



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

BİNA ENTEGRELİ FOTOVOLTAİK PANEL ISIL KONTROLCUSÜNÜN SAYISAL MODELLENMESİ

**MUSTAFA AYDIN
CEM KALKAN
EZGİ KOPARAN
ELİF LEŞANOĞLU
CANSU USLU
CEREN YÜKSEL
ŞEBNEM YILMAZ BALAMAN
MEHMET AKİF EZAN
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**

**AHMET YILANCI
EGE ÜNİVERSİTESİ**

BİNA ENTEGRELİ FOTOVOLTAİK PANEL ISIL KONTROLCUSÜNÜN SAYISAL MODELLENMESİ

Numerical Modelling of Building Integrated Photovoltaic Panel

Mustafa AYDIN
Cem KALKAN
Ezgi KOPARAN
Elif LEŞANOĞLU
Cansu USLU
Ceren YÜKSEL
Ahmet YILANCI
Şebnem YILMAZ BALAMAN
Mehmet Akif EZAN

ÖZET

Fotovoltaik panellerin güç üretimi panel sıcaklığıyla ters orantılıdır. Güneş ışınımının yüksek olduğu zaman dilimlerinde panel yüzeyinden uzaklaştırılamayan ısı enerji panel sıcaklığının artmasına ve elektrik üretim veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle fotovoltaik panelin düşük sıcaklıklarda tutulması için kontrol edilmesi aktif veya pasif ısı kontrolcüler uygulanmaktadır. Bu çalışmada panel arka yüzeyine uygulanan farklı tip faz değişim malzemelerinin ve hazne kalınlıklarının panel sıcaklığı üzerine etkisi sayısal olarak modellenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlara göre panel kalınlığının artması duylur ısı kapasitesini arttırmakta ve sistem verimi olumlu yönde etkilenmektedir. Diğer taraftan faz değişim malzemesi erime sıcaklığının panel referans sıcaklığına yakın olması durumunda ısı kontrolcünün etkin olduğu tespit edilmiştir. 1 cm kalınlığında RT28HC kullanılmasıyla 5°C civarında sıcaklık düşümü elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik panel, ısı kontrol, faz değişim malzemesi, sayısal modelleme

ABSTRACT

Electricity generation of a photovoltaic panel is adversely proportional to the panel temperature. When the incident solar radiation is above a critical level, the excessive heat could not be extracted from the panel surface through the ambient. As a result, the panel temperature increases and the electricity generation efficiency reduces. In order to maintain the panel surface at lower temperatures, close to the reference temperature, active or passive thermal controllers are implemented. In the current work, phase change materials (PCMs) with different melting temperatures and enclosure thicknesses are applied at the rear side of the photovoltaic panel. The influences of the usage of PCMs on the panel surface temperature are determined numerically. Results show that increasing the thickness of the PCM enclosure improves the sensible heat storage capacity and consequently, the efficiency enhances. On the other hand, the thermal controller becomes more effective when the PCM melting temperature is close to the reference temperature of the PV. With the implementation of 1 cm of RT28HC, the maximum temperature of the PV reduces by 5°C.

Key Words: Photovoltaic panel, thermal control, phase change material, numerical modeling.

1. GİRİŞ

Güneş, dünyada yaşam döngüsünü sağlayan temel etkidir ve tüm canlılar için vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Sahip olduğu başlıca özelliklerden biri olan doğal olarak var olabilirliliği, herhangi bir çıkarım işlemine gereksinim duyulmaması, insanoğlunun bu kaynaktan tarih boyunca farklı amaçlarla yararlanmasını sağlamıştır. Dünya üzerine Güneş tarafından ortalama olarak her metre kare başına 1700 kWh'lik enerji üretebilecek kadar güneş ışınımı düşmektedir [1]. Dünya yüzeyine düşen bu güneş enerjisi miktarı ile var olan küresel enerji ihtiyacının 10000 katı kadar enerji elde edilebilir [1]. Güneş enerjisine erişim coğrafi konuma bağlı olup, ülkemiz bu açıdan önemli bir potansiyele sahiptir. Ayrıca ışınım sayesinde yarattığı sıcaklık da Güneş'in bir enerji kaynağı olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Güneş'in sağladığı bu imkândan çeşitli yöntemler kullanılarak sıcak su eldesi, ısıtma, soğutma ve elektrik üretiminde yararlanılmaktadır.

Güneş'ten gelen büyük potansiyele sahip ışınımın doğrudan elektrik enerjisine çevrilmesinde fotovoltaik paneller önemli rol oynamaktadır. Fotovoltaik paneller, hücreler halinde bulunan yarı-iletken malzemelerin üzerine güneş ışınımının düşürülmesiyle elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Yarı-iletken malzemenin üzerine gelen güneş ışınımının sahip olduğu enerji ile elektronlar bağlarından kurtularak serbest hale geçer ve bu sayede elektrik akımı üretilmiş olur. Elektriğin bu şekilde üretimi çevre kirliliğine sebep olmaması açısından diğer yöntemlerden daha çevre dostudur. Fotovoltaik panel 90 g-CO₂/kWh gibi düşük karbondioksit salınım oranları ile elektrik üretimi yapabilirken, kömürden elektrik üretiminde 1000 g-CO₂/kWh gibi 10 kat daha yüksek karbondioksit salınımı ile elektrik üretimi yapılmaktadır [2]. Enerji üretim/tüketim zincirinde meydana gelen en temel kayıp santrallerde üretilen enerjinin kullanım alanlarına aktarılması sırasında oluşur. Fotovoltaik paneller çalışırken güneş ışınımından yararlandığı için herhangi bir hammadde alınmasına ihtiyaç duymamaktadır. Bu yüzden işletme maliyetleri çok düşük seviyelerde yer almaktadır.

