

## **Fotovoltaik modüllerde yüzey sıcaklığının modül verimliliğine etkisi**

**Ramazan Kayabaşı <sup>\*1</sup>**

<sup>1</sup> *Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncioğlu Meslek Yüksekokulu, Kayseri*  
*ORCID: 0000-0001-6195-7445*

**Geliş Tarihi:** 21.04.2021

**Kabul Tarihi:** 09.06.2021

### **Özet**

Güneş enerjisi çevre dostu ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bu kaynaktan ısı uygulamalar ve elektriksel uygulamalar ile enerji üretilebilmektedir. Fotovoltaik (PV) uygulamalar güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten teknolojilerdir. Üretilen doğru akım direk olarak veya alternatif akıma dönüştürülerek kullanılabilir. PV sistemler şebeke bağlantılı veya şebeke bağlantısız kullanılabilen sistemlerdir. PV sistemlerde modüllerden kaynaklı veya sistem bileşenlerinden kaynaklı verim düşümüne neden olan birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerden biri modül sıcaklığının yükselmesidir. Test koşullarının üzerine çıkan çalışma sıcaklığı, modüllerin verimlerini düşürmektedir. PV modüllerin sıcaklığını test koşullarında tutmak için, son yıllarda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalardan yola çıkarak çalışmamızda modül sıcaklıkları ve sıcaklığa bağlı modül verimleri incelenmiştir. Sonuç olarak modül çalışma sıcaklığının düşürülmesi, modüllerde verimliliği %3 ile %15 arasında artırmaktadır. PV modüllerin sıcaklığını düşürmek için uygulanan yöntemlerin bir kısmı deneysel olarak uygulanabilir fakat ticari olarak uygulanması ekonomik olmamaktadır. Modül sıcaklık kontrolü için seçilen yöntemin ekonomik olması, yöntemin PV sistemlerde uygulanabilir olmasını sağlayacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi, Faz değiştiren madde, Fotovoltaik/Termal, Verim, Yenilenebilir enerji kaynakları

### **The effect of surface temperature on module efficiency in photovoltaic modules**

#### **Abstract**

Solar energy is an environmentally friendly and renewable energy source. Energy can be produced from this source with thermal and electrical applications. Photovoltaic (PV) applications are technologies that generate electrical energy from solar energy. The produced direct current can be used directly or by converting to alternating current. PV systems are systems that can be used with or without grid connection. In PV systems, there are many parameters that cause efficiency decrease due to modules or system components. One of these parameters is the increase of the module temperature. The operating temperature above the test conditions reduces the efficiency of the modules. A lot of research has been done in recent years to keep the temperature of PV modules under test conditions. Based on these research, module temperatures and temperature-dependent module efficiency have been examined in our study. As a result, lowering the module operating temperature increases the efficiency of the modules between 3% and 15%. Some of the methods applied to reduce the temperature of PV modules can be experimentally applied but are not economical to apply commercially. Being economical of the method chosen for module temperature control will ensure that the method is applicable in PV systems.

**Keywords:** Solar energy, Phase changing material, Photovoltaic/Thermal, Efficiency, Renewable energy sources

---

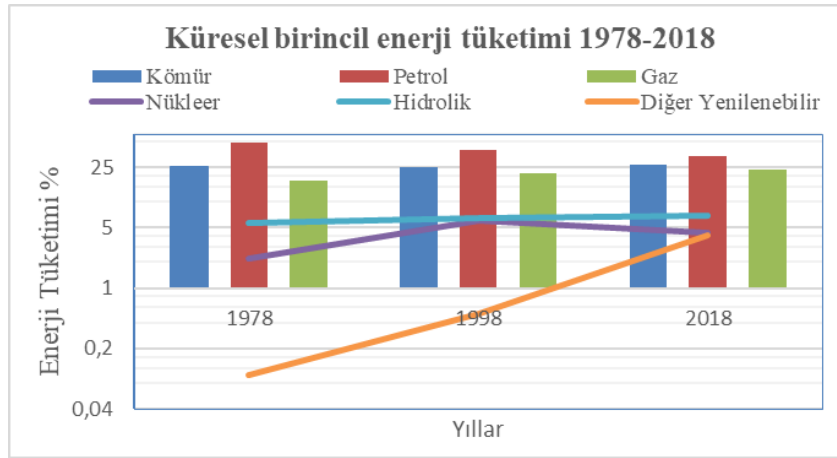
\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ramazan Kayabaşı, rkayabasi@kayseri.edu.tr

Künye Bilgisi: Kayabaşı, R.(2021). Fotovoltaik Modüllerde Yüzey Sıcaklığının Modül Verimliliğine Etkisi. Artibilim: Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(1), 1-13.

## 1. Giriş

Enerji kaynaklarının önemi giderek artmaya devam etmektedir. Günümüzde artan enerji taleplerini karşılayabilen (kendine yetebilen) ülkeler enerjide dışa bağımlı olmaktan kurtulmaktadır. Enerji geçmişte olduğu gibi gelecekte de dünya siyasetine yön vermeye devam edecektir. Bu nedenle tüm ülkeler enerji yatırımlarını ve araştırmalarını sürekli yenilemek durumundadır. Fosil kökenli enerji kaynakları, var olan teknolojik altyapısı ve rezervleri nedeniyle önemini korumaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ise giderek artmaktadır. Artan karbondioksit salınımı, çevre sorunlarının artmasına; bu sorunlara bağlı bölgesel ve küresel felaketlerin görülmesine neden olmaktadır. Bu nedenler, dünyada yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının artırılmasına yönelik fikir bütünlüğü oluşturmaktadır.

