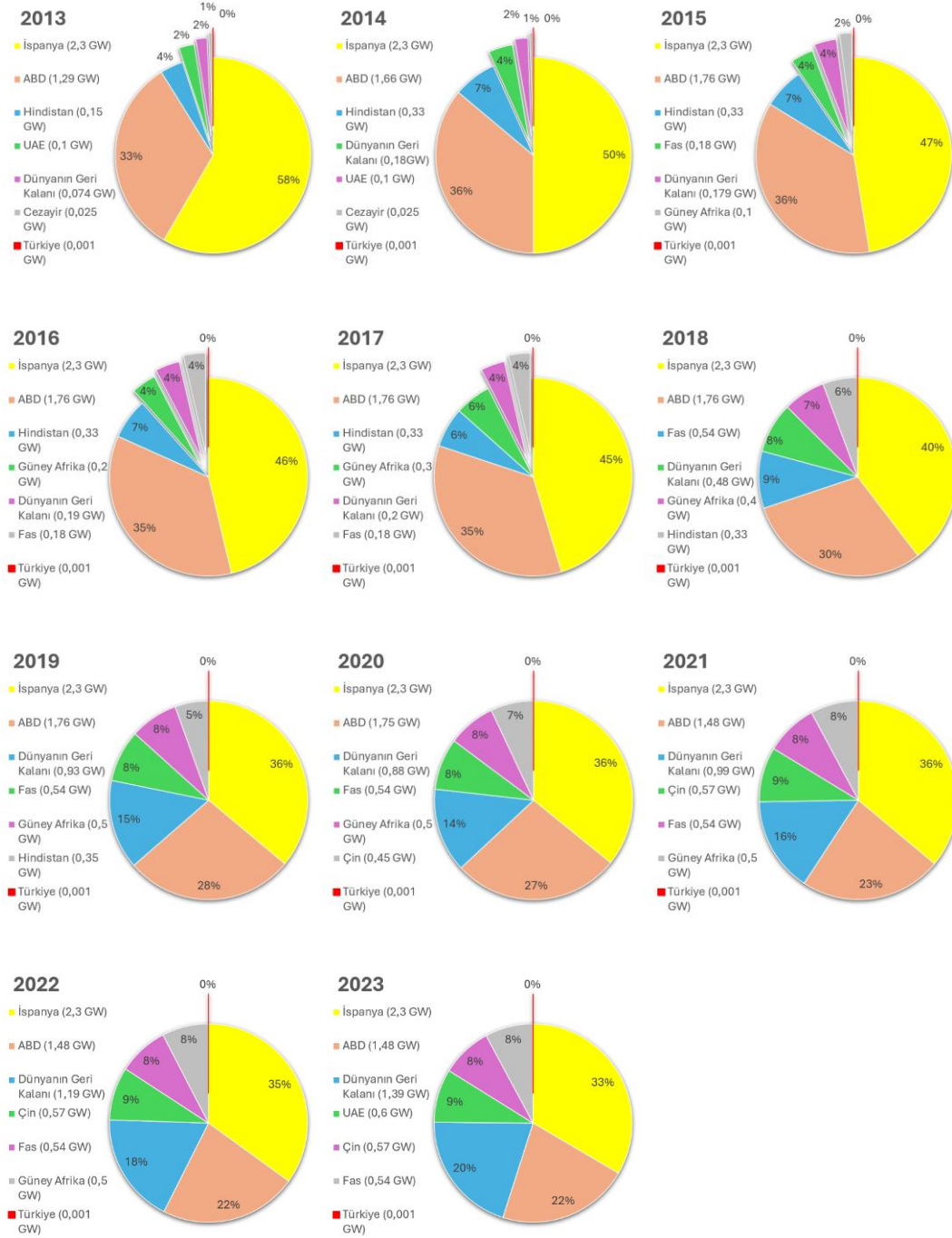
Şekil 19'da yıllara göre CSP sistemlerinin küresel toplam kapasitesinin değişimi gösterilmektedir. 2013 yılında 3,94 GW olarak başlayan kapasite, 2023 yılında 6,88 GW'a ulaşmıştır. 2013-2015 döneminde, 3,94 GW olan kapasite, 2015'te 2013 yılına göre %23,1 yüzde artış göstererek 4,85 GW seviyesine gelmiştir. Bu dönemde yıllık yüzde artış oranı yüksektir. 2016-2018 döneminde, 4,97 GW olan kapasite, 2018 yılına kadar kademeli bir artış göstererek 5,8 GW seviyesine ulaşmıştır. Ancak bu dönemde yüzde artış %16,75 ile sınırlı kalmıştır. 2019-2021 döneminde, 6,38 GW seviyesinde sabit kalan kapasite, bu yıllarda sektörün durağanlaştığını göstermektedir. CSP sektörünün durağan bir döneme girdiği söylenebilir. 2022-2023 döneminde, 6,58 GW olan kapasite ve 2023 yılında 6,88 GW'a çıkmıştır. Yüzde artış %4,56 olarak gerçekleşmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, CSP teknolojisinin büyüme oranlarının dalgalı seyretmiş ve bazı yıllarda durgunluk yaşanmıştır. Bununla birlikte, 2013–2023 arasında toplam kapasite 1,7 kat artmış ve bu durum CSP'nin gelecekte yeniden ivme kazanabileceğine işaret etmektedir.



Şekil 19. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) sistemleri toplam kapasitesi (GW) [24,38–46] (Total capacity of concentrated solar power (CSP) systems (GW))

Şekil 19'da yıllara göre CSP sistemlerinin küresel toplam kapasitesinin değişimi gösterilmektedir. 2013 yılında 3,94 GW olarak başlayan kapasite, 2023 yılında 6,88 GW'a ulaşmıştır. 2013-2015 döneminde, 3,94 GW olan kapasite, 2015'te 2013 yılına göre %23,1 yüzde artış göstererek 4,85 GW seviyesine gelmiştir. Bu dönemde yıllık artış oranı yüksektir. 2016-2018 döneminde, 4,97 GW olan kapasite, 2018 yılına kadar kademeli bir artış göstererek 5,8 GW seviyesine ulaşmıştır. Ancak bu dönemde yüzde artış %16,75 ile sınırlı kalmıştır. 2019-2021 döneminde, 6,38 GW seviyesinde sabit kalan

kapasite, bu yıllarda sektörün durağanlaştığını göstermektedir. CSP sektörünün durağan bir döneme girdiği söylenebilir. 2022-2023 döneminde, 6,58 GW olan kapasite ve 2023 yılında 6,88 GW'a çıkmıştır. Yüzde artış %4,56 olarak gerçekleşmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, CSP teknolojisinin büyüme oranlarının dalgalı seyretmiş ve bazı yıllarda durgunluk dalgalı seyretmiş ve bazı yıllarda durgunluk yaşanmıştır. Bununla birlikte, 2013-2023 arasında toplam kapasite 1,7 kat artmış ve bu durum CSP'nin gelecekte yeniden ivme kazanabileceğine işaret etmektedir.



