Anatolia Science and Technology Journal (ASTEJ)

ASTEJ, 2025, 2(1)
DOI: 10.5281/zenodo.17427375
Araştırma Makalesi/Research Article

DXD-HSK Dolu Koni Sprey Nozulu ile Fotovoltaik Panellerin Soğutma Performansının İncelenmesi

Muhammet Harun OSTA[1*], Kenan YAKUT[1]
[1]Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye

Özet

Fotovoltaik panellerin hücre sıcaklığının maksimum çalışma sınırını aşması, elektriksel verimlilikte ciddi düşüşlere yol açmaktadır. Bu durumu önlemek amacıyla, doğrudan soğutma sağlayan bir sprey soğutma sistemi geliştirilmiş ve deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde, 1000 W/m² ve 750 W/m² güneş ışınımı koşulları altında, farklı sıcaklıklarda fotovoltaik panelin elektriksel verimliliği hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, 1000 W/m² ışınım seviyesinde verimliliğin %10'un altına, 750 W/m² seviyesinde ise %8'in altına düşmemesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, panelin optimum çalışma sıcaklık aralığı 45–25 °C olarak belirlenmiş ve sistemin etkin soğutma performansı sayesinde panel sıcaklığı kontrollü bir şekilde 25 °C'ye kadar düşürülmüştür. Sistemde, homojen dağılım sağlayan dolu koni sprey alanına sahip DXD-HSK model harici basınçlı sıvıya ihtiyaç duymayan kendinden emişli nozul kullanılmıştır. Bu nozul, suyu harici bir basınçlandırmaya ihtiyaç duymadan 120 ml/dk debiyle kendi emişiyle çekebilmekte ve basınçlı hava desteğiyle birlikte ince atomizasyon sağlayarak stabil püskürtme konisi ile düzgün damlacık dağılımı elde etmektedir. Deneylerde sprey soğutma performansını değerlendirmek amacıyla Sauter ortalama çapı (SMD) ve ısı transfer katsayısı gibi temel ısı transfer parametreleri hesaplanmış, soğuma süreleri ise deneysel olarak ölçülmüştür. Sprey geometrisi, Charged-Coupled Device (CCD) kamera ile elde edilen görüntüler üzerinden değerlendirilmiş ve püskürtme açısı ile jet çapı hesaplanmıştır. 1000 W/m² ve 750 W/m² güneş ışınımı koşullarında gerçekleştirilen deneylerde, 120 ml/dk su ve 2,5 m³/saat hava debisi ile uygulanan soğutma sonucunda ısı transfer katsayısı 0,78 W/cm²K olarak hesaplanmıştır. Soğutma süreleri 1000 W/m² ışınımda 25 dakika ve 750 W/m² ışınımda 11 dakika olarak ölçülmüş, Sauter ortalama damlacık çapı (SMD) ise 203,63 µm olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, nozul, sprey soğutma, ısı transferi

Investigation of the Cooling Performance of Photovoltaic Panels Using a DXD-HSK Full Cone Spray Nozzle

Muhammet Harun OSTA[1*], Kenan YAKUT[1]
[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Atatürk University, 25240 Yakutiye, Erzurum, Türkiye

Abstract

Exceeding the maximum operating temperature of photovoltaic (PV) panel cells leads to a significant decrease in electrical efficiency. To prevent this, a spray cooling system providing direct cooling was developed and experimentally investigated. In the experiments, the electrical efficiency of the PV panel was calculated at different temperatures under solar irradiance levels of 1000 W/m² and 750 W/m². According to the obtained results, it was aimed to keep the efficiency above 10% at 1000 W/m² and above 8% at 750 W/m² irradiance levels. Accordingly, the optimal operating temperature range of the panel was determined to be between 45–25 °C, and thanks to the system's effective cooling performance, the panel temperature was successfully reduced to 25 °C in a controlled manner. The system employed a DXD-HSK model self-priming nozzle with a full cone spray pattern providing homogeneous distribution, which does not require externally pressurized liquid. This nozzle can draw water at a flow rate of 120 ml/min without external pressurization and, with the support of compressed air, enables fine atomization and forms a stable spray cone, achieving uniform droplet distribution. To evaluate the spray cooling performance in the experiments, fundamental heat transfer parameters such as the Sauter Mean Diameter (SMD) and heat transfer coefficient were calculated, and cooling durations were measured experimentally. The spray geometry was assessed based on images obtained using a Charge-Coupled Device (CCD) camera, and spray angle and jet diameter were determined. In the experiments conducted under 1000 W/m² and 750 W/m² solar irradiance, with a water flow rate of 120 ml/min and an air flow rate of 2.5 m³/h, the heat transfer coefficient was calculated as 0.78 W/cm²K. The cooling durations were measured as 25 minutes for 1000 W/m² and 11 minutes for 750 W/m² irradiance levels, while the Sauter Mean Diameter (SMD) was calculated as 203.63 µm.