2014 verilerine göre dünyada binalardaki elektrik tüketimi %31,3'lük büyük bir paya sahiptir [3]. Fotovoltaik panellerin düşük işletim maliyetine sahip olması, şebekeye ihtiyaç duymadan bölgesel olarak enerji üretebilmesi gibi nedenlerle binalara entegre şekilde fotovoltaik panel kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu sayede kullanım yerinde üretim yapılarak enerji iletiminde meydana gelen kayıplar en aza indirilebilir. Fotovoltaik panellerde enerji üretimi üç temel faktöre bağlıdır;

- *Panelde kullanılan yarı iletken malzemenin cinsi,*
- *Güneşten gelen ışınımın şiddeti,*
- *Hücrenin işletme sıcaklığı*

Ancak bunların yanında ortam sıcaklığı, hava şartları gibi mevsime bağlı parametrelerle birlikte panel konumu ve panel camının temizliği de verim için önemli etkenlerdir. Bu nedenle panel seçimi yapılırken bu etmenler göz önüne alınmalıdır. Mevcut yarı-iletken teknolojisi ile panellerin verimi %15-25 arasında değişmektedir. Bu verim değerleri referans çalışma koşullarında elde edilebilmektedir. Panelin güneş ışınımı alması ile güneşten gelen enerjinin bir kısmı elektrik enerjisine dönüşürken bir kısmı da ısı enerjisi olarak açığa çıkar. Bu da verimi düşüren en temel faktör olan işletme sıcaklığını etkilemektedir [4]. Panelin işletme sıcaklığının artışı ile elektrik üretimi arasındaki katsayı β ile tanımlanmaktadır. Fotovoltaik panellerde işletme sıcaklığının 1°C artışına karşılık elektrik üretiminde %0,2 ile %0,3 arasında azalma meydana gelmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yarı-iletken malzemeler için sıcaklık katsayıları ve referans sıcaklıkları Tablo 1'de verilmektedir [5].

Tablo 1 Farklı tip paneller için sıcaklık katsayıları ve referans sıcaklıktaki verim değerleri [5]

Fotovoltaik Panel Tipi	η_{ref} (%)	β_{ref} (% K ⁻¹)	T_{ref} (°C)
c-Si	12,4	0.392	25
a-Si	5	0.110	25
CIGS	13,3	0.353	25
CdTe	27,9	0.205	25

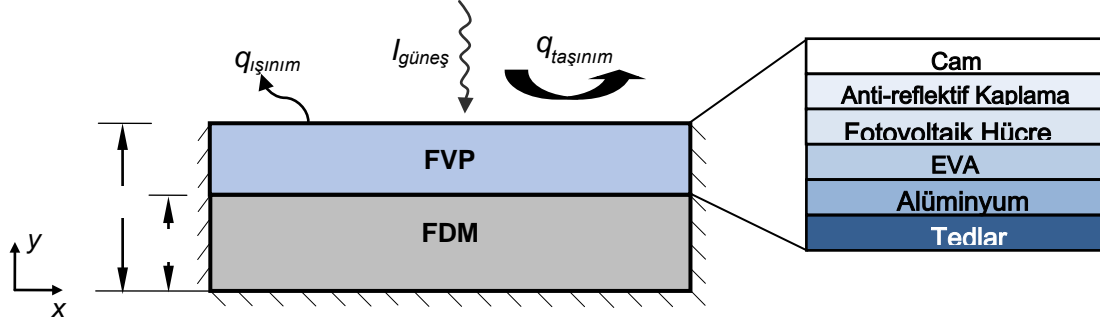
Literatürde fotovoltaik panelin işletme sıcaklığını düşürerek güç üretimini uygun aralıkta tutmak için çeşitli çözüm yolları uygulanmaktadır. Son yıllarda fotovoltaik sıcaklığının kontrolü için uygulanan en önemli iki yöntem faz değişim malzemesinin panele entegrasyonu ve hava kanalları içerisinde zorlanmış taşınım ile fazla ısının alınmasıdır [6]. Hava (veya su) kanalı entegrasyonu yoluyla ısının yüzeyden atılması ilave fan (veya pompa) gücü gerektirmenin yanı sıra hava akışına imkân veren açıklıkların da bulunmasını gerektirmektedir. Ancak bina çatı veya yan duvarlarına direkt monte edilen fotovoltaik panel uygulamalarında panel arkasındaki taşınım etkisi ortadan kalkmakta ve atık ısı panel yüzeyinin ısınmasına neden olmaktadır. Faz değişim malzemeleri (FDM) belirli bir hacim içerisinde ısı enerjisinin depolanması için kullanılan maddelerdir. Özellikle son yıllarda çeşitli ısı kontrol uygulamalarında da kullanılan FDM'ler ısı yükünü etkilediği dönemde sistemdeki atık ısıyı absorbe ederek ısı sistemin istenen sıcaklık aralığında tutulmasını sağlamaktadır. Faz değişimi sırasında meydana gelen hacim değişiminin az olması nedeniyle uygulamada genellikle katı-sıvı faz değişimli ısı enerji depolama yöntemi tercih edilmektedir. FDM, atık ısıyı emerken katı fazdan sıvı faza geçmektedir. Yükün ortadan kalktığı ve sistem sıcaklığının faz değişim noktasının altına düştüğü zaman diliminde ise FDM tekrar katı faza geri dönmektedir. FDM'lerin faz değişim gizli ısısı duyulur ısı değişimine kıyasla oldukça yüksektir. FDM'lerin bu özelliğinden yararlanarak fotovoltaik panellerde işletme sıcaklığının yüksek seviyelere ulaşmasını engellenebilir. Huang vd. [7] faz değişim malzemesi uygulanmış fotovoltaik panelin ısı davranışını ortaya koymak için doğal taşınım etkilerinin de göz önüne alındığı matematiksel bir model geliştirmiştir. Bunun yanı sıra oluşturulan sayısal modelin doğruluğunu değerlendirebilmek için küçük ölçekli bir test düzeneğinde de doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda faz değişim malzemeli panelin sıcaklığının 150 dakika boyunca 33°C altında tutulduğu gözlemlenmiştir. Burada kullanılan faz değişim malzemesinin erime sıcaklığı 26,6°C olarak belirlenmiştir. Aynı ekibin diğer bir çalışmada ise aynı sayısal kod kullanılarak farklı kanat uzunlukları, kanat malzemeleri ve ışınım şiddetleriyle panel sıcaklığının zamana göre değişimi incelenmiştir. Bu çalışmaya göre, faz değişim malzemesi olarak RT25 kullanılan kanatlı panel uygulamasında düz plakalı tasarımlara göre 30°C'lik sıcaklık farkı elde edilmiştir [7]. Mahamadul vd. [8] Malezya iklim koşulları için fotovoltaik panellerde faz değişim malzemesi kullanımını araştırmıştır. Sayısal analizler ve deneysel araştırmalar sonucunda 0,02 m kalınlığındaki RT35 tip faz değişim malzemesinin panele entegrasyonu ile modül yüzey sıcaklığının 10°C azaltıldığı belirlenmiştir. Dubey vd. [9] panel çalışma sıcaklığının elektrik üretim performansı üzerine etkisini tanımlayan farklı verim denklemlerini derlemiştir. Bunun yanı sıra, fotovoltaik güç üretim sistemlerinin dünya genelindeki güç üretim potansiyellerini gösteren dağılım grafiklerini oluşturmuşlardır. Coğrafi konum, ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığının fotovoltaik panel güç üretim potansiyeli üzerine etkisi ortaya konmuştur. Buna göre, yüksek rakımlı bölgelerde dış ortam sıcaklığının düşük olması nedeniyle fotovoltaik panelin daha yüksek performansa sahip olduğu vurgulanmıştır. Stropnik vd. [10] faz değişim malzemeli fotovoltaik panelin ısı davranışını hem kontrollü deneylerle hem de TRNSYS paket programı yardımıyla sayısal olarak incelemiştir. Fotovoltaik panel tipi CS6P-M, faz değişim malzemesi ise RT28-HC olarak seçilmiştir. Isıl kontrolcü olmayan fotovoltaik panel ile faz değişim malzemesi kullanılan fotovoltaik panelin sıcaklıkları karşılaştırılmıştır. FDM kullanılması durumunda maksimum panel sıcaklığının 35,6°C azaltıldığı tespit edilmiştir. Simülasyon sonucunda ise FDM içeren fotovoltaik panel veriminin Ljubljana şehri için yıllık %7,3 arttığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, İzmir iline ait Nisan ayı ortalama meteorolojik veriler kullanılarak farklı tip fotovoltaik panellerin ısı davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal model ANSYS-FLUENT paket programında 1-boyutlu olarak oluşturulmuş ve panele ait güç üretimi ve zamana bağlı sınır koşulları için kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (UDF) geliştirilmiştir. Panel yüzey sıcaklığının referans sıcaklık değeri civarında tutulması için panel arka yüzeyine farklı kalınlıklarda (1 cm, 2 cm ve 4 cm) faz değişim malzemesi hazneleri yerleştirilmiştir. Hazne kalınlığının yanı sıra kullanılan faz değişim malzemesinin erime sıcaklığının panel performansı üzerine etkisi ortaya konmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Problemin Tanımı

