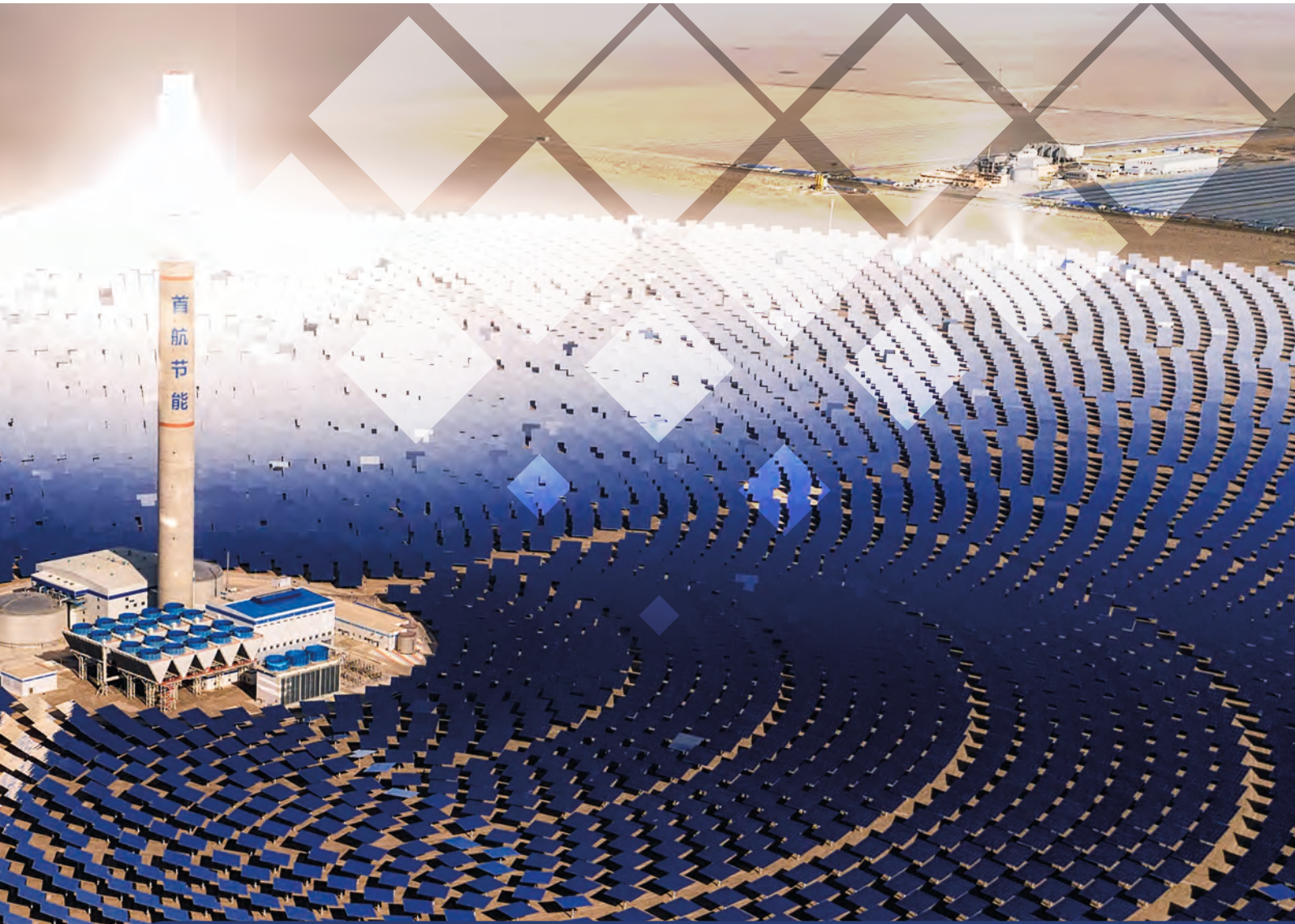


Güneş, Enerjisi ve Teknolojik Enerji Hasadı

Prof. Dr. Faruk Soyduđan [Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü, Astrofizik Anabilim Dalı & Astrofizik Gözlemevi



Gök adalar, kararlı enerji üreten yıldızlarla doludur. Gök adaların ve dolayısıyla evrenin en önemli enerji kaynağı, doğal füzyon reaktörleri olan yıldızlardır. Yıldızların kütlesi ve kimyasal bileşimi, onların nasıl ve hangi hızda enerji üreteceklerini ve uzaya ne kadar enerji yayacaklarını belirleyen başlıca parametrelerdir. Yıldızlardan yayılan enerji, çekim alanlarında gezegenler varsa onlar için de kritik rol oynar. Bizim yıldızımız Güneş'in ürettiği ve yaydığı enerji hem gezegenimiz Dünya hem de barındırdığı canlılar için büyük öneme sahiptir. Diğer taraftan, insanlığın enerji ihtiyacının giderek artması ve sera gazlarının salımını azaltma çabaları, en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan Güneş enerjisini, onun hasadını ve bunun için geliştirilen teknolojileri öne çıkarıyor.

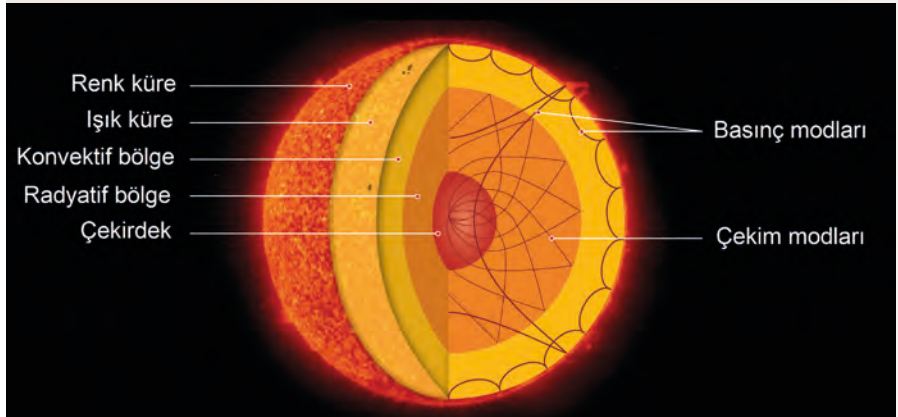
İnsanlığın var olduğundan bu yana yaşamını sürdürmek için kullandığı enerji önemini arttırarak gündemimizde yer alıyor. Neredeyse gıda ile aynı seviyede ve ağırlıkta bahsedilen enerji talebi ve ihtiyacının kişisel olarak veya ülkeler bazında artmasına ek olarak, dünya nüfusundaki artış ve bazı konvansiyonel enerji kaynaklarındaki azalma, bu konuya daha fazla enerji harcamamız gerektiğini gösteriyor. Farklı sebeplerle gelişen enerji problemlerinin çözülmesinde, başta yenilenebilir kaynaklar olmak üzere, alternatif kaynaklara ve enerji girdilerindeki çeşitliliğin arttırılmasına yönelik çalışmalar hız kazanıyor. Enerji ihtiyaçları, coğrafik özellikler, çevre kirliliği, küresel ısınma ve başka çok sayıda parametre dikkate alındığında ve fayda-maliyet analizleri yapıldığında öne çıkan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de güneş enerjisidir. Güneş enerjisinin hasadına ve teknolojik boyutuna bakmadan önce Güneş'in nasıl ve ne kadar enerji ürettiği üzerinde duralım.

Doğal Füzyon Reaktörü Güneş

Dünya'ya yaklaşık 150 milyon km uzaklıkta bulunan Güneş, hem oluşturduğu kütle çekimi alanı hem de sağladığı enerjiyle sistemin ana aktörü olduğunu sürekli gösteriyor. Güneş'in çekirdeğinde üretilen enerji önce yüzeyine yüz binlerce yıl süren yolculukla ulaşıyor ve sonrasında atmosferinden uzaya yayılıyor. Bu enerjiden Dünya da nasibini alıyor. Güneş enerjisi, Güneş sistemindeki bütün cisimler, onların yapıları ve yeryüzündeki canlılar için kritik öneme sahip. İnsanlık, binlerce yıldır gözle ve yaklaşık 400 yıldır teleskoplarla Güneş ve diğer yıldızları gözlemiş olsa da Güneş ve diğer yıldızlar nasıl enerji üretiyor sorusuna cevap verebilecek bilgileri yaklaşık bir asır önce üretmeye başladı. Arthur Eddington, 1920'de "The Internal Constitution of the Stars", başlıklı makalesinde hidrojen-helyum füzyonunun

yıldızların başlıca enerji kaynağı olabileceğini önerdi. Eddington bu araştırmasında, Albert Einstein'ın kütle-enerji eşdeğerliliği yani $E=m.c^2$ eşitliğini kullanarak hidrojen-helyum füzyonunda ne kadar enerji açığa çıktığını hesapladı. Bilinmeyen termonükleer enerji ve füzyon kavramları bu araştırmalarla birlikte kullanılmaya başlandı. Sonrasında kuantum tünellenmenin de keşfiyle beraber küçük ve sıkışık bir çekirdekte füzyonla nasıl ve ne kadar enerji üretilebileceği konusunda bilgiler daha da netleşmeye başladı.

