



# FOTOVOLTAİK PANELLERİN FAZ DEĞİŞTİREN MADDE DESTEKLİ ISI ALICISIYLA SOĞUTULMASI

*Cooling of Photovoltaic Panels with Phase Change Material Based Heat Sink*

Oğuz Kaan Yağcı  
Mete Avcı  
Orhan Aydın  
Burak Markal

## ÖZET

Bu çalışmada, fotovoltaik bir panelin faz değiştiren madde (PCM) ile soğutulma süreci deneysel olarak incelenmiştir. Yüksek ışınım altında panel sıcaklığında meydana gelen hızlı artış ve bu artışa bağlı elektriksel verim düşüşü, PCM ile pasif soğutma yapılarak giderilmeye çalışılmıştır. Deneyler laboratuvar ortamında standart test koşulları altında gerçekleştirilmiş olup; yerleşim açısı (30°, 45° ve 90°) çalışma parametresi olarak dikkate alınmıştır. Elde edilen deneysel veriler ile PCM'in faz dönüşüm davranışı ve buna bağlı elde edilen soğutma performansı zaman bağımlı olarak ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında sistemin termal davranışının yanı sıra maksimum güç değeri de zaman bağımlı izlenmiş olup; farklı ışınım miktarları için ısı alıcısız (soğutulmayan) panellere kıyasla elde edilen elektriksel güç çıktısındaki değişim belirlenmiştir. Uygulanan toplam ışınım miktarına ve yerleşim açısına bağlı olarak güç çıktısında %1,5'dan %10'a değişen artışlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fotovoltaik soğutma, pasif soğutma, faz değiştiren madde, deneysel değerlendirme.

## ABSTRACT

In this study, cooling process of a photovoltaic panel with phase change material is experimentally investigated. The rapid increase in the panel temperature under high irradiation and the decrease in electrical efficiency due to this temperature increase are aimed to be eliminated by passive cooling with PCM. Experiments are carried out under the standard test conditions in a laboratory environment and, orientation angle is considered as the study parameter (30°, 45° and 90°). With the experimental data obtained, the time dependent phase change behavior and the cooling performance of PCM are revealed. Within the scope of the study, in addition to the thermal behavior of the system, the maximum power value is also monitored time dependently and the change in the electrical power output compared to the panels without heat sink is determined for different irradiation amounts. Depending on the total applied irradiation and the orientation angle, increases in the power output are obtained ranging from 1.5% to 10%.

**Key Words:** Cooling of photovoltaics, passive cooling, phase change material, experimental evaluation

## 1. GİRİŞ

Işığın doğrudan elektrik enerjisine çevrilmesine imkân tanınması sebebiyle fotovoltaik panellerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Fotovoltaik hücrelerin farklı çalışma koşulları altındaki davranışları incelendiğinde hücre sıcaklığında meydana gelen artışın güç çıktısı üzerinde olumsuz etki

oluşturduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalar yaygın olarak kullanılan kristal bazlı (**c-si**) silikon hücrelerin verim değerlerinin ortalama %15 ve sıcaklık katsayılarının ise yaklaşık % 0.4-0,65/°C aralığında olduğunu bildirmektedir [1]. Verim değerine bağlı olarak panel üzerine düşen ışınım enerjisinin elektriğe dönüştürülemeyen kısmı hücrelerde ısı olarak birikmekte ve sıcaklık artışına yol açmaktadır. Sıcaklığın oluşturduğu bu etki, özellikle en yüksek güç çıktısının elde edildiği zaman aralıklarında, verimi önemli ölçüde düşürmektedir. Panellerde sıcaklık artışıyla meydana gelen bu olumsuzluğu gidermek ve güneş enerjisinden daha etkin bir şekilde yararlanmak amacıyla panellerin bir soğutma sistemiyle entegresine ihtiyaç vardır.

Literatürde soğutma amacıyla araştırmacıların aktif, pasif ve hibrit soğutma yöntemlerine başvurdukları görülmektedir. Aktif yöntemler soğutmanın harici bir enerji girdisiyle gerçekleştirildiği yöntemlerdir. Bu yöntemlerde soğutma işlemi çoğunlukla panel arkasına yerleştirilen ısı alıcılarında soğutucu akışkanların (hava veya sıvı) sirküle edilmesiyle gerçekleşmektedir. Panelden çekilen ısı farklı amaçlar doğrultusunda kullanılabilenler olup; ilgili sistemler literatürde fotovoltaik/termal(PV/T) olarak adlandırılmaktadırlar [2-16]. Bu sistemlerde hareketli parçaların (pompa veya fan) bulunması, bakım onarım maliyetleri ve soğutucu akışkanların oluşturabildiği korozif etkiler tehdit unsurları olarak ifade edilmektedir.

Fotovoltaik paneller, performans düşüşünün azaltılması amacıyla güç girdisi gerektirmeyen pasif yöntemlerle de soğutulabilmektedir. Kanatçık entegresi ve doğal taşınım ile soğutma, ısı borusu, suya daldırma ve PCM kullanımı bu uygulamalara örnek olarak verilebilir. Pasif yöntemlerde sıklıkla tercih edilen PCM'ler faz dönüşüm süreci boyunca sahip oldukları yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri sayesinde yüksek miktarlarda ısı soğurabilmektedirler. PCM'ler bu özellikleri sayesinde ısınan yüzeyler için soğutma amacıyla kullanılmakta olup; literatürde PV panellerin termal regülasyonunun sağlanması amacıyla araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. İlgili sistemler kısaca PV/PCM olarak adlandırılmaktadırlar. Bu sistemlerde temel olarak PCM, PV panel arkasında prizmatik bir hacim içerisinde depolanmakta ve ışınım altında PV panel üzerinde biriken ısının bir kısmını absorbe ederek sıcaklık artışını yavaşlatabilmektedir. Literatür incelendiğinde; PV/PCM sistemlerinin performansının PCM erime sıcaklığı, PCM miktarı, ısı değiştiricilerinin yüzey alanları, ortam koşulları gibi birçok parametreden önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Özellikle, PCM'lerin sahip oldukları düşük ısı iletkenlik değerleri ( $k \approx 0,2 \text{ W/m.K}$ ) PCM'lerden beklenen soğutma performansının elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu olumsuzluğun giderilmesi için literatürde araştırmacıların kanatçık kullanımı, nanoparçacık ilavesi ve metal ağ kullanımı gibi iletkenlik artırıcı yöntemlere başvurdukları görülmektedir.

PV/PCM sistemler üzerine yapılan ilk çalışmalar, Huang vd. [17-18] tarafından yapılmıştır. Çalışmalarda PV panel arkasında soğutma amacıyla PCM (RT-25) alüminyum bir hacim içerisinde tutulmuş ve PCM'in sahip olduğu düşük ısı iletkenliği hacim içerisine yerleştirilen yatay kanatçıklarla iyileştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmalarda kanatçık sayısı ve geometrisi değişken parametre olarak dikkate alınmıştır. Isı transfer yüzeyindeki artış belirli bir süre boyunca ısı transferini iyileştirerek daha düşük panel sıcaklıkları elde edilmesini sağlamış; ancak, termal regülasyon süresi üzerinde olumsuz etki yaratmıştır. Başka bir çalışmada [19], yatay kanatçıklı bir PV/PCM sistemi sayısal olarak ele alınmıştır. Çalışmada PCM olarak erime sıcaklığı 25°C olan bir parafin (RT-25) kullanılmıştır. Kanatçıksız durum dikkate alındığında PV panel 35°C'de yaklaşık 100 dakika boyunca sabit tutulabilmiştir. Bu sıcaklık değeri, kanatçık uzunluğunun artırılmasıyla 30°C'ye düşürülebilmektedir.

PCM'lerin ısı transfer süreçlerinde doğal taşınım mekanizması etkin rol oynamaktadır. Bu durum PV/PCM sistemlerinin yerleşim açılarından etkilenmesine neden olmaktadır. İfade edilen bu etki bazı araştırmacılar tarafından sayısal olarak incelenmiştir [20-22]. Çalışmalarda yerleşim açısının artmasıyla (sistemin daha dik konumda yerleştirilmesiyle) PCM içerisinde doğal taşınım daha etkin hale gelerek PV panel ve PCM arasındaki ısı transferi iyileşmiştir. Bunun bir sonucu olarak, belirli bir süre daha düşük PV panel sıcaklığı izlenmiş; fakat PCM'in erime sürecinin hızlanması sonucu termal regülasyon süreleri önemli ölçüde azalmıştır.