Enerji kaynakları refahın artışında, ülkenin büyümesinde ve ayrıca çevresel ve sosyal sürdürülebilirlikte önemli bir role sahiptir. Son 40 yılda enerji tüketimindeki artış, fosil yakıtlardan karşılanmıştır [1]. Bu nedenle, fosil yakıtların küresel birincil enerji tüketimindeki payı, 2018'de 1978'e göre sadece %7 azalmıştır. 2018 yılında toplam birincil enerji tüketiminin %85'i, fosil yakıtlar ile karşılanmaya devam etmektedir (Şekil 1). Yenilenebilir enerji kaynakları dünya var olduğu sürece varlığını korumaktayken, son yüzyılda ancak enerji ihtiyacının karşılanması için kullanımı artmıştır [2]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı son on yıl içerisinde artmaya başlamış, fakat henüz yeterli seviyeye ulaşamamıştır.

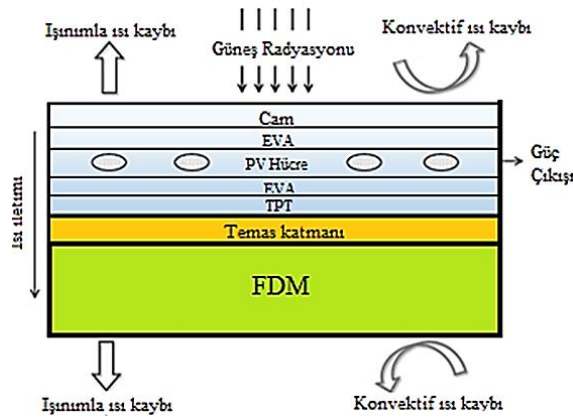


Şekil 1. 1978-2018 yılları arasında enerji kullanımı oranları [3]

Enerjide kaynağın var olması kadar, var olan kaynağın verimli kullanılması önemlidir. Enerji kaynaklarının verimli kullanılması için kaynağın dönüşümünü sağlayan teknolojinin geliştirilmesi ve verim düşüşüne neden olan etkilerin azaltılması gerekmektedir. Böylelikle kaynağın kullanılması ve işletilmesi ekonomik olacaktır. PV teknolojide yıllara bağlı olarak sağlanan verim artışı, güneşten PV teknoloji ile elektrik üretimini ekonomik hale dönüştürmeye başlamıştır. PV teknolojilerde henüz verim kayıpları tamamen çözülmüş değildir. Sistem kayıpları var olmaya devam etmektedir. Bu kayıplardan biri, sıcaklığın etkisi nedeniyle modüllerde görülen verim kaybıdır.

PV sistemlerde modül çalışma sıcaklığının yükselmesi verim düşümüne neden olmaktadır. Ayrıca modüllerde gölgelenme, tozlanma, ısınım ve sıcaklık nedeniyle kayıplar olduğu gibi sistem bileşenlerinden kaynaklı inverter ve kablo kayıpları gibi kayıplarda bulunmaktadır. Sıcaklık nedeniyle görülen verim kaybı %5 gibi önemli bir orana sahiptir. Sistem ve bileşenlerinde görülecek tüm kayıplar, toplam sistem verimini düşürmektedir.

Yüksek ortam sıcaklığı ve güneş ısınımı hücre sıcaklığının artmasına neden olmaktadır [4]. PV modüllerin çalışma sıcaklığı, modülün hem elektriksel verimliliğini hem de güç çıkışını etkilemektedir. Hücre sıcaklığını çevresel değişkenler, malzeme bileşimi ve sistem bileşenleri etkilemektedir [5]. PV hücrelerinin ana yapı bileşeni yarı iletken malzeme olması nedeniyle sıcaklıktaki artış, doğrudan verimin azalmasına neden olmaktadır. Modül veriminin düşme nedeni hücre sıcaklığı yükseldikçe açık devre voltajındaki doğrusal azalmadır [6]. Modül çalışma sıcaklığı 353K sıcaklıktan 253K sıcaklığa düşürüldüğünde, güç verimliliği %7.34'ten %9,78'e artmaktadır. Bu oran %33 iyileşme sağlamaktadır. Sonuç olarak, güneş pilinin yüksek verimde çalışmasını için modül sıcaklığının yükselmesi engellenmelidir [7]. Aktif ve pasif soğutma PV uygulamalarda modül sıcaklığını düşürürken, verim artışı sağlamaktadır. Pasif soğutma bir kanaldaki veya bir açıklıktaki hava kanalındaki kaldırma kuvveti tahrikli hava akışına dayanan soğutma türüdür [8]. Aktif soğutma yöntemi PV yüzeyinin önündeki veya arkasındaki su veya hava akışı ile yapılmaktadır. Aktif soğutma uygulamalarında enerji kullanımı maliyet oluşturmaktadır. Bu durumla birlikte soğutma amacıyla su kullanılması halinde kaynak sorunu yaşanabilmektedir. Bu nedenle, Faz Değiştiren Madde (FDM) su yerine kullanılabilir. PV sistemde FDM kullanımı modül sıcaklığını azaltmak ve elektriksel verimliliği artırmak için ideal bir yoldur [9]. PV/FDM modüle su bazlı bir termal toplayıcı eklenerek, FDM'de depolanan ısıyı etkin bir şekilde kullanmak için PV/FDM/T modülü tercih edilebilir. PV/T/FDM modülü genel tasarımı (Şekil 2)'te verilmiştir. Şekil üzerinde Ethylene Vinyl Acetate (EVA) katmanıdır. Modül üretiminde katmanların arasında bağlayıcılık sağlaması ve dayanım kazandırması amacıyla kullanılır. Tedlar filmi (TPT) modülleri korumak amacıyla arka katman olarak kullanılan kompozit bir yapıdadır.