Şekil 20. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) toplam kapasitesi (GW), en iyi 5 ülke ve Türkiye [24,38-46] (Total capacity of concentrated solar power (CSP), top 5 countries and Türkiye)

Şekil 20’de, 2013-2023 yılları arasında en fazla CSP kapasitesine sahip ülkeler ve bu kapasitenin yüzdesel dağılımı gösterilmektedir. İspanya, incelenen tüm yıllarda küresel CSP kapasitesinde lider konumunu korumuştur. 2013 yılında küresel CSP kapasitesinin %58’ine sahip olan İspanya, 2023 yılında da %33’lük pay ile liderliğini sürdürmektedir. Ancak yıllar içinde toplam payında azalma olduğu görülmektedir. ABD, 2013 yılında 1,29 GW kapasite ile küresel CSP kapasitesinin %33’ünü elinde bulunduruyordu. 2023 yılına gelindiğinde ise kapasitesi 1,48 GW seviyesinde kalmış ve küresel payı %22’ye düşmüştür. Bu durum, ABD’nin CSP yatırımlarının diğer ülkelerle kıyaslandığında daha yavaş ilerlediğini göstermektedir.

Çin, Fas ve Güney Afrika gibi ülkeler CSP kapasitelerini artırarak sektörde öne çıkmıştır. Fas, 2015 yılında 0,18 GW olan CSP kapasitesi, 2023 yılında 0,54 GW’a yükseltmiştir. Çin, 2020 yılında CSP kapasitesinde en iyi 5 ülke arasında yer almaya başlamış ve 2023 yılı itibarıyla 0,57 GW kapasiteye ulaşmıştır. Güney Afrika ise 2016’da 0,2 GW kapasiteye sahipken, 2023 itibarıyla 0,5 GW’a çıkmıştır. Bu yatırımlar, teknolojinin farklı kıtalara yayılmasına katkı sağlamıştır.

Türkiye, 2013-2023 yılları arasında CSP kapasitesini 0,001 GW seviyesinde sabit tutmuştur. Bu durum, Türkiye’nin CSP teknolojisi konusunda kayda değer bir ilerleme kaydetmediğini ve yatırımlarını daha çok diğer güneş enerjisi teknolojilerine yönlendiğini göstermektedir.

Yıllara göre CSP kapasitesinin değişimi ve ülkeler bazında dağılımı incelendiğinde şu sonuçlara ulaşılmaktadır. Küresel CSP kapasitesi 2013-2023 yılları arasında artış göstermiş, ancak büyüme oranları dönemsel dalgalanmalarla şekillenmiştir. İspanya, on yıl boyunca en büyük CSP kapasitesine sahip ülke olarak kalmıştır, ancak toplam içindeki payı azalmıştır. ABD’nin CSP kapasitesindeki artış yavaşlamış, payı 2013’ten 2023’e azalmıştır. Çin, Fas ve Güney Afrika gibi ülkeler CSP yatırımlarını artırarak sektörde daha önemli aktörler haline gelmiştir.

Türkiye, incelenen yıllar boyunca CSP kapasitesinde kayda değer bir değişiklik göstermemiştir. Gelecek yıllarda, teknolojinin maliyet avantajı ve verimlilik artışına bağlı olarak yeni ülkelerin pazara girmesi ve kapasitenin daha hızlı artması beklenmektedir. Bu nedenle, ülkelerin yenilenebilir enerji stratejilerini CSP gibi gelişmekte olan teknolojilerle çeşitlendirmeleri kritik bir faktör olacaktır.

Küresel ölçekteki gelişmeler, Türkiye’nin güneş enerjisi alanında atabileceği adımlar için hayati dersler sunmaktadır. Bu bağlamda, Türkiye’nin mevcut durumu ve performansının küresel liderlerle karşılaştırılması kritik bir değerlendirme alanı oluşturmaktadır. Türkiye’nin mevcut güneş enerjisi kapasitesi ve büyüme eğilimleri incelendiğinde, bu verilerin politika önerileri ve stratejik planlamalarla nasıl ilişkilendirilebileceği üzerinde durmak gereklidir. Yapılan analizler, küresel ve ulusal düzeyde güneş enerjisinin mevcut durumunu ve

gelecekteki potansiyelini ortaya koymuştur. Bu değerlendirmelerin ışığında, çalışmanın temel çıkarımları sonuç bölümünde sunulmaktadır.

Teknoloji gelişimini ele alan raporlar, çoğunlukla maliyet projeksiyonları ve kurulu güç eğilimleri üzerinden değerlendirme yapmaktadır. Ancak, bu projeksiyonlar varsayımsal olarak sürekli yatırım ve teknolojik ilerleme öngörmekte; ekonomik krizler, tedarik zinciri aksamaları veya jeopolitik riskler gibi dışsal faktörleri sınırlı ölçüde dikkate almaktadır. Ayrıca, veri toplama yöntemleri çoğunlukla makro ölçekli istatistiklere dayandığından, yerel düzeydeki farklı uygulamalara zorlukları gözden kaçabilmektedir. Bu da raporların genel eğilimleri doğru şekilde yansıtmasına rağmen, yerel politika tasarımlarında eksik kalmasına neden olmaktadır.

5. TEKNOLOJİK GELİŞİM, İSTİHDAM VE EKONOMİK ETKİLER (TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT, EMPLOYMENT AND ECONOMIC IMPACTS)

Türkiye’nin güneş enerjisi alanındaki gelişim alanları yalnızca teknik potansiyeliyle değil, aynı zamanda ulusal stratejik hedefleriyle de somutlaştırılmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2024–2028 Stratejik Planı’na göre, güneş enerjisi kurulu gücünün 14,5 GW’dan 32,9 GW’a yükseltilmesi hedeflenmektedir. Bu, beş yıllık dönemde yaklaşık %127’lik bir artış anlamına gelmektedir. Aynı belgede toplam yenilenebilir enerji kurulu gücünün 74,6 GW’a çıkarılması öngörülmektedir. Bu sayısal hedefler, Türkiye’nin güneş enerjisinde gelişim alanlarının yalnızca teorik değil, aynı zamanda politika belgeleri ve somut kapasite artışı projeksiyonlarıyla desteklendiğini göstermektedir [119].