Isı alıcı performansını etkileyen diğer bir önemli parametre, kullanılan PCM'in faz dönüşüm aralığı ve gizli ısı depolama kapasitesidir. Katıdan sıvıya geçiş sıcaklığı ve bu geçiş boyunca absorbe edilebilen ısı, PV panel sıcaklığının zamana bağlı değişimini ve buna bağlı güç kazanımını etkileyebilmektedir. Hasan vd. [23-24], çalışmalarında, farklı erime noktasına sahip 5 farklı PCM ile deneyler

gerçekleştirmiştir. Erime **sıcaklık noktasındaki artış**, özellikle yüksek ışınım altında yapılan deneylerde ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) daha yüksek panel sıcaklığı fakat daha uzun regülasyon süresinin elde edilmesini sağlamıştır. Başka bir çalışmada [25], PCM olarak RT-25, 35 ve 45 kullanılarak benzer sonuçlar elde edilmiştir.

PV/PCM sistemlerine ait termal regülasyon sürelerini ve performans kazanımlarını etkileyen önemli parametrelerden biri de kullanılan PCM miktarı ve çevresel koşullardır. Khanna vd. [26] tarafından yapılan çalışmada, 3, 4 ve 5 cm PCM tabaka kalınlığına sahip PV/PCM sistemler için sayısal analiz yapılmıştır. Çalışmada kullanılan tabaka kalınlığındaki artış, elektriksel iyileşmenin elde edildiği süreyi önemli ölçüde uzatmıştır. Buna ek olarak rüzgar hızındaki artış ve ortam sıcaklığındaki düşüş gibi sistemden çevre ortama ısı kaybını artıracak etmenlerin regülasyon ve kazanım sürelerini önemli ölçüde uzattığı ifade edilmiştir.

PV/PCM sistemlerin termal regülasyon sürelerinin uzatılması ve güneşlenme saatlerinde PCM bünyesinde biriken ısıdan faydalanılması PCM ve ısı eşanjörünün birleşiminden meydana gelen PV-T/PCM sistemlerin kullanımıyla da mümkün olabilmektedir. Radziemska ve Kucharek [27] tarafından yapılan bir çalışmada bir PV-T/PCM sisteminin termal ve elektriksel performansı farklı parametreler altında deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada deneyler üç farklı erime sıcaklık aralığına sahip PCM'ler (20–23, 42–72, 61–78) ile farklı PCM tabaka kalınlığı ve iki farklı su debisi için yapılmıştır. Standart test koşulları altında yürütülen çalışmada PV-T/PCM sisteminin performansını belirleyen ana parametrenin su debisi olduğu ve uygun PCM faz dönüşüm sıcaklığının  $30\text{--}45^\circ\text{C}$  arası olması gerektiği ifade edilmiştir. Literatürde PV/PCM sistemler üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar üzerinden şu çıkarımlar yapılabilir:

- Çalışma saatleri içerisinde fotovoltaik hücrelerde meydana gelen sıcaklık artışı, elektrik çıktısı (verim) üzerinde negatif etki yaratmaktadır.
- PV paneller arkasına ısı alıcı olarak PCM'in uygulanmasıyla çalışma saatlerinde PV panel sıcaklığı belirli bir süre ısı alıcısız panel sıcaklığının altında tutulabilmektedir (termal regülasyon).
- PCM'lerin düşük ısı iletkenlikleri ısı alıcı performansını olumsuz etkileyebilmektedir. PCM katmanı içerisine yapılan iletkenlik artırıcı önlemler ısı alıcı performansını belirli bir süre artırarak daha düşük PV panel sıcaklıkları elde edilmesini sağlamakta; fakat termal regülasyon süresi üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır.
- Yerleşim açısındaki artış ısı alıcı performansını artırabilmekte fakat benzer şekilde daha erken tamamlanan faz dönüşüm süresi sebebiyle regülasyon sürelerini kısaltabilmektedir.

İlgili sonuçlar incelendiğinde PV panel-PCM arasındaki ısı transfer hızı ve termal regülasyon süresi arasında zıt bir ilişki olduğu görülmektedir. PCM bünyesine yapılan iletkenlik artırıcı uygulamalar belirli bir süre daha düşük PV panel sıcaklıkları elde edilmesini sağlayarak panel verimini artırabilmekte fakat PCM'in daha erken faz dönüşümünü tamamlaması sebebiyle termal regülasyon süresi üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır [23-28]. Literatürdeki PV/PCM sistemler üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların büyük çoğunluğunun sayısal veya dış ortam deneylerinden oluştuğu görülmekte olup laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmaların azlığı göze çarpmaktadır. Fakat dış ortamda yapılan deneylerde meteorolojik koşulların sabit tutulmaması sebebiyle tekrarlı yapılan deneylerde aynı şartlar oluşturulması güçleşmektedir.

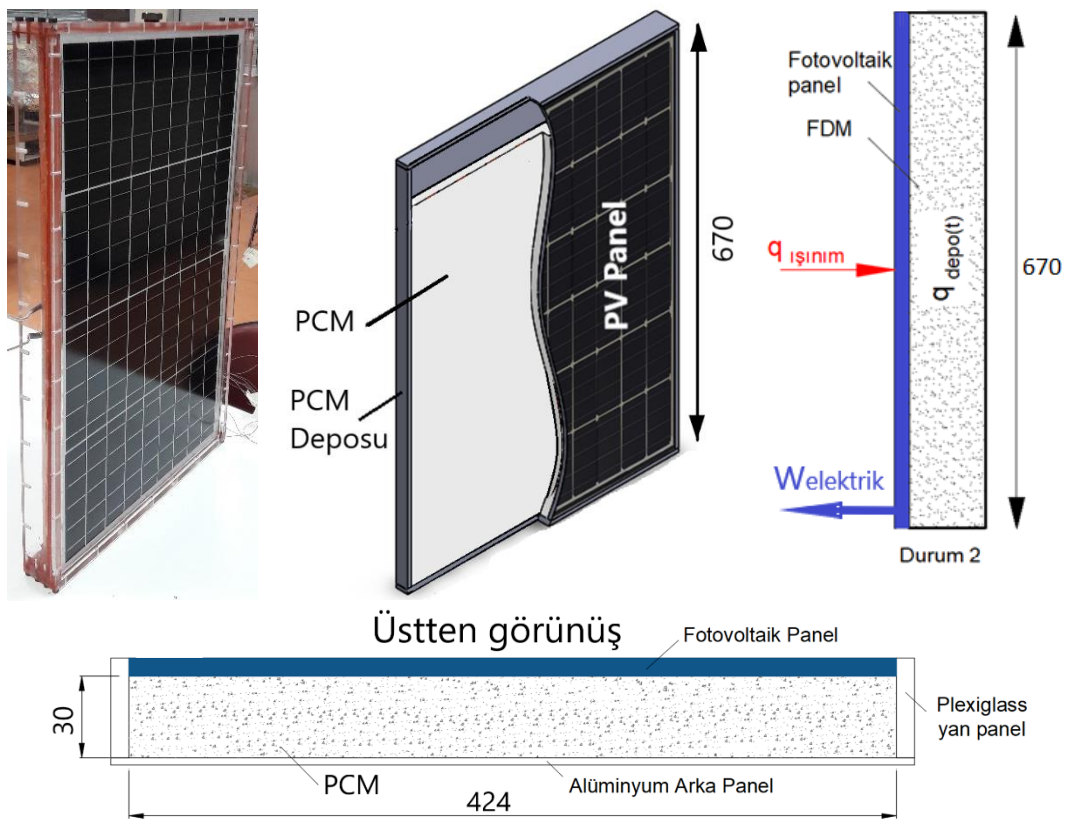
**Bu çalışmada, bir PV/PCM sisteminin elektriksel ve termal performansı laboratuvar ortamında yapay ışık kaynağı altında incelenmiştir. Deneyler standart test koşulları altında yapılmış olup sistemden elde edilen performans verileri farklı yerleşim açıları ve farklı toplam ışınlanma miktarları için ısı alıcısız (referans) sistem ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma ile PCM'in faz dönüşüm davranışıyla panelin elektriksel verimi arasındaki ilişki ve termal regülasyon sonrası sistemin performansındaki değişim açıkça ortaya konmuştur.**

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında bir PV/PCM sisteminin elektriksel ve termal performansı deneysel olarak laboratuvar ortamında incelenmiştir. Çalışma koşulları dikkate alındığında fotovoltaik paneller sahip oldukları düşük verim değerleri ( $\eta = \%15$ ) sebebiyle güneş ışınımının az bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürebilmektedirler. Kalan kısmı ise panel üzerinde ısı enerjisine dönüşerek panel sıcaklığında artışa ve verim düşüşüne sebep olmaktadır. PV panel üzerinde biriken bu ısının PCM yardımıyla soğurulması için çalışma kapsamında bir PV/PCM sistemi oluşturulmuştur.