Keywords: Photovoltaic, nozzle, spray cooling, heat transfer

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Muhammet Harun OSTA, e-posta: harun.osta@atauni.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6492-251X
** Yazar/Author: Kenan YAKUT, e-posta: kyakut@atauni.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7822-2445
*** Geliş/Received: 15/05/2025, Düzeltme/Revised: 21/07/2025, Kabul/Accepted: 27/07/2025, Yayınlanma/Published: 24/10/2025.

1. Giriş

Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş ışınımının fotonik enerjisini, içerdiği yarı iletken malzemelerin sınır tabakasında fotovoltaik etki adı verilen bir mekanizma ile elektrik enerjisine dönüştürür (Özakın ve ark., 2020). PV sistemler, güneş enerjisinin tamamı elektrik enerjisine dönüştürülemez ve fazlası hücrede ısı olarak depolanır. Depolanan bu ısı, elektronların hücre içindeki hareketini kısıtlayarak sistemin performansını düşürmektedir (Öner ve ark., 2016). PV panellerin optimum çalışma sıcaklığı aşıldığında sistemin çıkış gücü azalır (Bayrak ve ark., 2019). Bu nedenle daha iyi performans için PV panellerin optimum çalışma sıcaklığında tutulması gerekmektedir. Gelen güneş ışınımının elektrik enerjisine dönüştürülemeyen kısmının neden olduğu atık ısıyı soğutma tekniği ile hücreden uzaklaştırıp faydalı işe dönüştüren ve böylece sistemi optimum çalışma sıcaklığında tutan sistemlere Fotovoltaik/termal (PV/T) sistemler adı verilmektedir (Masters, 2013). PV panellerin soğutma teknikleri genel olarak pasif, aktif ve hibrit olarak sınıflandırılabilir. Pasif soğutma teknikleri, enerji tüketmeden soğutma işlemi gerçekleştirir ve genellikle basitliği ve düşük maliyeti nedeniyle tercih edilir (Alizadeh ve ark., 2018). Isı borusu ve bakır kanatçıklar kullanarak yapılan gaz (hava) destekli pasif soğutma çalışmasında verimliliğin %18 oranında arttığı görülmüştür (Wu ve ark., 2019). Su destlekli pasif soğutma tekniği kullanılarak panel sıcaklığının 19 °C düştüğü ve verimliliğin %8,3 arttığı belirtilmiştir. (Fayaz ve ark., 2019) PCM ve termal kollektör pasif soğutması ile verimliliğin %12,3 oranında arttığı belirtilmiştir. Aktif soğutma tekniklerinde ise soğutma işlemi için enerji tüketilir. Aktif soğutma tekniklerinde, soğutmanın ana faktörü zorlanmış konveksiyondur. Akışkan olarak gaz ve sıvı kullanılmaktadır (Teo ve ark., 2012). Panelin arkasındaki kanallarla hava destekli aktif soğutma tekniği kullanarak panelin sıcaklığını 30°C düşürmüş ve verimliliği %4 artırmıştır (Baloch ve ark., 2015). Su içeren ısı değiştirici kullanarak su destekli aktif soğutma ile panel sıcaklığını 19°C düşürmüş ve verimliliği %36,1 artırmıştır.

PV/T sistemlerinin elektrik verimliliğini artırma avantajının yanı sıra kurulum maliyetinin yüksek olması, enerji israfı, panelin tamamının soğutulamaması ve sistemin kendi özelliklerinden kaynaklanan bazı verimsizlikler gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Floating Tracking Condensed Cooling (FTCC) verimli bir PV/T sistemidir. Ancak FTCC'nin güneş ışınımının yoğunluğunu artıran aynaları olması nedeniyle kurulum maliyeti yüksektir (Cazzaniga ve ark., 2012). Suya daldırma yöntemi ekonomiktir ve kurulum için arazi alanı gerektirmez. Ancak suya daldırma tekniğinde daldırma derinliği verimliliği olumsuz yönde etkilemektedir (Mehrotra ve ark., 2014). PV/T sistemlerde yüksek verimli uygulamalardan biri olan şeffaf kaplama tekniğinde, yansıyan ışınımdan kaynaklanan kayıplar dezavantaj oluşturmaktadır (Cracker ve ark., 2015). Son olarak yüksek verimli PV/T sistemlerinden cebri hava ve su sirkülasyonu tekniklerinde ısıtılan akışkanın evsel uygulamalarda kullanılabileceği ve su sirkülasyonunun havadan daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Siecker ve ark., 2017). Diğer soğutma tekniklerinden PCM soğutma sisteminin veriminin soğuk bölgelerde azaldığı ve malzemenin soğurma kabiliyetinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir (Browne ve ark., 2015).