Türkiye’nin 2024–2025 dönemi Ar-Ge ve yenilik stratejileri, enerji politikalarında sürdürülebilirlik ve teknolojik yerleşme ekseninde şekillenen bir paradigma değişimini ortaya koymaktadır. TÜBİTAK tarafından belirlenen öncelikli araştırma başlıkları, özellikle “Yerli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önceliklendirilmesi” kapsamında güneş enerjisi teknolojilerine özel bir ağırlık vermektedir. Fotovoltaik hücrelerin yerli üretimi, yüksek verimli panel tasarımları, ince film teknolojileri ve güneş enerjisi sistemlerinin dijitalleştirilmesi gibi alanlara yönelik Ar-Ge çağrıları, Türkiye’nin güneş potansiyelini stratejik bir avantaja dönüştürme hedefini yansıtmaktadır. Bu yaklaşım, enerji arz güvenliğini artırma, dışa bağımlılığı azaltma ve yerli teknoloji geliştirme politikalarıyla doğrudan örtüşmektedir. Aynı zamanda, güneş enerjisi sistemlerinin şebeke entegrasyonu ve enerji depolama çözümleriyle birlikte ele alınması, Türkiye’nin yenilenebilir enerji altyapısını bütüncül bir şekilde güçlendirme yönündeki kararlılığını göstermektedir. TÜBİTAK’ın bu stratejik yönelimi, Türkiye’nin enerji politikalarının sadece kaynak temelli değil, aynı zamanda teknoloji ve sürdürülebilirlik odaklı bir dönüşüm içinde olduğunu açıkça ortaya koymaktadır [120].

Bu hedefler ve Ar-Ge öncelikleri, yalnızca teknik kapasite artışını değil, aynı zamanda enerji dönüşümünün ekonomik ve toplumsal boyutlarını da gündeme getirmektedir. Güneş enerjisi teknolojilerindeki yerli üretim ve verimlilik artışına yönelik yatırımlar, uzun vadede enerji ithalatını azaltarak makroekonomik dengelere doğrudan etki edebilecek potansiyele sahiptir. Bu nedenle, teknik ve teknolojik gelişim alanlarının, istihdam ve maliyet gibi sosyoekonomik göstergelerle birlikte değerlendirilmesi, politika etkilerinin bütüncül olarak anlaşılmasını sağlamaktadır.

Türkiye'nin güneş ve rüzgâr enerjisine dayalı yeşil dönüşüm senaryoları, istihdam ve maliyet boyutlarında yönetilebilir düzeyde etkiler oluştururken, kayda değer makroekonomik kazanımlar sağlamaktadır. Girdi-çıkı analizine göre, 2024–2040 döneminde “işlerin olağan akışı” senaryosunda enerji yatırımlarının toplam üretime katkısı 145,4 milyar ABD doları, katma değere katkısı ise 45 milyar ABD doları olarak öngörülmektedir. Buna karşılık, 52,9 GW güneş PV ve 29,6 GW rüzgâr kapasitesine ulaşmayı hedefleyen yeşil kalkınma senaryolarında bu katkılar sırasıyla yaklaşık, 123,4–109,5 ve 38–33 milyar ABD doları düzeyinde gerçekleşmektedir. İstihdam açısından, kömür santrallerindeki kapasite düşüşü nedeniyle net iş kaybı 17.417 ile 94.424 kişi arasında değişmekte olup, bu oran 2022 toplam istihdamının yalnızca %0,02'sine karşılık gelmektedir. Buna karşın, ithal kömür kullanımındaki 197 milyon tonluk azalma, cari işlemler dengesinde toplam 52,9 milyar ABD doları iyileşme sağlayarak yıllık bazda 2023 cari açık seviyesinin %7,8'ine denk gelen bir tasarruf oluşturmaktadır. Bu veriler, yenilenebilir enerjiye geçişin kısa vadede sınırlı istihdam etkilerine rağmen, uzun vadede enerji ithalat maliyetlerini düşürerek ekonomik sürdürülebilirliği güçlendirdiğini ortaya koymaktadır [121].

Türkiye'de kömür temelli elektrik üretimi yerine güneş fotovoltaik (PV) ve rüzgâr enerjisine dayalı yeşil dönüşüm senaryosu, istihdam yapısında uzun vadeli ve net pozitif etkiler oluşturmaktadır. Green Jobs Assessment Model sonuçlarına göre, 2022–2030 döneminde yeşil senaryo, referans senaryoya kıyasla 2025'te 139.465, 2028'de 236.389 ve 2030'da 311.262 ek istihdam sağlaması ön görülmektedir. Bu kazanımlar, kömür santrallerindeki kapasite düşüşüne bağlı olarak ortaya çıkacağı ön görülen, 2025'te 67.246 ve 2030'da 58.774 kişilik istihdam kaybına rağmen net pozitif seyretmektedir. Özellikle güneş PV yatırımları, panel ve hücre üretiminden montaj ve bakım faaliyetlerine kadar geniş bir tedarik zincirinde istihdam oluşturmakta; bu alanlarda elektrikli/elektronik ekipman ve makine imalatı gibi sektörlerde uzun vadeli iş gücü talebini artırmaktadır. Sektörde istihdamın %51'i orta beceri, %36'sı yüksek beceri ve %13'ü düşük beceri düzeyinde olup, bu dağılım Türkiye'nin güneş enerjisi teknolojilerinde nitelikli işgücü talebinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 2030 itibarıyla güneş enerjisi kaynaklı istihdam artışının erkeklerde 276.560, kadınlarda 93.476 kişi düzeyinde gerçekleşmesi, mevcut

işgücü yapısının cinsiyet temelli dağılımını da yansıtmaktadır. Bu veriler, güneş enerjisi teknolojilerinin Türkiye'de hem nitelikli istihdam oluşturma hem de enerji dönüşümünü sosyoekonomik açıdan destekleme potansiyelini ortaya koymaktadır [122].

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2024–2028 Stratejik Planı'nda güneş enerjisi kurulu gücünün 14,5 GW'den 32,9 GW'a çıkarılması ve toplam yenilenebilir enerji kapasitesinin 74,6 GW'a ulaşması hedefi, Türkiye'nin enerji dönüşümünde teknik kapasite artışını somutlaştırmaktadır [119]. Teknolojileri TÜBİTAK'ın 2024–2025 Ar Ge ve yenilik stratejilerinde “Yerli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önceliklendirilmesi” başlığı altında fotovoltaik hücrelerin yerli üretimi, yüksek verimli panel tasarımları, ince film teknolojileri ve dijitalleşme odaklı sistem entegrasyonu gibi alanlara verdiği öncelikle desteklenmektedir [120]. Böylece teknik kapasite artışı ile teknoloji geliştirme politikaları, güneş enerjisi yatırımlarının ekonomik ve toplumsal etkilerini güçlendiren bir zemin oluşturmaktadır.

