



## Effect of Phase Changing Material use on The Efficiency of Photovoltaic Modules

 Ramazan KAYABAŞI<sup>1,\*</sup>  Metin KAYA<sup>2</sup> 
<sup>1</sup> Kayseri University Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Vocational School, Melikgazi/KAYSERİ

<sup>2</sup> Karabük University Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, KARABUK

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 04/11/2019

Revision 10/02/2019

Accepted: 26/04/2020

#### Highlights

- Solar Radiation
- PV/T/FDM
- $CaCl_2 \cdot 6H_2O$

#### Keywords

Solar Energy  
 Photovoltaic Module  
 Photovoltaic/Thermal  
 Renewable Energy  
 Phase Change Material

In this study, an experimental study was conducted to reduce the efficiency loss caused by the increase in temperature in photovoltaic (PV) modules that operate independent of the grid. The experiment was carried out by using a pair of polycrystalline and a pair of monocrystalline PV modules. A reference/control module was selected from each type of PV modules and these control modules were added to the system as traditional PV modules. Heat pipe and phase changing material were applied to the back surface of other PV modules.

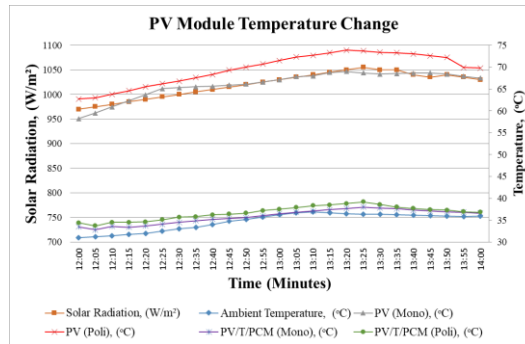


Figure A. Module Temperature Change Due to Solar Radiation

**Purpose:** In this study, we examined how the change of PV module temperature affects panel output parameters. Instantaneous changes in the module temperature were reduced by using heat pipe and PCM. The modules were kept at a low operating temperature with the methods applied, allowing them to operate at high efficiency.

**Theory and Methods:** The average temperature of PV modules was lowered using the heat pipe and phase-changing substance. One module from the monocrystalline and One module from the polycrystalline modules were placed on the measurement table as reference modules. For the other 2 modules, the double layer was fixed to the back surface of the panel by placing the heat pipe between the macro capsules. The heat pipe was manufactured from copper pipe using the U-type method. FDM was fixed by placing copper tubes between the macro capsules. The experiments were conducted under the conditions of Kayseri province.

**Results:** The temperature measured on the surface of the reference/control module was 30-80°C during the day, while the temperature ranged between 30-40°C in the experimental modules with phase changing substance. We found that the performance loss caused by increase in surface temperature in reference/control modules reaches up to 20%. Whereas, the performance loss in the experimental modules is only as high as 1% under the same conditions.

**Conclusion:** Module temperature tends to increase due to solar radiation and environmental conditions. Although the module temperature tends to increase, the heat pipe and FDM balance the temperature. They subsequently lower the mean temperature, thus, reducing the loss of performance caused by the increased temperature.

GU J Sci, Part C, 8(2): 262-278 (2020)



Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**  
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## Fotovoltaik Modüllerde Faz Değiştiren Madde Kullanımı ve Verimlerine Etkisi

Ramazan KAYABAŞI<sup>1</sup>,\* Metin KAYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, Melikgazi/KAYSERİ

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, KARABÜK

### Öz

Bu çalışmada, fotovoltaik (PV) modüllerde sıcaklık artışı nedeniyle meydana gelen verim kaybının azaltılması için deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışmanın amacı sistemde anlık sıcaklık değişimlerini azaltmak, ortalama sıcaklık değerini düşürmek ve ayrıca modül sıcaklığının kontrol dışı artışını engelleyerek sıcaklık artışı nedeniyle meydana gelen verim kaybını azaltmaktır. Çalışmada iki adet polikristal ve iki adet monokristal PV modül kullanılmıştır. PV modüller 10W gücünde ve aynı özelliklere sahiptir. Modüllerden birer modül referans modül olarak seçilmiş ve referans modüller geleneksel fotovoltaik modül olarak sisteme eklenmiştir. Diğer PV modüllerin arka yüzeyine, ısı borusu ve faz değiştiren madde uygulanmıştır. Faz değiştiren madde PV modül yüzeyinde ısı depolamak ve depolanan ısıyı ısı borusuna aktarmak amacıyla kullanılmıştır. Sistemde faz değiştiren madde olarak Kalsiyum Klorür Heksahidrat tercih edilmiştir. Sistemde ısı borusu içerisinden su geçirilerek sistem sıcaklığı kontrol altına alınmıştır. Referans modül yüzeyinde gün içinde 30-80°C sıcaklık ölçülürken, faz değiştiren madde kullanılan modüllerde 30-40°C sıcaklık aralığı görülmektedir. Referans modüllerde yüzey sıcaklığına bağlı verim kaybı %20 seviyelerine ulaşmaktadır. Isı borulu faz değiştiren madde kullanılan modüllerde ortalama sıcaklık artışı nedeniyle verim kaybı %1 olmaktadır. Sonuç olarak, aktif PV modüllerin ortalama sıcaklığı, ısı borusu ve faz değiştiren madde kullanılarak düşürülmüştür. Modül sıcaklığının düşürülmesi sıcaklık artışına bağlı verim kaybını azaltmıştır.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 04/11/2019  
Düzeltilme: 10/02/2019  
Kabul: 26/04/2020

### Anahtar Kelimeler

Güneş Enerjisi  
Fotovoltaik Modül  
Fotovoltaik/Termal  
Yenilenebilir Enerji  
Faz Değiştiren Madde

### Keywords

Solar Energy  
Photovoltaic Module  
Photovoltaic/Thermal  
Renewable Energy  
Phase Change Material

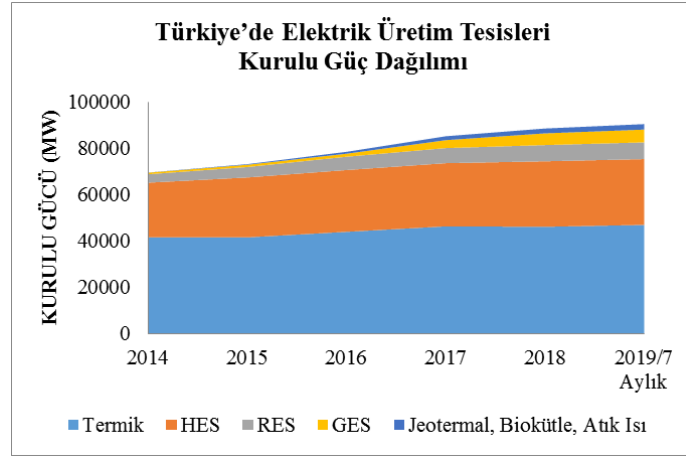
## Effect of Phase Changing Material use on The Efficiency of Photovoltaic Modules

### Abstract

An experimental study has been conducted to reduce the loss of efficiency caused by the increase in temperature in photovoltaic (PV) modules. The aim of this study is to decrease the instantaneous temperature changes and overall mean temperature in the system to prevent the uncontrolled increase of the module temperature, while reducing the loss of performance caused by the increase in temperature. The experiment was carried out by using a pair of polycrystalline and a pair of monocrystalline PV modules. Both types of the PV modules had 10W power and exact same features. A reference/control module has been selected from each type of PV modules and these control modules has been added to the system as traditional PV modules. Heat pipe and phase changing material were applied to the back surface of other PV modules. The phase changing material was used to store heat on the PV module surface and to transfer the stored heat to the heat pipe. Calcium Chloride Hexahydrate was the preferred material to use as the phase change materials in the system. The system temperature was then brought under control by passing water through the heat pipe in the system. The temperature measured on the surface of the reference/control module was 30-80°C during the day, while the temperature ranged between 30-40°C in the experimental modules with phase changing substance. We found that performance loss caused by increase in surface temperature in reference/control modules reaches up to 20%. Whereas, the performance loss in the experimental modules is only as high as 1% under the same conditions. The mean temperature of the active PV modules has been reduced by using heat pipes and phase changing material. Lowering the mean temperature subsequently reduced the loss of performance caused by the increased temperature.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yirminci yüzyılda olduğu gibi yirmi birinci yüzyılda da fosil yakıtlar enerji kaynağı olarak önemini korumaktadır. Dünyadaki nüfus artışı ve insanların yaşamlarında görülen refah artışına bağlı olarak enerji taleplerinde artış yaşanmakta, dolayısıyla fosil yakıt kullanımı giderek artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı 2017 verilerine göre, fosil enerji kaynakları küresel enerji talebinin %81'ini oluşturmaktadır [1]. Fosil yakıtlar, çevreci olmayan enerji kaynakları arasında sayılmaktadır. Kullanımı esnasında alıcı ortamlara zararlı atıklar bırakması nedeniyle, çevre sorunları oluşturmaktadır. Fosil yakıtların ekosisteme verdiği zararlar kabul edilemez seviyelere ulaşmıştır. Dünyada yaşanan iklim değişiklikleri nedeniyle doğal afetler çok sık yaşanmaya başlamıştır [2]. Bu nedenle ülkeler, gelecekteki enerji tüketimini planlamak, küresel ısınmayı durdurmak için sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla yönelmelidir.



