

# Yenilenebilir Enerjinin Depolanması Problemine Çevreci Çözüm: Termofotovoltaik Sistemler

Dr. Tuba Sarıgül [ TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Günümüzde enerji ihtiyacının büyük bölümü fosil yakıtlardan karşılanırsa da kurulum ve işletme maliyetlerinin giderek düşmesi sayesinde yenilenebilir enerji sistemleri her geçen gün yaygınlaşıyor. Ancak güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından kesintisiz bir şekilde enerji elde edilemiyor. Bu nedenle bu kaynaklardan elde edilen enerji miktarının tüketim için ihtiyaç duyulan enerji miktarından fazla olduğu durumlarda, fazla enerjinin depolanması gerekiyor. Çünkü üretilen ihtiyaç fazlası enerji şebeke sistemlerinde probleme neden olabiliyor. Ayrıca ihtiyaç fazlası enerjinin depolanması sayesinde güneşten enerji elde edilemediği gece saatlerinde ya da rüzgârdan enerji edilemediği rüzgârsız dönemlerde tüketicilerin enerji ihtiyaçları kesintisiz olarak karşılanabiliyor.



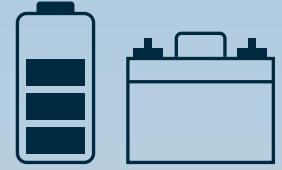


**P**iller günümüzde enerji depolamanın en bilinen yollarından biri. Bunun dışında enerjinin depolanmasında farklı teknolojiler de kullanılıyor. Suyun daha alçaktaki bir rezervuardan daha yüksekte bulunan bir rezervuara pompalanarak enerjinin potansiyel enerji olarak depolandığı pompaj depolamalı hidroenerji sistemleri, enerjinin ısı enerjisi olarak depolandığı termal depolama sistemleri bu yöntemlerden bazıları. Termal enerji depolama sistemleri diğer enerji depolama yöntemleri arasında maliyet ve uygulama kolaylığı açısından son derece avantajlı. Bugün bu sistemler özellikle konutlarda, seralar gibi tarımsal uygulamalarda ve küçük ölçekli endüstriyel işletmelerde ısınma ihtiyacını karşılamakta kullanılıyor. Son yıllarda üretim yöntemlerinde

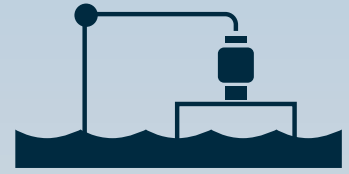
ve verimliliğinde önemli gelişmeler yaşanan termofotovoltaik sistemler ise termal depolama yöntemlerinin büyük ölçekte uygulamaya geçebilmesine imkân sağlıyor. Ancak termal depolama yöntemleriyle entegre edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının, maliyet ve verimlilik açısından fosil yakıtlarla rekabet edebilmesi için termofotovoltaik sistemlerin verimlilik değerinin belirli bir eşik değere ulaşması gerekiyor.

Termofotovoltaik teknolojiler ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde de kullanılabilir. Uluslararası Enerji Ajansının (IEA) verilerine göre günümüzde küresel ölçekte enerji ihtiyacının yaklaşık %80'i fosil yakıtlardan sağlanıyor. Fosil yakıtlardan elektrik enerjisi elde edilirken yanma sonucu

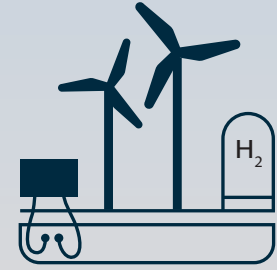
## Enerji Depolama Teknolojileri



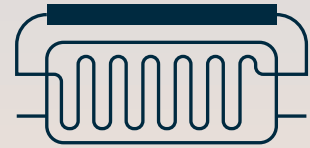
Elektrokimyasal Batarya



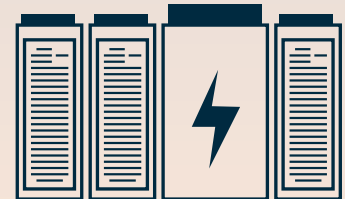
Mekanik Pompaj Depolamalı Hidroenerji



Kimyasal Hidrojen



Termal



Elektrik Süper Kapasitör

açığa çıkan ısı çoğunlukla buhar türbinleri aracılığı ile elektriğe dönüştürülüyor. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan geleneksel buhar türbinlerinin verimlilik değeri ise ortalama %35 düzeyinde.