Bu çerçevede, rapor bulguları [122], 2022–2030 döneminde yeşil dönüşüm senaryosunun referans senaryoya kıyasla 2025'te 139.465, 2028'de 236.389 ve 2030'da 311.262 ek istihdam oluşturduğunu; bu artışın önemli bir bölümünün güneş PV tedarik zincirine bağlı imalat ve hizmet sektörlerinden geldiğini göstermektedir [121]. İstihdamın %51'inin orta beceri, %36'sının yüksek beceri düzeyinde olması, güneş enerjisi teknolojilerinde nitelikli işgücü talebinin yüksekliğini ortaya koymaktadır.

Ekonomik açıdan ise, aynı senaryo 2030 itibarıyla yıllık yaklaşık 10–45 milyar TL ek GSYH oluşturmakta, ithal kömür kullanımını 197 milyon ton azaltarak cari işlemler dengesinde toplam 52,9 milyar ABD doları iyileşme sağlamaktadır [121]. Bu, yıllık bazda 2023 cari açığının %7,8'ine denk gelen bir tasarruf anlamına gelmektedir. Böylece, güneş enerjisi odaklı yenilenebilir enerji politikaları, Türkiye'de teknik kapasite artışı, nitelikli istihdam oluşturulması ve enerji ithalat maliyetlerinin düşürülmesi gibi çok boyutlu kazanımları aynı stratejik çerçevede bütünlüştirmektedir.

6. KÜRESEL LİDERLER VE TÜRKİYE (GLOBAL LEADERS & TÜRKİYE)

Dünya genelinde güneş enerjisi teknolojilerinin gelişimi incelendiğinde hem solar termal hem de fotovoltaik (PV) teknolojilerde bazı ülkelerin liderliği dikkat çekmektedir.

Solar termal kolektörlerde, 2012–2023 döneminde Çin açık ara lider konumunu korumuştur. 2012'de küresel kapasitenin %64'ünü elinde bulunduran Çin, 2023'te bu oranı %75'e çıkarmıştır. Türkiye ise özellikle 2014 sonrasında kaydettiği artışla öne çıkmış ve 2020'de 18,4 GW kapasite ile ABD'yi geride bırakarak Çin'in ardından ikinci sıraya yükselmiştir. Bu gelişme, Türkiye'nin solar termal teknolojilerde küresel ölçekte önemli bir oyuncu haline geldiğini göstermektedir.

Fotovoltaik teknolojilerde (PV) ise Çin, 2015 itibarıyla Almanya'yı geride bırakarak liderliği ele geçirmiştir. 2023'te 609,4 GW kapasiteye ulaşan Çin, küresel kapasitenin %43'ünü tek başına karşılamaktadır. ABD, kapasitesini 10 katın üzerinde artırarak 2023'te ikinci sıraya yükselmiştir. Almanya ve Japonya gibi ülkeler de uzun yıllardır ilk 5 içerisinde yer almaktadır. Türkiye'nin PV kapasitesi ise 2013'te yok denecek kadar az iken, 2015'te %525 büyüme kaydetmiş ve 2023'te 11,3 GW seviyesine ulaşmıştır. Bu artış önemli bir gelişmeyi ifade etmekle birlikte, Türkiye'nin küresel lider ülkelerle arasındaki farkın halen belirgin olduğu görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, Türkiye'nin güneş enerjisi teknolojilerindeki konumu çift yönlüdür: Solar termalde dünya sıralamasında üst basamaklara çıkarken, fotovoltaik kapasitede küresel liderlerin oldukça gerisinde kalmış ve CSP alanında kayda değer bir ilerleme kaydedememiştir. Buna rağmen son on yılda yakalanan büyüme ivmesi, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini değerlendirme yolunda önemli adımlar attığını ortaya koymaktadır. Bu teknik gelişimin yanı sıra, Türkiye'nin stratejik planları ve Ar-Ge öncelikleri de dönüşüm sürecini desteklemektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2024–2028 Stratejik Planı,

güneş kurulu gücünü 32,9 GW'a çıkarma hedefiyle kapasite artışını somutlaştırırken; TÜBİTAK'ın yerli üretim, panel verimliliği ve dijital entegrasyon odaklı programları bu süreci teknoloji geliştirme boyutuyla güçlendirmektedir. Ayrıca, 2022–2030 dönemi için öngörülen yeşil dönüşüm senaryoları, güneş PV yatırımlarının uzun vadede nitelikli istihdam oluşturacağını, enerji ithalatını azaltacağını ve cari işlemler dengesinde iyileşme sağlayacağını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla Türkiye, küresel liderlerle karşılaştırıldığında kapasite bakımından geride kalsa da ulusal politika belgeleri ve ekonomik projeksiyonlar sayesinde güneş enerjisi dönüşümünü çok boyutlu ve stratejik bir çerçevede ele almaktadır.

Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (CSP) teknolojilerinde ise İspanya on yıllık dönemde liderliğini korurken, ABD ve Çin'in yanı sıra Fas ve Güney Afrika da yükselen aktörler olmuştur. Türkiye'nin CSP kapasitesi ise 2013–2023 arasında 0,001 GW seviyesinde sabit kalmıştır. Bu durum, Türkiye'nin yatırımlarını daha çok solar termal ve fotovoltaik teknolojilere yönlendirdiğini göstermektedir. Tablo 2'de küresel liderler ve Türkiye'nin konumu özetlenmektedir.

Tablo 2. Küresel liderler ve Türkiye'nin güneş enerjisi teknolojilerindeki konumu (2023 itibarıyla) (Global leaders and Türkiye's position in solar energy technologies (as of 2023))

Teknoloji	Küresel Liderler	2023 Kapasite/Pay	Türkiye'nin Kapasitesi	Türkiye'nin Konumu
Solar Termal	Çin, Türkiye, ABD	Çin (411,4 GW)	18,4 GW	ABD'yi geçerek 2. sırada
PV	Çin, ABD, Almanya	Çin (609,4 GW), ABD (137,7 GW)	11,3 GW	Liderlere göre düşük, hızlı büyüme eğilimi
CSP	İspanya, ABD, Çin	İspanya (2,3 GW), ABD (1,48 GW)	0,001 GW	Sabit, gelişim yok

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında küresel ısınmanın enerji sistemlerine etkisi ve özellikle güneş enerjisi teknolojilerinin bu süreci yavaşlatmadaki rolü incelenmiştir. Güneş enerjisi, sürdürülebilir, çevre dostu ve ekonomik bir enerji kaynağı olarak, düşük karbonlu bir geleceğe geçişin en önemli araçlarından biri haline gelmiştir.