**Şekil 1.** Türkiye'deki elektrik üretim tesisleri toplam kurulu güç dağılımı [EİGM, 2019]

Türkiye elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için termik, hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal ve biokütle santrallerini kullanmaktadır. Son yıllarda ise, alternatif enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payını arttırmak için çalışmalara hız vermiştir. Bu çalışmalara bağlı olarak son beş yılda güneş, rüzgâr ve jeotermal enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin, toplam üretilen elektrik enerjisine oranında artış görülmüştür (Şekil 1.)

PV modüller atmosfere açık şartlarda elektrik üretirken, üzerine gelen güneş ışınları hücre sıcaklığını artışına neden olmaktadır. Fotovoltaik hücre verimine bağlı olarak, gelen güneş enerjisinin sadece bir kısmını elektrığe çevirebilir [3]. PV hücresi tarafından kullanılmayan güneş enerjisinin geri kalan kısmı, panel yüzey ve malzemesine bağlı ısı olarak emilmektedir [4].

Güneş enerjisinden mekanik sisteme ihtiyaç duyulmadan direk olarak PV teknolojisi ile enerji üretmenin avantajlı yönleri olmakla birlikte, sistemin kullanımı esnasında verimi düşüren nedenlerde bulunmaktadır. PV modül verimlerini düşüren nedenler arasında gölgelenme, yansıma, tozlanma, kablo ve invertör kayıpları yer almaktadır. Modüllerin atmosfer şartlarında çalışması esnasında çevresel nedenler ve güneş ışınları nedeniyle sıcaklığı yükselmeye başlar. Güneş ışınlarının bir kısmı modüllerde yararlı enerjiye dönüşürken diğer kısmı, ısı enerjisi olarak modül sıcaklığını arttırmaktadır.

Güneş pilinin çalışma sıcaklığı arttıkça, P-V karakteristiğinde modül gücüne karşılık gelen gerilimi azaltmaktadır. PV modüllerde sıcaklığın artması nedeniyle modül gerilim değeri düşerken akım değeri artmaktadır. Işınım şiddeti arttıkça, PV modül çıkış gücü yükselmektedir. Işınım şiddetine bağlı çıkış gücü ile modül gerilimi ve modül akımı artmaktadır. PV modüllerde sıcaklık değişimlerinin oluşturduğu değişim az iken, ışınım şiddetine bağlı değişim daha fazladır. PV modüller sıcaklıktan olumsuz etkilendiği için sıcaklık arttıkça modülün çıkış gerilimi ve gücü azalmaktadır. Işınım şiddeti modüllerin temel enerji kaynağı olması nedeniyle güneşli-soğuk alanlar PV modüllerin ideal konumlarıdır [5].

PV modüller güneş doğarken çevre sıcaklığındadır, gün içinde ise hücre sıcaklıkları artmaktadır. Işınım şiddetine ve aktif soğutma sistemine bağlı olarak hücre sıcaklığı değişmektedir. Güneş hücrelerinin siyah veya koyu mavi yüzeyi ısı için iyi bir emme tabakasıdır yüzey sıcaklığı (80 °C'ye kadar) ulaşabilmektedir. PV sıcaklığının yükselmesi modül verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Hücre sıcaklığındaki bir

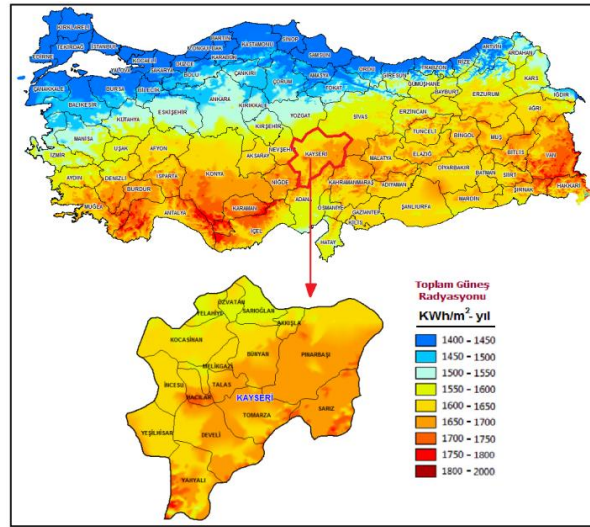
derece yükseliş %0,04 ile %0,065 verim kaybına neden olmaktadır [6]. FDM'ler faz değişimi sırasında gizli ısıyı, sonrasında duyulur ısıyı emerek hücre sıcaklığını sınırlamak için PV modüllerde kullanılabilir [7]. FDM seçimi yapılırken erime sıcaklıkları dikkate alınmalıdır. Gizli ısı depolama kapasitesi yüksek olmalı ve sistemin alt ile üst sıcaklık değerlerine uyumlu olmalıdır. Seçilen FDM kimyasal olarak kararlı ve ucuz olmalıdır. Ayrıca toksik ve aşındırıcı özelliğe sahip olmamalıdır [5].

PV panellere soğutma yapılmadığında, hücre sıcaklığına bağlı olarak panelin elektrik üretimi ve elektriksel verimi düşmektedir. Deneysel çalışmalarda PV yüzey sıcaklığı 50 dakika içerisinde 80°C sıcaklığa çıkmaktadır. Yüzey sıcaklığının artışı PV panelin elektriksel verimini %11,9 iken %8 seviyelerine düşürmektedir [8].

### 1.1. Güneş Enerjisi Potansiyeli (Solar Energy Potential)

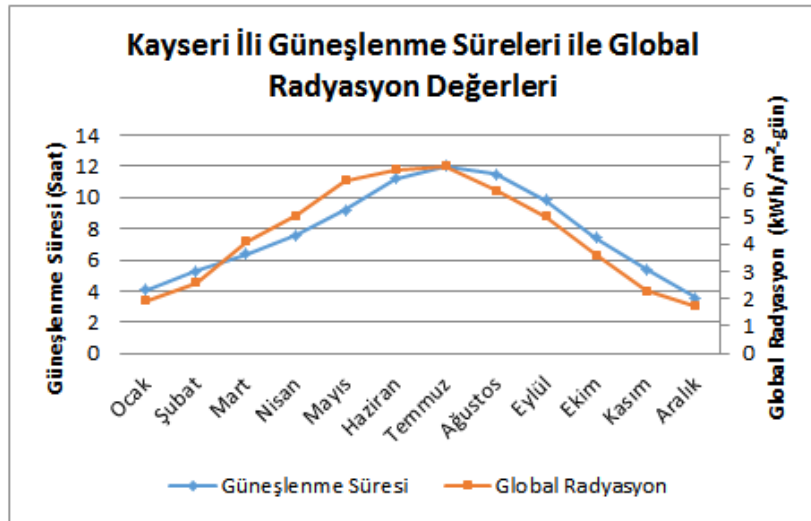
Tarih boyunca güneş ve güneş enerjisini insanlığın yararına kullanmak için çalışmalar yapılmıştır. Geçmişte güneşten atmosfer şartlarında kurutma yapılırken, günümüzde atmosfer şartlarından bağımsız modern şartlarda kurutma işlemleri yapılmaktadır. Güneş enerjisinden yararlanma yöntemleri arasında en yaygın olarak ısıl sistemler kullanılmaktadır. Evlerin çatılarında termal kolektörler kullanılarak kullanım suları ısıtılmakta ve yoğunlaştırıcı ısı sistemleri ile güneş santrallerinde elektrik üretilmektedir. Isıl yöntemler dışında, güneş enerjisinden doğrudan elektrik elde etmek için PV sistemler kullanılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları sürekliliği olan, tükenmez ve çevreci enerji kaynaklarıdır. Güneş enerjisi bu yenilenebilir enerji kaynaklarından olmakla birlikte, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına da kaynak olmaktadır. Enerji kaynağı güneşten gelen ışınlar olması nedeniyle, temiz ve çevreci bir enerji kaynağıdır. Yeryüzünün yüzey şekillerine ve yükseltisine bağlı olarak ortalama güneş enerjisi potansiyeli (0-1100) W/m<sup>2</sup> 'dir [9].



Şekil 2. Türkiye-Kayseri ili güneş enerji potansiyeli (YEGM, 2019)

Türkiye konumu nedeniyle yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Türkiye geneli ortalama güneşlenme süresi 2737 saat/yıldır. Türkiye geneli ortalama güneş enerjisi potansiyeli 1527 kWh/m<sup>2</sup>-yıldır [10]. Kayseri ili ise güneş ışınımı miktarı 1500-1700 KWh/m<sup>2</sup>-yıl olarak yüksek potansiyele sahiptir (Şekil 2). Kayseri ilinde günlük güneşlenme süresi yaz aylarında 12 (saat) seviyelerinde olmakla birlikte, global güneş radyasyonu ise 7 kWh/m<sup>2</sup>-gün seviyelerindedir (Şekil 3). Bu nedenle yapılan çalışmada deney düzeneği Kayseri ilinde yer alan Erciyes Üniversitesi kampüsü içerisinde kurulmuştur.