Çalışma kapsamında incelenen 1-boyutlu matematiksel model Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Fotovoltaik paneli (FVP) oluşturan temel bileşenler şu şekilde sıralanabilir; (i) koruyucu cam, (ii) anti-reflektif kaplama, (iii) fotovoltaik hücre, (iv) EVA, (v) alüminyum panel ve (vi) Tedlar [11]. Panelin aşırı ısınmasını engellemek için panelin alt yüzeyine faz değişim malzemesi (FDM) içeren hazne yerleştirilmiştir. Hazne malzemesinin kalınlığı ihmal edilirken panel ile FDM arasındaki temas direnci göz ardı edilmiştir. Faz değişim malzemesi erime sıcaklığının ve hazne kalınlığının panel sıcaklığı üzerine etkisi geliştirilen matematiksel model yardımıyla elde edilmiştir.



Şekil 1 Fotovoltaik panel (FVP) ve FDM'den oluşan matematiksel model

Tablo 2'de katman kalınlıkları ve ısıl özellikleri listelenmiştir. Anti-reflektif kaplama kalınlığı diğer katmanlara kıyasla çok ince olduğundan ihmal edilmiştir. Çalışmada 28°C, 31°C ve 35°C erime sıcaklığına sahip üç farklı FDM incelenmiştir. Ele alınan FDM'lere ait termofiziksel özellikler Tablo 3'te verilmektedir [12].

Tablo 2 FVP katmanlarının özellikleri [11]

FVP Katmanları	Yoğunluk ρ (kg/m ³)	Isıl İletkenlik k (W/mK)	Özgül Isı c_p (J/kgK)	Kalınlık, t (m)
Cam	3000	1,8	500	0,003
Anti-Reflektif Kaplama	2400	32	691	100 x 10 ⁻⁹
Fotovoltaik Hücre	2330	148	677	225 x 10 ⁻⁶
Eva	960	0,35	2090	500 x 10 ⁻⁶
Alüminyum	2700	237	900	10 x 10 ⁻⁶
Tedlar	1200	0,2	1250	0,0001

Tablo 3 Faz değişim malzemelerinin termofiziksel özellikleri [12]

Özellik	RT28HC		RT31		RT35HC	
	Sıvı	Katı	Sıvı	Katı	Sıvı	Katı
T_{erime} (°C)	28		31		35	
h_{sf} (J/kg)	250000		250000		240000	
c (J/kgK)	2000		2000		2000	
ρ (kg/m ³)	770	880	770	880	770	880
k (W/mK)	0.2		0.2		0.2	

2.2. Çözüm Yöntemi

Fotovoltaik panelin hücre kısmı dışında kalan katmanları için (cam, EVA, alüminyum ve Tedlar) zamana bağlı sıcaklık dağılımının çözümlenmesi için enerji denklemi aşağıdaki forma indirgenebilir,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Hücre katmanında ise kontrol hacmine etki eden güneş ışınımı ve elektrik üretimi enerji denklemi içerisinde kaynak terim olarak dahil edilmektedir,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - P''_{out} + Q''_{gen} \quad (2)$$

burada hacimsel güç üretimi ve ısıl kaynak terim şu şekilde tanımlanır: $P''_{out} \times t_{PV} = \eta_{PV} \times (\alpha \tau I_{solar})$ ve $Q''_{gen} \times t_{PV} = (1 - \eta_{PV}) \times (\alpha \tau I_{solar})$. Panel verimi ise sıcaklığa bağlı olarak elde edilmektedir,