- Küresel düzeyde, güneş enerjisi teknolojilerine yapılan yatırımlar son on yılda dikkat çekici bir hızla artmıştır. 2013 yılında 137 GW olan küresel PV kapasitesi, 2023'te 1412 GW'a ulaşarak yaklaşık 10,3 kat artış göstermiştir. Yalnızca 2023 yılında 283 GW'lık yeni kapasite eklenmiştir. Çin, 609,4 GW kapasiteyle sektördeki liderliğini sürdürmektedir.
- Türkiye ise özellikle 2015 yılından itibaren güneş enerjisi yatırımlarında ciddi bir ivme yakalamıştır. 2015 yılında bir önceki yıla göre %525 oranında artış gösteren PV kapasitesi, 2023 itibarıyla 11,3 GW seviyesine ulaşmıştır. 2023 yılından sonra da bu ivme hızlanarak devam etmiştir.

• 1 Haziran 2025 itibarıyla Türkiye'nin toplam elektrik kurulu gücü yaklaşık 119 GW'ye yükselmiştir. Bu kapasitenin belirgin bir bölümünü oluşturan 22,5 GW'lık kısmı PV sistemlerinden sağlanmaktadır. Söz konusu güneş enerjisi kapasitesinin büyük çoğunluğu, yani 20,26 GW lisanssız üretim tesislerinden elde edilirken; geriye kalan 2,24 GW'lık bölüm lisanslı güneş enerji santrallerinden oluşmaktadır [25,26]. Bu durum, güneş enerjisi yatırımlarında lisanssız sistemlerin hala baskın olduğunu göstermektedir.

• Güneş termal kapasitesi ise 2014-2019 ve 2023 yıllarında Türkiye'nin kapasite artış oranları Çin ve ABD'nin üzerinde gerçekleşmiş; ortalama artış oranı Türkiye için %6,4 iken Çin için %4,6, ABD için %1,5 olmuştur. 2021 yılı itibarıyla 18,9 GW'lık olup bu değer Türkiye'yi global sıralamada ikinci konuma taşımıştır.

• CSP (Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi) sistemleri küresel çapta gelişim göstermiş, ancak Türkiye bu alanda kayda değer bir büyüme sergilememiştir. 2013-2023 yılları arasında CSP kapasitesi küresel ölçekte 1,7 kat artarken, Türkiye'nin katkısı sabit kalmıştır.

Elde edilen bulgular, Türkiye'nin yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinde yalnızca teknik kapasite artışı değil, aynı

zamanda istihdam oluşturma, enerji ithalat maliyetlerinin azaltılması ve bölgesel kalkınmanın desteklenmesi gibi çok boyutlu kazanımlar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, politika yapıcılarının enerji dönüşümünü hızlandırırken ekonomik ve sosyal faydaları en üst düzeye çıkaracak bütüncül adımlar atmasının önemini vurgulamaktadır. Bu çerçevede, bulgularla doğrudan ilişkili olarak şu politika önerileri geliştirilebilir:

- Lisanssız üretim sınırlarının kademeli olarak artırılması, küçük ve orta ölçekli yatırımcıların güneş ve rüzgâr enerjisi projelerine erişimini kolaylaştırarak yerinde üretimi teşvik edecek, dağıtık enerji modelini güçlendirecek ve enerji arz güvenliğini artıracaktır.
- Şebeke altyapısının modernizasyonu ve esnekliğinin artırılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek penetrasyonunu destekleyecek akıllı şebeke teknolojileri, enerji depolama çözümleri ve bölgesel iletim kapasitesi yatırımlarının hızlandırılmasıyla üretim-tüketim dengesini optimize edecektir.
- Yerli üretim ve teknoloji geliştirme teşviklerinin genişletilmesi, fotovoltaik panel, rüzgâr türbini ve enerji depolama sistemleri gibi stratejik ekipmanlarda yerli üretim kapasitesini artırarak dışa bağımlılığı azaltacak ve teknoloji tabanlı rekabet gücünü yükseltecektir.
- Adil geçiş politikalarının uygulanması, fosil yakıt sektörlerinde istihdam kaybı yaşayacak işgücünün yeniden eğitimi, sosyal koruma mekanizmaları ve sektörler arası geçiş programları ile dönüşüm sürecinde sosyal maliyetleri en aza indirecektir.
- Bölgesel kalkınma odaklı yenilenebilir enerji yatırımlarının teşvik edilmesi, yüksek güneş ve rüzgâr potansiyeline sahip bölgelerde enerji yatırımlarını yerel istihdam, sanayi gelişimi ve ekonomik kalkınma stratejileri ile entegre ederek bölgesel eşitsizlikleri azaltacaktır.

Bu öneriler, çalışmada ortaya konan teknik ve sosyoekonomik verilerle doğrudan temellendirilmiş olup, Türkiye'nin enerji dönüşüm sürecinde hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliği güçlendirecek, uygulanabilir ve ölçülebilir politika adımlarını temsil etmektedir. Sonuç olarak, güneş enerjisi teknolojileri hem iklim değişikliğiyle mücadele hem de enerji arz güvenliği açısından stratejik öneme sahiptir. Türkiye'nin sahip olduğu yüksek güneşlenme potansiyeli, coğrafi avantajları ve son yıllardaki büyüme performansı dikkate alındığında, bu kaynakların daha etkin değerlendirilmesi için yatırım teşviklerinin, teknolojik araştırma-geliştirme faaliyetlerinin ve ulusal stratejik politikaların sürdürülebilir biçimde güçlendirilmesi gerekmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Abid USTAOĞLU: Literatür taraması yapmış, makaleyi organize etmiş, makaleyi yazmış ve gözden geçirmiştir.

Süheyl Bilal SUNGUR: Literatür taraması yapmış ve makaleyi yazmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Jones MW, Peters GP, Gasser T, Andrew RM, Schwingshackl C, Gütschow J, et al. "National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850". *Scientific Data*, 10, (2023).
- [2] CO₂ and Greenhouse Gas Emissions - Our World in Data <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions> (accessed February 15, (2025)).
- [3] Breakdown of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions by sector - Our World in Data <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector> (accessed February 14, (2025)).
- [4] About the statistical review | Statistical Review of World Energy <https://www.energyinst.org/statistical-review/about> (accessed March 21, (2025)).
- [5] NASA SVS | Global Temperature Anomalies from 1880 to 2021 <https://svs.gsfc.nasa.gov/4964> (accessed March 3, (2025)).
- [6] Voosen P. "The hottest year was even hotter than expected". *Science*, 383, (2024).
- [7] Luhn A. "2023 was officially the world's hottest year on record". *New Scientist*, 261, (2024).
- [8] Copernicus: 2023 is the hottest year on record, with global temperatures close to the 1.5°C limit | Copernicus <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2023-hottest-year-record> (accessed March 7, (2025)).
- [9] Climate records shatter as 2024 is set to be the hottest year ever - Earth.com <https://www.earth.com/news/climate-records-shatter-2024-set-to-be-hottest-year-ever/> (accessed March 7, (2025)).
- [10] STATE OF THE CLIMATE EUROPEAN <https://doi.org/10.24381/14j9-s541>.
- [11] IPCC. Global Warming of 1.5°C. 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>.
- [12] UNEP Climate Action Note | Data you need to know <https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/state-of-climate.html> (accessed March 10, (2025)).
- [13] Climate Change - NASA Science <https://science.nasa.gov/climate-change/> (accessed March 12, (2025)).
- [14] AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (accessed March 8, (2025)).