Şekil 2. Tipik bir PV/FDM sisteminin genel görünümü [10]

## Fotovoltaik modüllerde yüzey sıcaklığının modül verimliliğine etkisi

### 2. Materyal ve metot

PV modüllerde güneş ışınımı ve çevresel etkiler nedeniyle meydana gelen modül sıcaklığının değişimine bağlı, modül performans ve verim değişimi 2010 ile 2020 yılları arasında yapılan çalışmalar incelenerek derleme makale yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Modüllerde meydana gelen sıcaklık artışının engellenmesi için uygulanan pasif ve aktif soğutma sistemleri teorik olarak araştırılmıştır. Modüllerde kullanılan bu yöntemlere bağlı sıcaklığın değişimi incelenmiş olup sıcaklığa bağlı verim değişimi görülen çalışmaların sonuçları alınarak kıyaslanmıştır. Yapılan çalışmalarda verim düşmesine yönelik sağlanan kazanımlar grafik haline getirilerek açıklanmış ve sağlanan fayda tartışmaya açılmıştır. Ekonomik ve uygulanabilir yöntemler kullanarak sıcaklığın olumsuz etkilerinin bertaraf edilebilmesi için ideal soğutma yolları önerilmiştir.

PV modüller ile enerji üretimi atmosfer şartlarında, yüksek güneş ışınımına sahip, güneşlenme süresi uzun olan belirlenmiş noktalarda yapılmaktadır. PV modüllerin güneş ışınımından maksimum yararlanabilmesi için modüller güneşe dik olacak şekilde yerleştirilmektedir. Bu durum koyu renge sahip olan modüllerin yüzeyinde ısının birikmesine ve modül sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Geleneksel modüllerin yapısı modüllerde biriken ısıyı atmak için yeterli olmaması nedeniyle, gün içerisinde modüller yüksek sıcaklığa ulaşmaktadır. Modüllerin çalışma sıcaklığı test koşullarının ne kadar üzerine çıkarsa, sıcaklığa bağlı verim kaybı o kadar artmaktadır. Bu nedenle modüllerin çalışma sıcaklığını düşürmek için aktif ve pasif soğutma sistemleri deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır. Modüller üzerine yapılan çalışmalar (Tablo 1)'de kategorize edilerek verilmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde uygulanan soğutma yönteminin ve seçilen materyalin modüllere sağlamış olduğu soğutma etkisinin oranına bağlı modül verimlerinde iyileşme görülmektedir. Bu nedenle modüllerin verimlerini yükseltmek ancak modüllerin sıcaklığına bağlı oluşan olumsuz etkinin azaltılmasıyla mümkün olmaktadır. Modüllerde ve PV sistemlerde modülden ve sistemden kaynaklı verimi etkileyen diğer parametreler bu çalışmada referans alınmamıştır.

**Tablo 1.** PV modüllerde sıcaklığı düşürmek için uygulanan yöntemler ve sonuçları

Referanslar	Yapısal Durum	FDM Türü	Verim
[10]	Fiziksel teması arttırmak için PV modül ile FDM kabı arasına bir termal temas katmanı yerleştirilmiştir.	OM35 (FDM)	PV ile PV/FDM sistemi arasındaki sıcaklık farkın 23°C'ye ulaşmaktadır. PV/FDM sisteminin elektrik çıktısı %5,18 artmıştır. PV/T/FDM sisteminin toplam enerji çıktısı, sırasıyla (%74,3-%8,32-%30,4) bu üç gösterge, enerji toplamı, ekserjik toplam ve elektriksel toplamdır.
[11]	Ötektik karışım, 21,75°C ve 199J/g erime sıcaklığına ve gizli füzyon ısısına sahiptir. Ayrıca, 3cm ve 5cm kalınlığındaki C-FDM kapları ile PV modülün arka yüzeyi kaplanmıştır.	Ötektik (FDM)	PV'lerin sıcaklığında maksimum 10,3°C azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, ortalama voltajı %2,85 artırmış, böylece ortalama güç çıkışı %2,8 artmıştır. Sonuç olarak, ötektik FDM, PV modülün ortalama performans oranını, elektrik verimliliğini ve kapasite kullanım faktörünü sırasıyla %72,63, %10,09 ve %19,41 artırmıştır.