Nükleer füzyon basitçe iki hafif atom çekirdeğinin büyük miktarlarda enerji çıkaracak şekilde birleşerek daha ağır tek bir çekirdek oluşturma sürecidir. Yıldızlarda, çekirdeklerin birbirlerine uyguladıkları elektriksel itme kuvvetiyle başa çıkmak ve böylece hafif atomların birleşmesini sağlamak için çekirdekte sıcaklığın milyonlarca derece santigrada ulaşması gerekiyor. Sadece bu da yeterli



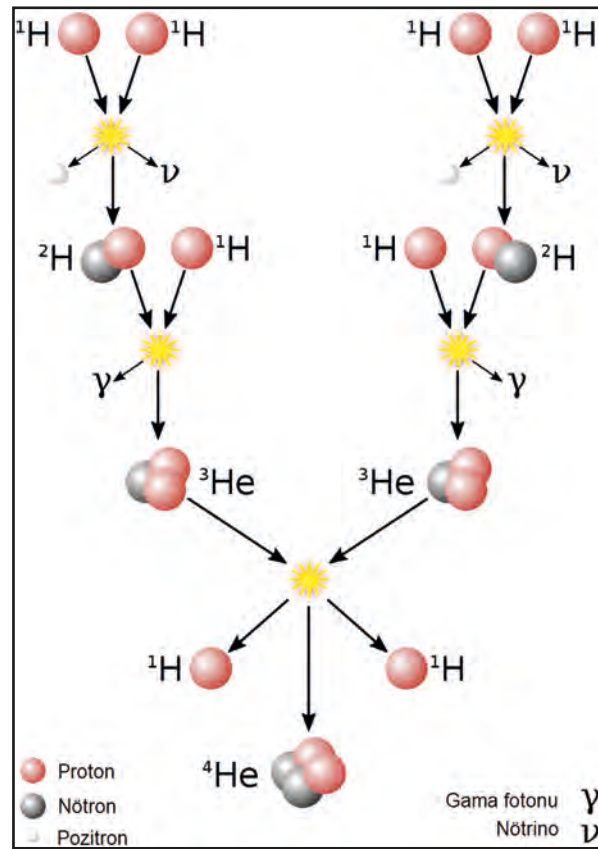
Güneş'in iç yapısı ve atmosferi (ESA)



Sproetmek / Getty Images

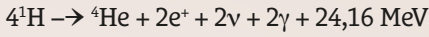
olmuyor, bu birleşmeyi açıklamak için kuantum tünelleme etkisine de ihtiyaç duyuluyor.

Güneş kütlelerinin yaklaşık %71'i hidrojen, %27'si helyumdan oluşuyor. Bir plazma küresi olan Güneş'in merkezinde sıcaklık 15 milyon derece santigradı aşıyor. Çekirdekte yoğunluk sudan 150 kat, basınç ise Dünya atmosferindeki basınçtan 200-300 milyar kat daha fazladır. İşte bu çok sıcak, çok yüksek yoğunluklu ve basınçtaki ortam, füzyon reaksiyonlarının gerçekleştiği bölgedir. Tepkimeler merkezden yaklaşık 140 bin km mesafeye kadar olan bölgede gerçekleşir. Güneş ve benzeri kütleli yıldızlarda füzyon reaksiyonlarının büyük bölümü, proton-proton (p-p) çevrimi denilen tepkimelerle hidrojen çekirdeklerinin birleşerek helyum oluşturması şeklinde meydana gelir. Dört hidrojen çekirdeğinin bir helyum çekirdeğine dönüşmesi için gerçekleşen



Güneş'in merkezinde gerçekleşen füzyon reaksiyonlarından p-p çevrimi

üç reaksiyon sırasında, iki pozitron ve iki nötrinonun yanı sıra elektromanyetik ışınım (foton) da ortaya çıkıyor. Helyum çekirdeğinin kütlesi, dört hidrojen çekirdeğinden % 0,64 oranında daha azdır. Bu kütle farkı, kütle-enerji eşdeğerliliği eşitliğiyle açıklanacak şekilde, enerjiye (her p-p zinciri sonunda yaklaşık 24,16 MeV) dönüşür. Reaksiyonlar sırasında ortaya çıkan nötrinolar da Güneş'ten çıkan enerjinin %2'sinden sorumludur. p-p zinciri reaksiyonları tek bir reaksiyon şeklinde aşağıdaki gibi gösterilebilir:



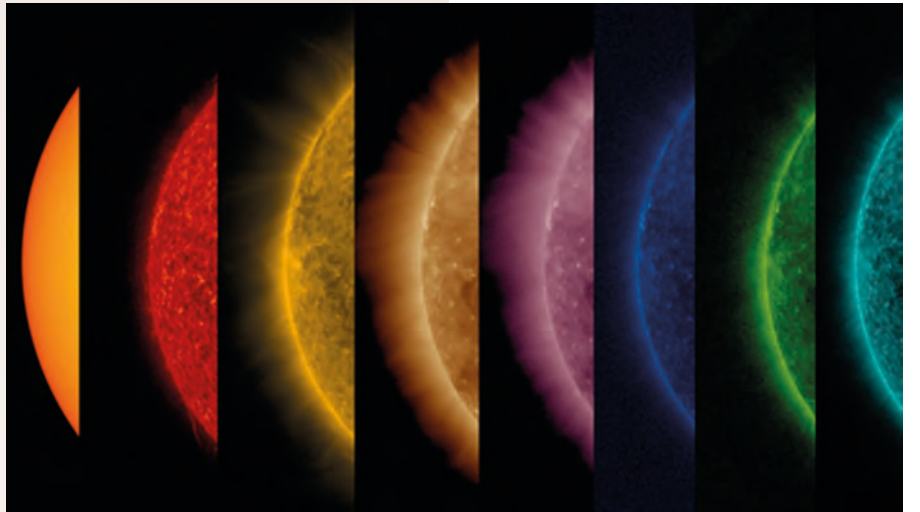
Güneş'ten daha büyük kütlelere doğru gidildikçe, yaşamının ileri evresinde olmayan yıldızlarda, p-p zinciri yerine Karbon – Azot – Oksijen (CNO) çevrimi reaksiyonları baskın olur. Gerçekleşen yine hidrojenin helyuma dönüşümüdür ancak daha uzun bir reaksiyon zinciri sonucunda helyum oluşurken yaklaşık 25,03 MeV enerji açığa çıkar.

Büyük miktarda kütle için küçük bir hacme sıkıştığı Güneş'in çekirdeği çok yoğundur ve füzyon reaksiyonlarında üretilen fotonlar, yüzeye çıkış seyahatlerinde sürekli soğurularak tekrar salınır. Bu nedenle, çekirdekte üretilen fotonların merkezden yüzeye ulaşmaları yüz bin yılı aşabilir. Bu arada, Güneş'in merkezinde üretilen enerji önce yarıçapın %75'lik bölümünde fotonlarla, sonrasında yüzeye kadar konveksiyonla aktarılır.