Buhar türbinlerinin çok sayıda hareketli parçadan oluşması, bakım ve işletme maliyetlerini artırıyor. Ayrıca çalışabileceği en yüksek sıcaklığın bir üst limiti bulunuyor. Isı enerjisini yüksek verimlilikle doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen termofotovoltaik sistemler ise hem yüksek sıcaklıklarda buhar türbinlerine göre daha verimli çalışabiliyor hem de hareketli parçasının bulunmaması nedeniyle kurulum ve işletme maliyetleri daha düşük.

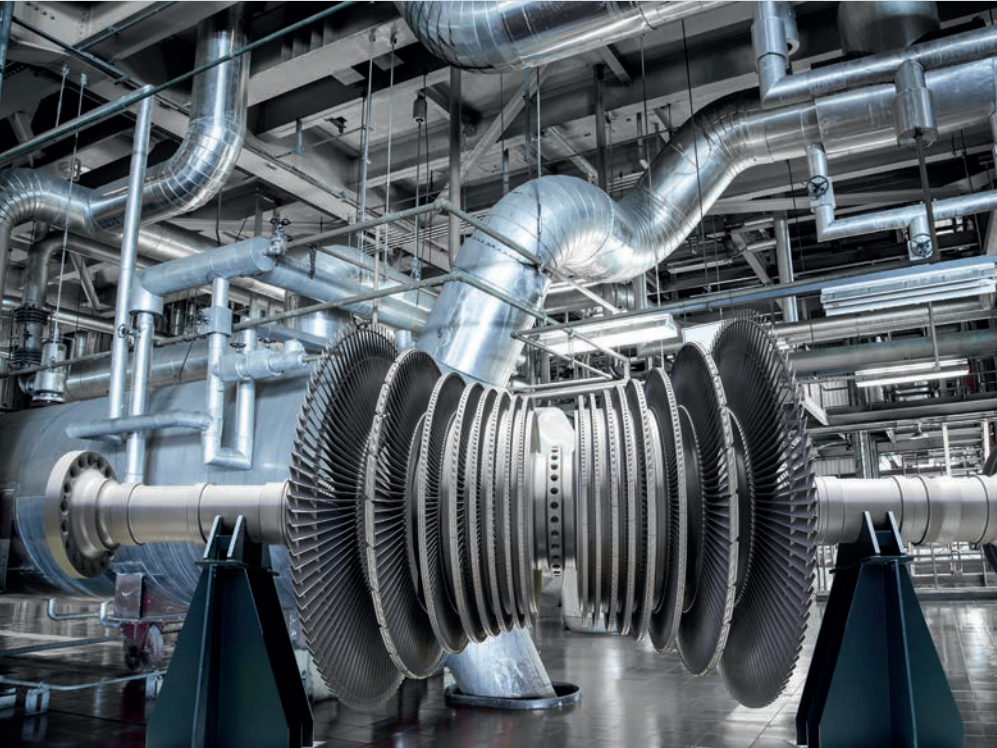
Termofotovoltaik sistemlerin enerji dönüşümünde ve enerji depolanmasında kullanılabilmesi için verimlilik değerinin ve güç yoğunluğunun yüksek olması gerekiyor. Bu sistemlerde verimlilik, termofotovoltaik hücreden elde edilen güç miktarının sıcak cisimden ışıının doluyla transfer edilen ısı miktarına oranı olarak tanımlanıyor. Enerji güç yoğunluğu ise birim alandan elde edilen güç miktarı. Geçmişte farklı malzemelerden üretilen termofotovoltaik hücrelerde elde edilen maksimum ısı-elektrik dönüşüm verimi yaklaşık %30 civarındaydı.