Şekil 3. Kayseri ili güneşlenme süreleri ile global radyasyon değerleri [EİGM, 2019]

Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına, özellikle güneş enerjisine eğilimin arttığı görülmektedir [11]. PV hücre teknolojisinde görülen yeni gelişmeler, ayrıca sistem bileşenlerinde kayıpların azaltılması, toplam verim artışını sağlamaktadır. Sistemlerde görülen kurulum kolaylığı, zaman içerisinde düşen maliyetler, PV sistemlerini avantajlı hale getirmektedir. Ayrıca ülkelerin güneş enerjisine yönelik sağladıkları teşvikler ve lisans muafiyeti, fotovoltaik sistemlerin cazip hale gelmesini sağlamaktadır [12].

## 1.2. Faz Değiştiren Madde (Phase Changing Material)

PV modüllerin yüksek sıcaklıklarda çalıştırılması modül verimlerini ve modül ömürlerini olumsuz etkilemektedir. Modül sıcaklığının yükselmesini engellemek için pasif veya aktif soğutma yöntemleri kullanılmaktadır. Pasif soğutma, tabii olarak sistemde hava akışı sağlanarak yapılmaktadır. Aktif soğutma, cebri olarak suyla veya havayla yapılabilmektedir. Son yıllarda PV panelleri için hava kaynaklı ısı pompasıyla modül sıcaklığını düşürmek için çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca ısı borusu kullanarak aktif su soğutma tekniği kullanılmaktadır. PV modüllerin sıcaklık kontrolünde FDM kullanmak birçok araştırmacı tarafından denenmeye başlanmıştır [13-14-15]. FDM kullanılarak yapılan çalışmalarda sistemin ekonomik uygulanabilirliği sorgulanmaya devam etmektedir.

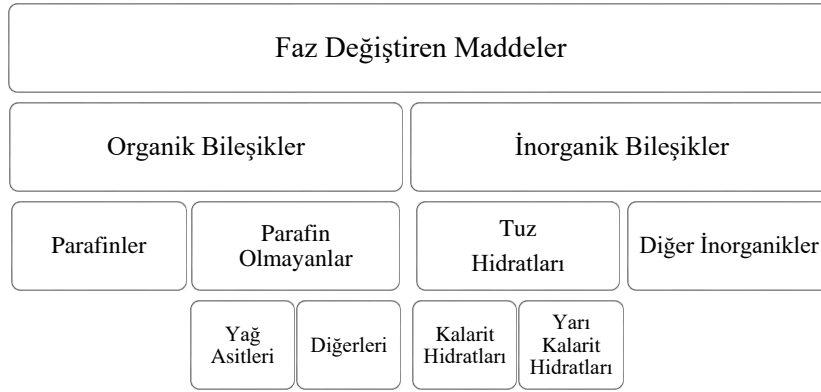
FDM'ler ısıya maruz bırakıldığında iç enerjilerinde artış görülmeye başlamaktadır. Isı verilmeye devam edilirse iç enerjileri artmaya devam eder ve maddenin sıcaklığı faz değişim sıcaklığına kadar yükselmeye başlar. Faz değişim sıcaklığına ulaşan FDM'ye ısı verilmeye devam ederse sabit sıcaklıkta faz değişimi gerçekleşir. Faz değişimi esnasında madde, gizli ısıyı depolarken madde sıcaklığı sabit kalır. Faz değişimi tamamlanması sonrasında FDM'ye ısı verilmeye devam edilirse, sıcaklığı artmaya devam eder. Sistemde kullanılacak FDM önceden incelenmelidir. Maddenin faz değişim sıcaklığı ve ısı kapasitesi kullanılacak sistem için uygun olmalıdır. Isı depolamak için kullanılabilen FDM türlerine örnek maddeler ve özellikleri (Tablo 1)'de verilmiştir.

Tablo 1. FDM Türleri ve Özellikleri

FDM	Moleküler Formül	Erime Noktası (°C)	Erime Isısı (kJ/kg)
Kalsiyum Klorür Hekzahidrat	CaCl <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	29,7	171
Oktadekan	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> CH <sub>3</sub>	24,4	244
Trimetilolitan Tetrahidrat	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub> 4H <sub>2</sub> O	29,8	185
Parafin	MERWAX B4-F	44-46	155
Tuz Hidratı	CaCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	30	171



FDM'ler organik ve inorganik olarak ikiye ayrılırlar. Parafinler ve yağ asitleri organik FDM sınıfında yer alırken, tuz ve klatrat hidratları inorganik FDM sınıfında yer almaktadır. Organik FDM'lerin kararlı olmaları, toksik olmamaları, korozif özellik göstermemeleri, düşük buhar basıncına sahip olmaları ve aşırı soğuma göstermemeleri avantajlarıdır. Organik FDM'lerin termal iletkenliğinin düşük olması, yanıcı olmaları ve çalışma şartlarında faz değişimi esnasında büyük hacim değişimi göstermeleri dezavantajlarıdır. İnorganik FDM'lerin termal iletkenliklerinin iyi olması, ergime ısısının yüksekliği, yanıcı olmaması ve ucuz olmaları avantajlı yönleridir. İnorganik FDM'lerin aşırı soğuma göstermesi, korozif olmaları, düşük faz dönüşüm sayısı dezavantajlı yönleridir. FDM'ler sistemde ısı enerjisi gereksinimi bulunmadığı durumlarda ısı depolama işlemi gerçekleştirirken, ısı ihtiyacı oluştuğunda sisteme ısı verebilmektedir. FDM'ler kapsülendirilerek kullanılması halinde, kullanıldığı sisteme avantajlar sağlamaktadır. FDM'ler kapsülendirirken sistemin yapısına bağlı olarak makro, mikro veya nano kapsülleme yöntemlerinden biri kullanılabilir. FDM'ler ısı depolamak ve ısı aktarmak amacıyla kapsülendirilerek kullanılması halinde, maddelerin çevrim sayısı artmaktadır [16].



**Şekil 4.** Faz değiştiren materyallerin sınıflandırılması [17].

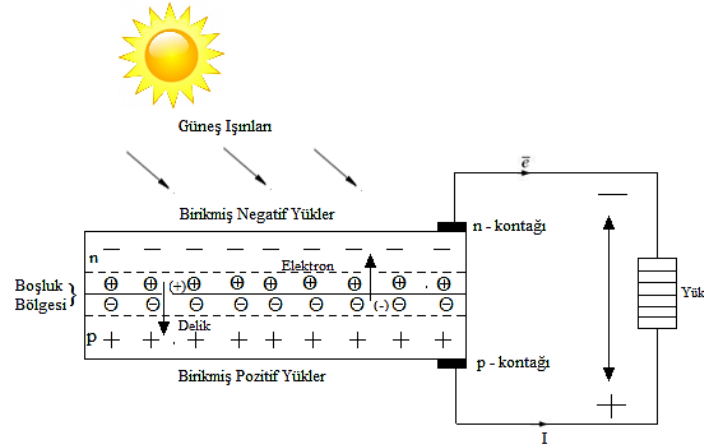
Sistemde FDM olarak Kalsiyum Klorür Heksahidrat ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) kullanılmaktadır. Normal şartlarda ( $25^\circ\text{C}$ ) katı fazda bulunan FDM sistemde ısıya maruz kaldığında,  $29,7^\circ\text{C}$ , sıcaklıkta erimeye başlamaktadır. Katı-sıvı faz değişim ısısı  $171 \text{ kJ/kg}$ 'dır.

FDM tercihi yapılırken, seçilen madde tasarlanan sisteme uygun olmalıdır. Seçilen FDM, sistemden beklenen ısı depolama kapasitesini karşılayabilmelidir. FDM'lerin ısı tutma kapasiteleri, faz değiştirme süreleri ve ısı transferi katsayıları tasarlanan sistem için uygun olmalıdır [18]. İnorganik maddeler organik maddelerle kıyaslandığında, birim hacimde iki kattan fazla ısı depolama kapasitesine sahiptir [19]. FDM'ler Fotovoltaik ve Hibrit sistemleri istenen sıcaklıkta tutmayı sağlayabilmektedir. Sistem istenen sıcaklıkta tutulduğunda daha fazla elektrik enerjisi üretebilmektedir. FDM kullanılan fotovoltaik modüllerin diğer modüllere kıyasla sıcaklık ortalamaları, yaklaşık  $30^\circ\text{C}$  azalmaktadır [20].

PV modüllerde FDM kullanımı, hücre sıcaklığının yükselmesini önlemektedir. Bu sisteme sağladığı pozitif bir durumdur. PV modüllerde FDM kullanımı sonrası negatif durumlarda ortaya çıkmaktadır. Modül ağırlığının artması, izolasyon problemlerinin yaşanması, ışık ve maliyetin artması negatif yönler olarak karşımıza çıkmaktadır.

