

Investigation of PV Panel Integrated PCM-Nanoparticle Mixture Using 1-D Mathematical Model

Korhan ÖKTEN^{1,*} ¹Amasya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 05000, Merkez/AMASYA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 04.02.2022

Revision: 05.05.2022

Accepted: 27.06.2022

Highlights

- Electrical power
- PV temperature
- Efficiency
- Melting ratio

Keywords

PV panel

PCM

Nanoparticle

Efficiency

In this study, it was aimed to cool the panel and increase electricity production by placing the PCM / Nanoparticle mixture under the panel.

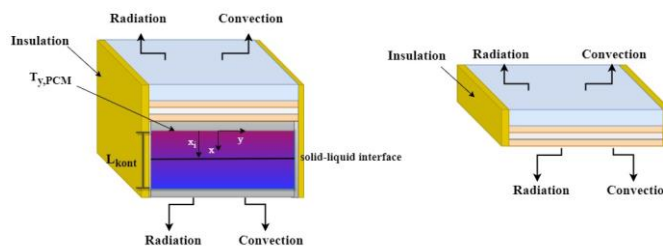


Figure A. PV panel and PV/PCM integration schematics

Purpose: In this study, it was aimed to cool the PV panel by adding PCM and a mixture of nanoparticles at different rates under the PV panel. The nanoparticle ratio in the PCM was chosen as 0.1, 0.3 and 0.5. These additions to the PV panel, under different radiation values; PV panel efficiency was evaluated by parameters of electricity production, PV panel temperature and PCM melting rate.

Theory and Methods: In the study, 1-D thermal resistance networks were used for modeling the PV panel. Also, a 1-D heat conduction equation was used for modeling the PCM container. The joint solution of these two models gave us the working outputs.

Results: As a result of the study, it was observed that the panel temperature and electricity production increased significantly due to the increase in the nanoparticle ratio. In addition, it was determined that the use of nanoparticles at high radiation values significantly increased the performance of the panel.

Conclusion: With this study, it has been proven that the use of nanoparticles in PV panel cooling in addition to PCM increases PV panel performance. In addition, it has been seen that the use of nanoparticles with higher thermal conductivity coefficients can give better results as an alternative. These results may solve the disadvantages of PV/PCM integration highlighted in the literature.



Investigation of PV Panel Integrated PCM-Nanoparticle Mixture Using 1-D Mathematical Model

Korhan ÖKTEN^{1,*}

¹Amasya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 05000, Merkez/AMASYA

Abstract

It is a well-known fact that PV panels heat up and decrease in efficiency depending on the amount of radiation and there are many studies on it. Adding PCM to the panel base for cooling PV panels is a passive cooling method commonly seen in the literature. In this study, PV panel temperature, panel efficiency, electricity generation, and melting rates in the FDM container were investigated using a 1-D mathematical model when PCM and PCM nanoparticle mixture were added to the PV panel base in different volumes ratios. The study was carried out for radiation values of 800, 1000, 1200 W/m². When the results were examined, the highest efficiency and electricity production values were obtained for 0.5 nanoparticle PCM mixture by volume. Efficiency expression was obtained as 18.3%, 17.7%, and 17.2% for 800, 1000, and 1200 W/m² by volume for 0.5 nanoparticle mixture, which is approximately 1% higher than the conventional PV panel. The electrical production was obtained as 112.5, 128, and 153 W, respectively, for the 0.5 nanoparticle PCM mixture, which are 5, 7, and 8 W more, respectively, than the conventional PV panel.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04.02.2022
Düzeltilme: 05.05.2022
Kabul: 27.06.2022

Keywords

PV panel
PCM
Nanoparticle
Efficiency

Anahtar Kelimeler

PV panel
FDM
Nanopartikül
Verim

PV Panel İle Bütünleştirilmiş FDM-Nanopartikül Karışımının 1-D Matematiksel Model Kullanılarak İncelenmesi

Öz

PV panellerin radyasyon miktarına bağlı olarak ısınması ve veriminin düşmesi bilinen ve üzerinde birçok çalışma yapılan bir olgudur. PV panellerin soğutulması için panel tabanına FDM eklenmesi ise literatürde yaygın olarak görülen pasif soğutma yöntemlerinden biridir. Bu çalışmada ise PV panel tabanına FDM eklenmesi ve farklı hacim oranlarında FDM nanopartikül karışımı eklenmesi durumunda PV panel sıcaklığı, panel verimi, elektrik üretimi ve FDM konteynerindeki erime oranı, 1-B matematiksel model kullanılarak incelenmiştir. Çalışma 800, 1000, 1200 W/m² radyasyon değerleri için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek verim ve elektrik üretimi değerlerinin hacimce 0.5 nanopartikül FDM karışımı için elde edildiği görülmüştür. Verim ifadesi hacimce 0.5 nanopartikül karışımı için 800, 1000 ve 1200 W/m² için sırasıyla % 18.3, %17.7 ve %17.2 olarak elde edilmiştir ki bu değerler geleneksel PV panelinden yaklaşık %1 fazladır. Elektrik üretimi ise yine 0.5 nanopartikül FDM karışımı için sırasıyla 112.5, 128 ve 158 W olarak elde edilmiştir ve bu değerler geleneksel PV panelden sırasıyla 5, 7 ve 8 W daha fazladır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

PV paneller, yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden faydalanarak karbon emisyonunu düşürmesi ve ucuz olması sebebi ile yaygın olarak kullanılan elektrik üretim sistemleridir [1,2]. Ancak PV paneller, diğer yenilenebilir enerji kaynağından elektrik enerjisi üreten sistemler (rüzgâr panelleri, hidro elektrik santraller) ile kıyaslandığında oldukça düşük verime sahiptirler. Bu sebeple PV panellerin verimini artırmak oldukça önemlidir. [3,4].

PV panel performansını etkileyen birçok parametre vardır. Bunlar; ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı ve radyasyon miktarıdır. Bu parametrelere bağlı olarak PV panel sıcaklığı arttığında, panel verimi önemli ölçüde düşmektedir. Dolayısı ile panel sıcaklığının düşürülmesi amacıyla literatürde aktif ve pasif soğutma