Diğer bir teknik olan sprey soğutma ise ısı transfer verimliliğini arttırmak için sprey damlacıkları ile faz değişiminin meydana geldiği bir soğutma mekanizmasıdır (Yan ve Chan, 2011). PV sisteminin sprey ile soğutulduğu bir çalışmada panelinin her iki yüzüne de su sağlayan bir soğutma sistemi geliştirmiş ve maksimum %16,3'lük elektrik çıkışı ve %14,1'lik verimlilik elde etmişlerdir. Bu yöntemle, PV panelinin yüzey sıcaklığı 54 °C'den 24 °C'ye düşürülmüş ve sürekli su tedariği sayesinde panelin kendini temizleyebilmesi sağlanmıştır (Nizetic ve ark., 2016). Sprey soğutma sistemlerinin ısı transfer verimini etkileyen en önemli parametrelerden biri sistemde kullanılan akışkanın cinsidir. İlgili bir çalışmada yüksek ısı akısı olan yüzeylerin soğutulması için kapalı devre sprey soğutma sistemi kurulmuştur. Çalışma akışkanı olarak FC-87, FC-72, metanol ve su kullanıldı. Deneylerde çeşitli sıcaklıklarda lüle basınç düşüşleri (0,69-3,10 bar) ve ısı akısı termal performans verileri elde edildi. Sonuçlara göre kritik ısı akılarına florokarbonlu sıvılarla 90 W/cm²'ye, metanolle ise 490 W/cm²'ye kadar ulaşılabileceği gösterilmiştir. Su için kritik ısı akısı 500 W/cm²'den yüksekti. Sonuç olarak sprey soğutma sistemine giren akışkanın ısı transfer özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve en iyi soğutmanın su ile elde edildiği gösterilmiştir (Lin, 2003).

Bir spreyi karakterize ederken, kesin damlacık boyutu dağılımı yerine ortalama damlacık çapıyla çalışmak daha uygundur. Meme çapı, ortalama damlacık çapının boyutunu doğrudan etkiler. Farklı nozul çaplarının etkisinin görülmesi amaçlanan bir çalışmada. Isıtılmış kare yüzeyi soğutan PF-5052 sıvı ile spreyin soğutma özelliklerini belirlemek için her biri 0,76, 1,19 ve 1,70 mm çapında, tam koni sprey şeklinde 3 farklı nozul

kullanılmıştır. Bu deneyde, her bir nozul çapı için kritik ısı akılarının sırasıyla 160, 200 ve 237 W/cm² olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak, nozul çapının artmasıyla kritik ısı akısı ve Sauter ortalama çapı (SMD) değerlerinin arttığı, bunun sonucunda daha iyi sprey soğutma performansı elde edildiği görülmüştür (Rybicki and Mudawar, 2006).

Sprey soğutma, yüksek ısı akısına sahip cihazların termal yönetiminde büyük bir avantaja sahiptir. Bu tür uygulamalar üzerinde yapılan bir çalışmada, yaygın olarak tek fazlı akış sistemleriyle soğutulan invertör modüllerinin ısıl dirençlerinin büyük ölçüde azaldığı rapor edilmiştir. Bu sonuçlara göre sprey soğutma sistemi yüksek kapasiteli sistemlerin ısıl yönetimi için uygun bir yöntemdir (Bostancı, 2009).

Sprey soğutma çalışmalarında ısı transferini etkileyen en önemli parametreler hava debisinin sıvı debisine oranı, SMD değeri ve ısı transferi katsayısıdır. Sprey oluşumunu bozmayacak şeklide su debisi ne kadar yüksek olursa sprey o kadar ısı transferine etkisi o kadar fazla olur (Yesildal ve ark., 2022). Hava debisi ne kadar yüksek olursa sprey o kadar iyi atomize olur. SMD boyutu ne kadar küçük olursa damlacıkların toplam yüzey alanı artar. Isı transferi katsayısı ne kadar yüksek olursa zorlanmış taşınım ısı transferi o kadar artmaktadır. Literatürde sprey oluşumunu etkileyen çalışma sıvısı, ortam gazı ve nozul geometrisini iyileştirerek daha iyi sprey soğutma ısı transferi elde etmek için çalışılmıştır.