### 1.3. Güneş Pilleri (Solar Cells)

Güneş enerjisinden direk elektrik enerjisi elde etmek için geliştirilen sistemlerin temelini, güneş pilleri oluşturmaktadır. Güneş pilleri, güneşten üzerine düşen ışınları (fotonları) direk olarak elektrik enerjisine çevirebilmektedir. Modül yüzeyine gelen güneş ışınları, güneş pilinin katmanları arasında elektrik akımı oluşmasını sağlamaktadır. Doğru akım olarak elektrik üretim yapan güneş pilleri, imalat ve bağlantı şekillerine göre çeşitli güçlerde imal edilebilmektedirler. Sistemden elde edilen enerji doğrudan kullanılabilir gibi, akülerde depolanabilmekte veya inverter vasıtasıyla şebekeye verilebilmektedir [21].



**Şekil 5.** Güneş pilinin çalışma prensibi [5].

Güneş hücrelerinin birbirlerine bağlanmasıyla, istenen çıkış gücüne sahip PV modüller oluşturulmaktadır (Şekil 5). Modüller birbirlerine bağlanarak panelleri ve paneller birbirlerine bağlanarak panel dizilerini oluşturmaktadır. Tasarımı yapılan sistemin gücünü karşılamak için modüller ve paneller birbirlerine seri veya paralel olarak bağlanabilmektedir.

PV modüllerin verimleri modül malzeme bileşimine, ışınım şiddetine, ortam sıcaklığına ve modül sıcaklığına bağlıdır. PV modül yüzey sıcaklığı  $14,9^{\circ}\text{C}$  iken modül verimi %12,07 ve modül yüzey sıcaklığı  $51,3^{\circ}\text{C}$  iken modül verimi %10,7 olmaktadır. PV modüllerde sıcaklık artışı, modüllerde sıcaklık artışına bağlı verim düşümüne neden olmaktadır [22].

Modül arka yüzeyi kış şartlarında modüllerin bulunduğu ortam sıcaklığı ve güneş radyasyonu değerlerine bağlı, soğutmaya ihtiyaç duymamaktadır. Yaz şartlarında ise hava hızı artırıldığında modül sıcaklığı azalır buna bağlı olarak açık devre voltajı artmaktadır [23]. Yoğunlaştırıcı modüllerde ise panel sıcaklığı  $80^{\circ}\text{C}$  ile  $100^{\circ}\text{C}$  arasında değişmektedir. Bu sıcaklıklar panel verimliliğini %10'a kadar düşürmektedir. Panellerin arkasındaki sıcaklık, ortam sıcaklığına ve konsantre güneş radyasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle modüllerin sıcaklığının düşürülmesi ihtiyaç haline dönüşür [24]. PV modüllerde geleneksel modüller ile FDM (parafin-balmumu) uygulanan, nanoparçacıklı (parafin) karışımı kullanılan modüller kıyaslandığında yüksek güneş radyasyonunda nanoparçacıklı parafin karışımı olan panelin yüksek elektriksel ve termal verime sahiptir. Ekserji analizlerine bakıldığında nanoparçacıklı parafin karışımı olan panelin ortalama ekserji verimliliği %10, parafinli panelin %9,2 olduğu belirlenmiştir [25].

#### 1.4. Fotovoltaik Sistemin Enerji Dengesi (Energy Balance of Photovoltaic System)

Termodinamiğin birinci yasası enerji korunumu kanunudur. Bu yasada “Kapalı bir sistemde bir hal değişimi sırasında toplam enerjisindeki net değişimi, sisteme giren toplam enerji ile sistemden çıkan toplam enerjinin farkına eşittir” diye ifade edilmektedir. Enerji korunarak bir formdan başka bir forma dönüşmekte toplam enerji miktarı değişmemektedir. Bu nedenle bir sistemde enerji dengesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$E_{giren} - E_{çıkan} = \Delta E_{sistem} \quad (1)$$

Denklemden ifade edilen sistem içinde meydana gelecek değişiklik, sisteme giren ( $E_{giren}$ ) enerjiden, sistemden çıkan ( $E_{çıkan}$ ) enerjinin çıkarılmasıyla hesaplanabilmektedir. Fotovoltaik sistemde enerji dengesi PV sisteminin elektrik üretimi ve PV sisteminin ısı kayıplarının toplamından oluşmaktadır.

$$En_{PV} = En_{PV,e} + En_{PV,ısı} \quad (2)$$

Sistemin açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) bilinmesi halinde sistemin üreteceği elektrik enerjisi ( $En_{PV,e}$ ) hesaplanabilmektedir.

$$En_{PV,e} = V_{oc}I_{sc} \quad (3)$$

Sistemde meydana gelen ısı kayıpları ( $En_{PV,ısı}$ ) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$En_{PV,ısı} = h_{ca}A_c(T_c - T_a) \quad (4)$$

Denklemden verilen ( $h_{ca}$ ) taşınım ve ışınım nedeniyle oluşan ısı kaybını ( $W/m^2K$ ) ve ( $T_c$ ) hücre sıcaklığını (K) ifade etmektedir. PV hücrede meydana gelen ısı kaybı rüzgâr hızına, modül yüzey malzemesine, nem oranına bağlı değişmektedir.

$$En_{PV} = V_{oc}I_{sc} + h_{ca}A_c(T_c - T_a) \quad (5)$$

Denklemin 2’de verilen eşitlik PV sisteminin toplam enerji dengesini ifade edecek şekilde yukarıdaki şekilde tekrar yazılabilmektedir.

PV sisteminin enerji verimliliği sistemden çıkan enerjinin, yüzeye ulaşan güneş enerjisine oranı olarak tanımlanabilmektedir.

PV sistemlerde modül sıcaklığı değişimi hücre verimini etkilemektedir.

$$\eta_h = \eta_{stk}[1 - \beta(T_h - 25)] \quad (6)$$

Eşitlikte yer alan ( $\eta_h$ ) hücre verimini, ( $\eta_{stk}$ ) test koşullarındaki verimi, ( $T_h$ ) hücre sıcaklığını, ( $\beta$ ) hücre sıcaklık katsayısıdır. PV modüllerin saatlik enerji üretim miktarı güneş ışınımına bağlı olarak değişmekle birlikte, modül verimi, sistem verimi ve diğer verim parametrelerine bağlı olarak değişmektedir.

## 2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, PV modüllerin elektrik üretimi esnasında sıcaklık artışı nedeniyle meydana gelen olumsuz etkilerin azaltılması için deneysel çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmada 4 adet PV modül kullanılmıştır. Modüllerden 2 tanesi monokristal, 2 tanesi polikristaldir. Monokristal ve polikristal modüllerden birer modül referans modül olarak ölçüm tablasına yerleştirilmiştir. Diğer 2 modül için çift katman makro kapsül arasına ısı borusu yerleştirilerek panel arka yüzeyine sabitlenmiştir.



**Şekil 6.** Deney düzeneği sıcaklık ölçme sistemi kalibrasyonu

Yapılan çalışmada PV modül sıcaklık ölçümleri SCN100 veri analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır. SCN100 içerisinde istasyonlardan sıcaklık ölçüm ayarı yapılarak K tipi termokupl uçlara bağlanmıştır. Cihaz buzlu su ’da ( $0^{\circ}C$ ) ölçümleri yapılarak kalibrasyonu kontrol edilmiştir (Şekil6).



Deney düzeneğinde kullanılan monokristal ve polikristal modüller 10W gücündedir. Modüllerin özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 2). Modüllerin ebat ve boyutları aynı özelliktedir. Modüllerin üretici tarafından test edilen verimleri %15,15, açık devre voltajı 21,6V, kısa devre akımı 0,61A olarak verilmiştir.

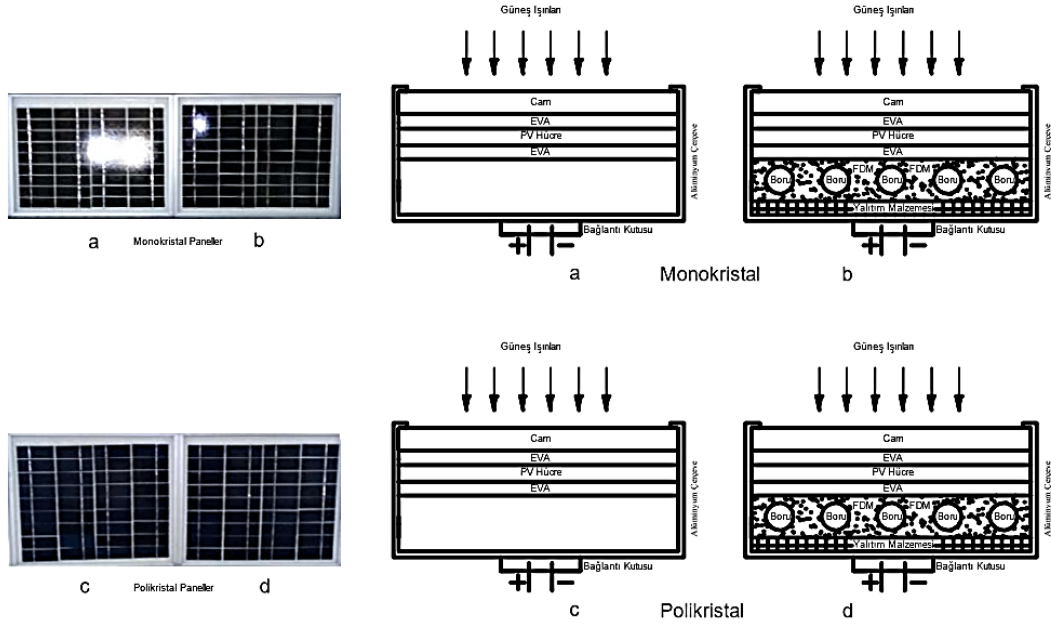
**Tablo 2.** PV Modüllerin Elektriksel ve Fiziksel Özellikleri