[12]	PV ve FDM arasındaki daha yüksek ısı transferini için 2,5mm kalınlığındaki metal yüzeyine 2,2kg sıvı FDM eklenmiş ve etkili bir ısı transferi için kanallardan su akışı gerçekleştirilmiştir.	OM47 (FDM)	PV/T'de akış koşulu olmadığında PV modeline göre verim %7,9 ile %11,1 daha azdır. PV ile PV/T karşılaştırıldığında %33,8 ve %40 maksimum sıcaklık düşüşü gerçekleşmektedir. Isıl verim %6,4-%42 (WTM) ve %7,1-%48,5 (WM) aralığında iken, elektrik verimlilik %14,5 (WTM) ve %15,2 (WM) ile PV durumunda %14'tür. FDM tabanlı PV/T sistemi geleneksel PV/T'den daha iyi performans göstermiştir.
[13]	PV/FDM konusunda yapılan çalışmalar derleme yöntemiyle incelenmiştir.	Parafin (balmumu)	Araştırma sonucunda modüllere FDM ilavesiyle PV verimliliğinin %6,1 ile %7,8 arasına yükseldiğini savunulmuştur.
[14]	PV/FDM	Parafin	FDM, soğuk aylarda sıcak aylara göre daha az modüllerde soğutma sağlamaktadır. PV/FDM sistemi, sıcak iklim koşullarında PV yıllık elektrik enerjisi verimini %5,9 artırmaktadır.
[15]	PV/FDM metalik dikdörtgen FDM kapları, epoksi reçine tutkalı ile PV panellerin arkasına sabitlenmiştir.	Tuz Hidratları Yağ Asitleri	En iyi durumda, sıcak iklim şartlarında günlük ortalama güç tasarrufu %7,7 olarak bulunmuştur.
[16]	Nano-SiC parçacıkları ile yüksek termal iletkenlikte parafin-FDM ve nanoakışkan ilave edilmiştir.	Nano-FDM/PVT	Önerilen PV/T-nano FDM-nano sıvı sistemi, açık devre voltajını 13V'tan 21V'a, elektrik verimliliğini %7,1'den %13,7'ye yükseltmiştir. Ayrıca sistem, ısıl verimliliği %72'ye ulaşmaktadır.
[17]	500W iki halojen lamba ile; A: Soğutmasız PV modülü, B: 30 mm kalınlığında FDM infüzyon grafit PV modül C: PV kanatlı bir ısı emici D: FDM infüzyon grafit ve kanatlı ısı emici.	RT40	Tepe T Modu, D durumu için 19°C azaldı ve B durumu için 5°C düşürüldü, Durum D, genel verimliliği artırmak için en verimli değer %12,97, 12 saatlik model verilerine dayalı olarak durum A'dan durum B için $\eta$ %7,32'lik bir artış gözlenmiştir.
[18]	Prototip 1, referans standart PV modül. Prototip 2-3, sırasıyla saf FDM ve birleşik FDM'li modül.	Beyaz Petrol Jeli	PV panellerin elektriksel verimliliğinin saf FDM kullanıldığında ortalama %3, kombine FDM kullanıldığında ortalama %5,8 arttığı gözlemlenmiştir.
[19]	Çalışmada 2 adet PV modül kullanılmıştır. Modüllerden biri referans modül, diğeri arka yüzeyine, ısı borusu ve FDM uygulanan modüldür.	Kalsiyum Klorür Hekza-hidrat	Referans modüllerde 30-80°C aralığında sıcaklık, FDM uygulanan modüllerde 30-40°C sıcaklık görülmektedir. Referans modüllerde verim kaybı %20 seviyelerine ulaşırken, ısı borulu FDM'li modüllerde ortalama verim kaybı %1 olmaktadır.
[20]	Hibrit PV/T sistemine nano geliştirilmiş FDM ilave edilmiştir.	Parafin mumu RT35	PV/T/FDM sistemin performansını artırmış ve modül sıcaklığını düşürmüştür. Çok duvarlı karbon nanotüp panelin soğutulması ve daha yüksek performans elde edilmesi için FDM en iyi katkı maddesidir. Sistem verimi %9,3-%18 artmıştır.

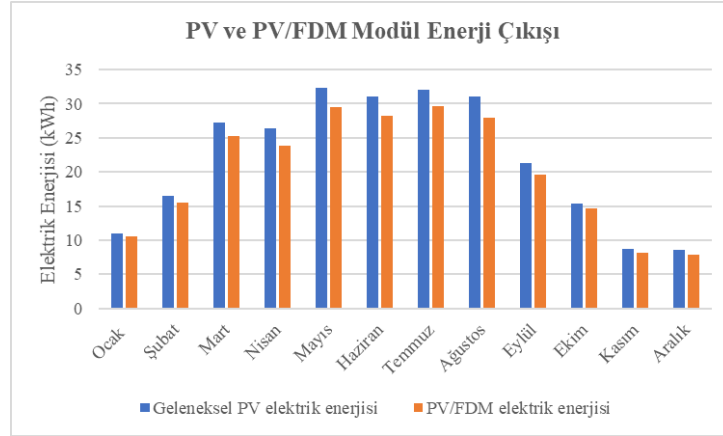
*Fotovoltaik modüllerde yüzey sıcaklığının modül verimliliğine etkisi*

[21]	TE cihazlarının üst seramik plakası kaldırılarak, geliştirilmiş ısı transferi özelliklerine sahip bir dizi yeni entegre PV-TE hibrit cihaz üretilmiştir.	PV-TE Hibrit	PV-TE hibrit cihazın çıktısının tek bir PV hücresinden daha üstün olduğunu doğruladı. Entegre PV-TE hibrit cihazdaki PV modül çıkış gücü, tek başına PV hücresinden yaklaşık %14,9 daha yüksektir.
[22]	Sistemde soğutucu olarak suyla birlikte su nanoakışkan kullanılmıştır.	RT25 S27	FDM ile nano akışkan kombinasyonu PV çalışma sıcaklığını %30'a kadar düşürmektedir. Akışkan çıkış sıcaklığını %54'e kadar artırmaktadır. S27, RT25'ten daha iyi performans sağlamıştır. Enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %11 ve %7 artırmıştır.
[23]	Prototip 1 geleneksel PV panel ve devresinden oluşur. Prototip 2, PV panelin arka yüzüne birleşik FDM haznesinden oluşur.	Petrol Mumu	Standart kullanılırken, PV panellerin elektrik çıkışı ortalama yüzde 2,8 kombine FDM kullanıldığında ortalama yüzde 4,3 artmıştır.
[24]	PV modüle petek yapılı yeni bir alüminyum metal ısı eşanjörü dâhil edilmiştir.	OM-47	FDM tabanlı PV/T ile PV sistemi kıyasla verimlilik, sırasıyla %11,1 ve %7,9 artmıştır.
[25]	PV/T sistem deney sonuçları TRNSYS yazılım simülasyonu ile doğrulanmıştır.	RT28HC	Modül Sıcaklığı 35,6°C düşürülmüş ve modül çıkış gücü %4,3–%8,7 artmıştır.
[26]	PV/T sisteminde nanoakışkan kullanılmıştır.	Ag-SiO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	PV sisteme kıyasla nano sıvı bazlı PV/T sistemi enerji verimliliğinde %12 artış hesaplanmıştır.
[27]	PV/T panellerin üst kısmına suyu homojen olarak dağıtacak bir boru dağıtımı yerleştirilmiştir.	Su	PV modülün yüzey sıcaklığı 11°C düşürülmüş bu duruma bağlı 5 günlük ortalama üretilen elektriksel güç 11,528W artırılmıştır. Sonuç olarak verim artışı %14,47 olarak hesaplanmıştır.
[28]	PV/T hibrit bir sistem olarak tasarlanmış ve çalıştırılmıştır.	Su-Hava	PV/T modülün soğutma yapıldığı durumda elektriksel çıkış %12,9 artmış, dolayısıyla elektriksel verim %12 olmuştur.
[29]	Modüller kanatçıklara bölünerek iki plaka arasında 2cm alüminyum petek yapısı oluşturulmuştur.	RT10HC; RT18HC; RT25HC; RT35HC	Sistemde maksimum verim artışı %10 olarak gözlemlenmiştir.
[30]	100W silikon bazlı PV modüllerde FDM'li su bazlı (PV/T), sistemde çift emici plaka kullanılmıştır.	FDM Parafin RT30	Su bazlı PVT sistemi %10,66 ve su bazlı PV/T/FDM sistemi ve ortalama artış ile %12,6 iyileşme sağlanmıştır.
[31]	Kompozit Faz Değiştiren Madde (cFDM) kullanılarak soğutulan genişletilmiş grafit Kap: Al	FDM Parafin Kompozit	cFDM ile, PV modülü ile FDM arasındaki ısı direnç azaltılmış ve cFDM'den yüksek termal iletkenlik elde edilmiştir. 5cm'lik bir FDM ile %14,86'lık bir verim artışı sağlanmıştır.