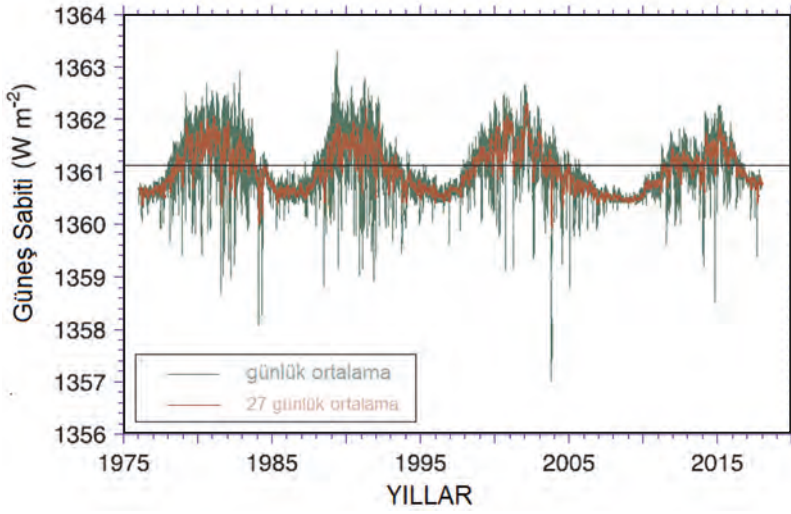
Güneş'in yüzeyi yani atmosferinin en alt katmanı fotosfer (veya ışık küre) diye adlandırılır. Bu bölgede sıcaklık yaklaşık 5.800 K'dir, enerji yayılımı da bu sıcaklıktaki kara cisim enerji dağılımıyla benzerdir ve Planck Yasası ile hesaplanabilir. Buna göre, Güneş'in ışınım gücü, yani yüzeyinden tüm uzaya yayılan enerji saniyede yaklaşık $3,83 \times 10^{26}$ Watt'tır. Bu aşamadan sonra Güneş atmosferinden çıkan fotonlar ters kare yasasına uyarak uzaya yayılır ve karşılaştığı cisim ve/veya ortamlarla etkileşir. Füzyon reaksiyonları dikkate alındığında Güneş'in ömrünün yaklaşık 10 milyar yıl olduğu sonucuna ulaşılır. Güneş şu ana kadar çekirdeğindeki yakıtın yaklaşık yarısını tüketmiş durumdadır. Dolayısıyla, yaklaşık 4,5 milyar yıl yaşında olan Güneş'te füzyon reaksiyonlarının daha bu kadar süre devam edebileceği, benzer kütledeki yıldızlarla da karşılaştırılarak, gözlemler ve teorik iç yapı modelleri kullanılarak öngörülmüştür.

Güneş'ten Yer'e Gelen Enerji

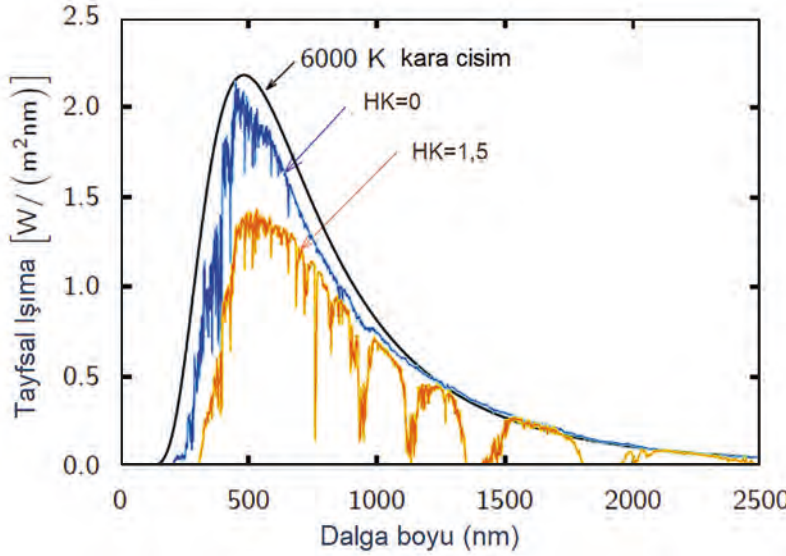
Güneş'in ışınım gücü $3,83 \times 10^{26}$ Watt olarak ölçülüyor. Bu enerjinin önemli bölümü görsel ve kızılötesi bölgede yayınlanır. %1'den az kısmı ise elektromanyetik tayfın radyo, morötesi ve X ışını enerji aralıklarında uzaya salınır. Enerjinin uzayda ters kare yasasıyla elektromanyetik ışınım şeklinde azalarak yol aldığı bilindiğine göre, Güneş'ten yaklaşık 150 milyon km uzaklıktaki Yer'in atmosferinde birim alana ulaşan enerji yaklaşık 1.361 W/m^2 olarak hesaplanır. Bu değere, Güneş sabiti denir. Yer'in yarıçapı dikkate alındığında Yer'in atmosferine bir saniyede düşen yaklaşık enerji $1,75 \times 10^{17}$ Watt gibi çok büyük bir değerdir.



Farklı dalga boylarında Güneş (NASA)



Güneş sabitinin uzay tabanlı radyometrik ölçümlerden çıkarılan 1976-2017 yılları arasındaki değişimi (yeşil: günlük ortalama, kahverengi: 27 günlük hareketli ortalama) (Gueymard, 2018)



Tayfsal enerji dağılımının Yer atmosferi dışında (HK=0, Güneş sabiti 1361 W/m²) ve HK=1,5 olduğu durumdaki gösterimi ve 6.000 K sıcaklığındaki bir kara cismin enerji dağılımıyla karşılaştırılması (Kwarikunda, 2018)

Güneş sabiti, Yer'in Güneş etrafındaki yörüngesinin elips olması nedeniyle yaklaşık $\pm 3\%$ kadar değişir. Bunun yanında, Güneş değişen bir yıldızdır ve parlaklığında çevrimsel değişimler gözlenir. Güneş'in dış katmanlarındaki konveksiyonla enerji aktarımı

ve gözlenen diferansiyel dönme (farklı enlemlerin farklı hızlarda dönmesi), manyetik etkinlik olarak isimlendirilen süreçlerin (yüzeyde soğuk lekeler, sıcak plaj alanları, flare parlamaları, koronal kütle atımları vd.) ortaya çıkmasına neden olur. Güneş'in

manyetik etkinliği ortalama 11 yıllık bir çevrimsel değişimler şeklinde ortaya çıksa da bu değişimin şiddeti sabit değildir. Bu nedenle, değişken manyetik etkinlik süreçleri de Güneş'in enerji çıktısında farklılıklara yol açar. Güneş sabitindeki bu değişimler 40 yıldan uzun süredir uydulardan ölçümler yapılarak takip ediliyor. Manyetik aktivite çevrimi kaynaklı Güneş sabiti değişimi son 30 yıldır $0,1\%$ düzeyinde gerçekleşiyor.

Buraya kadar Güneş ışığının Güneş'in çekirdeğinde üretilmesinden Dünya'nun atmosferine ulaşmasına kadarki bölüme yer verildi. Güneş ışığı Yer atmosferine girdiğinde, yansıma, saçılma ve soğurma süreçleri devrededir. Yer atmosferinde ilerleyen ve yeryüzüne ulaşan enerjiyi tahmin etmek çok güçtür çünkü atmosfer çok dinamik bir katmandır. Gelen enerjinin yaklaşık 50% 'si Yer yüzeyinde soğurulur, geri kalan bölüm ise atmosferden, bulutlardan ve yeryüzünden yansyarak uzaya yönelir. Bir bölümü de atmosferdeki parçacıklar ve bulutlar tarafından soğurulur.

Güneş'ten Yer'e ulaşan enerji hesaplamalarında, fiziksel süreçlere ek olarak, Yer'in dönme ekseninin yaklaşık $23,5$ derece eğik olması, Güneş etrafında basık yörüngede dolanması ve kendi etrafındaki

dönme hareketi de dikkate alınır. Dünya üzerinde farklı enlemlerde, yılın farklı tarihlerinde, gün içindeki zamana göre; Dünya'nın Güneş'in başucu (zenith) doğrultusuyla yaptığı açı ve kuzey-güney doğrultusuyla yatayda yaptığı açı, gelen enerjinin hesaplanmasında kullanılır. Aynı zamanda Güneş için kullanılan bu iki açı, Yer yüzeyinde güneş enerjisi hasadı yapacak teknolojik ekipmanların Güneş'i takip etmesi sırasında kullanılan parametrelerdir. Güneş ışınlarının, Güneş'in gökyüzündeki konumuna göre kat etmesi gereken atmosfer kalınlığı farklılaşır. Hava kütlesi (HK) olarak tanımlanan bu yol, Güneş tam başucu noktasında iken $HK=1$, düşey doğrultuyla 60° açı yaptığında ise $HK=2$ olarak hesaplanır. $HK=1,5$ değeri (baş ucu ile Güneş doğrultusu arasındaki açı yaklaşık 48°), Güneş hücresi verimlilik hesaplarında standart olarak kullanılır. HK değeri 1,5 olduğunda Güneş sabiti yaklaşık 1000 W/m^2 değerine düşer.