Özellikleri	Monokristal Özellikleri	Polikristal Özellikleri
Maksimum güç (PM)	10 W	10 W
Güç Toleransı	Sadece Pozitif	Sadece Pozitif
Açık Devre Voltajı (VOC)	21.6 V	21.6 V
Kısa Devre Akımı (ISC)	0.61 A	0.61 A
Yükteki Maks. Voltaj (VPM)	17.38 V	17.38 V
Yükteki Maks. Akım (IMP)	0.56 A	0.56 A
Maksimum Sistem Voltajı	600 V	600 V
Modül Verimi	15.15%	15.15%
Hücre tipi	Monokristal	Polikristal
Boyutlar / Çerçeve	(355x305x20)mm/Alüminyum	(355x305x20)mm/Alüminyum
Ağırlık	1.5 kg	1.5 kg
Bağlantı Kutusu	IP65 67	IP65 67

Deney düzeneğinde kullanılan monokristal ve polikristal modüller ile ölçme cihazlarının belirsizlik analizi (Uncertainty Analysis) yapılmıştır (Tablo 3). Modüllerin çıkış parametrelerini güneş radyasyonu, modüllerin hata oranı, ölçüm cihazlarının hata oranı belirlemektedir. Ölçüm cihazlarının belirsizlik analizi yapılırken standart test koşullarındaki ölçümlerde belirtilen hata değerleri alınmıştır. Sonuçlar laboratuvar sonuçlarına göre kıyaslandığında sapmaların olması sistemde etki eden diğer bilinmeyen parametrelerin varlığı nedeniyle ortaya çıkabilmektedir.

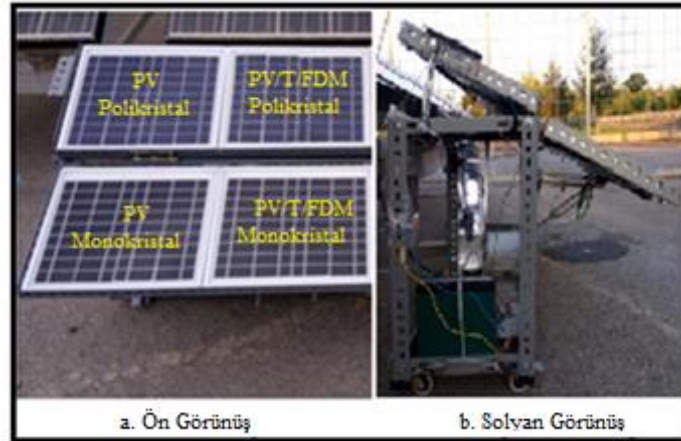
**Tablo 3.** Ölçme Sisteminde Kullanılan Cihazların Özellikleri ve Belirsizlik Analizi

Cihaz Adı	Ölçme Türü	Birimi	Verim (%)	Ölçülen Verim (%)	Oran
<b>PV Modüller</b>					
Monokristal PV	Güç	W	15,15 (25°C)	14,34	±3,33
Polikristal PV	Güç	W	15,15 (25°C)	14,31	±3,33
Monokristal PV/T/FDM	Güç	W	15,15 (25°C)	14,33	±3,33
Polikristal PV/T/FDM	Güç	W	15,15 (25°C)	14,32	±3,33
<b>Ölçüm Cihazları</b>					
Cihaz Adı	Ölçme Türü	Birimi	(%) Oran	Ölçülen Değer	Oran
SCN100	Sıcaklık	°C	0,2	25	±1,03
Termokupl	Sıcaklık	°C	0,2	25	±0,28
Piranometre	Işınım	W/m <sup>2</sup>	1000 W/m <sup>2</sup> ±1.5	1000	±1,51
Multimetre	Gerilim	V	±1.2	19,40	±1,21
Ampermetre	Akım	A	±1.2	0,495	±2,16



**Şekil 7.** PV, PV/T Olarak Kullanılan Modüllerin Detay Şekilleri

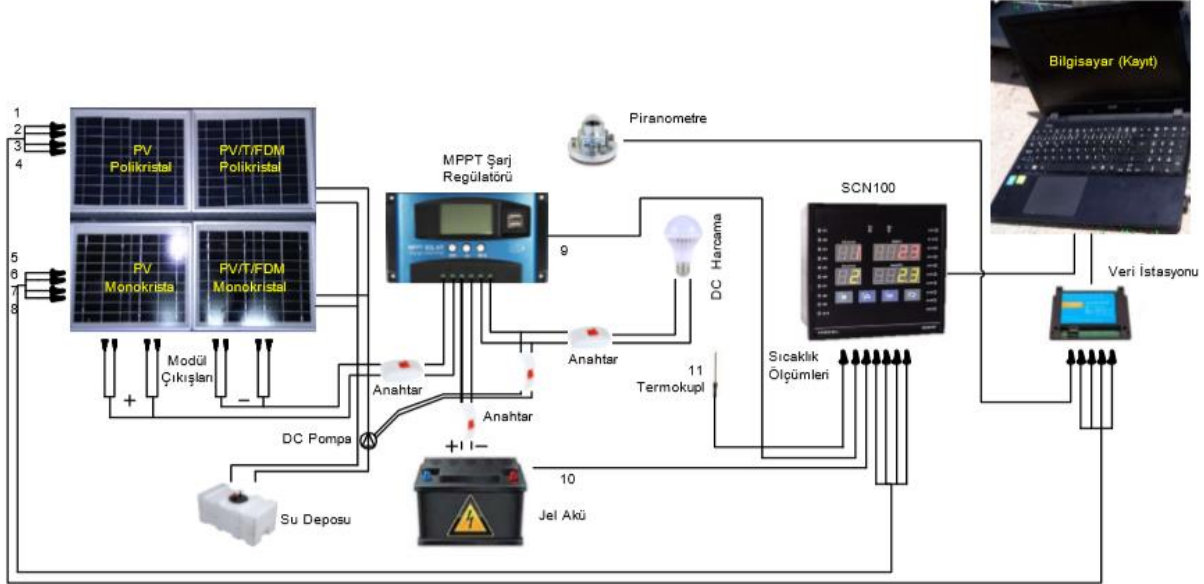
Deney düzeneği Kayseri ili Melikgazi ilçesi sınırlarında bulunan Erciyes Üniversitesi kampüsü içerisine yerleştirilmiştir. Sistemin verileri bir yıl süre ile gözlemlenerek verilerin güvenilirliği kontrol edilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan modüllerin şekilleri ve tasarımları yukarıda gösterilmiştir (Şekil 7). Şekilde (a) geleneksel monokristal PV modülü ifade etmekte, (b) yüzeyine FDM uygulanmış içerisinden ısı borusu geçirilen yalıtımlı PV/T/FDM monokristal modülü göstermektedir. Şekilde (c) geleneksel polikristal PV modülü ifade etmekte, (d) yüzeyine FDM uygulanmış içerisinden ısı borusu geçirilen yalıtımlı PV/T/FDM polikristal modülü göstermektedir. Isı borusu U tipi kullanılarak bakır borudan imal edilmiştir. FDM makro kapsülleri arasına bakır borular yerleştirilerek sabitlenmiştir. FDM kapsülün üzeri EPS (Genleştirilmiş Polistren) termoplastik kapalı gözenekli strafor (yoğunluğu  $10\text{kg/m}^3$ , ısı iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ )  $0.039\text{W/m}^2\text{K}$ ) ile kaplanmıştır. Bakır borular soğuk büküm ile şekillendirilmiş olup eksiz olarak ısı borusuna dönüştürülmüştür.



**Şekil 8.** Deney Sistemi Genel Görünüşleri.

FDM PV'lerdeki sıcaklık artışını sınırlamak amacıyla ısı çekmektedir. Isı borusu ise FDM tarafında çekilen ısıyı, suya transfer etmek amacıyla kullanılmaktadır. PV tarafından emilen ısı, taşıyıcı akışkan olan suya transfer edilmektedir. Su ısı taşıyıcı akışkan olarak sistemde kullanılmakta ve cebri olarak sirküle edilmektedir. Modüller sistemde  $15^\circ$  ile  $30^\circ$  arasında açılarda ayarlanmıştır. Modül açıları Kayseri ilinin enlem derecesine ( $38,731$ ) göre hesaplanmıştır. Modüller tüm yıl kullanıldığında ağustos ayı için panel eğim açısı ( $30-31^\circ$ ) çıkmaktadır. Modüller yaz aylarında kullanıldığında ağustos ayı için panel eğim açısı

(15-16)<sup>o</sup> çıkmaktadır. Deneysel sonuçlarının verildiği ağustos ayı için modül açıları 16<sup>o</sup> alınmıştır. Modül açıları değiştirilerek, eğim açısı yanlış uygulanması sonucunda verim kaybı oluşmaktadır. Eğim açısı değeri hatası artırıldığında verim kaybı artmaktadır.