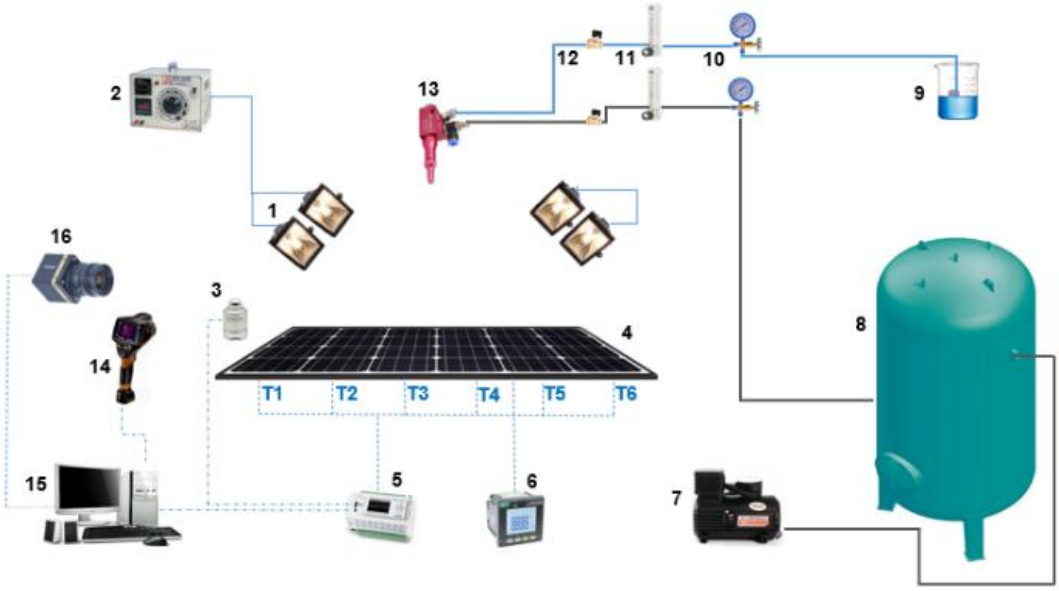
Bu çalışmada, DXD-HSK model nozul kullanılarak gerçekleştirilen sprey soğutma deneylerinde, hava debisinin sıvı debisine oranı olan ALR değerleri hesaplanmış ve farklı güneş ışınımı koşullarında elde edilen ısı transferi parametreleri incelenmiştir. Bu çalışmanın literatürdeki benzerlerinden temel farkı, harici pompaya ihtiyaç duymayan DXD-HSK model kendinden emişli nozülün kullanılması ve düşük SMD değeri ile homojen damlacık dağılımı sağlamasıdır.

2. Materyal ve Metot

Fotovoltaik sistemlerin sprey ile soğutulduğu bu deney sisteminde atomize olan su damlacıkları yüzey alanını arttırarak ısıtılmış yüzeye doğrudan temas eden sprey ile etkili soğutma sağlamaktadır. Bu sistemde DXD-HSK nozulu ile farklı güneş ışınım değerlerinde sprey soğutma deneyleri gerçekleştirilmiş ve her deney için SMD değeri, ısı transferi katsayısı hesaplanmış ve soğuma süreleri ölçülmüştür.

2.1. Deney Sistemi

Şekil 1'de fotovoltaik sistemlerin sprey ile soğutulduğu deney düzeneği görülmektedir. Sistemde akışkan olarak su ve basınçlı hava kullanılmıştır.



Şekil 1. Sprey soğutma deney düzeneği şematik resmi
Figure 1. *Schematic drawing of the spray cooling experimental setup*

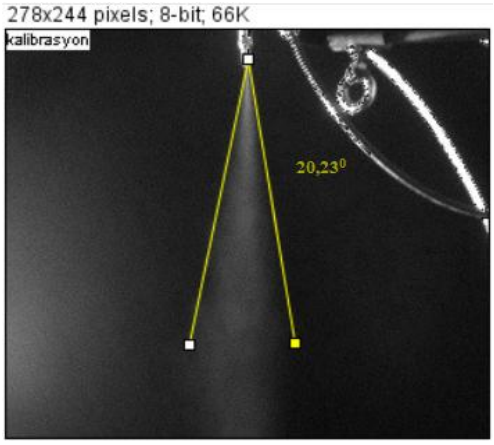
1. Halojen lambalar, 2. Varyak, 3. Piranometre, 4. PV panel, 5.Veri kayıt cihazı, 6.Güç analizörü, 7. Kompresör, 8.Basınçlı hava tankı, 9.Beher, 10. Su ve hava giriş basıncı, 11.Su ve hava debimetresi, 12. Selonoid Vana, 13.Nozul, 14. Termal Kamera, 15. Bilgisayar, 16. CCD Kamera