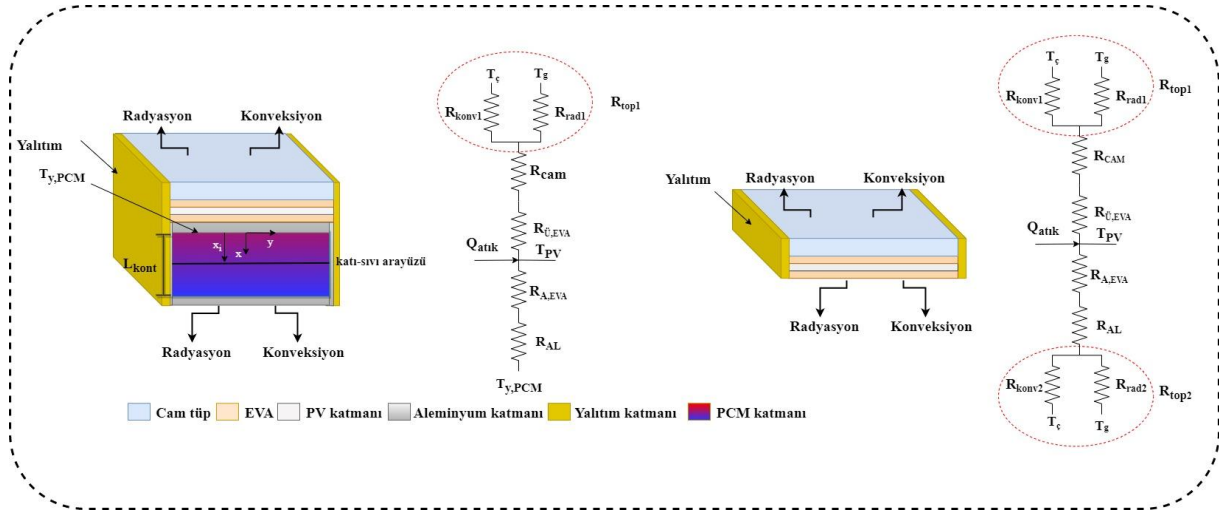
teknikleri kullanılarak yapılan birçok çalışma mevcuttur [5]. Literatürde panel tabanına, PV hücrelerinde oluşan ısıyı çekmek amacı ile FDM yerleştirilmesi yaygın olarak kullanılan pasif soğutma yöntemlerinden biridir.

Literatürde yer alan PV/FDM entegrasyonu ile ilgili çalışmalar incelenecek olunursa; Smith ve ark. [6] PV panel sıcaklığını düşürmek amacı ile panel tabanına FDM (Faz değiştiren malzeme) yerleştirmiş ve panel performansını geleneksel PV panel performansı ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar dünyanın farklı kıtalarındaki çevresel koşullar kullanılarak elde edilmiştir. Buna göre FDM kullanımı, incelenen tüm kıtalar için PV panel performansını artırmış olmakla beraber bazı bölgelerde verim artışı %6'yı aşmıştır. Strpnik ve Stritih [7] farklı radyasyon değerleri ve ortam koşulları için PV/FDM entegrasyonunu elektrik üretimi ve panel sıcaklıkları parametreleri ile deneysel ve nümerik olarak günlük ve yıllık olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda FDM kullanımı ile panel sıcaklığının 35.5 °C düştüğü ve elektrik üretiminin %7.3 arttığı görülmüştür. Savvakis ve Tsoutsos [8] yaptıkları çalışmada, PV/FDM entegrasyonu çıktılarını gerçek Akdeniz iklimi koşulları altında incelemiştir. PV/FDM kullanımı ile panel sıcaklığı 26.6 °C derece düşerken elektrik üretimi %5.7 artış göstermiştir. Emam ve Ahmed [9] PV/FDM entegrasyonunda, FDM' nin içerisinde bulunduğu konteyneri bölmelere ayırmış ve bu bölmelere farklı özelliklerde FDM' ler yerleştirerek PV panel sıcaklıklarını incelemiştir. 5 paralel bölüme ayrılmış ve panel sıcaklığına bağlı olarak 5 farklı FDM kullanılmış konteynerin, panel sıcaklığını en çok azaltan ve elektrik üretimini en çok artıran konfigürasyon olduğu saptanmıştır. Abdulmunem ve ark. [1] farklı PV panel açılarında FDM malzemesinin erime karakteristiğini ve buna bağlı olarak PV panel sıcaklığını incelemiştir. PV panel açısının 0°'den 90°'ye artışına bağlı olarak panel sıcaklığı %0.4 ile %1.2 arasında düşüş göstermiştir. Ahmad ve ark. [10], PV panelin soğutulması amacı ile 6 farklı konfigürasyon denemiştir. Bu konfigürasyonlar; geleneksel PV panel, PV panelin su ile soğutulması, PV/FDM entegrasyonu, PV/FDM entegrasyonuna ek olarak su soğutması, PV/kompozit FDM entegrasyonu ve PV/kompozit FDM entegrasyonuna ek olarak su soğutmasıdır. Aktif soğutmalı PV/kompozit FDM birleşimi tüm konfigürasyonlar içerisinde en iyi soğutmanın görüldüğü durum olmuştur. Sonuçlar bu durumda %66,8-82.6 arasında elektrik üretiminde artış olduğunu göstermiştir. Dual ve ark. [11] PV panel tabanında bulunan FDM' nin erimesi sırasında, konveksiyon akımlarına bağlı ısı transferini engellemek ve panelin homojen soğumasını sağlamak amacı ile FDM malzemesini gözenekli bir ortama entegre etmişlerdir. Sonuçlar gözenekli ortam kullanımının FDM' nin erimesi üzerine negatif etki ettiği belirlenmesine rağmen PV panel soğuma hızını artırdığını göstermiştir. Son olarak, Akshayver ve ark. [2] 3 farklı PV/FDM entegrasyonu incelemiştir. İlk olarak PV panel tabanına FDM konteyneri entegre edilmiş bir sistem, ikinci olarak üst ve alt tarafı PV hücresi ve ortasında FDM bulunan bir sistem ve son olarak üst ve alt tarafı PV hücresi ve ortasında FDM bulunan sistemde FDM konteynerinin ortasına yatay şekilde üçgenel yalıtım konumlandırılmış bir sistem modellemişler ve PV panel sıcaklıklarını karşılaştırmışlardır. En iyi sonuçlar karşılıklı PV panel arasına üçgenel yalıtım yerleştirilmiş durum için elde edilmiştir. Bu durum için sonuçlar PV/FDM entegrasyonuna göre %77 fazla elektrik üretildiğini göstermiştir.

Yukarıda bahsedildiği gibi PV panel sıcaklığının düşürülmesi PV panel verimini ve elektrik üretimini artırmaktadır. Bu çalışmadaki temel motivasyon ise ısı iletim katsayısını artırdığı bilinen nanopartikül FDM karışımlarının (Tablo 3) özelliklerini kullanarak radyasyon değeri ve nanopartikül oranı değişimine bağlı olarak PV panel verimi (n_{pv}), PV panel sıcaklığı (T_{pv}), FDM erime oranı (x_i / L_{cont}) ve elektrik üretimi (W_{elek}) parametrelerini iyileştirmektir. Radyasyon değeri olarak 800, 1000 ve 1200 W/m², nanopartikül oranı olarak ise 0.1, 0.3 ve 0.5 değerleri seçilmiştir.

2. SİSTEM TANITIMI (SYSTEM DESCRIPTION)

PV ve PV/FDM sistemlerinin çözümlenmesi için 1-B matematiksel model oluşturulmuştur. Matematiksel model için iki farklı kontrol hacmi seçilmiştir. İlk olarak PV panel kontrol hacmi seçilerek termal direnç ağı yöntemi ile çözümlenmiştir. İkinci olarak ise FDM konteyneri kontrol hacmi olarak seçilmiş ve analitik yöntem kullanılarak çözümlenmiştir. Şekil 1' de görülen şematikte PV ve PV/FDM entegrasyonu için ısı transferi ve termal direnç ağı modelleri görülmektedir.