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref} (T_{PV} - T_{ref})] \quad (3)$$

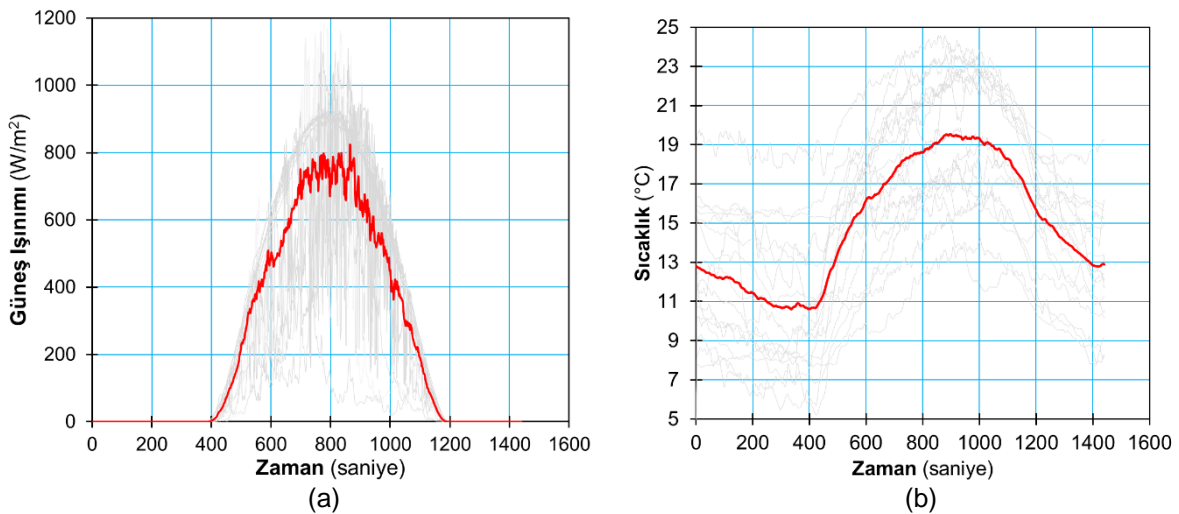
Faz değişim malzemesi içerisindeki sıcaklık dağılımının çözümlenmesi için etkin ısı kapasitesi (ρc) yaklaşımı uygulanmıştır [13]. Bu yaklaşımda, faz değişiminin yapay bir sıcaklık aralığında ($2\delta T_m$) gerçekleştiği kabul edilerek, ara faz için ısı kapasitesi değeri gizli ısı cinsinden tanımlanmaktadır,

$$C(T) = \begin{cases} (\rho c)_s & T < T_m - \delta T_m \\ \frac{(\rho c)_s + (\rho c)_l}{2} + \frac{\Delta H}{2\delta T_m} & T_m - \delta T_m \leq T \leq T_m + \delta T_m \\ (\rho c)_l & T > T_m + \delta T_m \end{cases} \quad (4)$$

Panelin (veya FDM'nin) bina cephesine temas eden yüzeyi ısıl olarak yalıtım kabul edilmiştir. Panelin dış ortama açık yüzeyinde ise güneş ışınımının yanı sıra taşınım ve ışınım ile ısı transferi göz önüne alınmıştır,

$$-k \frac{dT}{dy} \Big|_{y=H} = q''_{solar} - q''_{convection} - q''_{radiation} \quad (5)$$

Taşınım ile ısı geçişi terimi doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinden oluşmaktadır. Literatürden alınan [14] bağıntılardan yola çıkarak ANSYS-FLUENT paket programına kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (UDF) tanımlanmış ve anlık rüzgar hızı, dış ortam sıcaklığı ve cam dış yüzey sıcaklığı gibi veriler üzerinden taşınım katsayısı belirlenmiştir. İzmir ili Nisan ayına ait dakikalık güneş ışınımı, rüzgar hızı ve dış ortam sıcaklığı ölçümleri indirgenerek aylık ortalama değişimler elde edilmiştir. Şekil 2'de Nisan ayının ölçüm yapılan tüm günlerine ait anlık güneş ışınımı ve dış ortam sıcaklığı değişimleri ile aylık ortalama eğrileri gösterilmektedir.



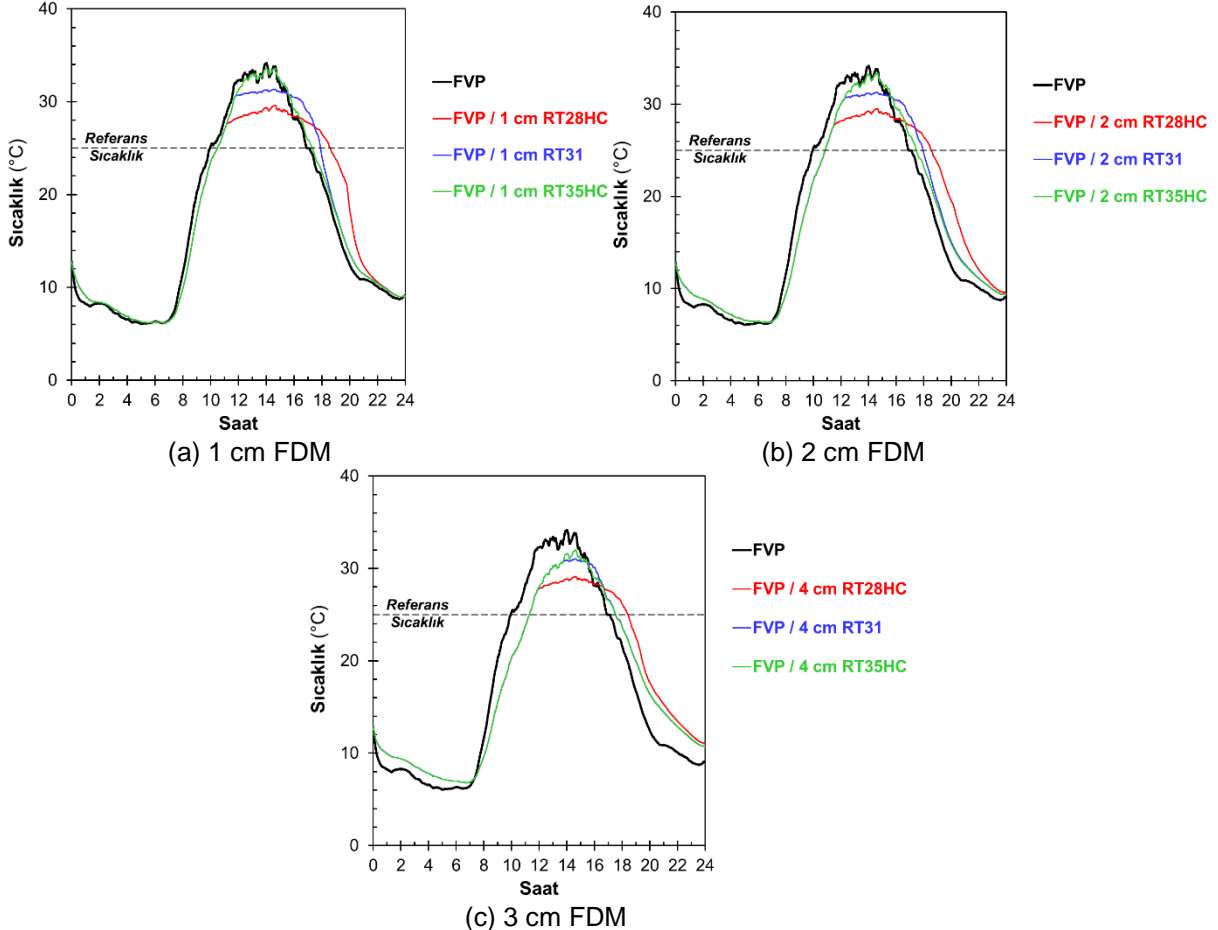
Şekil 2 İzmir ili Nisan ayı (a) anlık güneş ışınımı ve (b) dış ortam sıcaklığı