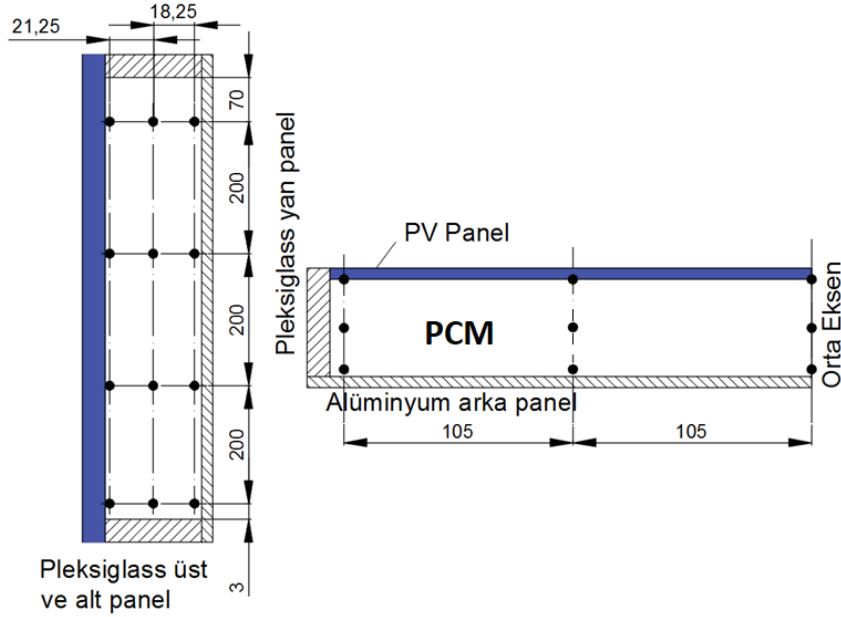
### 2.1 Test Bölgesi

Test bölgesi bir PV panel ve panel arkasına PCM temelli bir ısı alıcının yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. PCM temelli ısı alıcısı ile oluşturulan PV/PCM sisteme ait bileşenler ve geometrik ölçüler Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Test bölgesinin fotoğrafı, bileşenleri ve geometrik ölçüleri

Şekilden görüldüğü üzere PCM, PV panel arkasında oluşturulan prizmatik boşluk içerisine depolanmaktadır. PCM'in depolandığı hacmin yan duvarları deney süresinde görsel kontrollerin yapılabilmesi için plexiglass malzemeden, arka duvar ise alüminyum malzemeden yapılmıştır. Depo içerisinde PCM panel arka yüzeyiyle doğrudan temas halinde olup çalışma süresi boyunca panel üzerinde biriken ısının bir kısmını absorbe etmektedir. Deneylerde 50 W nominal güce sahip 424 mm × 670 mm boyutlarında monokristal bir fotovoltaik panel kullanılmıştır. İmal edilen PCM destekli ısı alıcısı fotovoltaik panel ölçüleriyle sınırlı tutulmuş olup panelin arka kısmına bitişik şekilde yerleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri panel arkasına ve PCM katmanına içerisine yerleştirilmiş  $\pm 0.5$  °C hassasiyete sahip T-tipi termoeleman çiftleri vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Termoeleman çiftlerinin konumları Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.2 Termoleman çiftlerinin yerleşim düzeni

Çalışmada PCM olarak organik bir parafin olan Rubitherm RT-35HC kullanılmıştır. İlgili madde toksik ve yanıcı özellik göstermeyen yüksek saflık ve gizli ısı depolama kapasitesine sahip ticari bir parafindir. PV/PCM sisteminde kullanılacak PCM'in seçiminde şu kriterler dikkate alınmıştır [29].

- PCM'nin faz dönüşüm sıcaklığının fotovoltaik panellerin nominal çalışma sıcaklığı olan 25 °C sıcaklığına yakın olması
- Faz dönüşüm sıcaklığının yaz aylarındaki gündüz ortalama sıcaklık değerinden yüksek olması
- Kış aylarında güneşlenme saatleri içerisinde PCM'nin eriyebilmesi için PV panelin ortalama sıcaklığından düşük olması
- Gece saatlerinde katılaşabilmesi için faz dönüşüm sıcaklığının yazın ortalama gece sıcaklığından yüksek olması

Belirtilen kriterler dikkate alınarak PCM olarak 34-36°C katı-sıvı faz dönüşüm aralığına sahip RT-35HC tercih edilmiştir. Isı alıcısı içerisinde **6,75 kg PCM kullanılmıştır**. PCM'e ait termofiziksel özellikler Tablo 2.1'de listelenmiştir.

Tablo 2.1 RT-35HC'nin termofiziksel özellikleri[30].

| Yoğunluk<br>( $kg.m^{-3}$ ) | Viskozite<br>( $kg.m^{-1}.s^{-1}$ ) | Özgül ısı<br>( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ) | Isıl iletkenlik<br>( $W.m^{-1}.k^{-1}$ ) | Faz aralığı<br>(°C) | Gizli ısı $kJ.kg^{-1}$ |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|---------------------|------------------------|
| 778.2                       | 0.0044                              | 2000                                | 0.116                                    | 34,5-36             | 220                    |

## 2.2 Deneş Düzeneği ve Çalışma Prensibi

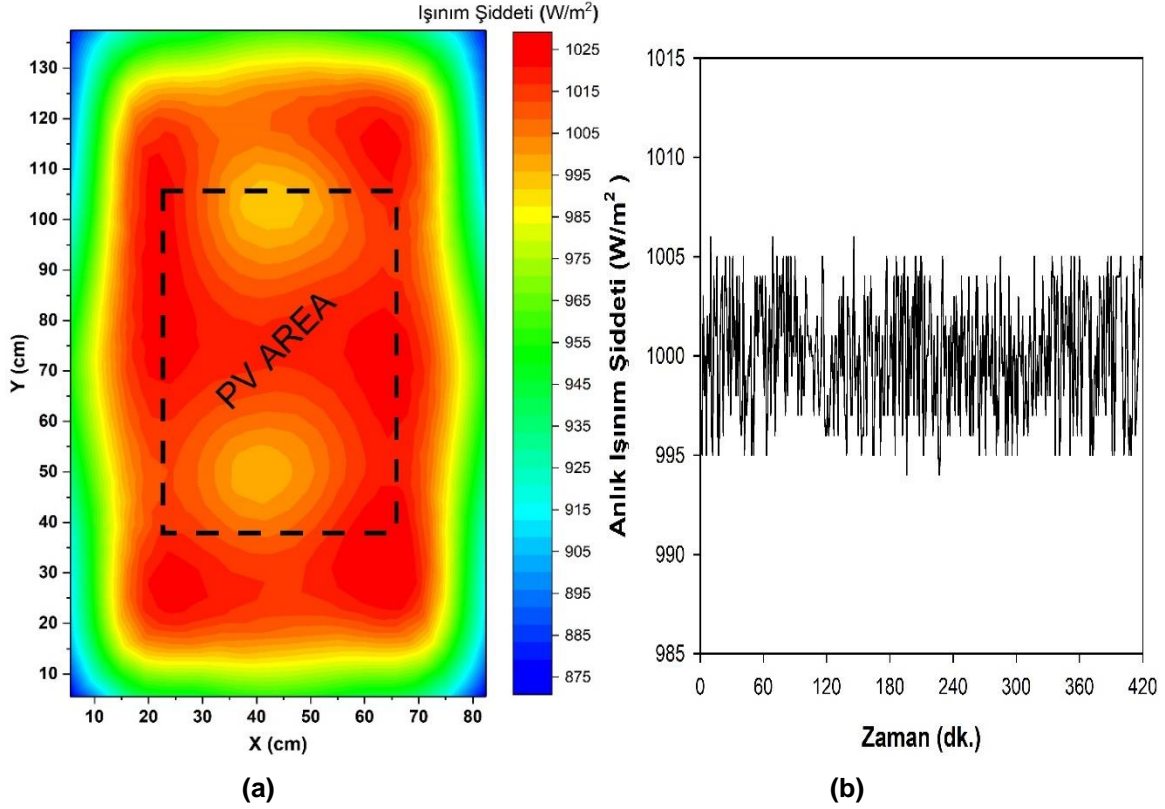
Çalışma kapsamında deneyler laboratuvar ortamında yapay ışık kaynağı altında gerçekleştirilmiştir. Bu sayede değişken meteorolojik koşulların tekrarlı deneyler üzerinde oluşturduğu olumsuz etki giderilebilmiş ve tüm deneylerde aynı ortam şartları sağlanabilmiştir. İlgili deneş düzeneğine ait fotoğraflar ve bileşenler Şekil 2.3'de verilmiştir.