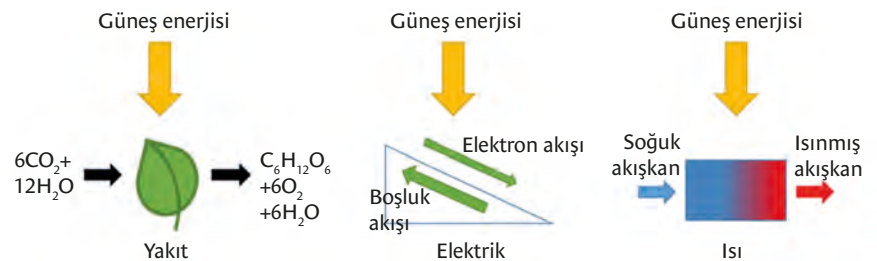
Güneş enerjisinin ne kadarının kullanılacağı, yukarıda söz edilen değişkenlere ek olarak, enerji hasadı yapılacak konum, yükseklik, yüzey örtüsünün özellikleri, yerel hava durumu, hava kirliliği, volkanik aktivite, toz dağılımı, orman yangınları vb. çok sayıda parametreden etkilenir. Güneş enerjisi

hasadında temelde, Güneş'ten doğrudan gelen (dalga boyu 0,3 ila 3 mikro metre) ışınım ve ortamdan yayılan (dalga boyu 3 mikro metreden büyük) ışınım değerlendirilmeye çalışılıyor. Güneş enerjisi hasadının verimli olması için, Yer yüzeyindeki güneş ışınımı ölçülüyor ve sağlanan veri analiz edilerek planlama yapılıyor. Güneş enerjisi ölçümlerinde iki önemli araç kullanılıyor. Pirheliometre (pyrheliometer) doğrudan gelen Güneş ışınımını, piranometre ise dağınık ve yayılmış ışınımı ölçmede tercih ediliyor. Tüm ölçümlere ait değişkenler, bilinenler ve bilinmeyenler birlikte değerlendirildiğinde yeryüzüne ulaşan güneş enerjisinin Güneş sabitine göre çok küçük bir değer olduğu anlaşılıyor. Yer yüzeyinde etkin kullanılabilecek yıllık güneş enerjisi miktarı yaklaşık $60\text{-}250 \text{ W/m}^2$ aralığında. Bu nedenle, uzaydan enerji hasadı son dönemin önemli araştırma alanlarından biri durumunda. (Bu sayıdaki "Uzaydan Güneş Enerjisi" başlıklı yazıyı okuyabilirsiniz.)

Güneş Enerjisi Teknolojileri

İnsanlık güneş enerjisini farklı tekniklerle hasat ederek çok uzun süredir kullanıyor. Son yarım yüzyıllık döneme baktığımızda ise, Endüstri 3.0 ve 4.0, sanayi dönüşümleriyle beraber, teknolojik hasat konusunda önemli yol alındığı görülüyor. Güneş enerjisi kullanımı söz konusu olduğunda, bu enerjinin teorik olarak insanlığın tüm enerji ihtiyacını karşılayabilecek potansiyelde olduğu ancak onu hasat ederken çok sayıda değişkenin devrede olduğunu bilmek ve ona göre planlama yapmak gerekiyor.

Güneş enerjisi; ısı, elektrik ve yakıt formuna dönüştürülüp kullanılabilir. Fotosentezle kimyasal yakıt, fotovoltaik (FV) hücrelerle elektrik enerjisine ve yoğunlaştırma tekniğiyle ısı enerjisine dönüştürme en yaygın olanları. Örneğin,



Güneş enerjisinin üç farklı dönüşümü (Hayat vd. 2018)

bitkiler güneş enerjisini fotosentez yardımıyla yakıta dönüştürüyor. Güneş enerjisinin yaklaşık %11'i doğal fotosentez süreçlerinde kullanılıyor. Fotosentez işleminin enerji verimliliği (Güneş enerjisi dönüşüm verimliliği), soğurulan fotonların yüzdesi ile tanımlanan kuantum verimliliği cinsinden ölçülür. Ticari olarak kullanılan FV hücrelerde ise, Güneş enerjisi dönüşümünde kullanılan cihazın verimliliği doğrudan güç cinsinden verilir. Çoğu bitki fotosentez işleminde Güneş ışığının yalnızca %0,5 ila %1'ini kullanırken, algler ve siyanobakteriler (cyanobacteria) %5 ila %10'nunu kullanabiliyor. FV hücreler ise çok daha yüksek (%20'leri aşan) enerji dönüşüm verimliliğine sahip.

Güneş enerjisi kullanım teknikleri ve buna bağlı teknolojiler temelde, pasif ve aktif sistemler olarak ikiye ayrılıyor. Bu yazıda aktif sistemler ve bağlı teknolojiler üzerine odaklanacağız ancak öncesinde kısaca pasif sistemlere değinmekte fayda var. Pasif teknolojilerde, aktif mekanik veya elektrikli cihazlar kullanılmadan, güneş ışığı ısıya dönüştürülerek oluşturulan hava hareketi sayesinde yaşam alanları ısıtılır, soğutulur veya havalandırılır. Binaların mimari tasarımlarında pasif güneş enerjisi kullanımı önemli enerji tasarrufu sağlar. Bu tür binalarda, güney cephe geniş açıklık cam alan (mümkünse enleme göre eğime sahip tasarım), ısı süreçlere katkısı



bilinen malzeme seçimi, Güneş enerjisinin toplandığı bölümden binanın diğer bölümlerine aktarımı dikkate alınan önemli noktalardır. Mimari özellikler, malzeme seçimi ve oluşturulacak hava kanalları termodinamik yasaları uyarınca gerçekleşen ısı transferini kolaylaştırır ve düşük maliyetlerle yenilenebilir güneş enerjisinden kolaylıkla faydalanmayı sağlar.

İnsanlığın enerji tüketim biçimleri ve yoğunlukları incelendiğinde tüketimin 2/3'ünden fazlası elektrik enerjisi formundadır. Artan elektrik enerjisi ihtiyacının bir bölümüne güneş enerjisi kullanılarak cevap verilmeye çalışılıyor. Güneş enerjisi, FV hücreler (doğrudan) ve ısı süreçler (dolaylı) yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülüyor.

Fotovoltaik (FV) Hücreler

Güneş hücresi veya FV hücre, Güneş ışığı kullanarak fotoelektrik olay yardımıyla enerji üreten yarı iletken bir cihazdır. Fotoelektrik etki ilk olarak 1839'da Fransız fizikçi Edmond Becquerel tarafından gözlemlendi. Becquerel, bazı malzemelerin üzerine ışık düştüğünde az miktarda da olsa elektrik akımı ürettiklerini belirledi. 1905 yılında Einstein, ışığın doğasını ve fotoelektrik etkiyi tanımlayarak bu olayın anlaşılmasında önemli rol oynadı. İlk FV modül ise Bell laboratuvarında 1954 yılında geliştirildi. FV'lerin etkin kullanıldığı ilk alan 1960'lı yıllardan itibaren uzay



temizyurek / Getty Images

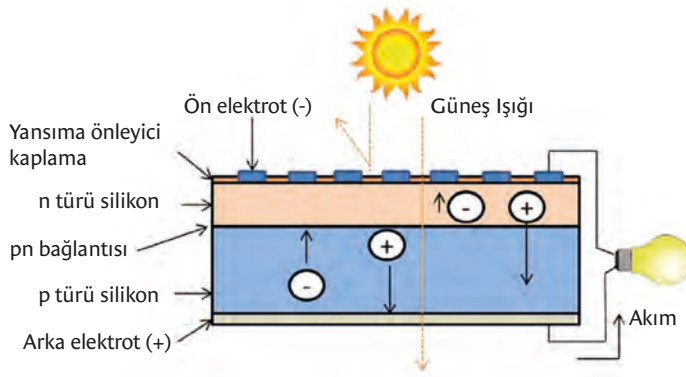
endüstrisi oldu. Uydulara güç sağlamak için FV modüller, güç üreten sistemler olarak ciddi şekilde kullanılmaya başlandı. Farklı teknolojik alanlarda olduğu gibi, uzay teknolojileri tabanlı araştırmalar sayesinde, FV teknolojisi ilerledi, güvenilirliği sağlandı ve maliyetleri düşmeye başladı. Özellikle 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizinin de etkisiyle FV hücre ve güç teknolojilerine yapılan yatırımlar daha da arttı. Dönem dönem dalgalanmalar yaşansa da günümüzde Güneş enerjisinde en yoğun araştırmalar, FV hücreler ve güç sistemleri üzerine gerçekleştiriliyor.