Eşitlik (1) – (5) ile verilen denklemler ANSYS-FLUENT paket programında zamana bağlı çözümlenmiştir. FDM içerisindeki doğal taşınım etkileri ihmal edildiğinden ısı transfer mekanizması

iletimdir. Bu nedenle zaman adımı olarak 60 s alınmıştır. İteratif çözümde her bir zaman adımı için enerji denkleminin artık teriminin 10-8 değerinin altına inmesi sağlanmıştır. Matematiksel çözüm yönteminin zaman adımından ve ağ sayısından bağımsızlığı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yöntemin doğruluğunu test etmek için ise literatürden seçilen sayısal modellerle karşılaştırma yapılmıştır. Bu sonuçlar yazarların daha önceki çalışmasında sunulmaktadır [15].

3. BULGULAR

FDM içeren fotovoltaik panelin ısıl davranışını detaylı olarak sunabilmek için sonuçlar hem zamana bağlı hem de konuma bağlı olarak elde edilmiştir. Şekil 3'te FDM'li ve FDM'siz CIGS tip fotovoltaik panelin zamana bağlı sıcaklık değişimleri sunulmaktadır. FDM uygulanmayan panel (FVP) en yüksek sıcaklığa öğleden sonra 14:00 civarında ulaşmaktadır. Panelin maksimum sıcaklığı 34,18°C olarak belirlenmiştir. Panel arkasına 1 cm, 2 cm ve 4 cm olmak üzere üç farklı kalınlıkta FDM haznesi uygulanmıştır. FDM kalınlığından bağımsız olarak, düşük erime sıcaklığına sahip FDM'lerin, 28°C ve 31°C gibi, panel arkasına uygulanmasıyla birlikte panel sıcaklığının azaldığı ve maksimum sıcaklığın referans sıcaklığa doğru düştüğü görülmektedir. Erime sıcaklığı 35°C olan FDM'ye ait sonuçlar incelendiğinde ise hazne kalınlığıyla sıcaklık değişimi arasında önemli bir etkileşim olduğu görülmektedir.

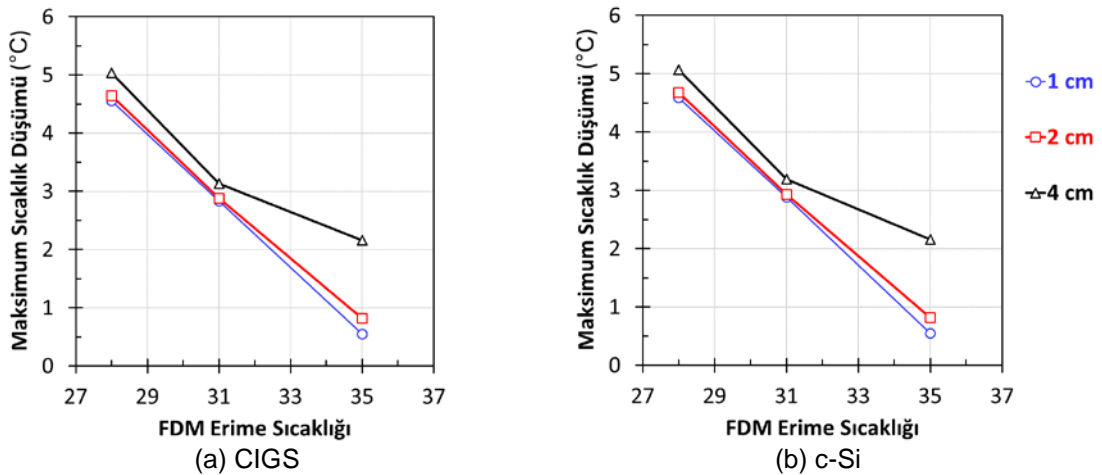


Şekil 3. CIGS tip FVP sıcaklığının zamanla değişimi

Şekil 3(a)'dan da görüldüğü gibi FDM'siz FVP ile 1 cm kalınlığında RT35HC uygulanan panel arasında gözle görülür bir fark yoktur. Panelin bu çalışma koşulunda ulaştığı maksimum sıcaklık 34°C civarında olduğundan erime sıcaklığı bu değer üzerinde bir FDM kullanımı etkin olmamaktadır. Maksimum sıcaklık değerinin altındaki FDM'ler ise faz değişim işlemi gerçekleştirerek panel yüzeyinden ısıl enerjiyi hem duyulur hem de gizli olarak çekebilmektedir. RT35HC tipi FDM, 2 cm ve üzeri hazne

kalınlıkları için etkin olabilmektedir. Yüksek sıcaklığa sahip FDM'nin en belirgin etkisi 4 cm hazne kalınlığı için gözlemlenmiştir. Bu kalınlık için RT35HC ve RT31 sonuçları birbiriyle benzeşmektedir. FDM kalınlığının artmasıyla birlikte malzemenin duyulur ısı depolama özelliğinin de artması iki durum arasındaki yakınlaşmanın sebebi olabilir.