**Şekil 2.3** Deney düzeneği ve bileşenleri

Deney düzeneği temel olarak bir şartlandırma kabini, yapay ışık kaynağı, test bölgesi ve ölçüm cihazlarından oluşmaktadır. Şartlandırma kabini 2000 mm × 1000 mm × 1500 mm ölçülere sahip olup deney süresi boyunca test bölgesini sabit ortam şartları altında tutabilmek amacıyla 5200 W soğutma gücüne sahip bir soğutma sistemiyle desteklenmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan yapay ışık kaynağında toplamda 176 adet 50 W gücünde halojen spot lamba PV panel üzerine uygulanan ışınımın üniforma yakın olabilmesi için 11 × 16 formunda eş aralıklarla konumlandırılmıştır. Tüm spot lambaların yansıtıcıları kapalı prizmatik bir hacim içerisinde tutulmakta olup ilgili hacim yüksek debi sağlayabilen radyal bir fan ile soğutulabilmektedir. Fanın sağladığı hava kabinin dış ortamından alınıp tekrar dış ortama atılmıştır (iki ayrı baca kullanılmıştır). Böylece, ışık kaynağının soğutulmasında soğutma sistemine ek yük oluşturulmamış olup; kabin içerisindeki fan kaynaklı hava hareketi engellenmiştir. Işık kaynağı, ayrıca, 20 kW'lık bir dimmer (kısmı) devresiyle entegre edilmiş olup; ışınım şiddeti ayarı yapılabilmekte ve kabin içerisinde farklı açı ve pozisyonlarda da konumlandırılabilir. Şekil 2.4'de yapay ışık kaynağından elde edilen ışınım haritası ve ışınım şiddetinin anlık değişimi verilmiştir. Şekilden de görülebildiği üzere panel iz düşüm alanı içerisindeki ışınım şiddetinin yerel ve zaman bağımlı değişimi %5'in altındadır.





**Şekil 2.4** Test bölgesinden alınan ışınım haritası (a), ışınım şiddetinin zamanla değişimi (b).

Deneyler boyunca test bölgesi üzerinde sıcaklık, ışınımın şiddeti ve PV panelin ürettiği anlık akım ve voltaj değerleri olmak üzere dört farklı büyüklük ölçülmüştür. İlgili büyüklüklerin ölçümünde kullanılan ekipmanlar şu şekildedir:

#### **Sıcaklık ölçümü**

Sıcaklık ölçümleri, 0.25 mm çapında dışı izoleli T-tipi termoeleman çiftleri kullanılarak yeterli sayıda kanala sahip bir veri toplama cihazı üzerinden alınmıştır (Rigol M300). Deneyler boyunca sistem üzerinden toplanan sıcaklık değerleri veri toplama cihazı aracılığıyla bilgisayar ortamına 30 saniyelik aralıklarla düzenli olarak kaydedilmiştir.

#### **Elektriksel güç ölçümü**

Deney süresi boyunca PV panel tarafından üretilen elektriksel gücün belirlenmesi için düzenli olarak maksimum güç nokta takibi yapılmıştır. İlgili nokta takibi DC yük cihazı (Rigol DL3021A,150W) üzerinden her 30 saniyede bir elde edilen I-V eğrileri üzerinden yapılmıştır. İlgili eğriler cihazın sabit direnç (yük) modunda adım (step) fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Direnç değeri 2 ohm'dan 1000 ohm'a hızlıca değiştirilirken her adımda akım ve gerilim değerleri kaydedilerek I-V eğrileri ve eğri üzerinden  $P_{MAX}$  tayini yapılmıştır. Elektriksel davranışın izlenmesi için tercih edilen bu yöntem hızlı ve hassas ölçüm sağlaması açısından sürece uygun olup; konu ile ilişkili güncel çalışmalarda da tercih edilmektedir [31-34]. Belirli bir elektriksel yüke bağlanan PV panelin anlık güç çıktısı;

$$P_{anlık} = I_{anlık} \times V_{anlık} \quad (1)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada, I ve V, sırasıyla, panelden ölçülen akım ve gerilim değerleridir. PV panelin maksimum güç noktasında çalışması durumunda ilgili eşitlik;

$$P_{max} = (I \times V)_{max} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (2)$$

halini almaktadır. Toplam üretilen elektrik enerjisi miktarı ise 30 s ara ile tespit edilen maksimum güç çıktılarının aritmetik ortalamasının deney süresiyle çarpılmasıyla bulunmuştur.

$$P_{\text{toplam}} (Wh) = P_{\text{max}} (\text{anlık}) (W) \times (30/ 3600 \text{ sec}) (h) \quad (3)$$

### **Işınım şiddetinin ölçümü**

PV panel üzerine düşen termal radyasyonun doğru ölçülmesi için kullanılan ölçüm cihazının ışık kaynağına uygun olması gerekmektedir. Bu çalışmada, ışık kaynağı olarak halojen lambaların kullanılması sebebiyle (spektrum 250-2500nm) [35] şiddet ölçümü için termopil piranometre (Kipp&Zonen-CMP11) kullanılmıştır. Cihaz termopil prensibiyle çalışmakta olup 285-2800 nm spektral ölçüm aralığıyla halojen lamba spektrumunun tamamına yakınına kapsamaktadır.

### **Belirsizlik Analizi**

Deneylerde kullanılan ölçüm ekipmanlarına ait belirsizlikler Tablo 2.2'de verilmiştir.

**Tablo 2.2** Ölçümlere ait belirsizlikler

| Ölçülen değer                  | Belirsizlik               |
|--------------------------------|---------------------------|
| Sıcaklık                       | $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ |
| Gerilim (Sabit direnç modunda) | $\pm \%0.05$              |
| Akım (Sabit direnç modunda)    | $\pm \%0.1$               |
| Işınım şiddeti (G)             | $\pm \%0.5$               |

Deneylerde ölçülen gerilim (V), akım (I) ve ışınım şiddeti (G) bağımsız değişkenleri üzerinden güç (W) ve elektriksel verim ( $\eta$ ) hesaplanmaktadır. İlgili çıktılar için belirsizlik, aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$w_p = \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial V} v \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial I} w_I \right)^2 \right]^{1/2}, \quad w_{\eta} = \left[ \left( \frac{\partial \eta}{\partial V} w_V \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial I} w_I \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial G} w_G \right)^2 \right]^{1/2}$$

Güç ve verim için belirsizlikler; sırasıyla,

$$\frac{w_p}{P} = \%0,11 \quad \text{ve} \quad \frac{w_{\eta}}{\eta} = \%0,51 \quad \text{olarak hesaplanmıştır.}$$

### **Deney prosedürü**

Çalışma kapsamında yapılan deneyler PV panel testlerinde standart test koşulu olarak kabul edilen  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışınım şiddeti ve  $25^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney süresinin tayininde ise Türkiye için yaz ayları günlük ortalaması olan **6700 Wh/m<sup>2</sup>** toplam ışınlanma değeri dikkate alınmıştır [36]. Bu durumda deney süresi ise **7 saat** olarak dikkate alınmıştır. Deneylerde izlenen prosedür sırasıyla şu şekildedir:

1. Şartlandırma kabini ve kabin ortamında tutulan test bölgesi (PV/PCM)  $25^{\circ}\text{C}$ 'ye şartlandırılır.
2. Şartlanmayı takiben yapay ışık kaynağı devreye alınır, ışınım şiddeti dimmer devresi yardımıyla istenilen değere set edilir.
3. Tüm ölçüm cihazları üzerinden periyodik ölçümler alınmaya başlanır ve deney süresi başlatılmış olur.
4. Her deney süresinin başlangıcından itibaren sistem üzerinden I-V eğrileri ve sıcaklık değerleri 30 saniye aralıklarla ölçülerek kaydedilir.
5. Deney süresinin tamamlanmasının ardından ışık kaynakları kapatılır ve PV/PCM sisteminin başlangıç koşuluna dönme süresi (PCM'in deşarj süresi) belirlenir.