FV Hücrelerin Yapısı ve Türleri

Bir FV hücre, fotoelektrik etkiyle güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren elektronik bir aygıttır. Üzerine ışık düştüğünde, akım ve voltaj gibi elektriksel özelliklerinin değiştiği gözlenir. Güneş pili de denilen bu aygıtlar, güneş panelleri olarak bilinen güç sistemlerinin temel yapı taşlarıdır. Bir güneş pili, silikon gibi yarı iletken malzemeler kullanılarak yapılır. Hücrede, p-n eklemi diye adlandırılan bağlantı, örneğin silikon kullanılması durumunda, bor veya fosfor ile katkılandırılarak oluşturulan

p ve n türü silikonun veya yarı iletkenin bir araya getirilmesiyle üretilir. Bu iki tür yarı iletken birleştirildiğinde; elektronlar pozitif p tarafına, boşluklar da negatif n tarafına hareket ettikçe bağlantı bölgesinde elektrik alan oluşur. Bu alan, negatif yüklü parçacıkların bir yönde, pozitif yüklü parçacıkların ise diğer yönde hareket etmesini sağlar. FV hücreye uygun dalga boyunda veya yeterli enerjiye sahip ışık düştüğünde, gelen enerji yarı iletken malzemenin bir elektronuna aktarılır ve onun iletim bandı olarak adlandırılan daha yüksek bir enerji seviyesine geçmesine yol açar. İletim bandında uyarılmış hâldeki elektronlar, malzeme içinde serbestçe hareket eder. FV hücrede elektrik akımını oluşturan etki, elektronların bu şekildeki hareketidir. Bir FV hücrenin verimliliği ve maliyeti, kullanılan malzemeye bağlıdır. FV hücrelerin teknolojik ilerleme adımlarına bakıldığında, en verimli ve uygun maliyetli malzeme araştırmalarının öne çıktığı görülür.

FV hücreler; birinci, ikinci ve üçüncü nesil hücreler şeklinde sınıflandırılıyor. Geleneksel veya silikon bazlı hücreler olarak da adlandırılan birinci nesil hücreler, polisilikon ve monokristal silikondan üretiliyor. Bunlar ticari olarak sıklıkla kullanılan yapılardır. Her ikisinde de verim %20'leri



Bir FV hücrenin temel yapısı (Sampaio ve Gonzalez, 2017)

aşar. Monokristalli hücrelerde verim biraz daha yüksek olsa da polikristal içeren FV'ler, daha uygun maliyet ve kristal yapıdaki problemlerin daha az olmasıyla bu verim farkını telafi edebilir. Birinci nesil FV'ler, düşük sıcaklıklarda daha verimlidir ve aynı miktarda gücü üretmek için daha az alana ihtiyaç duyar. Bu hücrelerde, sıcaklık yükseldikçe performans düşer.

İnce film hücreleri, ikinci nesil FV hücreleri olarak kabul edilir. Bu hücrelerde daha az silikon malzeme kullanıldığından, birinci nesle göre daha düşük maliyetlidir ancak düşük verimlilikleri nedeniyle pazarda küçük payları vardır. İnce film hücrelerin farklı türleri bulunuyor. Bunlar arasında amorf silikon içerenler, düşük miktarda malzeme kullanımları ve rulo biçiminde üretilibilmeleri nedeniyle öne çıkıyor. Amorf silikon hücrelerin en büyük dezavantajı, düşük verimlilikleri (yaklaşık %10) ve zamanla ortaya çıkan elektriksel kararsızlıklarıdır. Kadmiyum tellür (CdTe) ince film güneş pillerinin verimlilikleri

(%20 mertebesinde) daha yüksektir. Daha düşük maliyetli ve daha hızlı üretilbildiklerinden pazarda silikon tabanlı hücrelere alternatif oluştururlar. Öte yandan, tellür üretiminin sınırlı olması ve zehirli (toksik) madde içermeleri, CdTe hücrelerin kullanımındaki dezavantajlardır. Diğer bir uygulama olan bakır indiyum galyum selenid (CIGS) ince film hücrelerinin verimliliği ise laboratuvar ölçeğinde %20'leri aşarken ticari üretimlerde bu değer %14'lere kadar geriler.

Üçüncü nesil FV hücreler, daha yüksek verimlilikleri ve çevre dostu olmaları nedeniyle öne çıkar. Bu uygulamalarda, ikinci nesil hücrelere göre güç maliyetlerinin %50 ile %80 arasında azaltılması amaçlanıyor. Maliyetlerin yanı sıra birinci ve ikinci nesil hücrelerde kullanılan malzemelerin az bulunması, bazı yapıların esnek olmaması vb. nedenlerle, üçüncü nesil olarak adlandırılan nanokristal tabanlı, boya duyarlı, çok eklemlili ve organik güneş hücreleri yeni bir nesil olarak geliştiriliyor.

Birden fazla aktif katmana sahip çok eklemlili hücrelerde, her katman farklı dalga boyuna duyarlı olacak şekilde geliştiriliyor, böylece güneş ışığının farklı enerji aralıklarından da yararlanmak hedefleniyor. Çok eklemlili yapılarda katmanlar; organik, inorganik veya her ikisinin de kullanıldığı hibrid şekilde oluşturulabilir. Geleneksel p-n bağlantılı güneş hücresinde teorik verim %30'lar civarında iken, iki eklemlili hücre için bu sınır %42, üç eklemlili ise %48 dolaylarındadır. Bununla birlikte, yoğunlaştırıcı sistemler kullanılarak bu verim değerleri arttırılabilir. Galyum arsenit (GaAs), germanyum (Ge) ve Galyum indiyum fosfit (GaInP) p-n bağlantılarını temel alan çok eklemlili hücreler, hem araştırmalarda hem de pazarda öne çıkan örneklerdir. Eklemlili FV'lerde teknolojik gelişmeler çok hızlı gerçekleşiyor ve laboratuvar denemelerinde %30'ları aşan verimlilik örnekleri duyuruluyor.

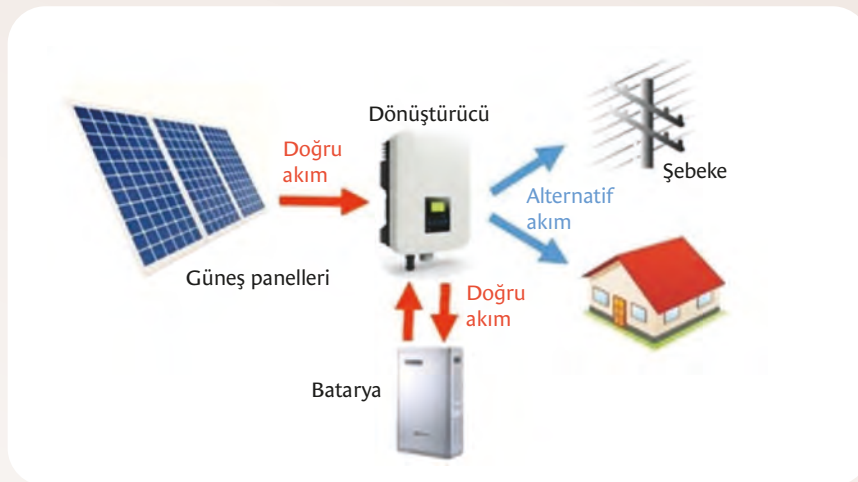
Nanokristal tabanlı güneş hücreleri veya kuantum nokta hücreler, yığın hâlde görülemeyen nm mertebesinde ortaya çıkan bazı özelliklerin avantaj olarak kullanıldığı teknolojilerdir. Boyutlara ve nano malzemeye göre farklı optik ve elektronik özelliklere sahiptirler. Kuantum noktalar, silikon ve germanyum gibi elementlerden üretildiği gibi CdS ve CdTe gibi bileşiklerden de üretilir. Organik FV hücreler, çözülebilen ve çözelti

ile işlenebilen karbon bileşikleriyle oluşturulan hafif yapılardır. Organik FV hücrelerde, organik ışık yayan diyot teknolojilerinde olduğu gibi, elektriği ileten ve üreten organik polimerler ve moleküller kullanılır. Organik moleküller, farklı özelliklerde sentezlenebildiği için farklı renklerde veya şeffaf olabilir. Bu nedenle, pazarda pencere, bina giydirme vb. farklı uygulamalarda kullanılması planlanabilir.