### 3. Bulgular ve tartışma

PV modüllerin ve sistemlerin verimlerini artırmak için sistem bileşenleriyle ilgili yapılan çalışmaların her biri sonuç olarak toplam verimi etkilemektedir. Bu nedenle yapılan tüm çalışmalarda sağlanan yararlı etki tartışmasız öneme sahiptir. Güneş ışınımını alan modüllerin henüz yeni enerji üretimine başlamasına rağmen kendi yapısında biriken ısı nedeniyle sıcaklıklarının yükselmesi ve bu duruma bağlı verim kaybı yaşanması modüllerde görülen istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle modüllerin sıcaklığını düşürmek için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalardan ortaya çıkan ortak sonuç, modül verimlerini modül sıcaklığının yükselmesi düşürmektedir.

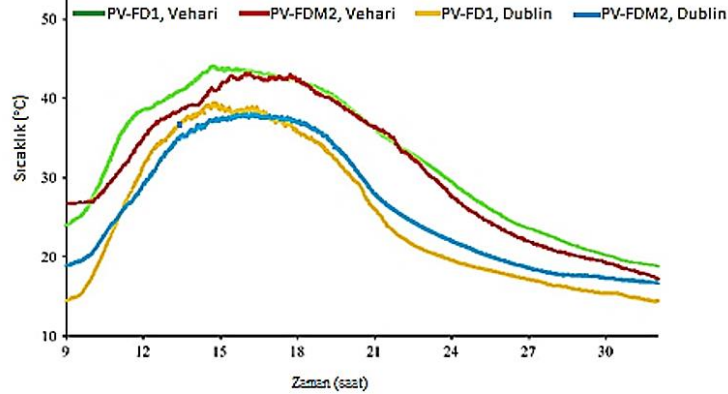
PV modüllerde kullanılan FDM'ler modül sıcaklığının düşürmesi nedeniyle, sıcaklık artışı nedeniyle modüllerde oluşan verim düşüşü azalmaktadır. Verim kaybının giderilmesi ile modüllerin çıkış gücünde artış görülmektedir. Yıl içerisinde tüm aylarda PV modüle kıyasla PV/FDM modül çıkış gücü yüksek olmaktadır (Şekil 3). Yaz aylarında güneş ışınımı ve çevresel şartlar nedeniyle modüllerin sıcaklığının daha fazla artması, PV modüle kıyasla PV/FDM modül çıkış gücü farkını artırmaktadır.



Şekil 3. Slovenya'da bir yıl boyunca geleneksel PV ve PV/FDM panelinin elektrik enerjisi çıktısının simülasyon sonuçları [13]

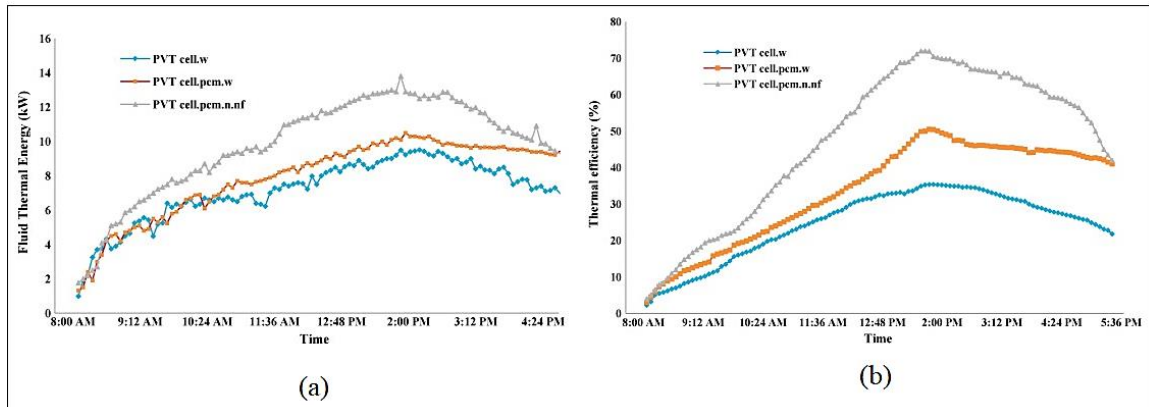
PV/FDM sistemlerinin arka yüzeyindeki sıcaklık dağılımı (Şekil 4)'te gösterilmiştir. Vehari ve Dublin'deki sıcaklık değişimi, FDM'nin kütlesinden dolayı modül sıcaklığı etkilenmektedir. PV/FDM sisteminde bulunan FDM 1 ve FDM 2'nin kütlesi 13kg ve 20kg olduğundan füzyon ısısı 173kJ/kg ve 191kJ/kg'dır. FDM1 ve FDM2 için gizli ısı depolama kapasiteleri 2145kJ ve 3820kJ'dir. Sistemin enerji dengesi Dublin'de 251Wh ve 382Wh, Veharide 576Wh ve 875.7Wh olarak bulunmuştur.