Şekil 1. PV ve PV/FDM konfigürasyonu şematik görünümü

Öncelikle radyasyon ve konveksiyonla gerçekleşen ısı transferinin hesaplanabilmesi için ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplamanın kolaylaştırılabilmesi için çevre sıcaklığı (T_c) gökyüzü sıcaklığına (T_g) eşit alınmış ve bu kabul ile aşağıda görülen eşitlik yazılabilmektedir [12].

$$h_{top} = h_{konv} + h_{rad} \tag{1}$$

Eş. 1’ de görülen h_{konv} ve h_{rad} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [12].

$$h_{konv} = 2.8 + 3V_{rüz} \tag{2}$$

$$h_{rad} = A_{pv} \sigma \varepsilon (T_y^2 + T_g^2) (T_y + T_g) \tag{3}$$

Eş. 2 ve Eş. 3’ te görülen $V_{rüz}$ rüzgar hızını, T_y yüzey sıcaklığını, T_g gökyüzü sıcaklığını, σ Stefan boltzman sabitini, ε emicilik katsayısını ve A_{pv} PV panel alanını temsil etmekte olup PV panel alanı 1 m^2 olarak alınmıştır. Isıl direnç modelinin oluşturulabilmesi için Şekil 1’ de görülen her birleşenin ısıl dirençleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$R_{top} = \frac{1}{h_{top} A_{PV}} \tag{4}$$

Eş. 4’ te görülen R_{top} , yüzeyden konveksiyon ve radyasyonla gerçekleşen ısı kayıplarını temsil eden birleşik ısıl dirençtir. Aşağıda ise cam, EVA ve Alüminyum katmanlarında gerçekleşen iletim ile oluşan ısıl dirençler görülmektedir.

$$R_{cam} = \frac{L_{cam}}{k_{cam} A_{PV}} \tag{5}$$

$$R_{EVA} = \frac{L_{EVA}}{k_{EVA} A_{PV}} \tag{6}$$

$$R_{Al} = \frac{L_{Al}}{k_{Al} A_{PV}} \tag{7}$$

Eş. 5, Eş. 6 ve Eş. 7' de görülen, R_{cam} , R_{EVA} ve R_{Al} sırasıyla cam, EVA ve alüminyum katmanlarının ısı dirençlerini; L_{cam} , L_{EVA} ve L_{Al} sırasıyla cam, EVA ve alüminyum katmanlarının kalınlıklarını; k_{cam} , k_{Al} ve k_{EVA} ise sırasıyla cam, EVA ve alüminyum katmanlarının ısı iletkenliklerini göstermektedir.

İlk olarak geleneksel PV panel çözümlenmesi, termal direnç ağı kullanılarak yapılmıştır. Eş. 8' de üst yüzeyden gerçekleşen ısı kaybı; PV panel, gökyüzü ve üst yüzey sıcaklıkları arasındaki direnç ağlarından yararlanılarak tanımlanmıştır. Eş. 9' da ise alt yüzeyden çevreye olan ısı kaybı; PV panel, çevre ($T_c = T_g$) ve alt yüzey sıcaklıkları arasındaki direnç ağlarından yararlanılarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\dot{Q}_{atk,\text{üst}} = \left(\frac{T_{y,\text{üst}} - T_g}{R_{top,\text{üst}}} \right) = \left(\frac{T_{pv} - T_g}{R_{EVA,\text{üst}} + R_{cam} + R_{top,\text{üst}}} \right) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{atk,\text{alt}} = \left(\frac{T_{y,\text{alt}} - T_g}{R_{top,\text{alt}}} \right) = \left(\frac{T_{pv} - T_g}{R_{EVA,\text{alt}} + R_{al} + R_{top,\text{alt}}} \right) \quad (9)$$

Eş. 8' de görülen $\dot{Q}_{atk,\text{üst}}$ üst yüzeyden çevreye olan ısı kaybını, $T_{y,\text{üst}}$ PV panel üst yüzey sıcaklığını ve $R_{top,\text{üst}}$ üst yüzeyden çevreye gerçekleşen ısı direnci göstermektedir. Eş. 9' da görülen $\dot{Q}_{atk,\text{alt}}$ alt yüzeyden çevreye olan ısı kaybını, $T_{y,\text{alt}}$ alt yüzey sıcaklığını ve $R_{top,\text{alt}}$ alt yüzeyden çevreye gerçekleşen ısı direnci göstermektedir. Eş. 8 ve Eş. 9' da görülen üst ve alt yüzeyden gerçekleşen ısı kayıplarının toplamı bize toplam ısı kaybını verecektir.

$$\dot{Q}_{atk} = \dot{Q}_{atk,\text{alt}} + \dot{Q}_{atk,\text{üst}} \quad (10)$$

PV-FDM entegrasyonu için ise öncelikle PV panel kontrol hacmi olarak seçilmiş ve Şekil 1' de görülen ısı direnç ağı modeli oluşturulmuştur. Geleneksel PV paneline benzer şekilde PV panel üst yüzeyinden gökyüzüne olan ısı kaybı Eş. 11' de görüldüğü gibi olacaktır.

$$\dot{Q}_{atk,\text{üst}} = \left(\frac{T_{y,\text{üst}} - T_g}{R_{top,\text{üst}}} \right) = \left(\frac{T_{pv} - T_g}{R_{EVA,\text{üst}} + R_{cam} + R_{top,\text{üst}}} \right) \quad (11)$$

PV panelin alt yüzeyinde ise PV/FDM entegrasyonunda geleneksel PV panelden farklı olarak ısı çevreye değil FDM' ye geçecektir. Dolayısı ile $\dot{Q}_{atk,\text{alt}}$ (\dot{Q}_{FDM}) Eş. 12' de görüldüğü gibi tanımlanmıştır.

$$\dot{Q}_{atk,\text{alt}} = \left(\frac{T_{pv} - T_{y,FDM}}{R_{EVA,\text{alt}}} \right) \quad (12)$$

Eş. 12' de görülen $T_{y,FDM}$ ifadesi FDM konteynerinin üst yüzey sıcaklığını temsil etmektedir. Benzer şekilde PV/FDM entegrasyonunda da toplam ısı kaybı, alt ve üst yüzeyden gerçekleşen ısı kaybının toplamına eşit olacaktır.

$$\dot{Q}_{atk} = \dot{Q}_{atk,\text{alt}} + \dot{Q}_{atk,\text{üst}} \quad (13)$$

FDM konteynerinin çözümü için ikinci olarak konteyner sınırları kontrol hacmi olarak seçilmiş ve analitik çözüm gerçekleştirilmiştir. Çözüm için zamana bağlı 1-B ısı iletim denklemi kullanılmıştır.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