FV'lerde son dönemin önemli uygulamalarından biri de boya duyarlı güneş pilleridir. Boya duyarlı hücreler, çoğu FV'lere göre avantajlıdır. Ucuz, daha az toksik malzeme kullanımı, dolaylı ışık ve geniş sıcaklık aralığında çalışma ve esneklik öne çıkan özelliklerindedir. Bu hücreler, geleneksel p-n bağlantılı yapılardan farklı olarak elektrokimyasal pildir. Bu yapılarda, geniş bant aralığına sahip TiO_2 , SnO_2 gibi bir yarı iletken üzerine bir boya molekül tabakası uygulanır. Farklı boya renklerinin sentezlenmesi ve boya renklerinin farklı yarı iletkenlerle denenmesi, bu alandaki önemli

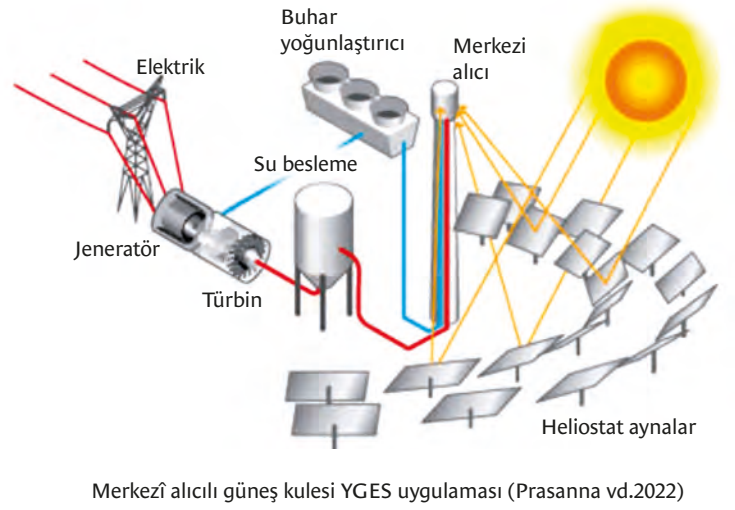
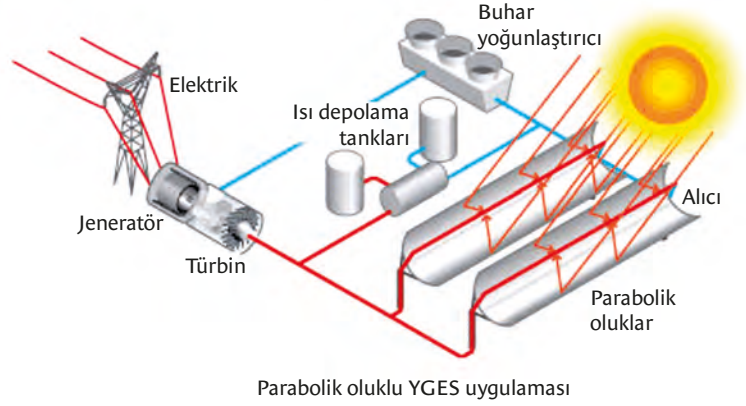
araştırma alanlarıdır. Boya duyarlı hücrelerin bir diğer uygulaması ise katı elektrolit kullanılan "perovskit" FV pilleridir. Organik ve inorganik iki farklı çeşitte uygulaması olan bu pillerin verimlilikleri laboratuvar ortamında %20'leri aşmıştır.

FV hücreler üzerine yapılan yoğun Ar-Ge çalışmaları, günlük kullanıma sunulduğunda, hücreler modüllere, modüller de panellere dönüştürülüyor. FV paneller de ihtiyaca göre paralel ve/veya seri bağlanarak istenilen güç üretiliyor. Kullanılacak FV tabanlı güç sistemi kW mertebesinde güçlerde ev kullanımlarında, şebekeye bağlı veya şebekeye bağlı olmadan doğrudan ihtiyaca cevap verecek şekilde (ana ekipmanlar: FV paneller, dönüştürücü, akü ve kontrol sistemleri, sayaçlar, bağlantı ekipmanları vd.) planlanabiliyor. Bunun yanında, kW'dan MW'a ulaşan farklı güçlerde güneş enerjisi santralleri (GES) kurularak enerji tüketiminde yenilenebilir enerji girdilerinin oranları gün geçtikçe arttırılıyor.



Yoğunlaştırılmış Isıl Güneş Enerjisi Sistemleri

Güneş'ten gelen enerjinin ısı teknikler kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlerden bazıları güneş enerjisinin yoğunlaştırılması tekniğiyle geliştiriliyor. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinde (YGES), güneş ışığı buhar veya sıcak hava

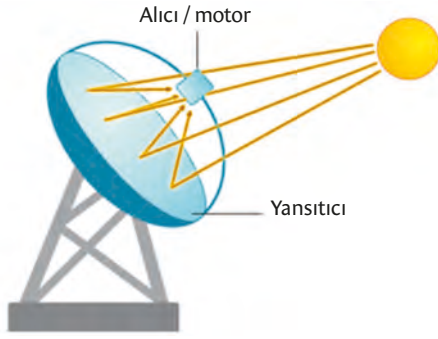


üretmek için yoğunlaştırılarak güçlendiriliyor. Oluşturulan buhar veya sıcak hava, iyi bilinen geleneksel tekniklerdeki gibi, önce hareket sonra da elektrik enerjisine dönüşüm için kullanılıyor. YGES'lerden elektrik üretimi dışında suyun tuzdan arındırılması, gıda işleme, kimyasal üretim ve mineral işleme süreçlerinde de faydalanılıyor. Öne çıkan dört farklı YGES teknolojisi bulunuyor: Parabolik oluklu, çanaklı, doğrusal "fresnel" yansıtıcı sistemler ve merkezî alıcılı güneş kuleleri.

Parabolik oluklu YGES'lerde, parabolik oluklu güneş enerji toplayıcıları, buhar üretim veya ısı aktarım sistemi, buhar türbini, jeneratör ve ısı depolama alanları ana bileşenlerdir. Parabolik toplayıcıdaki yansıtıcı plaka ile soğurucu tüpteki sıvının sıcaklığının artırılması sağlanır. Soğurucu tüp, ısı kaybını en aza indirmek için camla kaplanır. Güneş'ten gelen ve yoğunlaştırılan ışınım, cam tüpten geçerek soğurucu kaplamaya çarpar ve sıvıyı ısıtır. Parabolik yoğunlaştırıcı, genellikle Güneş'i takip eden bir mekanizmaya

sahiptir. Dünya üzerinde en yaygın ısı elektrik üretim santrallerinden olan parabolik oluklu güç sistemlerinde akışkan sıcaklığı 500 °C'lara ulaşabilir. California'daki 354 MW gücündeki SEGS (Solar Energy Generating Systems) ve İspanya'daki 200 MW gücündeki Solaben Güneş Güç İstasyonu bu tür santrallere örnek olarak verilebilir.

Merkezî alıcılı güneş güç kulelerinde, "heliostat" denilen çok sayıda hareketli ayna sayesinde güneş ışığı istenilen konuma yönlendiriliyor. Bu aynalar, gün



Çanaklı YGES uygulaması (Prasanna vd. 2022)

nedenle, çanak-motor sisteminde verim %30'lara ulaşabiliyor.

Doğrusal Fresnel toplayıcılarda, bir dizi uzun, düz veya küçük eğimli ayna kullanılır. Bu

aynalar, güneş ışığını sabit bir alıcının etrafında yoğunlaştırmak için farklı açılarda yerleştirilir. Alıcı, güneş ışığını soğurma kapasitesi yüksek malzemeden üretilen uzun bir tüptür. Yüksek sıcaklıklara ulaşan tüp içindeki akışkan, ısıyı geleneksel bir elektrik üretim sistemine aktarır. Parabolik oluklara göre daha düşük maliyetlidir.

YGES alanındaki gelişmeler incelendiğinde ve maliyet-verim dengeleri dikkate alındığında, parabolik oluklu ve merkezî alıcılı güç sistemleri öne çıkıyor. Dünya genelinde de MW mertebesinde güçlere sahip santrallerin sayısı giderek artıyor.

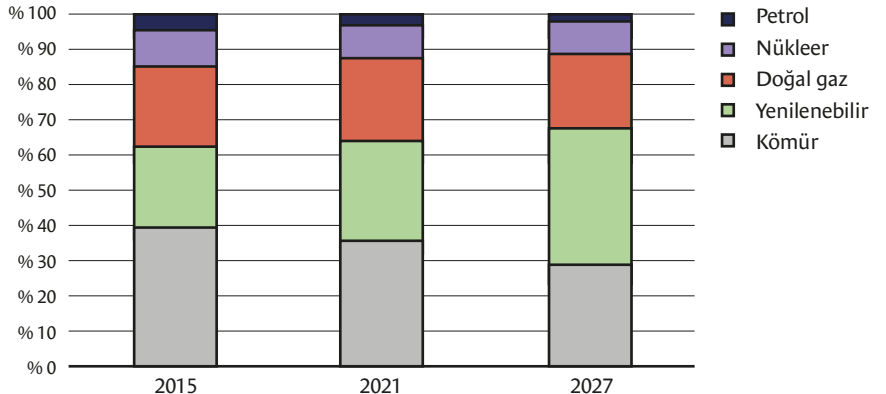
Dünyada ve Türkiye'de Güneş Enerjisi Kullanımı

Dünyada enerji talebinin artışı yakından takip ediliyor. Son yarım yüzyıl boyunca, elektrik tüketim miktarlarının neredeyse dört kate yakın oranda arttığına dair çeşitli kuruluşların raporları bulunuyor. Küresel ısınma, çevre sorunları ve enerji ihtiyacı birlikte değerlendirildiğinde; temiz, güvenilir, bol ve yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarının kullanımının önemi daha da artıyor. Dünya ölçeğinde sera gazlarının salınımının azaltılmasına ilişkin hedefler gösteriliyor. Bu hedeflerin gerçekleştirilmesinde, yenilebilir enerji kaynaklarının ve özellikle güneş enerjisinin önemli pay alacağı öngörülüyor.