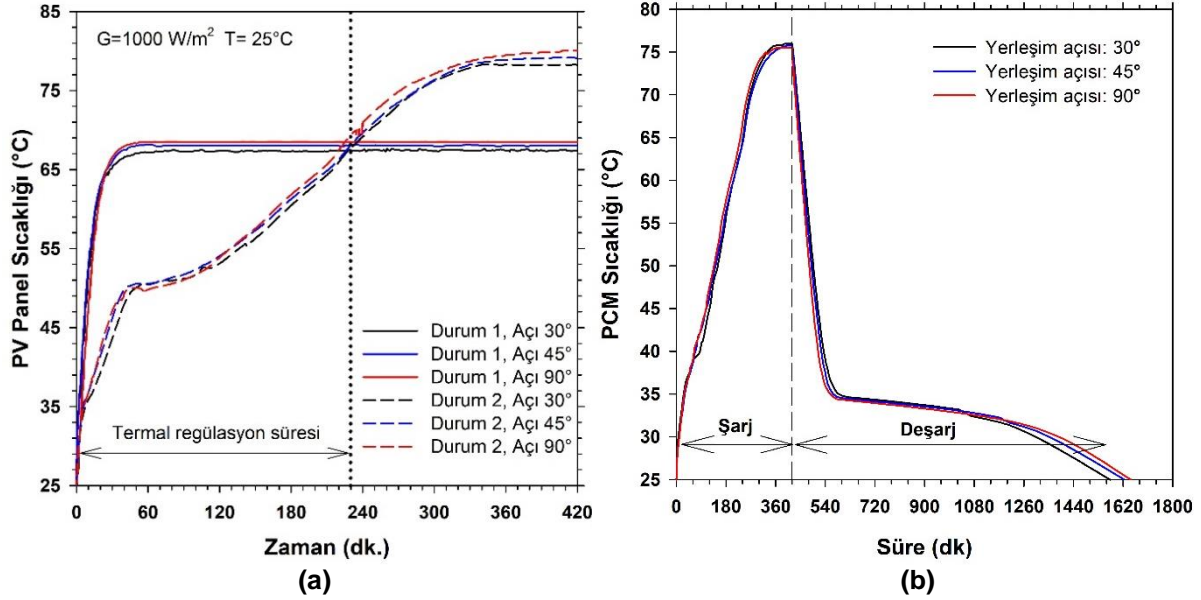
## **3. BULGULAR VE İRDELEME**

Çalışma kapsamında bir PV/PCM sisteminin ısı ve elektriksel performansı standart test koşulları altında ( $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışınım şiddeti ve  $25^{\circ}\text{C}$ ) laboratuvar ortamında yapılan deneylerle elde edilmiş ve faz dönüşüm karakteristiği ve sistem performansı arasındaki ilişkiler deneysel olarak ortaya konmuştur. PV/PCM sisteminin yanı sıra ısı alıcısız (referans) sistemler üzerinde de deneyler



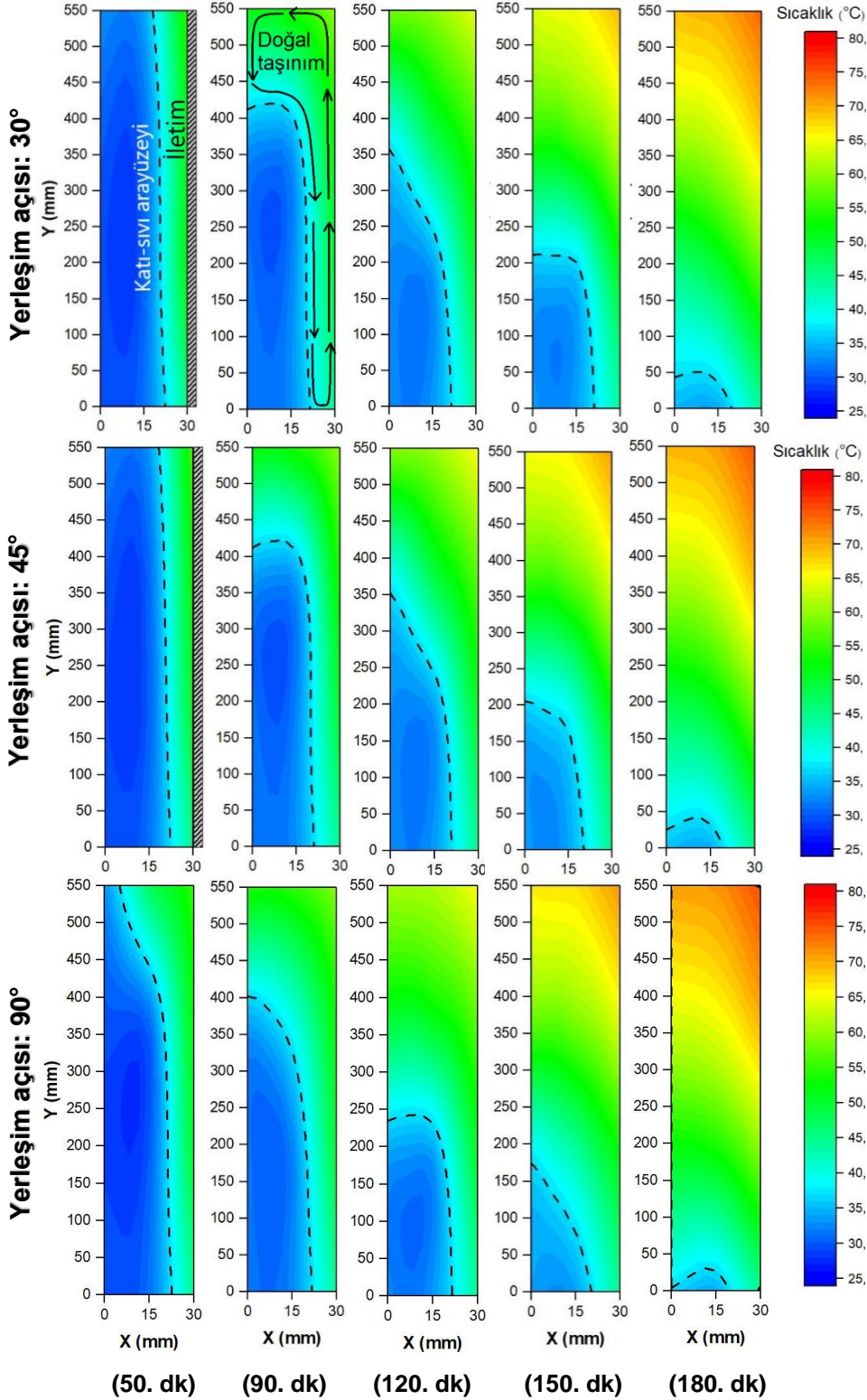
gerçekleştirilmiş ve ele alınan sistemlere ait zaman bağımlı sıcaklık ve elektriksel güç ölçümleri üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır.