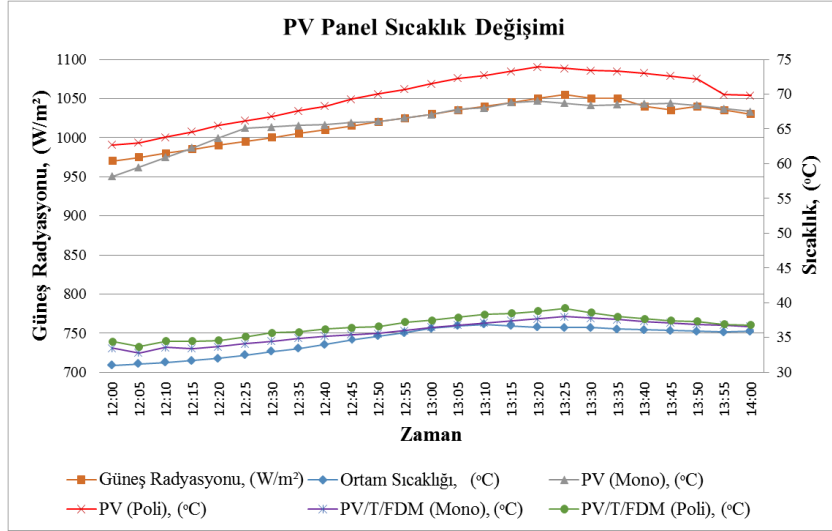


**Şekil 9.** PV-PCM sisteminin deneysel tasarımı.

Deneysel sisteminin tasarımı (Şekil 9)'da verilmiştir. PV modül sıcaklıklarını ölçmek için K tipi termokupl (1-2-3-4) kullanılmıştır. Sistemde çalışan devre elemanlarının sıcaklıkları ve ortam sıcaklığı SCN100 ile K tipi termokupl yardımıyla ölçülmüştür (9-10-11). Modüller polikristal PV, polikristal PV/T/FDM, monokristal PV, monokristal PV/T/FDM olarak gösterilmiş olup; modüllerden sağlanan gerilim çıkışı (5-6-7-8) ile veri istasyonuna bağlanmış ve bilgisayara kaydedilmiştir. Modüllerin çıkışları paralel bağlanarak bir anahtar üzerinden MPPT Şarj Regülatörüne bağlanmış, şarj regülatörünün harcama ucu DC lambaya ve şarj ucu jel aküye bağlanmıştır. Böylelikle sistem şebekeden bağımsız güneş enerji sistemi olarak çalışmaya başlamıştır. Polikristal ve monokristal modüllerden PV/T/FDM olarak çalıştırılan (b-d) modüller su deposundan alınan suyun ısı borusu içerisinden geçirilerek cebri olarak dolaştırılmasıyla soğutulmaktadır. Sirkülasyonun devam etmesiyle birlikte modül sıcaklıkları yükselmesi engellenmiş ve düşmeye başlamıştır. Bu durum verim düşüşüne neden olan sıcaklığın etkisini ortadan kaldırmaktadır.

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND SUGGESTIONS)

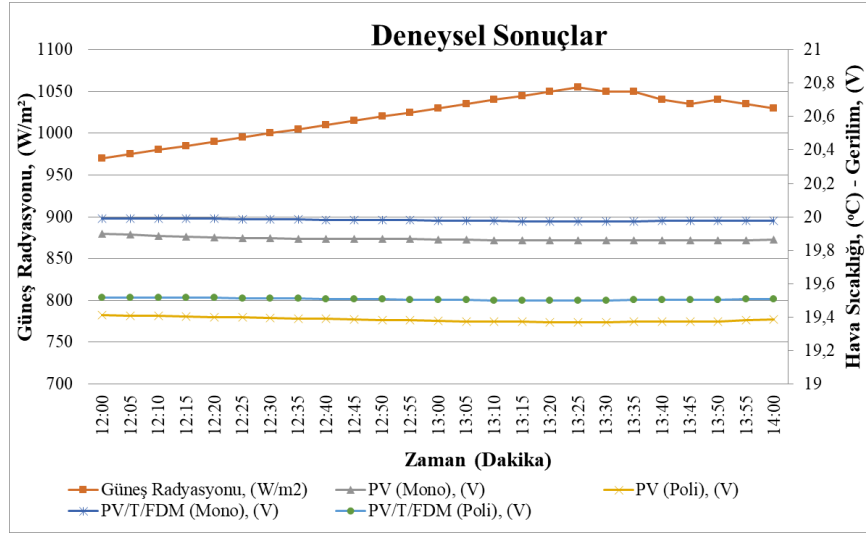
Yapılan bu çalışmada PV modüllerde modül verimini etkileyen parametrelerden biri olan sıcaklığın etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada PV modüllere ısı borusu ve FDM uygulanmıştır. Modül yüzeyinde yapılan uygulamaların modül çalışma sıcaklığını nasıl değiştirdiği, akım, gerilim ve güç çıkışını nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda modül sıcaklık değerlerinin test koşullarına yakın tutulması, modül verimlerini olumlu olarak etkilediği görülmüştür.



**Şekil 10.** Güneş radyasyonuna bağlı modül sıcaklığı değişimi (26.08.2019)

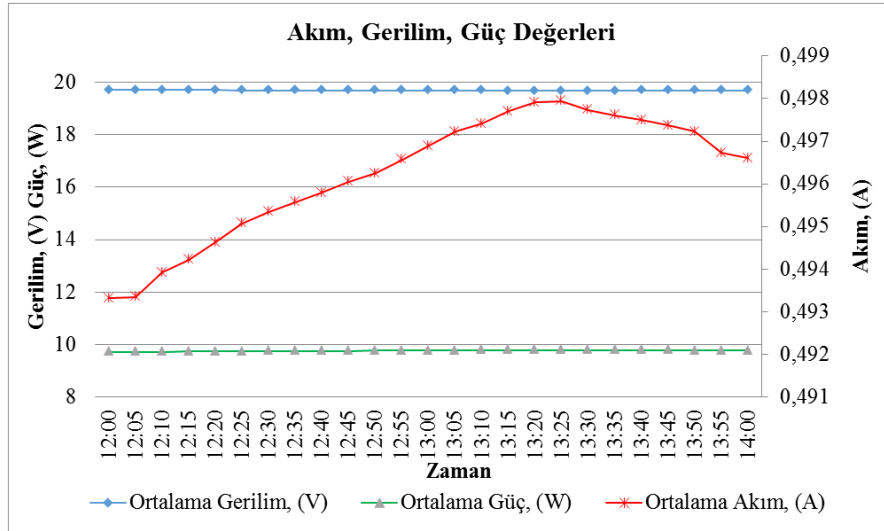
Güneş radyasyonu ve çevresel şartlar nedeniyle modül sıcaklıkları sürekli değişmektedir (Şekil 10). Güneş ışınım değerleri 12:00-14:00 saatleri arasında 970-1055W/m<sup>2</sup> aralığında değişmektedir. Deney verileri incelendiğinde, ışınım miktarına bağlı olarak PV (Polikristal), PV (Monokristal), PV/T/FDM (polikristal), PV/T/FDM (monokristal), modüllerin yüzey sıcaklıkları ışınım miktarına bağlı olarak 33°C ile 74°C aralığında değişmektedir. Deneyde ölçülen en yüksek modül sıcaklığı polikristal modüle ait olup 73,9°C seviyelerine ulaşmaktadır. Deneyde ölçülen en düşük modül sıcaklığı PV/T/FDM (monokristal) modüle ait olup 33,5°C seviyelerindedir. Işınım değerlerine ve modül yüzey sıcaklığına bağlı olarak çıkış gerilimi değişmektedir.

FDM sistemden ısı çekmek amacıyla modül arka yüzeyine ilave edilmiştir. İki adet makro kapsül içerisine (360+360) ml, toplam 720 ml Kalsiyum Klorür Hekzahidrat enjekte edilerek kapsülleme yapılmıştır. İki makro kapsül arasından ısı borusu geçirilmiştir. Sistemde kullanılan FDM faz değişim sıcaklığı 29,7°C olduğu için katı fazda bulunmaktadır. Faz değişim sıcaklığına kadar ısı çeken FDM bu sıcaklıkta faz değiştirmekte ve sıvı hale dönüşmektedir. Sıvı haldeki FDM ısı alarak sıcaklığı artmaya devam etmektedir. Fakat bu sıcaklık buharlaşma sıcaklığının çok altındadır. Bu nedenle sistemde buharlaşma faz değişimi yaşanmamaktadır. FDM'nin sıcaklığının çevre sıcaklığının üzerine yükselmesi için gerekli ısı kaynak sistemde bulunan PV modüllerdir. Yaz aylarında güneş doğuşunda sistem sıcaklığı 13°C ile 18°C arasında değişmektedir. Başlangıç noktası sıcaklığına bağlı olarak faz değişiminin başlaması için 12-17°C arasında bulunan FDM ısı almalıdır. FDM katı-katı sıcaklık değişimi esnasında 26,1kj duyulur ısı ile sıcaklığı faz değişim sıcaklığına yükselmektedir. FDM katı-sıvı faz değişimi esnasında 184,7kj gizli ısı ile sıcaklığı sabit kalarak sıvı hale gelmektedir. FDM sıvı-sıvı sıcaklık değişimi esnasında 12kj duyulur ısı ile sıcaklığı 35°C'ye kadar yükselmektedir. FDM katı-katı, katı-sıvı, sıvı-sıvı işlemlerinde toplam 223kj ısı alarak son durumda sıvı halde 35°C sıcaklıkta bulunmaktadır. Isı borusundaki sirkülasyonun devam etmesi ve çevresel etkenler sıcaklığın daha fazla yükselmesine izin vermemektedir. Bu durumda modül sıcaklığının yükselmesi durmaktadır. Modül sıcaklığı sistemde bulunan FDM sayesinde anlık olarak değişmemektedir. Modül sıcaklığının test koşullarında tutulması ve anlık değişimlerin azaltılması PV modüllerin çıkış parametrelerini olumlu etkilemektedir.