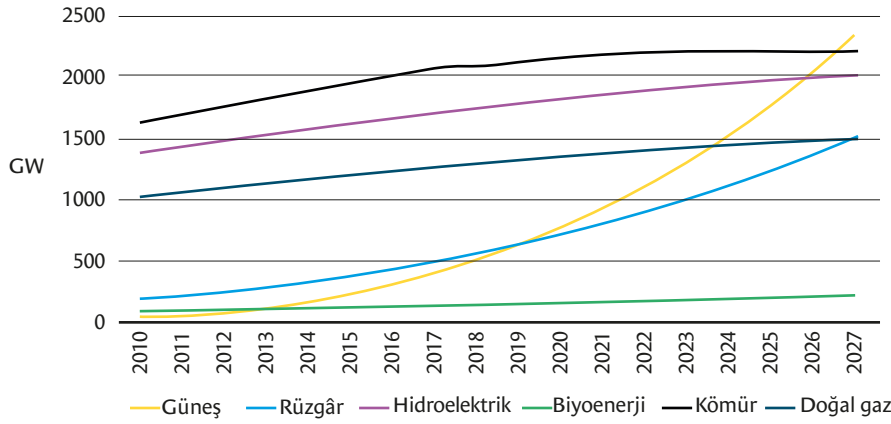
Gelişen teknolojilerin de getirdiği tüketim biçimleri, enerjinin elektrik enerjisi olarak tüketim

boyunca Güneş'i takip ediyor. Aynalardan yansıyan güneş ışığı, merkezî bir kuleye yerleştirilmiş alıcı üzerine yoğunlaştırılıyor. Alıcıda, bu enerjiyi soğuran ve daha sonra ısı enerjisinin elektriğe dönüştürüldüğü güç sistemine taşıyan sıvı bulunur. Güneş kulelerinde ayrıca gün boyu kesintisiz elektrik üretimi için depolama sistemi yer alır. Geleneksel kulelerde, termal sıvı olarak su/buhar kullanılırken, modern kulelerde erimiş tuz kullanılır. Bu kulelerde, 800 °C'ları aşan sıcaklıklar elde edilebilir. Tipik bir merkezî alıcılı güneş kulesinde verim, %15 ile %25 arasındadır. Fas'ta 150 MW ve Şili'de 110 MW gücündeki merkezî alıcılı santraller, bu alandaki önemli örneklerdir.

Güneş ışınlarını yoğunlaştırmak amacıyla çanak yapılar kullanan teknolojiler de bulunuyor. Yansıtıcı yüzeye sahip çanağın odak noktasında bir alıcı yer alıyor. Alıcı bir "stirling" motoru veya gaz türbini olabilir. Stirling motor içeren sistemlerde, ısı aktarımı için sıvıya ihtiyaç duyulmadığından ısı kayıpları çok daha düşüktür. Bu



2015 ve 2021 yılları için enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payları ve 2027 yılı tahmini (Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2022 yılı Dünya Enerji Görünümü raporu)



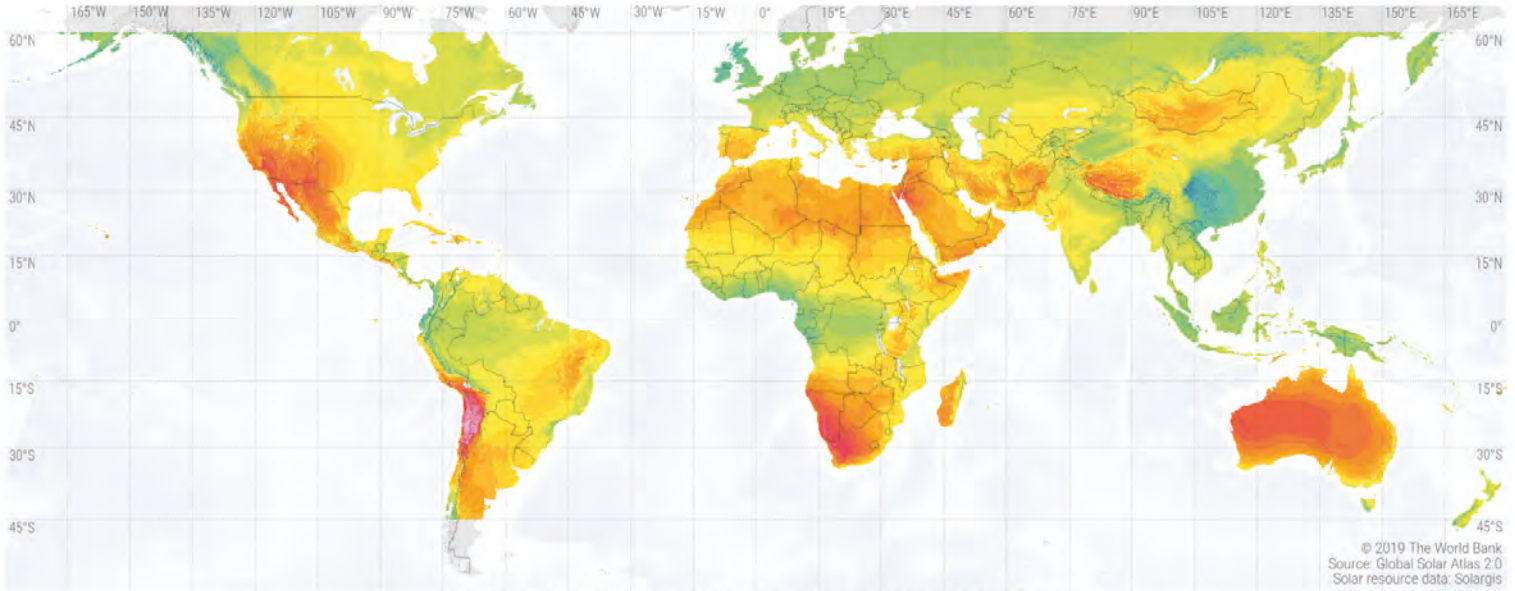
Eneri kaynaklarının kümülatif güç katkılarının yıllara göre değişimi (Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2022 yılı Dünya Enerji Görünümü raporu)

toplam enerji üretimindeki rolü son beş yılda önemli ölçüde arttı. Bu artışın, azalan maliyetlerle birlikte ivmelenerek devam edeceği öngörülüyor.

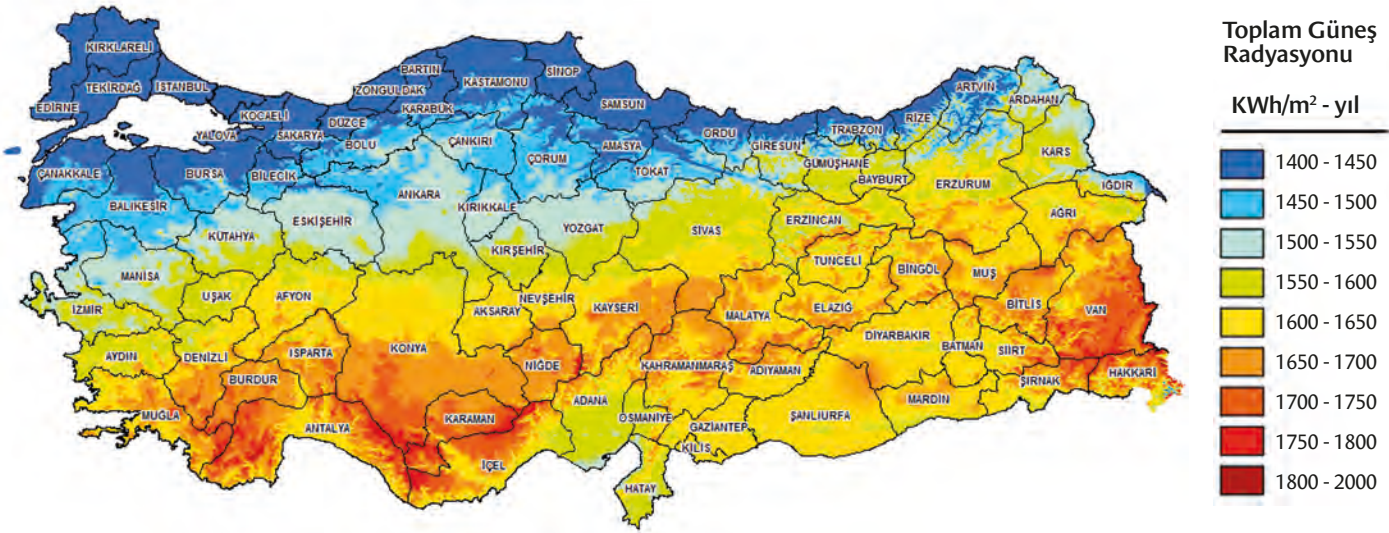
Dünyada güneş enerjisi potansiyeli yüksek ülkeler ve bölgeler (kara alanları), yeryüzüne ulaşan ve ölçülen güneş enerjisi değerleri de dikkate alındığında; Kuzey ve Güney Afrika, Ortadoğu ülkeleri, Amerika kıtasının batısındaki bazı bölgeler, Avustralya, Güney Asya bölgesinde bazı ülkeler (örneğin Pakistan, Afganistan, Çin'in güneyi) olarak sayılabilir. Güneş enerjisinin toplam elektrik üretimine katkısı 2015 yılında %1 iken, 2021 yılı sonunda %4'ler mertebesine

oranını gittikçe arttırıyor. 2015-2021 yılları arasındaki dönem incelendiğinde geleneksel kaynaklar olan kömür ve petrolün elektrik enerjisi üretimindeki kullanım oranının düştüğü ve yerini yenilebilir kaynakların aldığı görülüyor. Uluslararası