Dolu koni püskürtme özelliğine sahip olan DXD-HSK nozulu Şekil 2'de gösterilmiştir. Hava-su girişi ile spreyin atomize olmasını sağlayan bu nozul maksimum 30 cm kaplama alanı genişliği gösterebilir.



Şekil 2. DXD-HSK nozulu ve püskürtme alanı
Figure 2. *DXD-HSK nozzle and spray area*

Bu nozul, suyu harici bir basınçlandırmaya ihtiyaç duymadan 120 ml/dk debiyle kendi emişiyle çekebilmekte ve basınçlı hava desteğiyle birlikte ince atomizasyon sağlamaktadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi CCD kamera ile görüntüsü alınarak sprey oluşumu incelenmiş ve sprey açısı hesaplanmıştır.



Şekil 3. Sprey görüntüsü
Figure 3. *Spray image*

2.2. Isı Transferi Hesaplamaları

Spreye ilişkin iki temel hidrodinamik parametre olan hacimsel akı (Q″) ve Sauter ortalama damlacık çapı (SMD), Mudawar ve Estes tarafından yapılan bir çalışmaya göre Eş. (1); kullanılarak belirlenmiştir.

$$SMD = d_{32} = 3{,}67 d_0 (We_{d_0}^{1/2} Re_{d_0})^{-0{,}259} \quad (1)$$

Sauter ortalama çapı hesaplamak için kullanılan ve nozul çapı ile hesaplanan Re sayısı Eş. (2); ve We sayısı Eş. (3);

$$Re_{d_0} = \frac{\rho_s (2\Delta P/\rho_s)^{1/2} d_0}{\mu_s} \quad (2)$$

$$We_{d_0} = \frac{\rho_h (2\Delta P/\rho_s) d_0}{\sigma_s} \quad (3)$$

İle hesaplanmıştır. Nusselt sayısı Eş. (4); aşağıdaki korelasyon ile hesaplanmıştır.

$$Nu = 7.144 Re^{0,438} \left(\frac{T_s}{T_{sat} - T_a}\right) \quad (4)$$

Burada T_y yüzey sıcaklığı, T_d suyun doyma sıcaklığı ve T_o ise ortam sıcaklığıdır. Nusselt korelasyonunu hesaplamak için kullanılan ve ortalama çap ile hesaplanan Re sayısı Eş. (5);

$$Re = \frac{\rho_w Q'' d_{32}}{\mu_w} \quad (5)$$

Burada ρ_s su yoğunluğu, Q'' hacimsek akı ve μ_s suyun viskozitesidir. Hacimsel akı Eş. (6);

$$Q'' = \frac{Q}{(\pi L^2/4)} \quad (6)$$

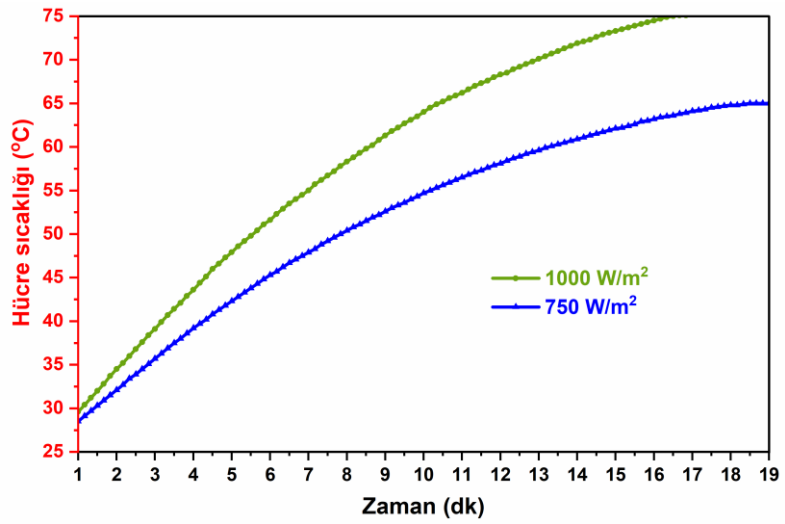
Sprey soğutma sistemindeki her nozul için ısı transferi katsayısı ise Eş. (7);