Şekil 11. Güneş radyasyonuna bağlı gerilim değerleri

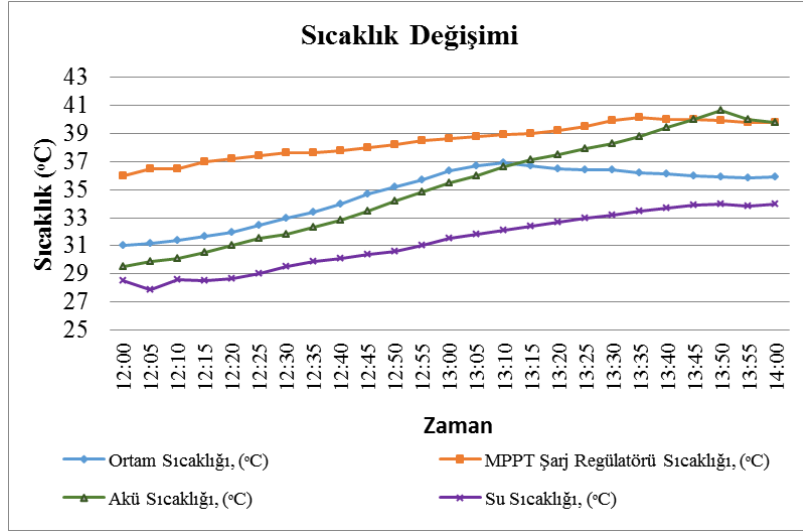
Güneş radyasyonuna bağlı olarak gerilim değerleri değişmektedir (Şekil 11). Deney ölçümlerinden elde edilen veriler incelendiğinde, ışınım değerinin en yüksek olduğu zaman dilimi gün ortasıdır. Işınım miktarına bağlı olarak ortam sıcaklığı, saat 13:00-13:30'da 37°C seviyelerinde bulunmaktadır. Işınım miktarına bağlı olarak PV (Polikristal), PV (Monokristal), PV/T/FDM (Polikristal), PV/T/FDM (Monokristal), modüllerin gerilim çıkışları ışınım miktarına ve modül sıcaklığına bağlı olarak 19 ile 20 volt aralığında değişmektedir. Deneyde ölçülen en yüksek gerilim seviyesi, PV/T/FDM (Monokristal) panel çıkışından 19,97V olarak elde edilmiştir. Sistemde modüllerin ortalama güç değerler 9,5W ile 9,8W arasında değişmektedir. Sistem içerisinde modüller tek çıkış ile şarj regülatörüne bağlandığında, şarj gerilimi ortalama 14,2V ve sistem tüketim güç çıkışı 12,6V ile 13,6V aralığında değişmektedir. Sistemde 5W gücünde iki adet DC LED lamba bulunmakta ve bir adet DC sirkülasyon pompası 35W güç harcamaktadır. Aydınlatma devresi 24 saat temmuz ve eylül ayı boyunca kapatılmamış, kesintisiz enerji ihtiyacı sistemden karşılanmıştır.



Şekil 12. Modüllerde ortalama akım, gerilim ve güç değerleri

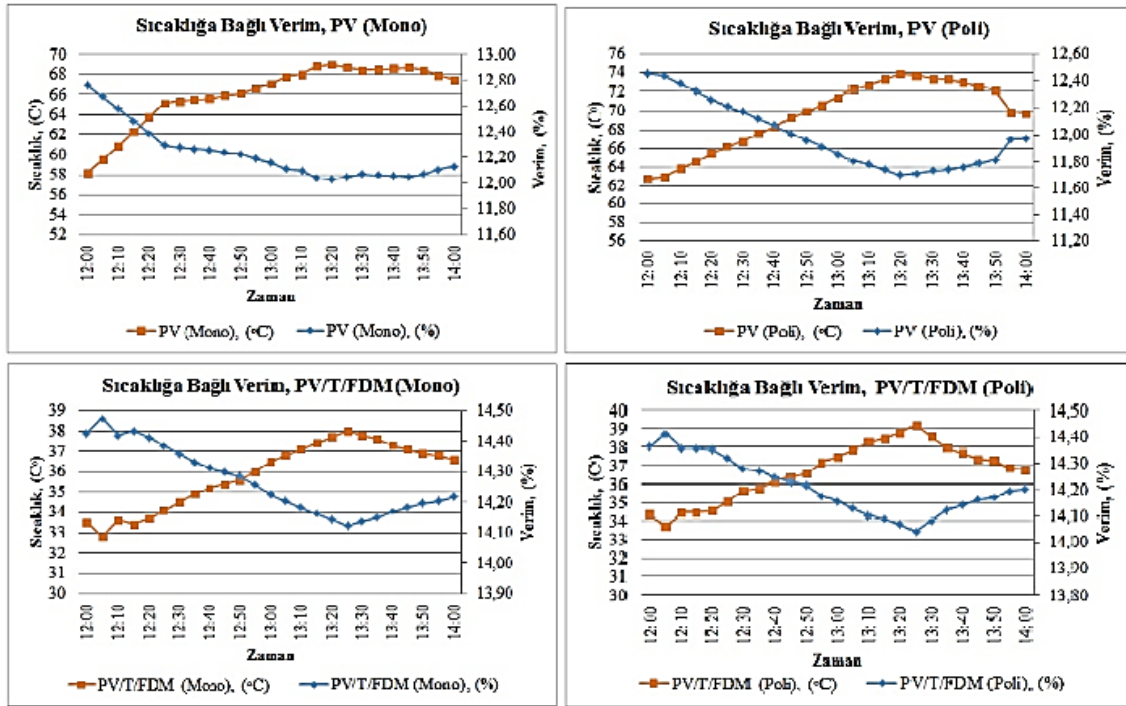
PV modüllerin çıkış gerilimi güneş ışınım miktarına bağlı olarak değiştiği gibi modül sıcaklığına bağlı verim düşümü nedeniyle de değişmektedir. Modül yüzey sıcaklığı artmasıyla birlikte modül çıkış gerilim değerleri azalmaktadır (Şekil 12). Modül akımları modül sıcaklığına bağlı olarak yükselmektedir. Modül akımlarındaki artış, gerilim düşümüne oranla 1/5-1/10 seviyelerinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle modül çıkış gücü sıcaklık artışı nedeniyle azalmaktadır.





Şekil 13. Sistem bileşenlerinin sıcaklık dağılımı

Sistem atmosfer şartlarında çalışırken bulunduğu ortamdan kaynaklı çevresel etkilere maruz kalmaktadır. Güneş ışınım değeri, ortam sıcaklığı, nem miktarı, rüzgâr hızı vb. nedenlerden dolayı sistem elemanlarının sıcaklıkları değişmektedir. Sistem çalışır durumda iken sistem bileşenleri çalışma şartlarından etkilenmektedir. Bu nedenle sistem elemanları sıcaklıkları ölçülerek kayıt altına alınmıştır (Şekil 13). Güneş ışınım değerinin arttığı ve çevre sıcaklığının yükseldiği zaman diliminde sistem elemanlarının sıcaklığı artmaktadır. Güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı azaldığında sistem elemanları ısı kaybettiği için çalışma sıcaklığı azalmaktadır. Sistem elemanlarının çalışma sıcaklığı aşırı seviyelere ulaşmaması nedeniyle harici soğutma uygulamalarına ihtiyaç duymamaktadır. Sistem bileşenleri sıcaklığı 40°C üzerine çıkmamaktadır. Bu nedenle sistem elemanlarına yönelik harici soğutma yapılmamıştır. Sonuç olarak modül verimlerine etkisi düşük olması nedeniyle yok kabul edilerek verim hesabı yapılmıştır.