### Fotovoltaik modüllerde yüzey sıcaklığının modül verimliliğine etkisi



Şekil 4. PV/FDM sistemleri için sıcaklık dağılımı [15]

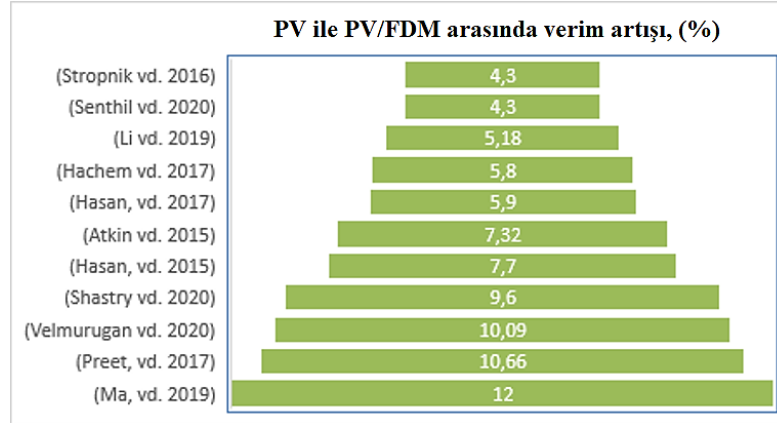
PV/T sistemlerinin termal enerji (a) ve termal verimlilik (b) dağılımını (Şekil 5) gösterilmiştir. Nanomateryalin eklenmesiyle aktarılan ısı miktarı artar, yüksek termal iletkenlik termal enerji geçişini artırarak modüllerin sıcaklığının düşmesini sağlar. Nanomalzemelerin FDM ile kullanılması PV panel sıcaklığının düşürür elektrik verimliliği artırır. Anlık sıcaklık dalgalanmaları sistemde nanometaryal ve FDM olması nedeniyle azalır.



Şekil 5. PV/T'ler için termal enerji dağılımı (a), PV/T'ler için termal verimlilik dağılımı (b) [16]

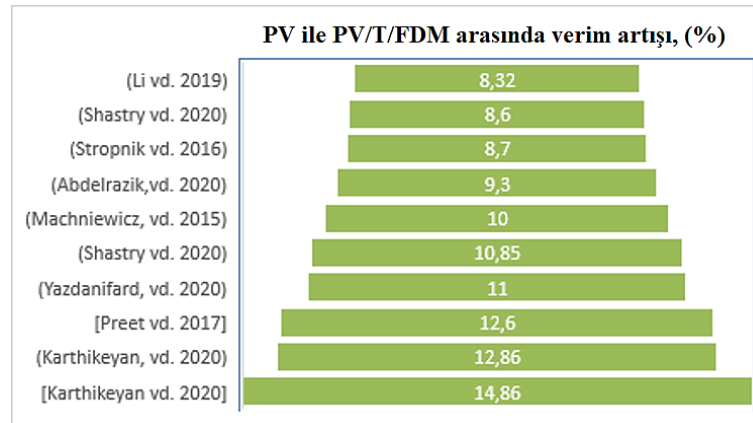
PV modüller verimleri atmosfer şartlarında ölçülerek veya teorik yöntemlerle hesaplanarak bulunabilmektedir. Bu modüller referans modül olarak kabul edilir. Referans modül kabul edilen PV modüller, yine deneysel veya teorik yöntemle verimleri bulunan PV/FDM modüllerin verimleriyle kıyaslanarak % olan verim artışı hesaplanmaktadır (Şekil 6). Verim artışı için modüllerde uygulanan yöntemler benzerlik göstermekle birlikte elde edilen sonuçlarda büyük farklılık görülmektedir. Bu farklılığın temel nedeni seçilen PV modülün yapısı, FDM türü veya modülün çalışma sıcaklığındaki değişimdir. Verim artışı PV/FDM modüllerde %4 ile %12 arasında görülmektedir. PV/FDM modüllerde çalışma sıcaklığında sağlanan düşüş modül verimliliğinin artmasına neden olmaktadır.





**Şekil 6.** PV modül referansı ile PV/FDM modül çalışmalarında verim artışı

Referans modül kabul edilen PV modüller, yine deneysel veya teorik yöntemle verimleri bulunan PV/T/FDM modüllerin verimleriyle kıyaslanarak % olan verim artışı hesaplanmıştır (Şekil 7). Araştırmalarda modüllere uygulanan yöntemler benzerlik göstermektedir. Fakat elde edilen sonuçlarda büyük farklılık görülmektedir. PV/T/FDM modüllerdeki verim artışı PV/FDM modüllerdeki verim artışından yüksektir. PV/T/FDM modüllerde kullanılan akışkan sayesinde modül yüzeyinden ısı çekme kabiliyeti artmaktadır. Ayrıca FDM ile modüllerin arka yüzeyinde ısı emilimi ve yüzeyler arası iyi bir ısı geçişinin sağlanması modül sıcaklığının yükselmesini engellemektedir. PV/T/FDM modüllerde çalışma sıcaklığında sağlanan düşüş modül verimliliğinin artmasına neden olmaktadır.