Yakın zamanda ise Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) ve ABD Ulusal Yenilenebilir

Enerji Laboratuvarı (NREL) araştırmacıları, termofotovoltaik sistemleri kullanarak ısı enerjisini %41 verimle elektrik enerjisine dönüştürmeyi başardı. Bu değer, buhar türbinlerinin enerji dönüşüm verimi ile karşılaştırılabilir ölçekte. Sıcaklığı 1900 °C ila 2400 °C arasında olan ısı kaynaklarından elektrik enerjisi elde edilmesini sağlayan teknoloji, ısı enerjisinin doğrudan elektrik enerjine dönüştürülmesinde ve büyük ölçekteki ısı depolama sistemlerinde kullanılabilir. Araştırmanın sonuçları *Nature* dergisinde yayımlandı.

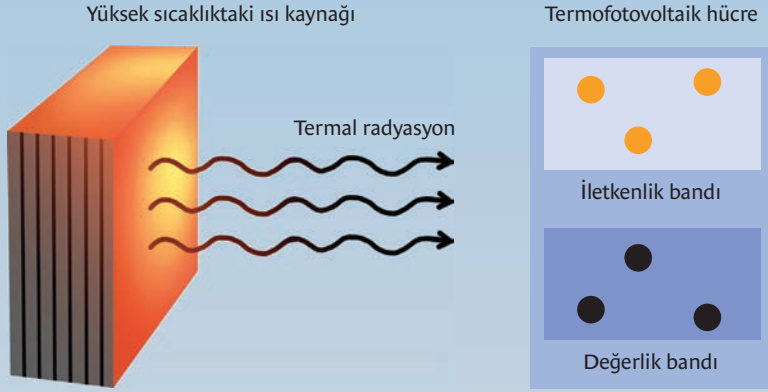
## Termofotovoltaik Sistemler Nasıl Çalışır?

Isı yayan sıcak bir kaynaktan ve fotovoltaik hücreden oluşan termofotovoltaik sistemler, güneş gözelerine benzer şekilde çalışıyor. Güneş gözelerinde bulunan fotovoltaik hücreler Güneş'ten gelen elektromanyetik radyasyonun yani güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlıyor. Termofotovoltaik sistemlerde ise sıcak kaynaktan yayılan daha uzun dalga boyundaki elektromanyetik radyasyon (büyük oranda kızılötesi ışınlar) fotovoltaik hücreler tarafından soğurularak elektrik enerjine dönüştürülüyor.



Elektrik üretiminde kullanılan bir buhar türbini

## Termofotovoltaik Sistemler



elektromanyetik dalgaların yaklaşık %93'ünü ısı kaynağına geri yansıtıyor. Bu sayede fotovoltaik hücre tarafından elektrik enerjisine dönüştürülemeyen fotonlar, ısı kaynağı tarafından tekrar soğurularak ısı kaynağının sıcak kalmasına yardımcı oluyor.

Altın levhanın altında ise ısı emici bir katman yer alıyor. Bu katman, termofotovoltaik hücreye gelen elektromanyetik radyasyonun fotovoltaik hücre tarafından soğurulmayan ya da ısı kaynağına geri yansıtılmayan kısmının ısıya dönüşerek hücrenin aşırı ısınmasını, dolayısıyla verimlilik kaybına neden olmasını engelliyor.

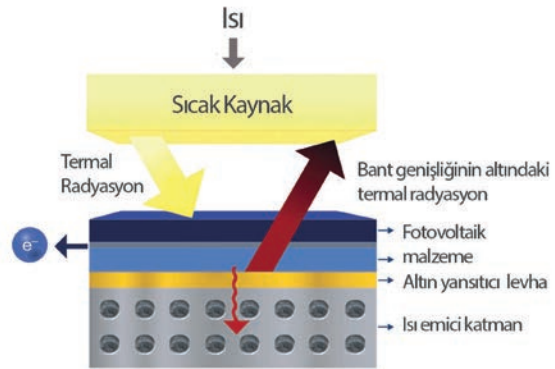
Bilim insanları araştırma kapsamında farklı fotovoltaik malzemelerden oluşan iki farklı hücre tasarladı. Bu hücrelerden biri bant genişliği 1,2 eV olan AlGaInAs ve bant genişliği 1,0 eV olan GaInAs malzemeden, ikinci ise bant genişliği 1,4 eV olan GaAs ve bant genişliği 1,2 eV olan GaInAs malzemeden üretildi.