Enerji Ajansına göre, 2021 yılı sonu itibarıyla, yenilebilir kaynakların elektrik üretimindeki oranı %30 civarında. 2027 yılına kadar bu oranın %40'lar seviyesine çıkacağı tahmin ediliyor. Güneş enerjisinin, özellikle de FV kaynaklı üretimin



Dünya üzerindeki farklı bölgelere doğrudan ulaşan güneş enerjisi miktarı



Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)

ulaştı. Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde ağırlık olarak FV ve YGES teknolojileri tercih ediliyor. Kişisel kullanımlardan GES'lere doğru hızla yaygınlaşan FV kullanımının oranı gittikçe artıyor. Aktif FV GES kapasitelerine bakıldığında Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Almanya önde gelen ülkeler olarak göze çarpıyor. YGES teknolojilerinin kullanımına bakıldığında ise İspanya ve Amerika Birleşik Devletleri 1,500 MW üzerinde kurulu güçle ön sırada görünüyor.

Türkiye, önemli güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkelerden biri. T.C. Enerji Bakanlığı tarafından hazırlanan "Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)" verilerine göre, ortalama yıllık toplam ışıınım değeri yaklaşık 1.527 kWh/m²'dir.

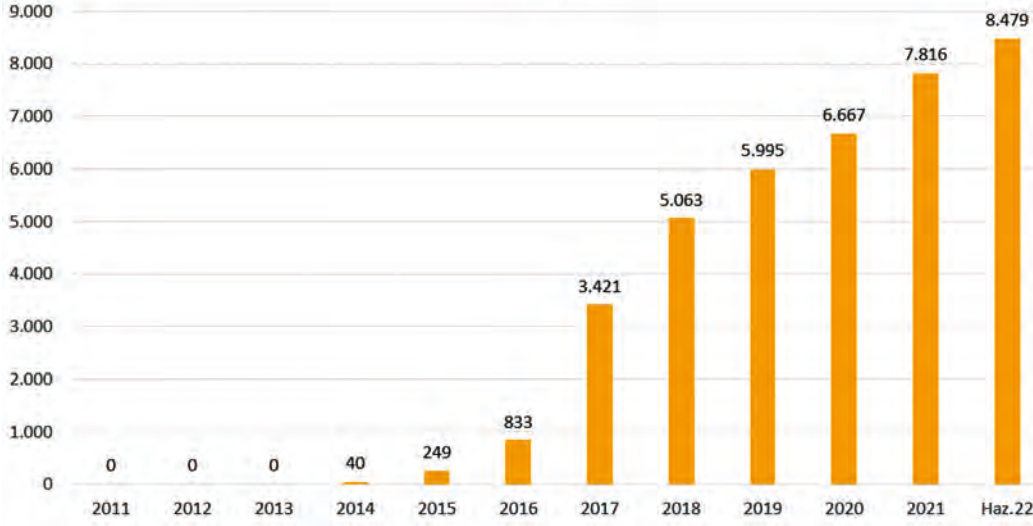
Haziran 2022 sonu verilerine göre, güneş enerjisi kurulu gücümüz 8.479 MW'a ulaştı. Bu güç, toplam kurulu gücümüzün %8,35'ine karşılık geliyor. Dünya ölçeğinde, güneş enerjisi kurulu güçler değerlendirildiğinde (25 adedi 10 MW gücün üzerinde 650'den fazla santrale) ilk on beş ülke arasında yer alıyoruz.

Sonuç olarak;

Dünya'daki enerji krizleri, küresel ısınma, çevre sorunları ve artan enerji ihtiyacı dikkate alındığında; yenilenebilir, temiz, güvenilir ve kaynağı bol olan güneş enerjisi en önemli alternatiflerden biri olarak değerlendiriliyor. Teknolojik gelişmelerle beraber, teknolojik enerji hasadı alternatiflerinin de artacağını ve maliyetlerin hızla düşeceğini öngörmek zor değil. Özellikle FV tabanlı teknolojilerdeki gelişmeler

çok hızlı gerçekleşiyor. Güneş enerjisi teknolojileri alanında, ihtiyaç duyulan Ar-Ge ve inovasyon tabanlı araştırmalar neler olabilir diye bakıldığında, FV hücrelerin verimliliklerinin artırılması, FV hücre malzemelerinin geliştirilmesi ve çeşitlendirilmesi, FV hücrelerde kullanılan toksik malzemelerin en aza indirilmesi, YGES'ler için yüksek ısı kapasitesine sahip ısı transfer akışkanlarının keşfedilmesi ve ısı kayıplarının azaltılması, verimli ve güvenilir enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesi, güneş enerjisinin günlük ve yüksek maliyetli yatırım getirmeyen kullanım çeşitliliğinin artırılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve özellikle güneş enerjisinin önemini anlaşılması ve kullanım farkındalığının artırılması için uygulamalı

KURULU GÜÇ (MW)



Türkiye'nin güneş enerjisine dayalı kurulu gücünün değişimi (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı)

eğitim tabanlı çalışmalar aklı ilk gelen bazı konu başlıkları. Türkiye'de de güneş enerjisi teknolojileri alanında, ağırlıklı olarak üniversiteler bünyesindeki (örneğin, ODTÜ Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi ile Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü) araştırmalar gün geçtikçe hızlanıyor ve önemli

araştırmalar yayımlanıyor. Bu konuyu detaylıca ele almak üzere ileride başka bir yazıda değerlendireceğiz.

İnsanlık güneş enerjisini var olduğundan bu yana aktif olarak kullanılıyor. Farklı bir açıdan bakıldığında, fotosentezi model olarak oluşturulan ve geliştirilen

teknolojiler, doğal nükleer reaktör olan Güneş'in füzyon reaksiyonları model alınarak denenen yapay füzyon vd. gelinen noktada Güneş ve enerjisinin önemini gösteriyor. Bize yaklaşık 150 milyon km uzaklıkta bulunan Güneş'in enerjisinden daha fazla faydalanmak için yeni teknolojiler geliştirmeye devam edeceğiz. ■

Kaynaklar

- Hayat, M.B., Ali, D., Monyake, K.C., Alagha, L., Ahmed, N., Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future, *Int J Energy Res.*, 43, 1049–1067 (2019).
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A.A., Kim, Ki-H., Solar energy: Potential and future prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900 (2018).
- Chen, C.J., *Physics of Solar Energy*, John Wiley & Sons, Inc. (2011).
- Gueymard, C.A., A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations, *Solar Energy*, 168, 2-9 (2018).
- Kumar, A., Predicting efficiency of solar cells based on transparent conducting electrodes, *Journal of Applied Physics*, 121, 1 (2017).
- Parasanna, M., Pradeep K. V., Rishi S. S., Mukesh, K., A Review Study on Solar Energy and Its Various Techniques for Electricity Generation, *Nucl Ene Sci Power Generat Techno.*, 11:4 (2022)
- Kwarikunda, N., *Solar Energy*, African School of Fundamental Physics and Applications, Lecture notes, bit.ly/3Hfsge2 (2018).
- Sampai PG.V., Gonzalez, M.O.A., Photovoltaic solar energy: Conceptual framework, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590–601 (2017).

- bit.ly/3J200lj
- bit.ly/3wal9Nk
- bit.ly/3XCfwn4
- bit.ly/3iN6Awg
- bit.ly/3wal9Nk
- bit.ly/3w9Z3L2
- bit.ly/3Xm5cj6
- bit.ly/3GR0jHM
- bit.ly/3wfirmYB
- bit.ly/3Hg3PNC
- bit.ly/3Wm7Ggj
- bit.ly/3Wf8aod
- bit.ly/3WmyOLU
- bit.ly/3GNONx6
- bit.ly/3kg48yC