$$h = \frac{Nu\, k}{d_{32}} \quad (7)$$

ile hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

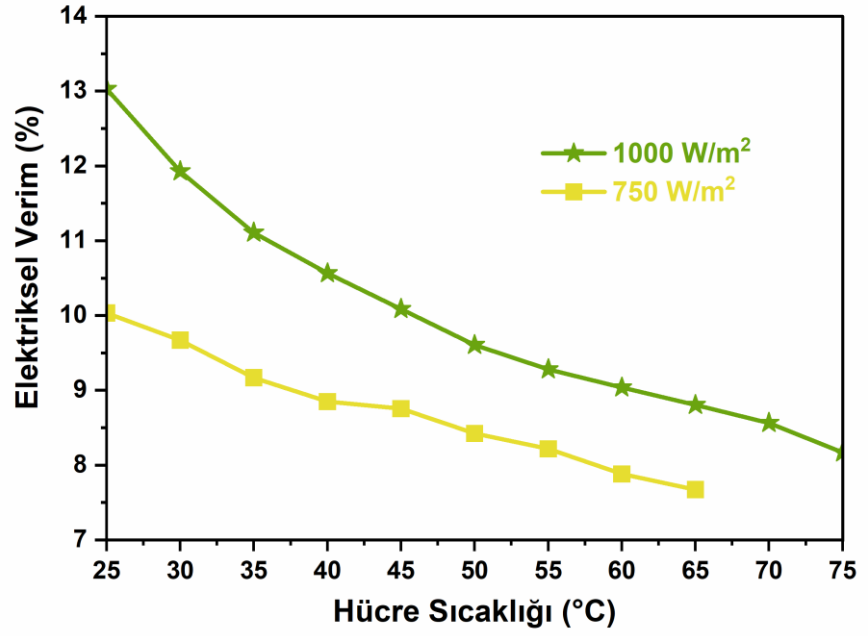
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, kullanılan fotovoltaik panelin hücre sıcaklığı 1000 W/m² ışınım altında 75 °C'ye, 750 W/m² ışınım altında ise 65 °C'ye kadar yükselerek kararlı bir duruma ulaşmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. 1000 W/m² ve 750 W/m² ışınım değerlerinde fotovoltaik panelin hücre sıcaklığındaki değişimler.
Figure 4. *Changes in cell temperature of the photovoltaic panel at 1000 W/m2 and 750 W/m2 irradiance values.*

Fotovoltaik sistemlerde herhangi bir soğutma uygulanmadığı durumda, ısı birikiminin elektron hareketini kısıtlaması nedeniyle meydana gelen elektriksel verim düşüşü Şekil 5'te gösterilmiştir. 1000 W/m² ve 750

W/m² ışınım değerlerinde, elektriksel verimlilik 25 °C sıcaklıkta sırasıyla %13 ve %10 seviyelerinde iken, sıcaklığın 75 °C'ye yükselmesiyle bu değerler %8,2 ve %7,6'ya kadar düşmüştür.



Şekil 5. 1000 W/m² ve 750 W/m² ışınım değerleri altında fotovoltaik panelin sıcaklığa bağlı elektriksel verim düşüşü.

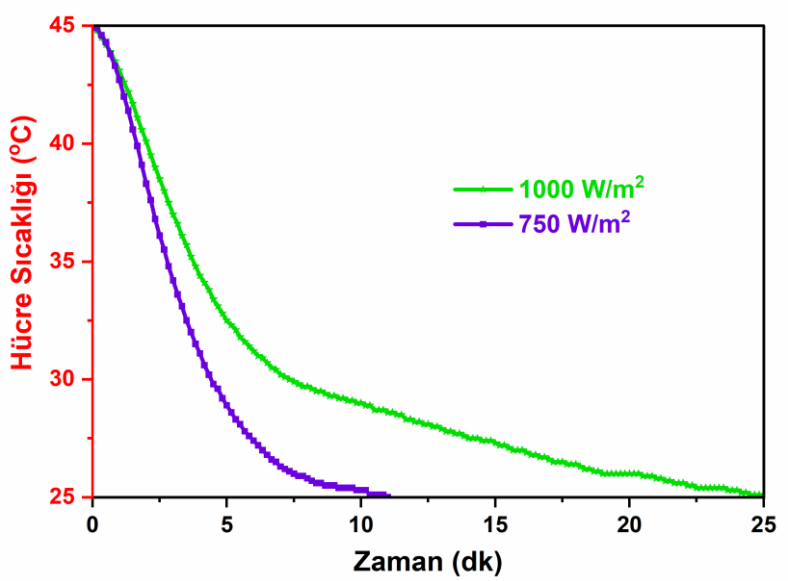
Figure 5. *Temperature-dependent electrical efficiency decrease of the photovoltaic panel under 1000 W/m2 and 750 W/m2 irradiance values.*