Geleneksel termofotovoltaik sistemlerde çoğunlukla sıcaklığı 1300 °C'nin altında olan ısı kaynakları ve bant genişliği görece düşük olan InGaAs, GaSb gibi malzemeler birlikte kullanılıyor. Çünkü ısı kaynağının sıcaklığı düştükçe ısı kaynağından yayılan elektromanyetik radyasyonun dalga boyu daha uzun dalga boylarına kayıyor.

MIT araştırmacıları ise geliştirdikleri termofotovoltaik sistemde bant genişliği 1,0 elektronvolt'un üzerinde olan malzemeler kullandı. Bu sayede sıcaklığı 2000 °C'nin üzerinde olan ısı kaynaklarından yüksek verimlilikle elektrik enerjisi elde edilmesi amaçlandı.

MIT araştırmacıları tarafından yeni geliştirilen hücrede, fotovoltaik özellikte iki farklı malzeme katmanı bulunuyor. Bu katmanların altında yansıtıcı özellikte bir altın levha yer alıyor. Bu katman, dalga boyu fotovoltaik katmanın bant genişliğinin altında olan

Bant genişliği, bir elektronun değerlik bandından iletkenlik bandına geçmesi için gerekli olan minimum enerji miktarını ifade eder. Bir fotonun, fotovoltaik hücrelerdeki yarı iletken malzemeler tarafından soğurulabilmesi için enerjisinin bant genişliğine eşit ya da daha büyük olması gerekir. Elektron uyarıldığında malzemede oluşan yük taşıyıcılar elektrik akımının ortaya çıkmasını sağlar.

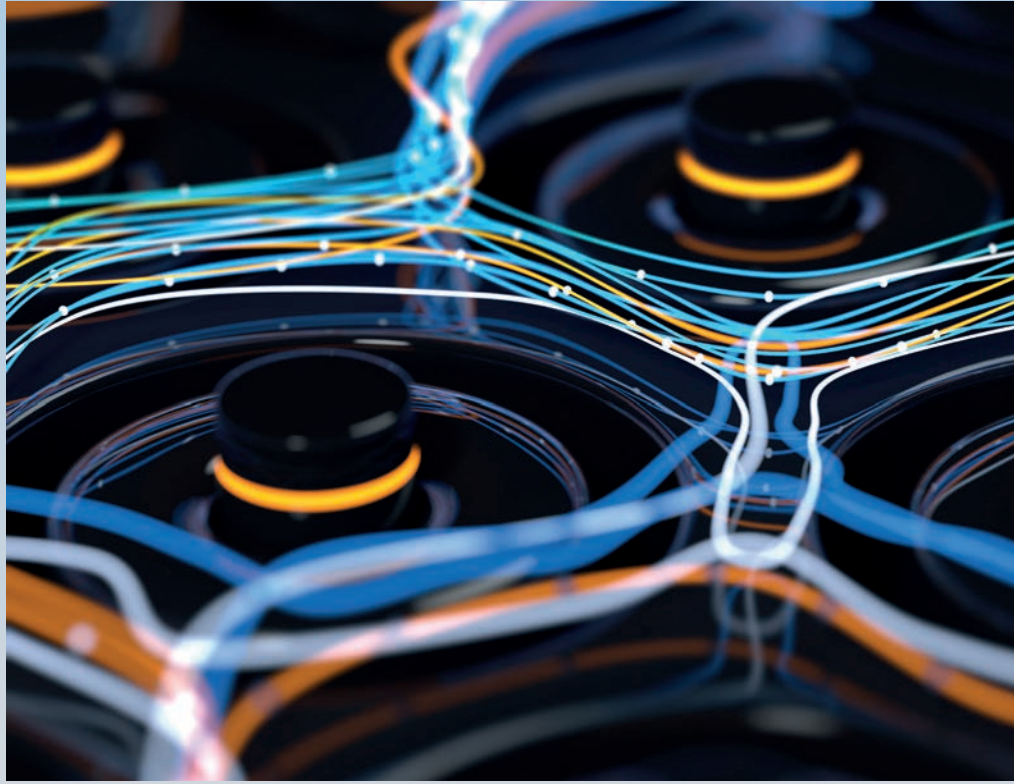


MIT araştırmacıları tarafından yeni geliştirilen termofotovoltaik hücrenin yapısı