**Şekil 7.** PV modül referansı ile PV/T/FDM modül çalışmalarında verim artışı

PV modüller ile elektrik üretiminde, kaynağın yenilenebilir ve sınırsız olduğunu düşünerek sistemi ekonomik olmaktan çıkaracak uygulamalardan yapılmamalıdır. Ticari olarak üretilen PV modüller kaynağın %15 ile %25'i arasındaki kısmını elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bu nedenle modül sıcaklığını düşürmek için uygulanacak sistemin enerji harcamadan veya düşük enerji tüketimiyle çalışması gerekmektedir. Sistem tasarımı yaparken uygulanacak yöntemin sistemin diğer bileşenlerinde ilave maliyetler getirmemesi bir o kadar

#### *Fotovoltaik modüllerde yüzey sıcaklığının modül verimliliğine etkisi*

önemlidir. Sistemin amortisman süresinin düşürülmeye çalışıldığı son yıllarda, önerilen uygulamanın ekonomik ve uygulanabilir olması gerekmektedir. Ticari uygulamalar referans alındığında, önerilen yöntemlerin Güneş Enerji Santrali (GES) maliyetlerini yükseltmemesi yatırımcının beklentisidir. Ayrıca enerji yatırımcılarının beklentisi, yatırım bedelinin geri dönüş süresidir. Bu nedenle geri dönüş süresini uzatan sistem ilaveleri, projenin uygulama projelerinde yatırım olma özelliğini kaybetmesine neden olmaktadır.

#### **4. Sonuçlar**

PV modüller doğal çalışma koşullarında elektrik enerjisi üretirken çevresel etkenler nedeniyle ısınmakta ve sıcaklığı yükselmektedir. Modül sıcaklığının artması verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalarda genel geçerlilik, modül sıcaklığı direk modül verimliliği ile ilgilidir. Sabit ışınım değerinde modül sıcaklığı artarsa verim düşerken, modül sıcaklığı azalırken verim artmaktadır.

PV sistemler için aktif veya pasif soğutma uygulamaları yapılmaktadır. Pasif uygulamalar modül sıcaklığını ortalama 20°C düşürürken, elektriksel verimliliği %15,5'e kadar artırmaktadır. Aktif uygulamalar ise modül sıcaklığını ortalama 30°C düşürürken, elektriksel verimliliği %22'ye kadar artırmaktadır [14]. Güneş ışınımının %20'si elektrik enerjisine dönüşürken, %80'ini modülün aşırı ısınmasına neden olur. Soğurulan radyasyon hücrelerin sıcaklığında önemli bir artışa neden olur ve modülün elektrik performansını düşürür. PV hücrelerde hücrelerin malzemesine bağlı olarak, referans sıcaklığının üzerindeki bir derece artış verimi %0,4-%0,65 düşürmektedir [32].

Son yıllarda PV maliyetlerinin azalması nedeniyle, PV sistemi tarafından sağlanan enerji geleneksel sistemler ile rekabetçi hale gelmeye başlamıştır [33]. PV sistemlerin verimliliğinde artış yenilenebilir enerji kaynağı kullanan PV'leri geleneksel enerji sistemiyle daha rekabetçi hale getirmektedir. Modüllerin çalışma sıcaklığını düşürmek, verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu durum araştırmacıları PV sisteminin soğutulmasını için motive etmektedir [34].

Modüllerin sıcaklığını düşürmek için uygulanan yöntemlerde, ısı çekme kabiliyeti yüksek olan tasarım, verim artışında avantajlı durumdadır. Bu nedenle PV modüllere kıyasla PV/T modüllerin verimi daha yüksektir. PV/T modüllere kıyasla PV/T/FDM modüllerin verimi daha yüksektir. PV/T/FDM modüllere kıyasla PV/T/FDM nanoakışkan modüllerin verimi daha yüksektir. Yüzeyde yapılan ilave soğutucu malzeme kullanımı verim artışında yarar sağlayabilmektedir. Genel sıralama içerisinde uygulanan yöntemde soğutucu akışkan hızı, FDM'nin ısı tutma kapasitesi ve sistemin yapısal özelliklerinin değişebilmektedir. Bu farklılıklar nedeniyle verim değerleri değişebilmektedir.

Modül sıcaklığını düşürmek için aktif veya pasif soğutma uygulamaları araştırılmaya devam eden bir konudur. Aktif veya pasif soğutma için yeni üretilen maddeler ve yeni uygulamalar geliştirilmelidir. Araştırılan yöntemlerin ortak noktası ekonomik olması, kullanılan malzemelerin kolay temin edilebilir olması, sistem için yük oluşturmaması, çevreci olması ve sisteme uygulanması halinde uzun süre kullanılabilir olmasıdır. Bu kapsamda yapılan araştırmaların genel özelliği, verim artışı olmasına rağmen sahada uygulanabilir durumda olmamasıdır. Bu nedenle yapılan çalışmalara ek olarak uygulanan tüm yöntemler için optimizasyon çalışması yapılarak sağlanan yararlı etkinin sahaya yansıtılması için uygulanabilirlik artırılmalı ve maliyet düşürülmelidir.

PV modüllerde kullanılacak olan FDM'ler çok sayıda bulunmaktadır. Modül sıcaklık aralığının test koşullarına yakın tutulması için, faz değişim sıcaklığı test koşullarına yakın olan maddeler tercih edilmelidir. Ayrıca ısı tutma kapasitesi ve ısıl iletkenliği yüksek, çevreci, ucuz ve

kolay bulunabilir meddeler kullanılmalıdır. Bu durumlara göre değerlendirildiğinde, PV'lerde ısı kontrolü için kullanılacak maddelerin sayıları azalmaktadır.