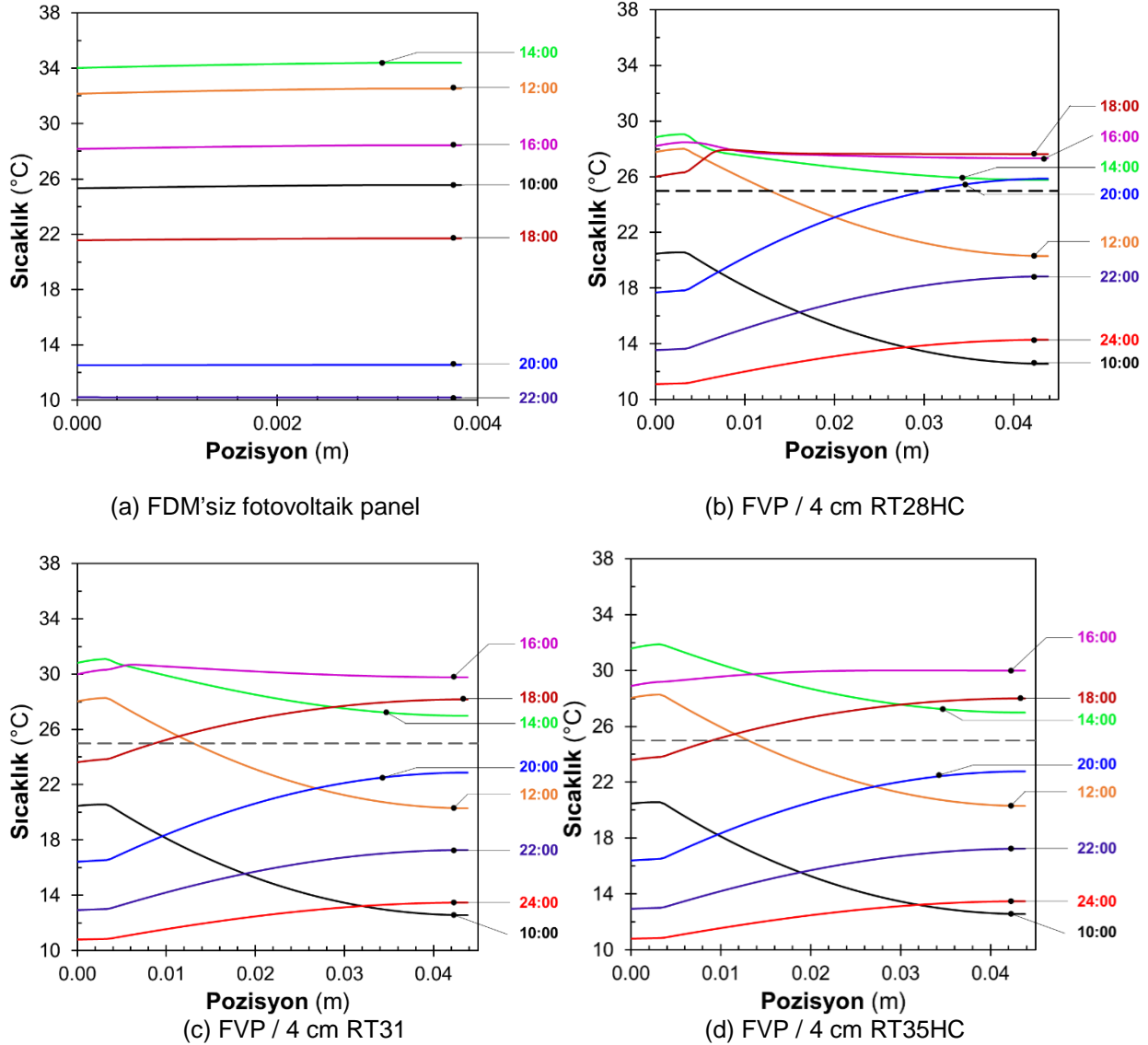
FDM uygulanan panellerde elde edilebilecek maksimum sıcaklık düşümü değerleri Şekil 4'te verilmektedir. CIGS ve c-Si tip paneller için elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4(a) ve Şekil 4(b)'de sunulmuştur. Seçilen panel tipleri için elektrik dönüşüm verimi ve sıcaklık katsayısı (β) birbirine yakın olduğundan sonuçlar arasında belirgin bir fark görülmektedir. Her iki panel için de en yüksek sıcaklık düşümü 28°C erime sıcaklığına sahip FDM için elde edilmiştir. FDM erime sıcaklığı arttıkça maksimum sıcaklık değerindeki düşüş etkisini kaybetmektedir. Yüksek erime sıcaklıklarına sahip FDM kullanımında sıcaklık düşüşü elde etmek için hazne kalınlığının artırılması gerektiği açıktır. Ancak sistemin ekonomik açıdan da avantaj sağlaması için yatırım maliyetinin de düşürülmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, ilk yatırım maliyetleri de düşünüldüğünde, 1 cm kalınlığında RT28HC uygulanan fotovoltaik panelin en etkin ısı kontrolcü olduğu görülmektedir.