Sonuçta bant genişliği 1,4 eV/1,2 eV olan GaAs-GaInAs hücre kullanılarak, 2400 °C sıcaklıktaki ısı kaynağından bugüne kadar geliştirilen termofotovoltaik hücreler arasında en yüksek verimliliğe (%41,1) ulaşıldı. Bu hücre tasarımında ortalama verim 1900 °C -2400 °C arasındaki sıcaklıklarda %36,2 olarak elde edildi. Bant genişliği 1,2 eV/1,0 eV olan ikinci hücrede ise maksimum verim, ısı kaynağının sıcaklığının 2127 °C olduğu durumda %39,3 olarak elde edilirken, 1900 °C -2300 °C arasındaki sıcaklıklarda sistemin ortalama verimi %38,2 oldu.

Geliştirilen hücre tasarımlarından bant genişliği 1,4eV/1,2 eV olan hücrede ısı kaynağının sıcaklığı arttıkça enerji dönüşüm veriminin yükseldiği, bant genişliği 1,2 eV/1,0 eV olan ikinci hücrenin ise daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek verime sahip olduğu anlaşıldı. İki hücre tasarımının performans verileri karşılaştırıldığında bant genişliği 1,2 eV/1,0 eV olan hücrenin enerji dönüşüm veriminin ısı kaynağının sıcaklığındaki değişimlerden daha az etkilendiği, belirli bir sıcaklıktaki güç yoğunluğunun ve çalışılan sıcaklık aralığındaki ortalama veriminin daha yüksek olduğu; bant genişliği 1,4 eV/1,2 eV olan hücrenin ise ısı kaynağının sıcaklığı en yüksekken maksimum verimliliğe sahip bulunduğu belirlendi.

Olemedia / Stock



## Termofotovoltaik Sistemler Buhar Türbinlerinin Yerini Alabilir mi?

Geliştirilen termofotovoltaik sistemin enerji dönüşüm veriminin buhar türbinleri ile karşılaştırılabilir düzeyde olması, buhar ve gaz türbini gibi geleneksel yöntemlerle rekabet edebilmesine imkân veriyor. Ayrıca araştırmacılar sıcaklığı 1900 °C -2400 °C arasındaki ısı kaynaklarıyla birlikte kullanılabilen termofotovoltaik hücre tasarımının, doğalgaz ve hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı enerji santrallerinde yanma sonucu açığa çıkan ısının elektrik enerjisine

dönüştürülmesinde kullanılmak için uygun olduğunu belirtiyor. Çok sayıda hareketli parça içeren buhar türbinlerinin, mevcut durumdakinden daha yüksek çalışma sıcaklıklarında kullanılabilmesi için bu sıcaklıklarda işlevlerini uygun şekilde yerine getirebilen malzemelerden üretilmeleri gerekiyor. Ancak bu özellikteki yenilikçi malzemelerin geliştirilmesine yönelik Ar-Ge çalışmaları ve üretim süreçleri son derece maliyetli. Hareketli parça içermeyen termofotovoltaik sistemler ise buhar türbinlerinden daha yüksek sıcaklıklarda çalışabiliyor. Ayrıca ısı enerjisinin düşük maliyetle ve yüksek verimle elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlıyor.

# Termofotovoltaik Enerji Depolama Sistemleri

Geliştirilen termofotovoltaik sistemin geniş bir sıcaklık aralığında yüksek verimlilikle çalışabilmesi, termal depolama uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılmasına imkân verebilecek.