Eş. 14' ün non-homojen sınır koşulları ile çözümü mümkün değildir. Dolayısı ile Jiji ve Gaye [13] yaptıkları çalışmada boyutsuzlaştırma parametrelerini kullanarak denklemi dönüştürmüşler ve $Ste < 0.1$ olduğu durum

için yarı kararlı durum kabulü yapılabileceğini ortaya koymuşlardır. Bir başka deyişle $Ste < 0.1$ olduğunda $\partial T / \partial t$ ifadesi oldukça küçük olacağından ihmal edilebilir olduğunu göstermişlerdir. Bu kabulde hareket ile Eş. 14 aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = 0 \quad (15)$$

Eş. 15' te görülen T_s ifadesi, sıvı faz için sıcaklık değeridir. Öncelikle sıvı faz için çözüm elde edilmiş ve Eş. 15' in çözümü için aşağıda görülen sınır koşulları kullanılmıştır. Sınır koşullarına göre Şekil 1' de görülen koordinat sistemine göre x ' in sıfır değerinde sabit ısı akısı girdisi olduğu ($\dot{Q}_{atk,alt} = \dot{Q}_{FDM}$) ve sıvı-katı ara yüzeyinde sıcaklığın sabit ve T_e (erime sıcaklığı) sıcaklığında olduğu kabulü yapılmıştır.

$$x = 0, \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{\dot{Q}_{FDM}}{A} \quad (15a)$$

$$x = x_i, \quad T_s = T_e \quad (15b)$$

Eş. 15a' da görülen k_s ifadesi sıvı faz ısı iletkenliğini, \dot{Q}_{FDM} ise FDM' ye geçen ısı miktarını göstermekte ve $\dot{Q}_{FDM} = \dot{Q}_{atk,alt}$ dir. Katı faz için 1-B ısı iletim denklemi ise aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} = 0 \quad (16)$$

Eş. 16' da görülen ısı denkleminin çözümü için aşağıda görülen sınır koşulları kullanılmıştır. Sınır koşulu olarak katı-sıvı ara yüzeyinde sıcaklığın erime sıcaklığında olduğu ve konteyner tabanından çevreye konveksiyon ve radyasyonla ısı kaybı olduğu düşünülmüştür.

$$x = x_i, \quad T_k = T_e \quad (16a)$$

$$x = L_{kont}, \quad \frac{\partial T_k}{\partial x} = -\frac{h_{top}}{k_k} (T_p - T_\zeta) \quad (16b)$$

Eşitliklerde görülen T_k katı faz sıcaklığını, L_{kont} konteyner uzunluğunu, k_k katı faz ısı iletkenliğini ve T_p konteyner taban sıcaklığını göstermektedir. Eş. 15 ve Eş. 16 sınır koşulları kullanılarak çözümlenir ise Eş. 17 ve Eş. 18 elde edilir.

$$T_s(x) = \frac{\dot{Q}_{FDM}}{A_{pv} k_s} (x_i - x) + T_e \quad (17)$$

$$T_k(x) = \frac{h_{top}}{k_k} (T_p - T_\zeta)(x_i - x) + T_e \quad (18)$$

FDM konteynerinin taban sıcaklığı ise Eş. 19' da görüldüğü gibidir.

$$T_p = \frac{\left(\left(-h_{top} \cdot \frac{(x_i - L_{kont}) T_\zeta}{k_s} \right) + T_m \right)}{1 - \left(h_{top} \frac{x_i - L_{kont}}{k_s} \right)} \quad (19)$$

Ara yüzeyin zamana bağlı ilerlemesini incelemek için Eş. 20' de ara faz eşitliği ve sınır koşulu görülmektedir [13]. Bu eşitliğe göre panel tabanından gelen ısı akısı sıvı fazdaki FDM' den iletim ile transfer olmaktadır. Bu ısının bir kısmı faz dönüşüm enerjisine dönüşecek, bir kısmı katı fazdan iletim ile aktarılacaktır.

$$k_k \frac{\partial T_k(x_i, t)}{\partial x} - k_s \frac{\partial T_s(x_i, t)}{\partial x} = \rho_s L \frac{dx_i}{dt}, \quad x_i(0) = 0 \quad (20)$$

Eş. 17 ve Eş. 18, Eş. 20' de yerine yazılırsa ara fazın x yönünde zamana bağlı değişimi Eş.21' de görüldüğü gibi elde edilir.

$$x_i(t) = \left(\left(\left(\left(-h_{top} \cdot (T_p - T_\zeta) \right) + \left(\dot{Q}_{PCM} / A_{pv} \right) \right) \right) \cdot \frac{t}{\rho_l \cdot L} \right) \quad (21)$$

Analitik çözümün ardından sistem çıktıları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Öncelikle Eş. 22' de PV panel verimi hesaplanması görülmektedir [12].

$$n_{pv} = n_{ref} \left(1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref}) \right) \quad (22)$$

Eş. 22' de görülen n_{ref} referans verim, β_{ref} güneş hücresi sıcaklık katsayısı ve T_{ref} ifadesi referans sıcaklıktır. Eş. 23' te ise PV panel üzerine, güneş kaynaklı gelen net ısı güç ifade edilmektedir [12].

$$\dot{Q}_{netPV} = G n_{op} A_{pv} \quad (23)$$

Eş. 23' te görülen G ifadesi radyasyon miktarını ve n_{op} ifadesi optik verimi ifade etmektedir. Eş. 24' te PV panelinin ürettiği net elektriksel güç görülmektedir.

$$\dot{W}_{elPV} = \dot{Q}_{netPV} n_{pv} n_{inv} \quad (24)$$

Eş. 24' te görülen n_{inv} ifadesi invertör verimini ifade etmektedir. Eş. 25' te panelden kaybedilen atık ısı miktarı hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{atik} = \dot{Q}_{netPV} (1 - n_{pv}) \quad (25)$$

Yukarıda sistemin çözümlenmesi için oluşturulan bir boyutlu matematiksel model ve sistem çıktılarının hesaplanmasından bahsedilmiştir. Geleneksel PV panel çözümlenmesi için Eş. 8, 9, 10, 22, 23, 24 ve 25' in çözümlenmesi ve PV/FDM entegrasyonu için ise Eş. 11, 12, 13, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24 ve 25' in çözümlenmesi ile sistem çıktıları elde edilmiştir. Çözüm EES (Engineering Equation Solver) ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan matematiksel modelden sistem çıktılarının elde edilebilmesi için PV panel ve FDM' nin termal ve fiziksel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Tablo 1' de PV panelin termal ve fiziksel özellikleri görülmektedir.

Tablo 1. PV panel termal ve fiziksel özellikleri

	Kalınlık (m)	Isıl iletkenlik (W/mK)	Yayılcılık (-)	Sıcaklık Katsayısı (1/K)	Referans verim, η_{ref} (-)	Alıntı
Cam Tüp	0.003	0.8	0.9	-	-	[12]
PV Katmanı	0.0002	148	-	0.0045	0.2	[9]
EVA katmanı	1.27×10^{-6}	0.37	-	-	-	[12]
Aleminyum	0.004	211	0.095	-	-	[12]

PV panel tabanına yerleştirilen FDM konteyneri içerisine ham FDM ve nanopartikül FDM karışımı ile doldurulmuştur. Sistemde kullanılan ham FDM' nin termofiziksel özellikleri Tablo 2' de görülmektedir.