Şekil 3.1'de ısı alıcısız (Durum 1) ve PV/PCM (Durum 2)'ye ait ortalama PV panel ve PCM sıcaklığının zamanla değişimi farklı yerleşim açıları için verilmiştir. Şekil 3.1a incelendiğinde ısı alıcısız PV panel sıcaklığının deney süresinin ilk 60 dakikası içerisinde hızlı bir şekilde artarak yaklaşık 68°C'ye yükseldiği ve sıcaklığını bu değerde koruduğu görülmektedir.



Şekil 3.1 PV panel sıcaklığının değişimi(a), PCM sıcaklığının(PV/PCM) değişimi (b).

Yerleşim açısındaki değişim, ısı alıcısız panelin sıcaklık artışı üzerinde önemli bir etki oluşturmamış olup; yerleşim açısının 30°'den 90°'ye yükselmesiyle daimi durum sıcaklığı yaklaşık 1,5°C artmıştır. Bu durum PV panelin yerleşim açısının değişmesiyle birlikte ön ve arka yüzeyler üzerinden dış ortama doğal taşınım ile transfer olan ısı arasındaki denge değişimiyle açıklanabilir. PV panel arkasında PCM temelli bir ısı alıcısı uygulanmasıyla (Durum 2), sıcaklık artış karakteristiğinde değişim meydana gelmektedir. Şekil 3.1 incelendiğinde, ısı alıcılı sistemde panel sıcaklık artışının 35°C'den sonra yavaşlamaya eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu noktada sıcaklık artışındaki yavaşlama PCM'in (Rubitherm RT 35HC) yaklaşık bu değerde (34-36°C) faz dönüşümüne girmesiyle ilişkilidir. PCM'in faz dönüşüm süreci boyunca yüksek miktarda ısı depolayabilmesi sayesinde temas halinde bulunduğu panelin sıcaklık artışını yavaşlatabilmektedir. Durum 2'ye ait sıcaklık artışı tüm deney süreci göz önüne alınarak incelendiğinde ise sıcaklığın 50°C civarında belirli bir süre sabitlendiği görülmektedir. 50 ve 120'inci dakikalar arasında panel sıcaklığı 50'den 53°C'ye yalnızca 3°C yükselmiş ve 120'inci dakikadan itibaren tekrar hızlı bir yükselişe geçmiştir. Panel sıcaklık artışında meydana gelen bu ani ve yüksek orandaki yavaşlama panel ve PCM arasındaki PCM'in erime sürecine bağlı değişen ısı transfer hızıyla ilişkilidir. Bu ilişkinin daha iyi açıklanabilmesi için PCM'in farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri üzerinden eş sıcaklık eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 3.2). İlgili şekilde kesikli çizgi 36°C çizgisi olup erimeye bağlı ilerleyen katı-sıvı ara yüzünü temsil etmektedir.



Şekil 3.2 PV/PCM (Durum 2) için eş sıcaklık eğrileri ve katı-sıvı ara yüzünün gelişimi.

Şekil 3.2'de 50'nci dakika için verilen görsel incelendiğinde sıcaklık dağılımının Y yönünde (PV paneli paralel doğrultuda) üniform ve katı-sıvı ara yüzünün ise düzlemsel yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, deney süresinin ilk 50 dakikasında panel ve PCM arasındaki ısı geçiş mekanizmasının temel olarak iletim olmasından kaynaklanmaktadır. 50'nci dakikadan itibaren sıvı PCM hacminin yeterince

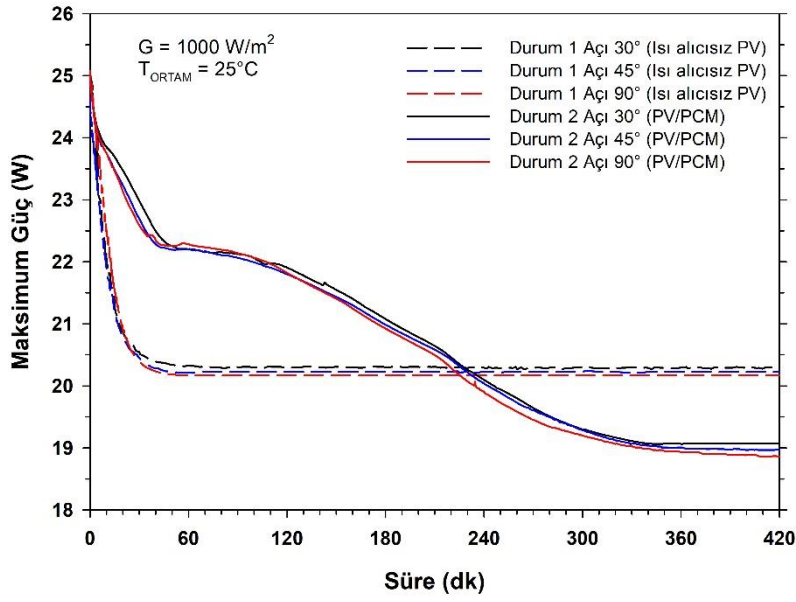
genişlemesiyle birlikte PCM içerisinde doğal taşınım hareketi oluşmaya başlamakta ve iletme ek olarak doğal taşınım ile da etkin bir şekilde ısı geçişi gerçekleşmeye başlamaktadır. İletme ek olarak ikincil bir mekanizma ile ısının geçişi sonucu ısı transfer katsayısı önemli miktarda artmakta ve 50'nci dakikadan itibaren ısı artış hızında ani bir yavaşlama gözlemlenmektedir. Deneyin ilerleyen süreçlerinde doğal taşınımın etkin rol oynamasıyla katı-sıvı ara yüzünün düzgün ilerleyişi değişmekte ve PCM katmanının üst kısımlarında daha yüksek sıcaklık değerleri gözlemlenmektedir. İlgili durum 50'nci dakikadan sonraki zaman adımları için verilen eş sıcaklık eğrilerinden görülebilmektedir. 120'nci dakikadan itibaren artan PCM sıcaklığı ve erimenin %65 orana ulaşmasıyla ısı alıcısının soğutma performansı düşmeye başlamakta ve panel sıcaklığı hızlı bir yükselişe geçmektedir. 230'uncu dakikadan itibaren panel sıcaklığının 68°C'ye ulaşmasıyla termal regülasyon süreci bitmiş olup; panel sıcaklığı ısı alıcısız PV panel sıcaklığını geçmiştir (Şekil 3.1a). Bu zaman adımından sonra ısı alıcısındaki PCM tümüyle erimiş halde olup; PCM temelli ısı alıcısı soğutma kabiliyetini yitirmiştir. Bu noktadan sonra; PCM, düşük ısı iletkenliği sebebiyle panel arkasında yalıtım tabakasına benzer bir davranış göstererek panel sıcaklığının 80°C gibi çok daha yüksek bir sıcaklığa ulaşmasına sebep olmuştur. İfade edilen bu mekanizmalar ve kritik zaman adımları tüm yerleşim açıları için benzerlik göstermiştir.

Şekil 3.1b'de ise PCM'in sıcaklık değişimi şarj ve deşarj süreçleri için birlikte verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere ışınımın uygulandığı süre (şarj) boyunca ortalama PCM sıcaklığı 75°C'ye kadar düzenli bir artış göstermiş ve şarj süresinin sonuna doğru bu değerde daimi duruma ulaşmıştır. Şarj süresinin (7 saat) tamamlanmasının ardından ışık kaynağı kapatılmış ve PCM'in başlangıç sıcaklığına (25°C'ye) dönüş süresi incelenmiştir. PV/PCM sistemi için yapılan ısı analiz neticesinde elde edilen termal regülasyon ve deşarj süreleri Tablo 3.1'de özetlenmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere; 3 cm PCM kalınlığı için panel sıcaklığı yaklaşık 230 dakika ısı alıcısız panel sıcaklığının altında tutulabilmektedir. Önemli bir diğer bulgu ise deşarj süresinin 3 cm PCM kalınlığı için yaklaşık 20 saat olmasıdır. Bu sürenin oldukça uzun olduğu ve ilgili sürenin kısaltılması yönünde bazı önlemler alınması gerektiği ifade edilmelidir.