### **Araştırma ve yayın etiği beyanı**

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

### **Kaynakça**

- [1] Ahmad, T., & Zhang, D. (2020). A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*, 6, 1973-1991.
- [2] Bouzguenda, I., Alalouch, C., & Fava, N. (2019). Towards smart sustainable cities: A review of the role digital citizen participation could play in advancing social sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 50.
- [3] Kober, T., Schiffer, H. W., Densing, M., & Panos, E. (2020). Global energy perspectives to 2060 – WEC's World Energy Scenarios 2019. *Energy Strategy Reviews*, 31.
- [4] Du, D., Darkwa, J., & Kokogiannakis, G. (2013). Thermal management systems for Photovoltaics (PV) installations: A critical review. *Solar Energy*, 97, 238-254.
- [5] Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013). Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*, 33, 311-321.
- [6] Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499-1511.
- [7] Xing, M., Zhang, Y., Shen, Q., Wang, R. (2020). Temperature dependent photovoltaic performance of TiO<sub>2</sub>/PbS heterojunction quantum dot solar cells. *Solar Energy*, 195, 1-5.
- [8] Ma, T., Yang, H., Zhang, Y., Lu, L., Wang, X. (2015). Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1273-1284.
- [9] Ferrer, G., Solé, A., Barreneche, C., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2015). Review on the methodology used in thermal stability characterization of phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 665-685.
- [10] Li, Z., Ma, T., Zhao, J., Song, A., Cheng, Y. (2019). Experimental study and performance analysis on solar photovoltaic panel integrated with phase change material. *Energy*, 178, 471-486.
- [11] Velmurugan, K., Karthikeyan, V., Korukonda, T. B., Poongavanam, P., Nadarajan, S., Kumarasamy, S., Sandeep, D. (2020). Experimental studies on photovoltaic module temperature reduction using eutectic cold phase change material. *Solar Energy*, 209, 302-315.
- [12] Shastry, D. M. C., Arunachala, U. C. (2020). Thermal management of photovoltaic module with metal matrix embedded PCM. *Journal of Energy Storage*, 28.
- [13] Ma, T., Li, Z., Zhao, J. (2019). Photovoltaic panel integrated with phase change materials (PV/PCM): technology overview and materials selection. *Renewable and Sustainable Energy*

*Fotovoltaik modüllerde yüzey sıcaklığının modül verimliliğine etkisi*

Reviews, 116.

- [14] Hasan, A., Sarwar, J., Alnoman, H., Abdelbaqi, S. (2017). Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV/PCM) system in hot climate. *Solar Energy*, 146, 417-429.
- [15] Hasan, A., McCormack, S. J., Huang, M. J., Sarwar, J., & Norton, B. (2015). Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: Materials comparison in different climates. *Solar Energy*, 115, 264-276.
- [16] Al-Waeli, A. H. A., Sopian, K., Chaichan, M. T., Kazem, H. A., Ibrahim, A., Mat, S., & Ruslan, M. H. (2017). Evaluation of the nanofluid and nano-PCM based photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study. *Energy Conversion and Management*, 151, 693-708.
- [17] Atkin, P., & Farid, M. M. (2015). Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. *Solar Energy*, 114, 217-228.
- [18] Hachem, F., Abdulhay, B., R24amadan, M., El Hage, H., El Rab, M. G., & Khaled, M. (2017). Improving the performance of photovoltaic cells using pure and combined phase change materials—Experiments and transient energy balance. *Renewable Energy*, 107, 567-575.
- [19] Kayabaşı, R., & Kaya, M. (2020). Fotovoltaik modüllerde faz değiştiren madde kullanımı ve verimlerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8(2), 262-278.
- [20] Abdelrazik, A. S., Saidur, R., & Al-Sulaiman, F. A. (2020). Thermal regulation and performance assessment of a hybrid photovoltaic/thermal system using different combinations of nano-enhanced phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215.
- [21] Zhang, J., Zhai, H., Wu, Z., Wang, Y., Xie, H. (2020). Experimental investigation of novel integrated photovoltaic-thermoelectric hybrid devices with enhanced performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215.
- [22] Yazdanifard, F., Ameri, M., Taylor, R. A. (2020). Numerical modeling of a concentrated photovoltaic/thermal system which utilizes a PCM and nanofluid spectral splitting. *Energy Conversion and Management*, 215.
- [23] Senthil Kumar, K., Revanth, S., Sanjeev, D., Sabesh Kumar, P., & Surya, P. (2020). Experimental investigation of improving the energy conversion efficiency of PV cell by integrating with PCM. *Materials Today: Proceedings*.
- [24] Shastry, D. M. C., Arunachala, U. C. (2020). Thermal management of photovoltaic module with metal matrix embedded PCM. *Journal of Energy Storage*, 28.
- [25] Stropnik, R., & Stritih, U. (2016). Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM. *Renewable Energy*, 97, 671-679.
- [26] Crisostomo, F., Hjerrild, N., Mesgari, S., Li, Q., & Taylor, R. A. (2017). A hybrid PV/T collector using spectrally selective absorbing nanofluids. *Applied Energy*, 193, 1-14.
- [27] Kerem, A., Atik, M., & Bayram, A. (2020). Experimental investigation of the effect of surface cooling on photovoltaic (PV) Panel System for Electricity Production. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(2), 1-14.
- [28] Gül, M., & Akyüz, E. (2019). Fotovoltaik-termal (PV/T) bir sistemin deneysel performansının

incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(1), 444-458.

- [29] Machniewicz, A., Knera, D., Heim, D. (2015). Effect of Transition Temperature on Efficiency of PV/PCM Panels. *Energy Procedia*, 78, 1684-1689.
- [30] Preet, S., Bhushan, B., Mahajan, T. (2017). Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM). *Solar Energy*, 155, 1104-1120.
- [31] Karthikeyan, V., Sirisamphanwong, C., Sukchai, S., Sahoo, S. K., Wongwuttanasatian, T. (2020). Reducing PV module temperature with radiation-based PV module incorporating composite phase change material. *Journal of Energy Storage*, 29.
- [32] Tian, Y., Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538-553.
- [33] Munceer, T., Asif, M., Kubie, J. (2003). Generation and transmission prospects for solarelectricity: UK and global markets. *Energy Conversion and Management*, 44, 33-52.
- [34] Nada, S. A., El-Nagar, D. H., Hussein, H. M. S. (2018). Improving the thermal regulation and efficiency enhancement of PCM-Integrated PV modules using nano particles. *Energy Conversion and Management*, 166, 735-743.