Enerji depolama sistemleri ile entegre edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlar ile maliyet açısından rekabet edebilmesi için enerji üretim maliyetinin kWh başına 20 ABD dolarının altında olması gerektiği öngörülmüyor. MIT araştırmacılarının analizlerine göre ise ısı depolama malzemesi olarak grafit gibi düşük maliyetli bir malzeme kullanılması durumunda enerji üretim maliyetlerinin kWh başına 10 ABD dolarının altında olması mümkün. Bu kapsamda ilk defa Antora



Energy isimli şirket, enerji dönüşümü için termofotovoltaik teknolojisinin kullanıldığı büyük ölçekli termal enerji depolama sistemini bu yıl hayata geçirmeyi planlıyor. Bu teknolojide termal depolama malzemesi olarak son derece uygun maliyetli bir malzeme olan karbon bloklar kullanılıyor. Karbon blokların çevresi ise ısı yalıtımı sağlayan bir katman ile çevreleniyor.

Rüzgâr, güneş enerjisi gibi farklı enerji kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisi, karbon blokların ısıtılmasında kullanılıyor. 1800 °C'ye kadar ısıtılabilen karbon bloklar saatlerce hatta günlerce sıcak kalabiliyor. Enerji ihtiyacı ortaya çıktığında ise karbon bloklarda depolanan enerji termofotovoltaik hücreler aracılığıyla elektrik enerjisine

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi

Termal enerji depolama

Enerji talebinin elektrik ya da ısı enerjisi olarak sağlanması



Termofotovoltaik enerji depolama sistemi



verilerine göre endüstriyel süreçlerde tüketilen enerjinin %20 ila %50'si üretim süreçlerinde kullanılmadan atık ısı olarak çevreye salınıyor. Araştırmacılar, termofotovoltaik temelli ısı depolama sistemlerinin yaygınlaşması durumunda, küresel ölçekteki karbondioksit salımının %40 azaltılabileceğini öngörüyor.

Termofotovoltaik sistemler; bakım ve üretim maliyetlerinin daha düşük olması, farklı yakıt türleriyle birlikte kullanılabilmesi ve harici ısı kaynaklarıyla kolayca entegre edilebilmesi gibi özellikleri sayesinde enerji dönüşümü için buhar türbinleri gibi geleneksel yöntemlere çevreci bir alternatif oluşturabiliyor. Ayrıca bu teknoloji verimli bir termal enerji depolama sistemi olarak güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından kesintisiz bir şekilde enerji elde edilmesine olanak sağlıyor. ■

dönüştürülebilir. Ayrıca depolanan enerji, çelik ve çimento gibi yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulan sektörlere doğrudan ısı olarak aktarılabilir.

Termal depolama malzemesinin çelik konteynerlerin içine yerleştirildiği sistem, modüler yapısı sayesinde kullanılacağı bölgelere kolayca taşınabiliyor. Karbon malzemenin yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi sayesinde sistemin kullanım ömrünün 30 yılın üzerinde

olacağı öngörülüyor. Antora Energy, termofotovoltaik hücrelerin kullanıldığı ve yıllık 2 megawatt gücündeki termal depolama sisteminin üretimine geçen yıl başladı.

Enerji dönüşüm verimliliği %40'ın üzerinde olan termofotovoltaik sistemlerden, endüstriyel süreçler sonucu ortaya çıkan atık ısının kullanılabilir enerjiye dönüştürülmesinde de yararlanılabileceği düşünülüyor. ABD Enerji Bakanlığının

## Kaynaklar

LaPotin, A. ve ark., "Thermophotovoltaic efficiency of 40%", *Nature*, Cilt 604, s. 287-291, 2022.

Mittapally, R. ve ark., "Near-field thermophotovoltaics for efficient heat to electricity conversion at high power density", *Nature Communications*, Cilt 12, Makale no: 4364, 2021.

<https://antoraenergy.com/tpv>

<https://news.mit.edu/2022/thermal-heat-engine-0413>

<https://news.mit.edu/2023/alumnus-thermal-battery-antora-energy-0818>

<https://www.nrel.gov/news/program/2022/capturing-light-from-heat-at-40-percent-efficiency-nrel-makes-big-strides-in-thermophotovoltaics.html>

<https://ourworldindata.org/energy-mix>