- [15] Kulp SA, Strauss BH. "New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding". *Nature Communications*,10, (2019).
- [16] Chart: Rising Sea Levels Will Threaten 200 Million People by 2100 | Statista <https://www.statista.com/chart/19884/number-of-people-affected-by-rising-sea-levels-per-country/> (accessed March 9, 2025).
- [17] Air pollution <https://www.who.int/china/health-topics/air-pollution> (accessed March 15, 2025).
- [18] Dönmezçelik O, Koçak E, Örkücü HH. "Net Sıfır Emisyon Hedefine Doğru Türkiye Kara Yolu ve Demir Yolu Taşımacılığının Enerji Modellemesi (2025–2050)". *Politeknik Dergisi*,227:931–46, (2024).
- [19] Air pollution effects | OECD <https://www.oecd.org/en/data/indicators/air-pollution-effects.html> (accessed March 15, 2025).
- [20] Öztürk Y, Abbasi MN. "Harnessing Photovoltaic Solar Power in Rural Regions: A Case Study of Tehsil Saleh Pat, Sindh, Pakistan". *Politeknik Dergisi*,28:697–706,(2025).
- [21] Hasnain SM, Elani UA, Al-Awaji SH, Aba-Oud HA, Smiai MS. "Prospects and proposals for solar energy education programmes". *Applied Energy*,52:307–14, (1995).
- [22] Hasnain SM, Alawaji SH, Elani UA. "Solar energy education – a viable pathway for sustainable development". *Renewable Energy*,14:387–92, (1998).
- [23] RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT <https://www.ren21.net/gsr-2022/> (accessed March 17, 2025).
- [24] Renewables in Energy Supply https://www.ren21.net/gsr-2023/modules/energy_supply/01_energy_supply/ (accessed September 3, 2025).
- [25] Reports and resources <https://www.gwec.net/reports?t=87193577191> (accessed March 20, 2025).
- [26] REN21 RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf (accessed September 3, 2024).
- [27] İstatistikler https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/firm_istatistikler.jsf (accessed July 5, 2025).
- [28] Elektrik kurulu gücünde rüzgar ve güneşin payı yüzde 30'a yükseldi <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/elektrik-kurulu-gucunde-ruzgar-ve-gunesin-payi-yuzde-30a-yukseldi/3528899> (accessed May 8, 2025).
- [29] The Paris Agreement | UNFCCC <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (accessed April 20, 2025).
- [30] Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050 <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020> (accessed April 23, 2025).
- [31] Open Knowledge Repository <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/58f2a409-9bb7-4ee6-899d-be47835c838f> (accessed April 25, 2025).
- [32] European Commission-Press release European Green Deal: Agreement reached on the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/ip_22_7719/IP_22_7719_EN.pdf (accessed April 26, 2025).
- [33] Wettestad J. "EU Emissions Trading for Transport and Buildings: Saved by Synergistic Institutional Interaction?". *JCMS: Journal of Common Market Studies*, 63:915–31, (2025).
- [34] South Korea | Climate Action Tracker <https://climateactiontracker.org/countries/south-korea/> (accessed April 30, 2025).
- [35] Boungou W, Dufau B. "EU ETS phase IV and Industrial performance". *Economics Letters*, 236, (2024).
- [36] De Clara S, Mayr K. *Oxford Energy Insight: 38 – The EU ETS phase IV reform: implications for system functioning and for the carbon price signal*. International Emissions Trading Association (IETA); 2018. http://www.ieta.org/resources/EU/EUETS%20Paper%20May_FINAL.pdf (accessed May 8, 2025).
- [37] General Law of Climate Change - Mexico pilot ETS – Policies - IEA <https://www.iea.org/policies/19298-general-law-of-climate-change-mexico-pilot-ets> (accessed May 1, 2025).
- [38] AB ETS'nin IV. aşama reformu: Sistemin işleyişi ve karbon fiyat sinyali üzerindeki etkileri - Oxford Enerji Araştırmaları Enstitüsü <https://www.oxfordenergy.org/publications/eu-ets-phase-iv-reform-implications-system-functioning-carbon-price-signal/> (accessed May 4, 2025).
- [39] World Energy Balances Highlights - Data product - IEA <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances-highlights> (accessed May 3, 2025).
- [40] RENEWABLES 2023 GLOBAL STATUS REPORT <https://www.ren21.net/gsr-2023/> (accessed September 3, 2024).
- [41] REN21 RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf (accessed September 2, 2024).
- [42] REN21 RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf (accessed September 2, 2024).
- [43] RENEWABLES 2019 GLOBAL STATUS REPORT https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf (accessed September 2, 2024).
- [44] REN21 RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/08/Full-Report-2018.pdf> (accessed September 4, 2024).
- [45] REN21 RENEWABLES 2017 GLOBAL STATUS REPORT 2017. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017_Full-Report_English.pdf (accessed October 2, 2024).
- [46] REN21 SRENEWABLES 2016 GLOBAL STATUS REPORT <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/>