Tablo 2. Ham FDM'nin termofiziksel özellikleri

FDM	Değer
Erime sıcaklığı (°C)	35-36
Katı hal yoğunluğu(g/cm ³)	0.969
Sıvı hal Yoğunluğu(g/cm ³)	0.87
Katı hal sıvı iletkenliği (W/mK)	0.2
Sıvı hal sıvı iletkenliği (W/mK)	0.16
Gizli ısı (kJ/kg)	171
Katı hal özgül ısısı (K/kgK)	2.57
Sıvı hal özgül ısısı (Kj/kgK)	2.78

FDM' ye nanopartikül olarak grafen nano plakalar eklenmiştir. Tablo 3' te sıcaklığa bağlı olarak hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 oranında nanopartikül olması durumundaki FDM' nin ısı iletim katsayıları görülmektedir. Buna göre nanopartikül oranının her 0.2 oranında artışına bağlı olarak ısı iletim katsayısı, 25-30 °C' de yaklaşık %25, 40-50 °C' de yaklaşık %20 ve 60-70 °C' de yaklaşık % 18 artmıştır.

Tablo 3. Sıcaklığa bağlı olarak hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 oranında nanopartikül olması durumundaki FDM'nin ısı iletim katsayıları [14]

	25 °C k_k	30 °C k_k	40 °C k_s	50 °C k_s	60 °C k_s	70 °C k_s
0.1 NA (W/mK)	0.24	0.24	0.208	0.2	0.19	0.18
0.3 NA (W/mK)	0.3	0.3	0.249	0.239	0.229	0.219
0.5 NA (W/mK)	0.38	0.38	0.29	0.28	0.27	0.26

Tablo 4' te yine hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 nanopartikül bulunan FDM' nin özgül ısı değerleri görülmektedir. Görüldüğü gibi sıcaklığa ve nanopartikül oranına bağlı özgül ısı değişimleri oldukça düşüktür.

Tablo 4. Hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 nanopartikül bulunan FDM' nin özgül ısı değerleri [14]

	25 °C c_k	30 °C c_k	60°C c_s	70°C c_s
0.1 NA (kJ/kgK)	2.27	2.38	2.08	2.15
0.3 NA (kJ/kgK)	2.265	2.35	2.05	2.13
0.5 NA (kJ/kgK)	2.17	2.26	2	2.06

Tablo 5' te hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 nanoakışkan bulunan FDM' nin termal yayıcılık katsayısı görülmektedir. Değerler katı faz için nanopartikül oranının artışına bağlı olarak termal yayıcılığın ortalama %28 arttığını, sıvı faz için ise ortalama %15 arttığını göstermektedir.

Tablo 5. Hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 nanoakışkan bulunan FDM' nin termal yayıcılık katsayısı [14]

α (Termal Yayıcılık katsayısı)	Katı	Sıvı
0.1 NA	1.145	0.94
0.3 NA	1.45	1.04
0.5 NA	1.89	1.25

Son olarak Tablo 6'da bu çalışmada kullanılan monokristal PV panel sabitleri görülmektedir.

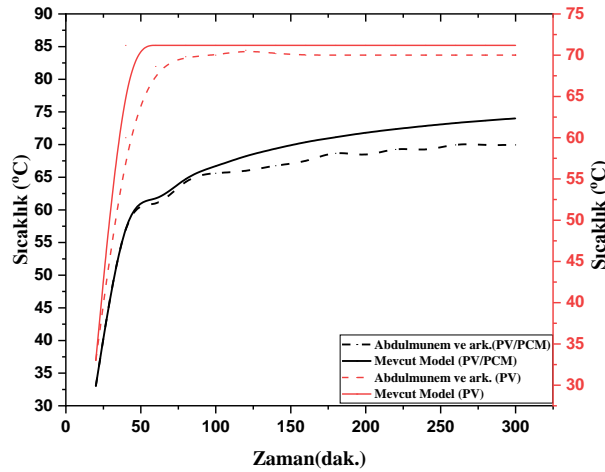
Tablo 6. PV panel sabitleri [12]

Sabitler	Değerler
n_{inv}	90
n_{op}	85
n_{ref}	25
β_{ref}	9.03×10^{-4}
T_{ref}	25

3. SONUÇLAR (CONCLUSION)

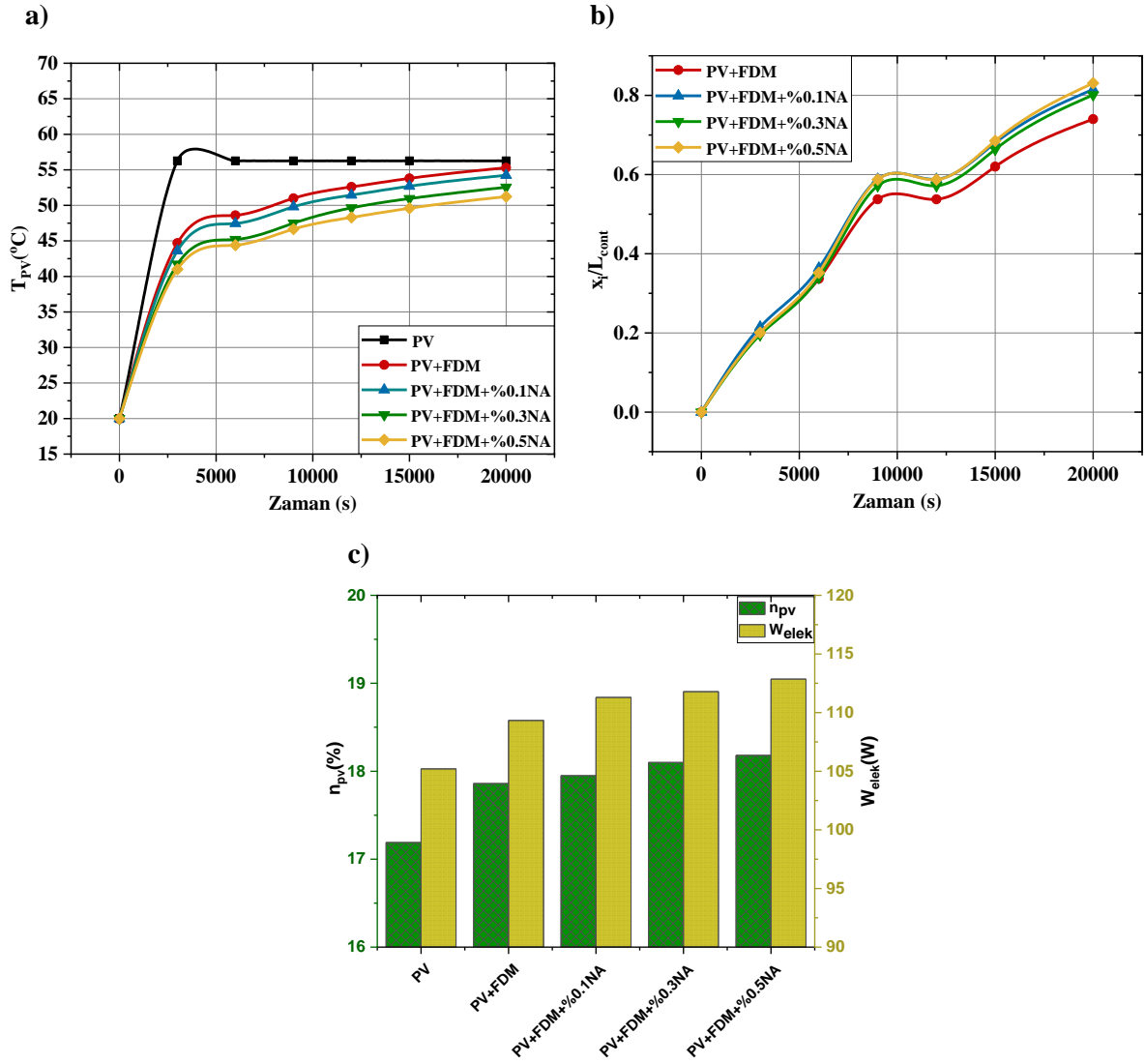
Bu bölümde hacimce 0,1, 0,3 ve 0,5 nanopartikül karıştırılmış FDM panel tabanına yerleştirilmiş, elde edilen sonuçlar geleneksel PV panel ve PV/FDM entegrasyonu ile yukarıda ayrıntıları verilen 1-D matematiksel model kullanılarak kıyaslanmıştır. Sistem çıktıları olarak T_{pv} , x_i / L_{cont} , n_{pv} , \dot{W}_{elPV} kullanılmış ve radyasyon değerinin 800, 1000 ve 1200 W/m² olduğu durum için aşağıda verilmiştir.