Şekil 14. Modüllerde sıcaklığına bağlı verim değişimi

PV modüller çalışma şartlarında değişken güneş ışınımına maruz kalmaktadır. Işınım değerleri ve çevresel etkiler nedeniyle modül sıcaklıkları sürekli değişmektedir. Modül sıcaklıklarına bağlı modül verimleri de değişmektedir (Şekil 14). Geleneksel monokristal ve polikristal modüllerde ışınım değerlerine bağlı ve

çevresel koşullar nedeniyle modül 70°C sıcaklığa hızla yükselmektedir. Modül sıcaklığının artmasına bağlı olarak modül verimleri %10 düşmektedir. Gün içerisinde geleneksel modüllerin yüzeyi 80°C sıcaklığa ulaşmaktadır. Geleneksel modüllerde test koşullarının 55°C üzerine çıkan sıcaklık nedeniyle modül çalışma verimleri %15'ten %11,30'a düşmektedir. Bu oran verim kaybını %20'nin üzerine çıkarmaktadır. PV/T/FDM monokristal ve polikristal modüllerde ışınlam değerlerine bağlı ve çevresel koşullar nedeniyle modül sıcaklığı artma eğiliminde olmasına rağmen ısı borusu ve FDM sıcaklığı dengelemektedir. Modül sıcaklıkları test koşullarının (25°C) üzerine artı olarak 12°C çıkmaktadır. PV/T/FDM monokristal ve polikristal modüllerde ortalama sıcaklık artışı nedeniyle verim kaybı %1 olmaktadır.

PV panellerde FDM kullanımının arttırılabilmek için, sistem teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir hale getirilmelidir. Sistemde yüksek ısı iletkenlik ve gizli ısı kapasitesine sahip düşük maliyetli FDM'ler kullanılmalıdır. Ayrıca FDM'ler nanopartikül ile karıştırılabileceği gibi ısı iletkenliğini arttırmak için diğer yöntemler araştırılmalıdır [26, 27]. Yeni yöntemler kullanılarak PV modül çalışma sıcaklığını düşürülmeye çalışılmalı ve sıcaklık artışı nedeniyle oluşan verim kaybının önüne geçilmelidir. PV modül verimlerini arttırmak için yeni yöntemler geliştirilirken yapılacak çalışmalar, sistem için fazla yük, fazla maliyet ve fazla işçilik getirmemelidir. Enerji yatırımları için bahsedilen durumlar bir sistemi avantajlı durumdan dezavantajlı hale dönüştürebilmektedir.

Bu çalışmada modül sıcaklığının azaltılması için PV modüllere uygulanan FDM ve ısı borusu monokristal ve polikristal modüller için yararlı olmuştur. Modül sıcaklıklarında anlık değişimler engellenmiş ve modül sıcaklığı test koşullarının maksimum 15°C üzerine ulaşmıştır. Referans PV modüllere göre üzerine FDM ve ısı borusu uygulanan modüller, 30°C- 50°C arasında ortalama sıcaklığı azalmıştır. Bu durum sıcaklık artışı nedeniyle meydana gelen verim düşüşünü engellemiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma Karabük Üniversitesi, BAP Koordinasyon Birimi tarafından KABÜBAP-17-DR-435 no'lu Doktora Projesi kapsamında desteklenmiştir.

## SİMGE ve KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

Mopt	: Optimal Verim
$\eta$	: Verim
$\eta_{stk}$	: Modülün Test Koşullarındaki Verimi
$\beta$	: Hücre Sıcaklık Katsayısı
$T_h$	: Çalışma şartlarındaki hücre sıcaklığı
R	: Elektrik direnci
V	: Gerilim
I	: Akım
W	: Güç
EMK	: Elektro Motor Kuvvet
DC	: Doğru Akım
FDM	: Faz Değiştiren Madde
PCM	: Phase Change Material
PV	: Fotovoltaik
PV/T	: Fotovoltaik/Termal
PV/T/FDM	: Fotovoltaik/Termal/Faz Değiştiren Madde

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cabeza, L.F., Palacios, A., Serrano, S., Üрге-Vorsatz, D., Barreneche, C. (2018). Comparison of Pastprojections of Global and Regional Primary and Final Energy Consumption with Historical Data, Renewable and Sustain Energy Reviews, 82, 681–688.

- [2] Yılmaz, F., Goncu, S. (2019). Yerküremiz Kaynaklarının Kullanımı, Refah ve Türkiye, Uluslararası Mühendislik Doğal Bilimler ve Mimarlık Sempozyumu, 2-4 Mayıs, Kocaeli.
- [3] Green, M.A., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E.D., Levi, D.H., et al. (2017). Solar Cell Efficiency Tables (Version 50), Prog Photovoltaics Res Appl, 25 (7) 668-676.
- [4] Shang, A., Li, X. (2017). Photovoltaic Devices: Opto-Electro-Thermal Physics and Modeling, Adv. Mater, 29, 1-8.
- [5] Altaşı, İ.H. (1998). Fotovoltaik Güneş Pilleri: Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, 47, :66-71.
- [6] Ewa, K.R., Patrycja, W.K. (2017). Photovoltaic Module Temperature Stabilization with the use of Phase Change Materials, Solar Energy, 150, 538-545.
- [7] Malvi, C.S., Dixon-Hardy, D.W., Crook, R. (2011). Energy Balance Model of Combined Photovoltaic Solar-Thermal System Incorporating Phase Change Material, Solar Energy, 85, 1440-1446.
- [8] Ömeroğlu, G., (2018). Fotovoltaik - Termal (PV / T) Sistemin Sayısal (CFD) ve Deneysel Analizi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30 (1), 161-167.
- [9] Anonim, (2009). Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Dünya’da ve Türkiye’de Güneş Enerjisi Raporu, 001, 1-246.
- [10] Külcü, R., Cihanalp, C., Süslü, A., Yılmaz, D. (2016). Adana’da Global Aylık Ortalama Günlük Güneş Işınımının Modellenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [11] Oğuz, M., Akkurt, Ş. (2017). Kayseri İlinin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6, (2), 362-374.
- [12] Karakaş, U.C. (2019). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımındaki Gelişmeler; Güneş Enerji Sistemleri ve Finansman Modelleri, ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi, 6(13), 65-84.
- [13] Brinkworth, B.J., Sandberg, M. (2006). Design Procedure for Cooling Ducts to Minimise Efficiency Loss due to Temperature Rise in PV Arrays, Solar Energy, 80, 89–103.
- [14] Sahay, A., Sethi, V.K., Tiwari, A.C., Pandey, M.A., (2015). Review of Solar Photovoltaic Panel Cooling Systems with Special Reference to Ground Coupled Central Panel Cooling System (GC-CPCS). Renew Sustain Energy Rev, 42, 306–12.
- [15] Nizetic, S., Coko, D., Yadav, A., Grubisic-Cabo F. (2016). Water Spray Cooling Technique Applied on a Photovoltaic Panel: The Performance Response, Energy Convers Manage, 108, 287–96.
- [16] Konuklu Y., (2008). Mikro Kapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama ile Binalarda Enerji Tasarrufu, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana Türkiye.
- [17] Kayabaşı, R., Kaya, M. (2019). Fotovoltaik Modüllerin Atık Isılarından Termoelektrik Jeneratör ile Elektrik Üretimi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (16), 310-324.
- [18] Eslamnezhad, H. Rahlimi, A.B., 2017. Enhance Heat Transfer for Phase-Change Materials in Triplex Tube Heat Exchanger with Selected Arrangements of Fins, Applied Thermal Engineering, 113, 813-821.
- [19] Mohamed, S. A., Al-Sulaiman, F. A., Ibrahim, N. I., Zahir, M. H., Al-Ahmed, A., Saidur, R., Yılbaş, B.S., Sahin, A., (2017). A Review on Current Status and Challenges of Inorganic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage Systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, 1072-1089.

- [20] Yin, E., Li, Q., Li, D., Xuan, Y. (2018). Experimental Investigation on Effects of Thermal Resistances on a Photovoltaic-Thermoelectric System Integrated with Phase Change Materials, *Energy*, 169, 172-185.
- [21] Karafil, A., Özbay, H. (2018). Design of Stand-Alone PV System on a Farm House in Bilecik City, Turkey, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5(3), 909-916.
- [22] Gedik, E. (2016). Modül Sıcaklığının Fotovoltaik Panellerin Verimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 19 (4), 569-576.
- [23] Ceylan, İ., Yılmaz, S., İnanç, Ö., Ergün, A., Gürel, A. E., Acar, B., & Aksu, A. İ. (2019). Determination of the Heat Transfer Coefficient of PV Panels. *Energy*, 175, 978-985.
- [24] Ceylan, İ., Gürel, A. E., & Ergün, A. (2017). The Mathematical Modeling of Concentrated Photovoltaic Module Temperature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(31), 19641-19653.
- [25] Ergün, A., Eyiç, H. (2019). Performance Assessment of Novel Photovoltaic Thermal System Using Nanoparticle in Phase Change Material. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 29(4), 1490-1505.
- [26] Yang, X., Yu, J., Guo, Z., Jin, L., He, Y.L. (2019). Role of Porous Metal Foam on the Heat Transfer Enhancement for a Thermal Energy Storage Tube, *Applied Energy*, 239, 142-15.
- [27] Yang, X., Yu, J., Guo, Z., Jin, L., He, Y.L. (2019). Effect of Inclination on the Thermal Response of Composite Phase Change Materials for Thermal Energy Storage, *Applied Energy*, 238, 22-33.
- [28] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Enerji İstatistik Raporları, <https://www.eigm.gov.tr>, E.T. 07.08.2019.
- [29] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, <http://www.yegm.gov.tr>, E.T. 07.08.2019.