- 2019/05/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf (accessed October 2, 2024).
- [47] RENEWABLES 2015 GLOBAL STATUS REPORT https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2015_Full-Report_English.pdf (accessed October 2, 2024).
- [48] REN 21 RENEWABLES 2014 GLOBAL STATUS REPORT https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2014_Full-Report_English.pdf (accessed September 4, 2024).
- [49] Suresh Babu PJ, Mangaiyarkarasi SP, Gandhi Raj R, Senthilkumar S. "Solving Optimal Power Flow Problem in Hybrid Renewable Energy Systems Through Hybrid Optimization Algorithm". *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 1–18, (2025).
- [50] Valencia-Díaz A, García S. "Stochastic optimization for siting and sizing of renewable distributed generation and D-STATCOMs". *E-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 101026, (2025).
- [51] Obahiagbon EG, Kosoe EA. "Economic Dimensions of Air Pollution: Cost Analysis, Valuation, and Policy Impacts". In: *Sustainable Strategies for Air Pollution Mitigation: Development, Economics, and Technologies*. Springer, p. 111–39, (2024).
- [52] Rovai FF, Mady CEK. "Regional environmental comparison of electrification and ethanol blends in light vehicles". *Cleaner Energy Systems*, 11:100189, (2025).
- [53] İstatistikler https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/firm_istatistikler.jsf (accessed February 10, 2025).
- [54] CO2 Observer | kWh to CO2 Calculator <https://co2.observer/calculator/?k=230&m=12&m2=53> (accessed February 10, 2025).
- [55] Greenhouse Gas Equivalencies Calculator | US EPA <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator#results> (accessed February 11, 2025).
- [56] Renewable Energy Agency I. *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*. 2023. www.irena.org (accessed February 10, 2025). (2023)
- [57] Demir A, Dinçer AE, Yılmaz K. "A novel method for the site selection of large-scale PV farms by using AHP and GIS: A case study in İzmir, Türkiye". *Solar Energy*, 259:235–45, (2023).
- [58] Ong S, Campbell C, Denholm P, Margolis R, Heath G. "Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States", (2013).
- [59] Wang Y, Chao Q, Zhao L, Chang R. "Assessment of wind and photovoltaic power potential in China". *Carbon Neutrality*, 1:1–11. (2022).
- [60] TÜİK - Veri Portalı <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109> (accessed September 7, 2025).
- [61] Population, total - China, United States, Germany, Türkiye | Data https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?end=2024&locations=CN-US-DE-TR&name_desc=true&start=1960&view=chart (accessed April 8, 2025).
- [62] Kandilli C. "Enerjinin ana kaynaktan kullanım enerjisine dönüşüm süreci". Ders Sunumu. 2008. (2008).
- [63] He Q, Zeng S, Wang S. "Experimental investigation on the efficiency of flat-plate solar collectors with nanofluids". *Applied Thermal Engineering*, 88, (2014).
- [64] Sharma N, Diaz G. "Performance model of a novel evacuated-tube solar collector based on minichannels". *Solar Energy*, 85, (2011).
- [65] Hussein OA, Habib K, Muhsan AS, Saidur R, Alawi OA, Ibrahim TK. "Thermal performance enhancement of a flat plate solar collector using hybrid nanofluid". *Solar Energy*, 204, (2020).
- [66] Ziyadanogullari NB, Yucel HL, Yildiz C. "Thermal performance enhancement of flat-plate solar collectors by means of three different nanofluids". *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, (2018).
- [67] Duffie JA, Beckman WA. *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*, (2013).
- [68] Tyagi VV, Kaushik SC, Tyagi SK. "Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, (2012).
- [69] Sabiha MA, Saidur R, Mekhilef S, Mahian O. "Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, (2015).
- [70] Zubriski SE, Dick KJ. "Measurement of the efficiency of evacuated tube solar collectors under various operating conditions". *Journal of Green Building*, 7, (2012).
- [71] Green MA. "Recent developments in photovoltaics". *Solar Energy*, 76:3–8, (2004).
- [72] Al-Ezzi AS, Ansari MNM. "Photovoltaic Solar Cells: A Review". *Applied System Innovation*, 5, (2022).
- [73] Olukan TA, Emziane M. "A comparative analysis of PV module temperature models". *Energy Procedia*, 62:694–703, (2014).
- [74] State T, Service M. "Modeling Solar Energy Potential in Turkey", 1–10, (2010).
- [75] Waqas A, Ji J. "Thermal management of conventional PV panel using PCM with movable shutters – A numerical study". *Solar Energy*, 158:797–807, (2017).
- [76] Huang BJ, Sun FS. "Feasibility study of one axis three positions tracking solar PV with low concentration ratio reflector". *Energy Conversion and Management*, 48:1273–80, (2007).
- [77] Osman AI, Chen L, Yang M, Msigwa G, Farghali M, Fawzy S, et al. "Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review". *Environmental Chemistry Letters*, 21, (2023).
- [78] Kennedy R. "LCOE of grid-scale solar expected to drop 2% globally in 2025". *PV Magazine International*, (2025).
- [79] Ustaoglu A, Akgül V, Okajima J. "Performance investigation of truncated low concentrating photovoltaic-thermal systems with V-trough, compound hyperbolic and compound parabolic