Öncelikle 1-B matematiksel model oluşturularak elde edilen çözüm literatür çalışması ile Şekil 2' de görüldüğü gibi kıyaslanmıştır. Abdulmunem ve ark. [5] tarafından gerçekleştirilen nümerik ve deneysel çalışma sonuçları incelendiğinde, PV panel için mevcut model ile literatür çalışması arasındaki farkın maksimum 2°C olduğu görülmüştür. PV/FDM entegrasyonuna bakıldığında ise bu farkın 5°C' ye çıktığı görülmüştür. Bu sıcaklık farklarının kabul edilebilir olduğu görülmüş ve parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir.



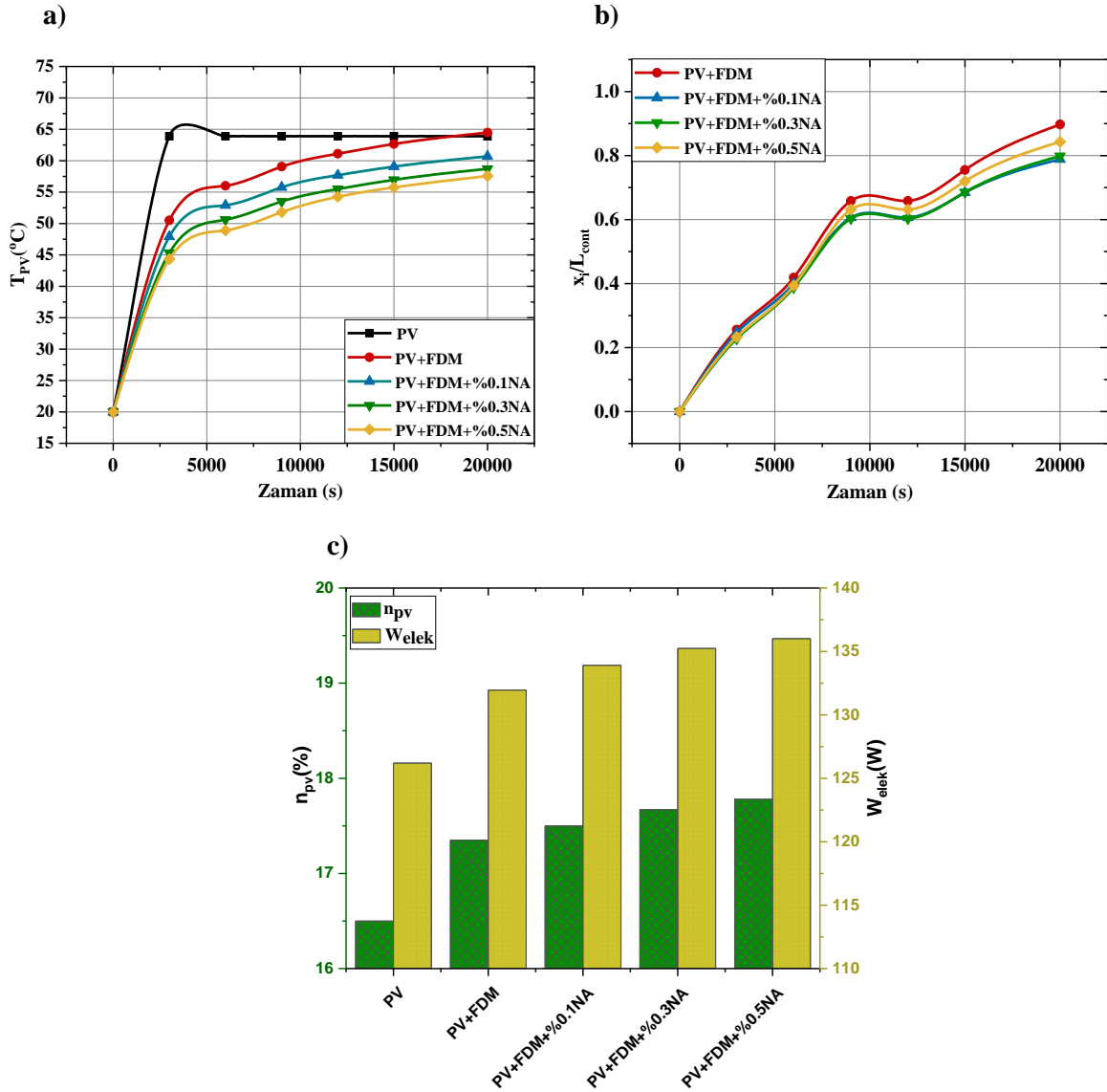
Şekil 2. PV panel ve PV/FDM entegrasyonunun literatür çalışması ile kıyaslanması