Şekil 4. FDM erime sıcaklığının maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi

FDM haznesinin etkinliğini belirlemek için tek gösterge elde edilen sıcaklık düşümü değildir. Etkin bir FDM kullanımının söz konusu olabilmesi için, FDM kütlelerinin tamamının faz değiştirmesi (erime/donma) beklenmektedir. FDM içerisindeki yerel sıcaklık değişimleri üzerinden FDM tipi ve kalınlığına bağlı olarak ısı etkinliği yorumlanabilir. Şekil 5'te FDM'siz ve 4 cm FDM içeren fotovoltaik paneller içerisindeki konuma bağlı sıcaklık değişimleri saat 10:00 ila 22:00 arasında seçilen anlar için sunulmaktadır. Şekil 5(a) FDM'siz FVP'ye ait yerel sıcaklık dağılımını göstermektedir. Saat 10:00'da 26°C'nin altında olan panel sıcaklığı 12:00'da 32°C, 14:00 ise 34°C'ye artmaktadır. Panelin ince olmasından dolayı (3.835 mm) kalınlık boyunca sıcaklık değişimi oldukça düşüktür. FDM'siz FVP için üniforma yakın sıcaklık dağılımının olduğu söylenebilir. 4 cm kalınlığında RT28HC, RT31HC ve RT35HC uygulanan FVP'lere ait yerel sıcaklık değişimleri ise sırasıyla Şekil 5(b), 5(c) ve 5(d)'de sunulmaktadır. Erime sıcaklığı 28°C olan FDM (RT28HC) kullanıldığında saat 10:00 için FVP kalınlığı boyunca sıcaklığın 20°C civarında olduğu görülmektedir. FDM'nin içerisinde ise yüksek bir sıcaklık gradyanı olup yalıtım yüzeyinde sıcaklık 14°C'nin altındadır. Bu sonuç FDM'nin iki yönlü ısı kontrolcü özelliğine vurgu yapmak açısından oldukça önemlidir. Günüz ile gece sıcaklık farkının yüksek olduğu durumlarda FDM aşırı soğuma yaptığından içerisinde duyulur "soğu" depolanabilmektedir. FDM kütlesi arttıkça duyulur "soğu" kapasitesi de artacaktır. Sistem içerisinde geceden depolanan "soğu" nedeniyle FDM'nin ısınması oldukça yavaştır. Saat 12:00'da FVP sıcaklığı 27°C olarak elde edilirken, yalıtım yüzeyindeki FDM sıcaklığı 19°C'dir. Saat 12:00'dan 14:00'a kadar geçen iki saatlik dilimde sıcaklık 30°C'nin altında kalmıştır. FDM'li ve FDM'siz durumlar mukayese edildiğinde saat 12 ile 14 arasında FDM'li sistem ile FVP sıcaklığının 5°C daha düşük tutulabildiği görülmektedir. Güneş ışınımı etkisinin azaldığı 18:00'dan itibaren FDM'siz FVP sıcaklığı 22°C altına inmektedir. FDM uygulanan FVP'nin içerisinde ısı enerji depolandığından soğuması daha uzun zaman almaktadır. Saat 18:00'da sistem içerisindeki sıcaklığın 26°C ile 28°C arasında değiştiği görülmektedir. FVP malzemesinin kalınlığı ve ısı kapasitesi düşük olduğundan FDM'ye göre daha hızlı soğumaktadır. Saat 20:00'da FVP sıcaklığı 18°C altına inerken FDM'nin yalıtım ucunda sıcaklık 26°C civarındadır. FDM sıcaklığı ancak

saat 24:00'te 14°C'nin altına düşmektedir. FDM uygulanmayan FVP'de ise 24:00'da panel sıcaklığı 10°C'nin çok altındadır. FDM erime sıcaklığının artmasıyla birlikte panel sıcaklıklarının ötelendiği görülmektedir. RT31 için maksimum sıcaklık 30°C'nin üstüne çıkarken, RT35HC için maksimum sıcaklık 32°C olarak tespit edilmiştir. Yerel sıcaklık dağılımları incelendiğinde, RT31 ve RT35HC uygulanan sistemlerde faz değişim malzemesinin erimediği tespit edilmiştir. RT28HC ise saat 14:00 ila 16:00 arasında erirken, 18:00'dan itibaren katı faza geçmiştir.



Şekil 5. Panel kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri

4. SONUÇLAR

Fotovoltaik panelin elektrik üretim veriminin panel sıcaklığı ile ters orantılı olduğu bilinmektedir. Panelin referans sıcaklığa yakın değerlerde tutulması için literatürde farklı uygulamalar mevcuttur. Bu çalışmada pasif ısıl kontrolcü olarak panel arka yüzeyine faz değişim malzemesi kullanılmıştır. Özellikle bina entegreli fotovoltaik paneller gibi panel arka yüzeyinde hava taşınımının sınırlı veya hiç olmadığı uygulamalarda bu yöntem oldukça avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada elde edilen belli başlı sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:



- FDM erime sıcaklığının panel referans sıcaklığına yakın olması ısı kontrolcünün performansını arttırmaktadır,
- Isıl kontrol sisteminin sürekliliğini sağlamak için FDM içerisinde depolanan ısı enerjinin dış ortama atılması gerekmektedir. Bu nedenle gündüz ile gece sıcaklık farkının yüksek olduğu çalışma koşulları avantaj sağlayabilir,
- Bu çalışma için en yüksek sıcaklık düşümü 1 cm kalınlığında RT28HC uygulaması durumunda elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık düşümü 5°C'tir. Bu sıcaklık düşümüne karşılık güç üretiminde %1,7 artış sağlanmaktadır.
- Nisan ayı için yapılan bu çalışma farklı mevsim koşulları için genişletilmeli ve yıllık bazda FDM'li sistemin güç üretimine katkısı ortaya konulmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 315M242 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] EPIA Association, Greenpeace Association, Solar Generation 6, Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World, EPIA Association, 2011.
- [2] EVANS, A., STREZOV, V., & EVANS, T.J., "Assessment of Sustainability Indicators for Renewable Energy Technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(5), 1082-1088, 2009.
- [3] International Energy Agency (IEA), Key Electric Trends, Excerpt from: Electricity Information (2016 edition), <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyElectricityTrends.pdf>
- [4] CELLURA, M., CIULLA, G., BRANO, V. L., MARVUGLIA, A., & ORIOLI, A., "A Photovoltaic Panel Coupled with a Phase Changing Material Heat Storage System in Hot Climates", PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 2008.
- [5] BJORK, R. & NIELSEN, K.K. "The Performance of a Combined Solar Photovoltaic (PV) and Thermoelectric Generator (TEG) System", Solar Energy, 120, 187-194, 2015.
- [6] BAHADARAH, H.M., BALOCH, A.A., & GANDHIDASAN, P., "Uniform Cooling of Photovoltaic Panels: A Review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 1520-1544, 2016.
- [7] HUANG, M.J., EAMES, P.C., & NORTON, B., "Thermal Regulation of Building-integrated Photovoltaics Using Phase Change Materials", International Journal of Heat and Mass Transfer, 47(12), 2715-2733, 2004.
- [8] MAHAMUDUL, H., RAHMAN, MD.M., METSELAAR, H.S.C., MEKHILEF, S., SHEZAN, S.A.S, SOHEL, R., KARİM, S.B.A., BADIUZAMAN, W.N.I., "Temperature Regulation of Photovoltaic Module Using Phase Change Material: A Numerical Analysis and Experimental Investigation" Hindawi Publishing Corporation, 2016.
- [9] DUBEY, S., SARVAIYA, J.N., & SESHADRİ, B., "Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and its Effect on PV Production in the World – a Review", Energy Procedia, 33, 311-321, 2013.
- [10] STROPNIK, R., & STRITIH, U., "Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM", Renewable Energy, 97, 671-679, 2016.
- [11] ARMSTRONG, S., & HURLEY, W.G., "A Thermal Model for Photovoltaic Panels under Varying Atmospheric Conditions", *Applied Thermal Engineering*, 30(11), 1488-1495, 2010.
- [12] RUBITHERM Technologies GmbH datasheets
<https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>
- [13] SCANLON, T.J., & STICKLAND, M.T., "A Numerical Analysis of Buoyancy-driven Melting and Freezing", International Journal of Heat and Mass Transfer, 47(3), 429-436, 2004.
- [14] HENDRICKS, J.H.C., & SARK, W.G.J.H.M., "Annual Performance Enhancement of Building Integrated Photovoltaic Modules by Applying Phase Change Materials", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 21(4), 620-630, 2013.



[15] YÜKSEL, C., KALKAN, C., AYDIN, M., NERGİZ, G., & EZAN, M.A., “Passive Thermal Management of a Photo-voltaic Panel: Influence of Fin Arrangements”, 8th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEEES-8), Antalya (Turkey), 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa AYDIN

1994 Burdur doğumludur. DEÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği 4. Sınıf öğrencisidir. Solaris Güneş Arabaları Ekibi ile güneş enerjili araç yapımında bulundu. Yurtiçi ve yurtdışında bu ekiple yarışmalara katıldı. Araştırma / Bitirme Projesini Fotovoltaik Panel Isıl Kontrolü konusu üzerine yapmaktadır.

Cem KALKAN

1993 Manisa doğumludur. 2016 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği bölümünü bitirmiştir. Çift Anadal Programı kapsamında başladığı Dokuz Eylül Üniversitesi Endüstri Mühendisliği eğitim programında 4.sınıf öğrencisidir. Bitirme projesini Isıl Kontrolcülü Fotovoltaik Panel Tasarımının Optimizasyonu konusu üzerine gerçekleştirmektedir.

Ezgi KOPARAN

1994 Bursa doğumludur. DEÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği 4. Sınıf öğrencisidir. Araştırma / Bitirme Projesini Fotovoltaik Panel Pasif Isıl Kontrolü üzerine yapmaktadır.

Elif LEŞANOĞLU

1994 Kırklareli doğumludur. DEÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği 4. Sınıf öğrencisidir. Araştırma / Bitirme Projesini Fotovoltaik Panel Pasif Isıl Kontrolü üzerine yapmaktadır.

Cansu USLU

1994 İzmir doğumludur. DEÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği 4. Sınıf öğrencisidir. Araştırma / Bitirme Projesini Fotovoltaik Panel Pasif Isıl Kontrolü üzerine yapmaktadır.

Ceren YÜKSEL

1992 yılı İzmir doğumludur. 2014 yılında Uşak Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Yüksek lisans eğitimini Dokuz Eylül Üniversitesi Termodinamik programında tamamlamıştır. Doktora eğitimine aynı üniversitede devam etmektedir.

Ahmet YILANCI

1978 yılında Denizli’de doğdu. Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimini 2000 yılında tamamladı. 2004 yılında Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Bilim Dalı’ndan yüksek lisans derecesi ile mezun oldu ve aynı üniversitede 2008 yılında Doktora öğrenimini bitirerek, 2009 yılında Yardımcı Doçent ünvanını almaya hak kazandı. 2013 yılından itibaren Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü’nde Yardımcı Doçent olarak çalışmaktadır. Yurtdışı ve yurtiçi çeşitli hakemli dergilerde, uluslararası ve ulusal sempozyumlarda yer alan çeşitli çalışmaları bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ve sistemleri, enerji-ekserji analizi ve hidrojen teknolojileri alanlarında çalışmaktadır. 2014 yılından itibaren Uluslararası Enerji Ajansı-Fotovoltaik Güç Sistemleri (IEA-PVPS) programında ve Uluslararası Güneş Enerjisi Topluluğu-Türkiye Bölümü’nde (GÜNDER) yönetim kurulu üyeliği yapmaktadır.

**Şebnem YILMAZ BALAMAN**

1985 Denizli doğumludur. 2007 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümünü bitirmiş, 2009 yılında aynı Üniversitede Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansını tamamlamıştır. 2014 yılında Doktorasını tamamladığı Dokuz Eylül Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde Yrd. Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemleri tasarımı ve optimizasyonu alanında ulusal ve uluslararası bilimsel çalışmaları bulunmaktadır.

Mehmet Akif EZAN

1982 Düzce doğumludur. 2004 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 2006 yılında Yüksek Mühendis, 2011 yılında Doktor unvanını almıştır. 2004-2014 yılları arasında aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2015 yılından itibaren DEÜ Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'nda Yrd. Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır. Isıl sistemlerin sayısal modellenmesi, faz değişimli ısı enerji depolama sistemleri ve manyetik soğutma konularında ulusal ve uluslararası bilimsel çalışmaları bulunmaktadır.