- concentrators". *Applied Thermal Engineering*, 232, (2023).
- [80] Nabil T, Mansour TM. "Augmenting the performance of photovoltaic panel by decreasing its temperature using various cooling techniques". *Results in Engineering*, 15, (2022).
- [81] Sargunanathan S, Elango A, Mohideen ST. "Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, (2016).
- [82] Wang Y, Gao Y, Huang Q, Hu G, Zhou L. "Experimental study of active phase change cooling technique based on porous media for photovoltaic thermal management and efficiency enhancement". *Energy Conversion and Management*, 199, (2019).
- [83] Gao Y, Wu D, Dai Z, Wang C, Chen B, Zhang X. "A comprehensive review of the current status, developments, and outlooks of heat pipe photovoltaic and photovoltaic/thermal systems". *Renewable Energy*, 207, (2023).
- [84] Hadipour A, Rajabi Zargarabadi M, Rashidi S. "An efficient pulsed-spray water cooling system for photovoltaic panels: Experimental study and cost analysis". *Renewable Energy*, 164, (2021).
- [85] Erdoğan İ, Bilen K, Kivrak S. "Experimental Investigation of the Efficiency of Solar Panel Over Which Water Film Flows". *Politeknik Dergisi*, 27:699–707, (2024).
- [86] Gao Y, Wang C, Wu D, Dai Z, Chen B, Zhang X. "A numerical evaluation of the bifacial concentrated PV-STEg system cooled by mini-channel heat sink". *Renewable Energy*, 192, (2022).
- [87] Cui Y, Zhu J, Zhang F, Shao Y, Xue Y. "Current status and future development of hybrid PV/T system with PCM module: 4E (energy, exergy, economic and environmental) assessments". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, (2022).
- [88] Amanlou Y, Tavakoli Hashjin T, Ghobadian B, Najafi G. "Air cooling low concentrated photovoltaic/thermal (LCPV/T) solar collector to approach uniform temperature distribution on the PV plate". *Applied Thermal Engineering*, 141:413–21, (2018).
- [89] Ebaid MSY, Ghrair AM, Al-Busoul M. "Experimental investigation of cooling photovoltaic (PV) panels using (TiO₂) nanofluid in water-polyethylene glycol mixture and (Al₂O₃) nanofluid in water-cetyltrimethylammonium bromide mixture". *Energy Conversion and Management*, 155, (2018).
- [90] Valeh-E-Sheyda P, Rahimi M, Karimi E, Asadi M. "Application of two-phase flow for cooling of hybrid microchannel PV cells: A comparative study". *Energy Conversion and Management*, 69, (2013).
- [91] Grubišić-Čabo F, Nižetić S, Marinić Kragić I, Čoko D. "Further progress in the research of fin-based passive cooling technique for the free-standing silicon photovoltaic panels". *International Journal of Energy Research*, 43, (2019).
- [92] Tao M, Zhenpeng L, Jiabin Z. "Photovoltaic panel integrated with phase change materials (PV-PCM): technology overview and materials selection". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, (2019).
- [93] Al-Amri F, Maatallah TS, Al-Amri OF, Ali S, Ali S, Ateeq IS, et al. "Innovative technique for achieving uniform temperatures across solar panels using heat pipes and liquid immersion cooling in the harsh climate in the Kingdom of Saudi Arabia". *Alexandria Engineering Journal*, 61, (2022).
- [94] Hu M, Zhao B, Suhendri, Ao X, Cao J, Wang Q, et al. "Applications of radiative sky cooling in solar energy systems: Progress, challenges, and prospects". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, (2022).
- [95] Haidar ZA, Orfi J, Kaneesamkandi Z. "Experimental investigation of evaporative cooling for enhancing photovoltaic panels efficiency". *Results in Physics*, 11, (2018).
- [96] Gao Y, Chen B, Wu D, Dai Z, Wang C, Zhang X. "Comparative study of various solar power generation systems integrated with nanofluid-flat heat pipe". *Applied Energy*, 327, (2022).
- [97] Fernández-García A, Zarza E, Valenzuela L, Pérez M. "Parabolic-trough solar collectors and their applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, (2010).
- [98] Ustaoglu A, Kandilli C, Cakmak M, Torlaklı H. "Experimental and economical performance investigation of V-trough concentrator with different reflectance characteristic in photovoltaic applications". *Journal of Cleaner Production*, (2020).
- [99] Ustaoglu A, Ozbey U, Torlaklı H. "Numerical investigation of concentrating photovoltaic/thermal (CPV/T) system using compound hyperbolic-trumpet, V-trough and compound parabolic concentrators". *Renewable Energy*, 152:1192–208, (2020).
- [100] Welford WT, Winston R. *Optics of Nonimaging Concentrators: Light and Solar Energy*, (1978).
- [101] Winston R, Miñano JC, Benitez P, Shatz N, Bortz JC. *Nonimaging Optics*, (2005).
- [102] Hinterberger H, Winston R. "Gas cherenkov counter with optimized light collecting efficiency". *Chicago Univ., Ill. Enrico Fermi Inst. for Nuclear Studies*, (1967).
- [103] Gordon JM, Rabl A. "Nonimaging compound parabolic concentrator-type reflectors with variable extreme direction". *Applied Optics*, 31:7332, (1992).
- [104] Proell M, Osgyan P, Karrer H, Brabec CJ. "Experimental efficiency of a low concentrating CPC PVT flat plate collector". *Solar Energy*, 147:463–9, (2017).
- [105] Cabral D. "Development and performance comparison of a modified glazed CPC hybrid solar collector coupled with a bifacial PVT receiver". *Applied Energy*, 325, (2022).
- [106] Raboaca MS, Badea G, Enache A, Filote C, Rasoi G, Rata M, et al. "Concentrating solar power technologies". *Energies (Basel)*, 12, (2019).
- [107] Cheng ZD, Zhao XR, He YL, Qiu Y. "A novel optical optimization model for linear Fresnel reflector concentrators". *Renewable Energy*, 129, (2018).

- [108] Zhu Y, Shi J, Li Y, Wang L, Huang Q, Xu G. "Design and experimental investigation of a stretched parabolic linear Fresnel reflector collecting system". *Energy Conversion and Management*, 126, (2016).
- [109] Kalogirou SA. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems – Second Edition*, (2014).
- [110] Mawire A, Taole SH. "Experimental energy and exergy performance of a solar receiver for a domestic parabolic dish concentrator for teaching purposes". *Energy for Sustainable Development*, 19, (2014).
- [111] Thirunavukkarasu V, Cheralathan M. "An experimental study on energy and exergy performance of a spiral tube receiver for solar parabolic dish concentrator". *Energy*, 192, (2020).
- [112] Neber M, Lee H. "Design of a high temperature cavity receiver for residential scale concentrated solar power". *Energy*, 47, (2012).
- [113] Cagnoli M, de la Calle A, Pye J, Savoldi L, Zanino R. "A CFD-supported dynamic system-level model of a sodium-cooled billboard-type receiver for central tower CSP applications". *Solar Energy*, 177, (2019).
- [114] Awan AB, Chandra Mouli KVV, Zubair M. "Performance enhancement of solar tower power plant: A multi-objective optimization approach". *Energy Conversion and Management*, 225, (2020).
- [115] Wang Z. "China Solar Thermal Alliance (CSTA) is a non-profit organization that supports and promotes the development of solar thermal technology and industry with the strength of all CSTA's members from universities, institutes and industry". *The Blue Book of China*
- [116] Energy SP. *Technology Roadmap*. Technical Report, IEA, (2014).
- [117] Guo R, Zhuang C, Gao Y. "Energy-efficient and energy-flexible buildings towards net-zero carbon emission". *Frontiers in Energy Research*, 12:1458006, (2024).
- [118] Dönmez NFK. "Taxation and incentives in renewable energy investments". *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 22:220–45, (2023).
- [119] Kılıç U, Kekezoğlu B. "A review of solar photovoltaic incentives and policy: Selected countries and Turkey". *Ain Shams Engineering Journal*, 13:101669, (2022).
- [120] Nyasapoh M, Gyamfi S, Debrah SK, Gabbar H, Derkyi N, Nassar Y, et al. "Navigating Renewable Energy Transition Challenges for a Sustainable Energy Future in Ghana". *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, 14:237–57, (2025).
- [121] Sareen K, Panigrahi BK, Nagdeve R, Bhalja BR, Suman S. "Energy Transition: A Global Review of Wholesale Energy Markets and Variable Renewable Energy Forecasting-Related Frameworks". *IEEE Power and Energy Magazine*, 23:53–64, (2025).
- [122] Haberler – T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <https://enerji.gov.tr/haber-detay?id=21398> (accessed September 1, 2025).
- [123] TÜBİTAK 2024-2025 Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları | TÜBİTAK | Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu <https://tubitak.gov.tr/tr/kurumsal/politikalar/tubitak-2024-2025-ocelikli-ar-ge-ve-yenilik-konulari?> (accessed September 1, 2025).
- [124] Gözkün KA, Orhangazi Ö. "Solar and wind power transition in Türkiye: An input-output analysis of growth, employment, and current account effects". In: *Integrated Policy Strategies and Regional Policy Coordination for Resilient, Green and Transformative Development*, (2025).
- [125] "Social and Employment Impacts of Climate Change and Green Economy Policies in Türkiye". *Application of the Green Jobs Assessment Model for Türkiye*.