Parametrik çalışma için rüzgâr hızı 1 m/s, çevre sıcaklığı 20 °C, panel alanı 1 m² ve güneşlenme süresi 20000 s olarak alınmıştır. Şekil 3' te 800 W/m² radyasyon değeri için T_{pv} , x_i / L_{cont} , n_{pv} ve \dot{W}_{elPV} değerleri kıyaslanmıştır. Şekil 3a incelendiğinde, maksimum sıcaklığın geleneksel PV paneli için elde edilmiş ve maksimum 56°C olarak gözlemlenmiştir. PV/FDM entegrasyonunda ise hacimce nanopartikül oranı arttıkça panel sıcaklıklarının düştüğü gözlemlenmiştir. Buna göre maksimum PV panel sıcaklığı PV/FDM için 55°C elde edilmiş ve hacimce nanopartikül oranının artışına bağlı olarak yaklaşık 1°C düşüş göstermiştir. x_i / L_{cont} oranları incelendiğinde ise tüm PV/FDM entegrasyonlarında yakın erime oranları görülmekle birlikte maksimum erime miktarı, hacimce 0.5 oranında nanopartikül içeren karışımda yaklaşık 0.82 olarak elde edilmiştir. \dot{W}_{elPV} ve n_{pv} değerleri incelendiğinde ise maksimum değerler sırasıyla %18.3 ve 112.5 kW olarak hacimce 0.5 nanopartikül-FDM karışımı için elde edilmiştir. Bu değerler geleneksel PV panelden sırasıyla %1 ve 5.5 kW yüksektir. Ayrıca hacimce nanopartikül miktarının artışının, \dot{W}_{elPV} ve n_{pv} değerlerini artırdığı gözlemlenen başka bir olgudur.



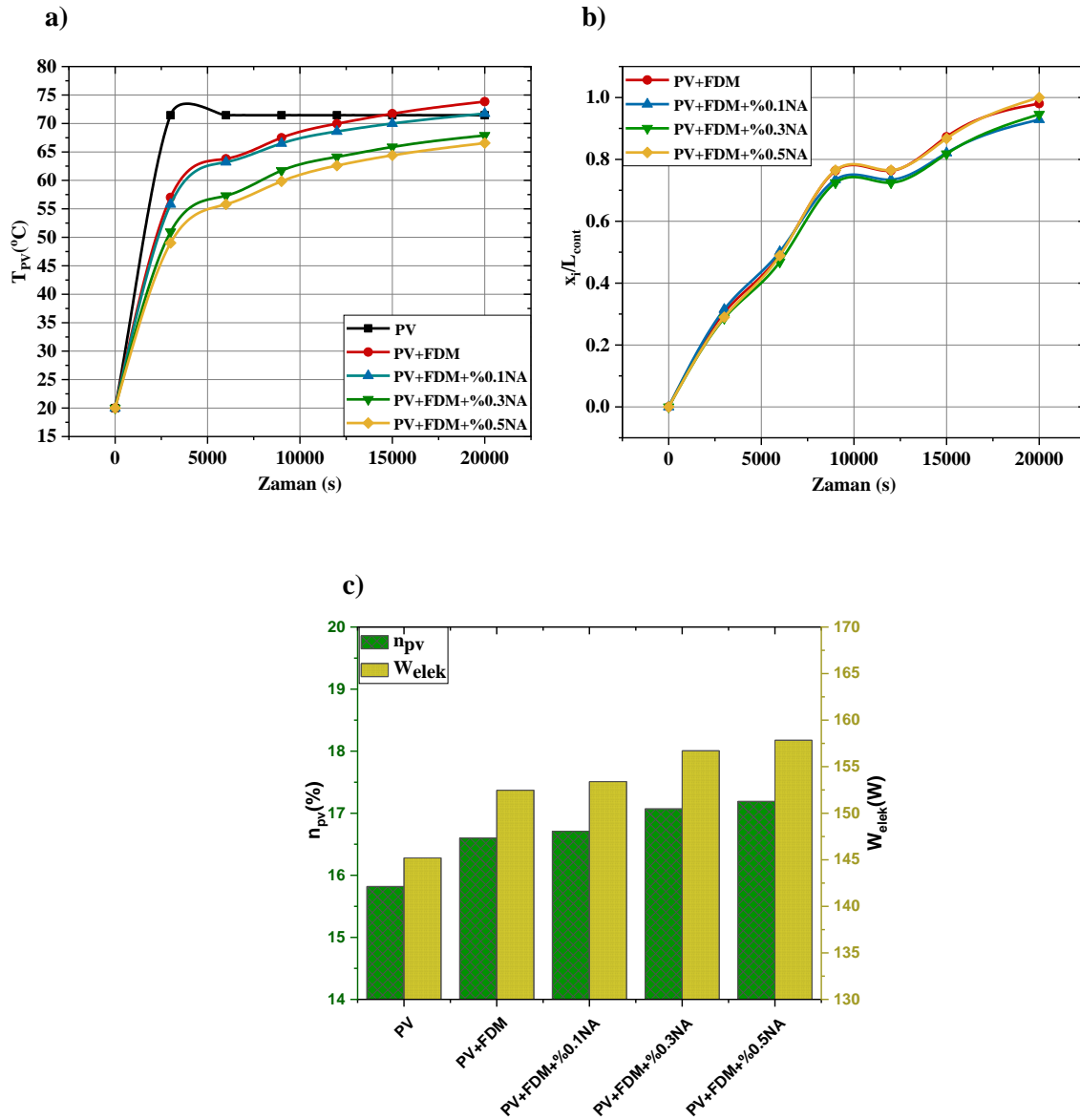
Şekil 3. 800 W/m^2 radyasyon değeri için T_{pv} , x_i / L_{cont} , n_{pv} , \dot{W}_{elPV} değerleri

Şekil 4' te radyasyon değeri 1000 W/m^2 değeri için sistem çıktıları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde geleneksel PV panelin zamana bağlı olarak $64 \text{ }^\circ\text{C}$ değerine ulaştığı ve bu değerde sabit kaldığı görülmektedir. FDM ve nanopartikül katkılı FDM eklenmiş PV panellerde ise sıcaklık süreç boyunca giderek artış göstermiş ancak geleneksel PV panel sıcaklığının altında kalmıştır. FDM ve nanopartikül katkılı FDM eklenmiş PV panellerinde ise panel sıcaklığı nanopartikül oranının artışına bağlı olarak yaklaşık $2 \text{ }^\circ\text{C}$ düşüş göstermiştir. x_i / L_{cont} değerleri incelendiğinde ise erime oranları birbirine yakın olmakla birlikte en yüksek erime oranı hacimce 0.5 nanopartikül karışımı için yaklaşık 0.9 olarak elde edilmiştir. Şekil 4c de ise PV panel verimi ve elektriksel güç üretimi görülmektedir. FDM kullanımı verimi yaklaşık olarak %1 artırırken, FDM/nanopartikül karışımı kullanımı yalnızca %0.2 ek bir artış sağlamıştır. Benzer şekilde FDM kullanımı elektrik üretimini yaklaşık 5 kW artırırken FDM/nanopartikül karışımı elektrik üretimini yaklaşık 3 kW ek bir artış sağlamıştır. En yüksek panel verimi ve elektrik üretimi 0.5 nanopartikül karışımı için yaklaşık %17.7 ve 136 kW olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.1000 W/m² radyasyon değeri için T_{pv} , x_i / L_{cont} , n_{pv} , \dot{W}_{elPV} değerleri