**Tablo 3.1** PV/PCM sistemine ait termal regülasyon ve deşarj süreleri

|                        | Durum 2 |     |      |
|------------------------|---------|-----|------|
|                        | 30°     | 45° | 90°  |
| Termal regülasyon (dk) | 227     | 230 | 225  |
| Deşarj süresi (saat)   | 19      | 20  | 20,3 |

Çalışma kapsamında PV/PCM sistemi üzerinden sıcaklık ölçümleriyle eş zamanlı elektriksel güç ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. PV panelin maksimum güç çıktısının deney süresi boyunca değişimi Şekil 3.3'de farklı yerleşim açıları için verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere ısı alıcısız durum için panelden elde edilen maksimum güç panel sıcaklığının 25°C'den 68°C'ye ani şekilde yükselmesiyle 25'den 20,2 W'a düşmüştür. Panel arkasına PCM temelli ısı alıcı uygulanmasıyla sıcaklık artışındaki yavaşlamanın maksimum güç üzerindeki olumlu etkisi şekilden açıkça görülebilmektedir. ısı alıcısı uygulamasıyla yaklaşık 4 saat boyunca PV/PCM sisteminin maksimum güç çıktısı ısı alıcısız PV panelin üzerinde olmuştur. Fakat termal regülasyon süresinin tamamlanmasının ardından panel sıcaklığında istenmeyen artışların meydana gelmesiyle PV/PCM sisteminin güç çıktısı ısı alıcısız PV panelin altında kalmaya başlamıştır. Şekilden görüldüğü üzere PV/PCM sisteminin maksimum gücü deney süresinin sonuna doğru 19 W değerine düşmüştür. Bu olumsuzluk, regülasyon süresi boyunca ısı alıcısı uygulamasıyla güç değerinde elde edilen kazanımın zamanla kaybolmasına sebep olmaktadır. Güç çıktılarının daha iyi ortaya konması için Tablo 3.2'de farklı toplam ışınım miktarları için Durum 1 ve Durum 2'den elde edilen güç çıktıları derlenmiştir. Tablodan görüldüğü üzere; PV/PCM sistemiyle referans duruma kıyasla güç çıktısında elde edilen kazanç ilk 1 saatin sonunda en yüksek değerindeyken (%9,5); bu değer, termal regülasyon süresinin (4 saat, 4000 Wh/m<sup>2</sup>) ardından hızlı bir şekilde düşerek deney süresinin sonunda %1,5'lere kadar gerilemiştir. Bu sonuç, PV/PCM sistem tasarımlarında termal regülasyon süresinin toplam ışınım miktarını dikkate alarak doğru tayin edilmesinin önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.3 Maksimum güç değerlerinin deney süresi boyunca değişimi

Tablo 3.2 Farklı zaman adımları için elektriksel güç çıktıları

|                        |                                     | Toplam ışıınım miktarları (Wh/m <sup>2</sup> ) |       |       |       |        |        |        |
|------------------------|-------------------------------------|--|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
|                        |                                     | 1000   | 2000  | 3000  | 4000  | 5000   | 6000   | 7000   |
| Durum 1, Y. Açılış 30° | Toplam elektrik üretim miktarı (Wh) | 21,24  | 42,24 | 62,20 | 82,56 | 102,92 | 123,37 | 142,90 |
|                        | Durum 1'e kıyasla kazanç (%)        | 9,53   | 7,35  | 7,50  | 5,95  | 4,10   | 2,72   | 1,60   |
| Durum 1, Y. Açılış 45° | Toplam elektrik üretim miktarı (Wh) | 21,11  | 41,47 | 61,69 | 82,05 | 102,62 | 122,93 | 142,40 |
|                        | Durum 1'e kıyasla kazanç (%)        | 9,50   | 8,87  | 7,91  | 6,17  | 4,32   | 2,74   | 1,58   |
| Durum 1, Y. Açılış 90° | Toplam elektrik üretim miktarı (Wh) | 21,40  | 41,56 | 61,72 | 81,88 | 102,04 | 122,20 | 142,29 |
|                        | Durum 1'e kıyasla kazanç (%)        | 9,53   | 7,35  | 7,50  | 5,95  | 4,10   | 2,72   | 1,60   |
| Durum 2, Y. Açılış 30° | Toplam elektrik üretim miktarı (Wh) | 23,26  | 45,35 | 66,87 | 87,47 | 107,13 | 126,73 | 145,18 |
|                        | Durum 1'e kıyasla kazanç (%)        | 9,53   | 7,35  | 7,50  | 5,95  | 4,10   | 2,72   | 1,60   |
| Durum 2, Y. Açılış 45° | Toplam elektrik üretim miktarı (Wh) | 23,11  | 45,15 | 66,57 | 87,11 | 107,05 | 126,30 | 144,66 |
|                        | Durum 1'e kıyasla kazanç (%)        | 9,50   | 8,87  | 7,91  | 6,17  | 4,32   | 2,74   | 1,58   |
| Durum 2, Y. Açılış 90° | Toplam elektrik üretim miktarı (Wh) | 23,11  | 45,22 | 66,60 | 87,05 | 106,70 | 125,89 | 144,31 |
|                        | Durum 1'e kıyasla kazanç (%)        | 7,99   | 8,80  | 7,91  | 6,31  | 4,57   | 3,02   | 1,42   |

#### 4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında bir PV/PCM sisteminin termal ve elektriksel davranışı deneysel olarak incelenmiş olup çalışmadan elde edilen sonuçlar şu maddelerle özetlenebilir:

- PV panel üzerine düşen ışıınım enerjisi panellerin düşük verimlilikleri sonucu büyük oranda ısı formunda panel üzerinde birikerek hücre sıcaklıklarında artışa sebep olmaktadır. Bu sıcaklık artışı PV panellerin güç çıktıları üzerinde olumsuz etki yaratarak verimliliğin düşmesine yol açmaktadır.



- Standart test koşulları altında yapılan deneylerde, ısı alıcısı uygulanmayan PV panel sıcaklıklarının 1 saat içerisinde 68°C'ye ulaştığı ve güç çıktısının yaklaşık %19 oranında azaldığı görülmüştür.
- Pasif bir soğutma sistemi olan PCM temelli ısı alıcısı uygulaması ile (PV/PCM) ısı alıcısız panellerde gözlemlenen sıcaklık artışı yavaşlatılabilmiş ve belirli bir süre ısı alıcısız panel sıcaklığının altında tutularak regüle edilebilmiştir.
- PV-PCM uygulaması ile (Durum 2) 3 cm PCM kalınlığı için termal regülasyon süresi ortalama 230 dakika olarak tespit edilmiştir. Bu sürenin ardından PCM'in erime sürecini tamamlamış olması sonucu panel sıcaklıklarındaki artış devam etmiş ve 80°C gibi yüksek seviyeler gözlemlenmiştir.
- PV/PCM sistemi (Durum 2) için elektrik güç çıktısında elde edilen kazanım, regülasyonun bittiği zaman adımı için yaklaşık %6 olarak tespit edilmiştir. İlgili sürenin ardından sıcaklık artışının devam etmesi sonucu bu değer yaklaşık %1,5'e gerilemiştir. Bu sonuç, termal regülasyon süresinin önemini ortaya koymakta olup; ilgili süre toplam ışıyım miktarına uygun olması gerektiği ifade edilmelidir. Bu durum, deney sürelerinde gerekli düzenlemeler yapılarak çalışmalarda dikkate alınmalıdır.
- İncelenen 3 cm PCM kalınlığına sahip PV/PCM sisteminde yerleşim açısının üretilen elektrik enerjisi ve termal regülasyon süreleri üzerindeki etkisi %3'ün altında olmuştur.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma bir TÜBİTAK 1002 projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKLAR

- [1] Ahmad, A., Navarro, H., Ghosh, S., Ding, Y., Roy, J.N., 2021. "Evaluation of New PCM/PV Configurations for Electrical Energy Efficiency Improvement through Thermal Management of PV Systems", *Energies*, 14, 4130.
- [2] Huang, B.J., Lin, T.H., Hung, W.C., Sun, F.S., 2001. "Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems", *Solar Energy* 70 (5), 443-448.
- [3] Tiwari, A., Sodha, M.S., Chandra, A., Joshi, J.C. 2006. "Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 2, 175-189.
- [4] Aste, N., Chiesa, G., Verri, F., 2008. "Design, development and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PVT) air collector", *Renewable Energy*, 33 (5), 914-927.
- [5] Joshi, A.S., Tiwari, A., Tiwari, G.N., Dincer, I., Reddy, B.V. 2009. "Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system", *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 154-164.
- [6] Odeh, S., Behnia M., 2009. "Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling", *Heat Transfer Engineering*, 30:6, 499-505.
- [7] Moharram, K.A., Abd-Elhady, M.S., Kandil, H.A., El-Sherif, H., 2013. "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling", *Ain Shams Engineering Journal*, 4, 4, 869-877.
- [8] Herrando, M., Markides, C. N., Hellgardt, K., 2014. "A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance", *Applied Energy*, 122, 288-309.
- [9] Kroiß, A., Präbst, A., Hamberger, S., Spinnler, M., Tripanagnostopoulos, Y., Sattelmayer, T., 2014. "Development of a Seawater-proof Hybrid Photovoltaic/thermal (PV/T) Solar Collector", *Energy Procedia*, 52, 93-103.



- [10] Shan, F., Tang, F., Cao, L., Fang, G., 2014. "Comparative simulation analyses on dynamic performances of photovoltaic-thermal solar collectors with different configurations", *Energy Conversion and Management*, 87, 778-786.
- [11] Hussien, H. A., Numan, A. H., Abdulmunem A. R., 2015. "Improving of the photovoltaic / thermal system performance using water cooling technique", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 78, 012020.
- [12] Khanjari, Y., Pourfayaz, F., Kasaeian, A.B., 2016. "Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system", *Energy Conversion and Management*, 122, 263-278.
- [13] Ooshaksaraei, P., Sopian, K., Zaidi, S. H., Zulkifli, R., 2017. "Performance of four air-based photovoltaic thermal collectors configurations with bifacial solar cells", *Renewable Energy* 102 (B), 279-293.
- [14] Tiwari, A. K., Sontake, V. C., and Kalamkar, V. R., 2019. "Enhancing the Performance of Solar Photovoltaic Water Pumping System by Water Cooling Over and Below the Photovoltaic Array.", *ASME. J. Sol. Energy Eng.*, 142(2), 021005.
- [15] Hadipour, A., Zargarabadi, M. R., Rashidi, S., 2021 "An efficient pulsed- spray water cooling system for photovoltaic panels: Experimental study and cost analysis", *Renewable Energy*, 164, 867-875.
- [16] Sornek, K.; Goryl, W.; Figaj, R.; Dąbrowska, G.; Brezdeń, J., 2022. "Development and Tests of the Water Cooling System Dedicated to Photovoltaic Panels", *Energies*, 15, 5884.
- [17] Huang, M.J., Eames, P.C., Norton, B. 2004. "Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2715–2733.
- [18] Huang, M.J., Eames, P.C., Norton, B., Hewitt, N.J. 2011. "Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95, 1598–1603.
- [19] Khanna, S., Reddy, K.S., Mallick, T.K. 2018. "Optimization of finned solar photovoltaic phase change material (finned pv pcm) system", *International Journal of Thermal Sciences*, 130, 313–322.
- [20] Variji, N., Siavashi, M., Tahmasbi, M., Bidabadi, M., 2022. "Analysis of the effects of porous media parameters and inclination angle on the thermal storage and efficiency improvement of a photovoltaic-phase change material system", *Journal of Energy Storage*, 50, 104690.
- [21] Nehari, T., Benlekkam, M., Nehari, D., Youcefi., A., 2016. "The Effect of Inclination on the Passive Cooling of The Solar PV Panel by Using Phase Change Material", *International Journal of Renewable Energy Research*, 6, No.1.
- [22] Khanna, S., Reddy, K.S., Mallick, T.K. 2017. "Performance analysis of tilted photovoltaic system integrated with phase change material under varying operating conditions", *Energy*, 133, 887–899.
- [23] Hasan, A., McCormack, S. J., Huang, M.J., Norton, B. 2010. "Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics", *Solar Energy*, 84, 1601–1612.
- [24] Hasan, A., McCormack, S.J., Huang, M.J., Norton, B. 2014. "Characterization of phase change materials for thermal control of photovoltaics using Differential Scanning Calorimetry and Temperature History Method", *Energy Conversion and Management*, 81, 322–329.
- [25] Nouira, M., Sammouda, H. 2018. "Numerical study of an inclined photovoltaic system coupled with phase change material under various operating conditions", *Applied Thermal Engineering*, 141, 958–975.
- [26] Khanna, S., Newar, S., Sharma, V., Reddy, K. S., Mallick, T.K., Radulovic, J., Khusainov, R., Hutchinson, D., Becerra, V. 2019. "Electrical enhancement period of solar photovoltaic using phase change material", *Journal of Cleaner Production*, 221, 878–884.
- [27] Klugmann-Radziemska, E., Wcisło-Kucharek, P. 2017. "Photovoltaic module temperature stabilization with the use of phase change materials", *Solar Energy*, 150, 538–545.
- [28] Japs, E., Sonnenrein, G., Krauter, S., Vrabec, J. 2016. "Experimental study of phase change materials for photovoltaic modules: Energy performance and economic yield for the EPEX spot market", *Solar Energy*, 140, 51-59.
- [29] Hasan, A., Sarwar, J., Alnoman, H., 2017. Abdelbaqi, S., "Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate", *Solar Energy*, 146, 417-429.





- [30] Nedumaran, M. S., Nagarajan, G., Hooman, K., 2022. "Numerical analysis of multiple phase change materials based heat sink with angled thermal conductivity enhancer", Journal of Energy Storage, 55(A), 105316.
- [31] Yin, E., Li, Q., Li, D., Xuan Y. 2019. "Experimental investigation on effects of thermal resistances on aphotovoltaic-thermoelectric system integrated with phase change materials" Energy, 169, 172-185.
- [32] Singh, P., Mudgal V., Khanna, S., Mallick, T.K., Reddy K.S. 2020. "Experimental investigation of solar photovoltaic panel integrated with phase change material and multiple conductivity-enhancing containers", Energy, 205, 118047.
- [33] Xu, H., Zhang, C., Wang, N., Qu, Z., Zhang, S. 2020. "Experimental study on the performance of a solarphotovoltaic/thermal system combined with phase change material" Solar Energy, 198, 202-211.
- [34] Adibpour, S., Raisi, A., Ghasemi, B., Sajadi, A.R., Rosengarten, G. 2021. "Experimental investigation of the performance of a sun tracking photovoltaic panel with Phase Change Material", Renewable Energy, 165, 321-333.
- [35] Esen, V., Sağlam, Ş., Oral, B., 2017. "Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77, 1240-1250.
- [36] Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü. "Türkiye Global Güneş Radyasyonu Uzun Yıllar Ortalaması (2004-2018)" [https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon\\_iller.aspx](https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon_iller.aspx) Son erişim tarihi: 20 Haziran 2021.

## ÖZGEÇMİŞ

### Oğuz Kaan YAĞCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Öğretim elemanı olarak görev yapmaktadır. 2013 yılında lisans, 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Enerji Anabilim Dalı'nda yüksek lisansını tamamlamış ve aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde doktora programına başlamıştır. Isı transferi, ısı enerji depolama, nanoakışkanlar ve akışkanlar mekaniği konularında çalışmalar yapmaktadır.

### Mete AVCI

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. 2022 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesinde Rektör Yardımcılığı görevine başlamış ve halen görevine devam etmektedir. Mikrokanallarda ısı ve kütle transferi, ısı enerji depolama, Newtonumsu olmayan akışkanlar dinamiği ve gözenekli ortamlarda aktarım konularında çalışmaktadır.

### Orhan AYDIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Deneysel ve hesaplamalı ısı transferi, faz değişimli ısı transferi, ısı transferi iyileştirme, ısı depolama, mikro kanallarda akış ve ısı transferi, Newtonumsu olmayan akış ve ısı geçişi gibi konular üzerine çalışmaktadır. Prof. Aydın, TÜBA asli üyesidir.

### Burak MARKAL

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Makine Mühendisliği'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 2010 yılında yüksek lisans, 2016 yılında ise doktorasını tamamlamıştır. Mikrokanallarda kaynamalı akış, ısı ve kütle transferi, ısı boruları, mikroakışkanlar, elektronik sistemlerin soğutulması, vorteks tüpler, dönmeli akışlar ve jet akışlar konularında çalışmaktadır.