Son olarak Şekil 5' te 1200 W/m² radyasyon değeri için PV panel sıcaklığı, erime oranları, PV panel verimi ve elektrik üretimi incelenmiştir. Şekil 5a' da PV panel sıcaklıkları incelendiğinde hacimce %0.3 ve %0.5 FDM nanopartikül karışımı için güneşlenme süresi boyunca geleneksel PV panelden daha düşük sıcaklıklar elde edilmiştir. FDM ve 0.1 nanopartikül içeren FDM karışımı PV panellerinin panel sıcaklığının ise güneşlenme süresinin sonuna doğru geleneksel PV panel sıcaklığının üzerine çıktığı görülmüştür. Maksimum erime miktarı yine hacimce 0.5 nanopartikül içeren FDM karışımı için elde edilmiş ve FDM katmanının tamamı erimmiştir. Panel verimleri incelendiğinde ise FDM kullanımı PV panel verimini yaklaşık %0.8 oranında artırmıştır. En yüksek PV panel verimi 0.5 nanopartikül içeren FDM karışımı için yaklaşık %17.2 olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde FDM kullanımı elektrik üretimini 7.5 kW artırırken, en yüksek elektrik üretimi yine 0.5 nanopartikül içeren FDM karışımı için 158 kW olarak elde edilmiştir.



Şekil 5. 1200 W/m^2 radyasyon değeri için T_{pv} , x_i / L_{cont} , n_{pv} , \dot{W}_{elPV} değerleri

Yukarıda görüldüğü gibi FDM içerisine nanopartikül eklenmesiyle ısıl iletkenlik arttığından panelden çekilen ısı miktarı artmıştır. Buna bağlı olarak FDM erime oranı da artmaktadır. Panelde daha fazla ısı çekilmesi panel sıcaklığını düşürmekte, panel verimi ve elektrik üretimi artmaktadır. Bu sebeple çalışmadaki en iyi sonuçlar 0.5 nanopartikül FDM karışımı için elde edilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada PV panelin soğutulması amacı ile FDM ve nanopartikül-FDM kullanımı 1-B matematiksel model geliştirilerek incelenmiştir. Nanopartikül FDM karışımı termofiziksel özellikleri için literatür çalışmasından faydalanılmış ve hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 nanopartikül içeren FDM-nanopartikül karışımının PV panel soğutulması üzerindeki etkileri farklı radyasyon değerleri için belirlenmiştir. Oluşturulan matematiksel model literatür çalışması ile kıyaslanmış ve modelin kabul edilebilir olduğu saptanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda aşağıda belirtilen bulgular saptanmıştır.

- Tüm radyasyon değerleri için PV panel tabanına FDM ve nanopartikül FDM karışımı tabakası yerleştirilmesi panel sıcaklığını düşürürken PV panel verimini ve elektrik üretimini artırmaktadır.

- Panel tabanına FDM katmanı yerleştirilmesi ile panel sıcaklığı radyasyona bağlı olarak 2-5 °C azalmış, elektrik üretimi 4-6.5 kW, panel verimi ise yaklaşık %1 seviyesinde artmıştır.
- FDM içerisinde nanopartikül oranının artması panel verimini artırmaktadır. Buna göre en yüksek panel performansı nanopartikül oranı 0.5 olduğu durum için elde edilmiştir.
- FDM içerisindeki nanopartikül oranı 0.5 olduğu durum için panel sıcaklığı geleneksel PV paneline kıyasla radyasyon değerine bağlı olarak 8-12 °C düşmüş, elektrik üretimi 6.5-10 kW ve panel verimi %1- 1.5 seviyesinde artmıştır.
- FDM-nanopartikül karışımı içerisindeki hacimce nanopartikül oranının artışı FDM konteyneri içerisindeki erime miktarını artırmıştır.

Bu sonuçlar ışığında PV panel tabanına FDM malzemesi yerleştirilmesi panel sıcaklığını bir miktar düşürürken, ek olarak FDM içerisine nanopartikül eklenmesi geleneksel PV panele kıyasla panel sıcaklığını önemli ölçüde düşürmüştür. Böylece elektrik üretimi ve panel verimi artmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Abdulmunem, A. R., Samin, P. M., Rahman, H. A., Hussien, H. A., Mazali, I. I., Ghazali, H. (2021). Numerical and experimental analysis of the tilt angle's effects on the characteristics of the melting process of PCM-based as PV cell's backside heat sink. *Renewable Energy*, 173, 520-530.
- [2] Kumar, A., Singh, A. P., Kotha, R. S., Singh, O. P. (2021). Thermal energy storage design of a new bifacial PV/PCM system for enhanced thermo-electric performance. *Energy Conversion and Management*, 250, 114912.
- [3] Atkin, P., Farid, M. M. (2015). Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. *Solar Energy*, 114, 217-228.
- [4] Naderi, M., Ziapour, B. M., Gendeshmin, M. Y. (2021). Improvement of photocells by the integration of phase change materials and thermoelectric generators (PV-PCM-TEG) and study on the ability to generate electricity around the clock. *Journal of Energy Storage*, 36, 102384.
- [5] Abdulmunem, A. R. (2017). Passive cooling by utilizing the combined PCM/aluminum foam matrix to improve solar panels performance: indoor investigation. *The Iraqi Journal for Mechanical and Material Engineering*, 17(4), 712-723.
- [6] Smith, C. J., Forster, P. M., Crook, R. (2014). Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling. *Applied Energy*, 126, 21-28.
- [7] Stritih, U. (2016). Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM. *Renewable Energy*, 97, 671-679.
- [8] Savvakis, N., Tsoutsos, T. (2021). Theoretical design and experimental evaluation of a PV+PCM system in the mediterranean climate. *Energy*, 220, 119690.
- [9] Emam, M., Ahmed, M. (2018). Cooling concentrator photovoltaic systems using various configurations of phase-change material heat sinks. *Energy conversion and management*, 158, 298-314.
- [10] Ahmadi, R., Monadinia, F., Maleki, M. (2021). Passive/active photovoltaic-thermal (PVT) system implementing infiltrated phase change material (PCM) in PS-CNT foam. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 222, 110942.

- [11] Duan, J. (2021). The PCM-porous system used to cool the inclined PV panel. *Renewable Energy*, 180, 1315-1332.
- [12] Kurşun, B., Ökten, K. (2019). Thermodynamic analysis of a Rankine cycle coupled with a concentrated photovoltaic thermal system for hydrogen production by a proton exchange membrane electrolyzer plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(41), 22863-22875.
- [13] Jiji, L. M., Gaye, S. (2006). Analysis of solidification and melting of PCM with energy generation. *Applied Thermal Engineering*, 26(5-6), 568-575.
- [14] Sivashankar, M., Selvam, C., Manikandan, S., Harish, S. (2020). Performance improvement in concentrated photovoltaics using nano-enhanced phase change material with graphene nanoplatelets. *Energy*, 208, 118408.