Fotovoltaik hücre sıcaklığının 45 °C ve üzerine çıkmasıyla elektriksel verimdeki düşüş dikkate alınarak yapılan deneylerde çalışma aralığı 45-25 °C olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Farklı ışınım değerlerinde yapılan sprey soğutma deneylerinin verileri.
Table 1. *Data of spray cooling experiments conducted at different irradiance values.*

Işınım (W/m²)	ALR	Soğuma Süresi (s)	SMD (μm)	h (W/cm²K)
1000	0,02083	25	203,63	0,78
750	0,02083	11	203,63	0,78

Tablo 1'de Farklı ışınım değerlerinde yapılan sprey soğutma deneylerinin verileri gösterilmiştir. Genel olarak sprey soğutma üzerine yapılan çalışmalarda, Sauter ortalama damlacık çapı (SMD) değerlerinin genellikle 32–583 μm aralığında değiştiği görülmektedir (Smakulski, 2016). Bu kapsamda, çalışmamızda elde edilen 203.64 μm SMD değeri, literatürdeki değerlerle uyumlu olup, atomizasyon açısından tatmin edici bir seviyededir. Ayrıca, Wang et al. (2015) tarafından uzay uygulamaları için geliştirilen çift nozüllü sprey soğutma sisteminde raporlanan 219–276 μm aralığındaki SMD değerlerine kıyasla daha düşük bir değere ulaşılmış; bu da daha homojen damlacık dağılımı ve dolayısıyla daha etkili soğutma sağlandığını göstermektedir. Ancak, literatürde su bazlı sistemler için bildirilen ısı transfer katsayısı değerlerinin 2–10 W/cm²K seviyelerine kadar çıkabildiği göz önüne alındığında, bu çalışmada elde edilen ısı transfer katsayısı değerlerinin bu aralığın altında kaldığı ve geliştirmeye açık olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 6. DXK-HSK nozulu ile yapılan 1000 W/m² ve 750 W/m² ışınım deneylerinin hücre sıcaklığı düşüşü.

Figure 6. *Cell temperature drop of 1000 W/m2 and 750 W/m2 irradiation experiments performed with DXK-HSK nozzle.*

Şekil 6'da, DXD-HSK model dolu koni nozulu kullanılarak yapılan sprey soğutma deneylerinde, 1000 W/m² ve 750 W/m² ışınım altında fotovoltaik hücre sıcaklığının zamanla nasıl değiştiği gösterilmektedir. Her iki durumda da başlangıç sıcaklığı yaklaşık 45 °C'dir. 750 W/m² ışınım altında sıcaklık daha hızlı düşerek yaklaşık 11. dakikada 25 °C'ye ulaşırken, 1000 W/m² ışınım altında bu sıcaklığa ulaşmak yaklaşık 25 dakika sürmüştür. Bu da, daha yüksek ışınım seviyelerinde hücreye daha fazla ısı aktarıldığını ve bu nedenle soğuma süresinin daha uzun sürdüğünü göstermektedir. Aynı su ve hava debileriyle yapılan her iki deney, sistemin her iki ışınım koşulunda da etkili şekilde çalıştığını, ancak ışınım arttıkça soğuma süresinin uzadığını ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar

Fotovoltaik panellerin elektriksel verimliliğindeki düşüşü önlemek amacıyla sprey soğutma sistemi kullanılarak deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, PV hücre sıcaklığı 1000 W/m² ışınımda 25 °C'den 75 °C'ye çıktığında verim %13'ten %8,2'ye, 750 W/m² ışınımda ise 25 °C'den 65 °C'ye ulaştığında verim %10'dan %7,6'ya düşmüştür. Hızlı ve doğrudan soğutma sağlayan sprey sistemiyle yapılan uygulamalarda, elektriksel verimlilik değerleri sırasıyla %10'un ve %8'in üzerinde tutulabilmiştir. Sprey soğutma deneylerinde, 120 ml/dk su debisi ile gerçekleştirilen uygulamalarda ısı transfer katsayısı 0,78 W/cm²K olarak hesaplanmış; soğutma süresi 1000 W/m² ışınımda 25 dakika, 750 W/m² ışınımda ise 11 dakika olarak ölçülmüştür. Her iki ışınım seviyesinde de Sauter ortalama damlacık çapı (SMD) 203,63 µm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, sistemin özellikle düşük ışınım koşullarında daha hızlı ve verimli soğutma sağladığını göstermektedir. Damlacık boyutunun literatürle uyumlu olduğu ve bazı çalışmalara kıyasla daha düşük değerlerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum atomizasyon kalitesinin yüksek olduğunu ve yüzeyle temasın daha etkili şekilde sağlandığını ortaya koymuştur. Öte yandan, elde edilen ısı transfer katsayısı değerlerinin literatürde bildirilen üst sınırlara göre daha düşük kaldığı görülmüştür. Bu bulgu sistemin ısı transfer kapasitesi açısından geliştirmeye açık olduğunu göstermektedir. Genel olarak, kullanılan sprey soğutma sisteminin fotovoltaik panellerin sıcaklık kontrolü için etkili bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Gözlemler, sprey soğutmanın fotovoltaik panellerin hücre sıcaklığını optimum çalışma aralığında tutabileceğini göstermektedir Bu yaklaşım, fotovoltaik panel verimliliğindeki düşüşü etkili bir şekilde önler ve enerji tasarrufunu artırır. Gelecekteki araştırmalar, fotovoltaik paneller için farklı nozul konfigürasyonları kullanarak sprey soğutma tekniklerindeki varyasyonları keşfedebilir. Ayrıca, gelecekteki çalışmalar yeni nesil PV/T sistemlerindeki gelişmelere öncelik vermeli ve ekserjetik verimlilik, ekonomik uygulanabilirlik ve

hesaplamalı akışkanlar dinamiğini (CFD) içeren kapsamlı analizler yapmalıdır. Bu çabalar, inovasyonu teşvik etmeyi ve çeşitli uygulamalarda fotovoltaik teknolojinin performansını artırmayı amaçlamaktadır.

Ekler-Semboller

$\dot{m}$	Kütlesel Debi [kg/s]
ϱ	Yoğunluk [kg/m^3]
μ	Viskozite [kg/m.s]
$\dot{Q}$	Isı Akısı [kW/m^2]
σ	Yüzey Gerilimi
As	Yüzey Alanı
ALR	Air Liquid Ratio
d_o	Nozul Çapı
eV	Elektron Volt
g	Yer Çekim İvmesi [m/s^2]
h	Isı Transferşi Katsayısı [W/cm^{2}K]
k	Isı İletim Katsayısı
η	Verim
Nu	Nusselt Sayısı
P	Basınç [bar]
PCM	Faz Değişim Malzemesi
PV	Photovoltaic Panel
Re	Reynolds Sayısı
SMD	Sauter Ortalama Çap
t	Zaman [s]
T	Sıcaklık [°C]
Q″	Hacimsel Akı [m/s]
V	Volt
W	Watt
We	Weber Sayısı

Çıkar Çatışması Beyanı/ Conflict of Interest
Yazarlar, çıkar çatışması veya kişisel ilişki bulunmadığını beyan etmektedirler. / The authors have no conflicts of interest to declare.

Finansal Destek/ Funding
Yazar, bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir. / The authors declared that this study has received no financial support.

Hakem Değerlendirmesi/Peer-review
Dış bağımsız/Externally peer-reviewed

Yazar Katkıları/Author Contributions
Concept/Tasarım-MHO, KY.; Dizayn/Design-AP; Denetleme/Supervision-MHO, KY; Kaynaklar/Resources-MHO, KY; Veri Toplanması ve/veya İşlemesi/Data Collection and/or Processing-MHO, KY; Analiz ve/ veya Yorum/Analysis and/or Interpretation-MHO, KY; Literatür Taraması/Literature Search-MHO; Yazıyı Yazan/ Writing Manuscript-MHO; Eleştirel İnceleme/Critical Review-KY.

Kaynakça

Alizadeh, H., Ghasempour, R., Shafii, M. B., Ahmadi, M. H., Yan, W.-M., & Nazari, M. A. (2018). Numerical simulation of PV cooling by using single turn pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 127, 203–208.

Baloch, A. A. B., Bahaidarah, H. M. S., Gandhidasan, P., & Al-Sulaiman, F. A. (2015). Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling. *Energy Conversion and Management, 103*, 14–27.

Bayrak, F., Oztop, H., & Selimefendigil, F. (2019). Effects of different fin parameters on temperature and efficiency for cooling of photovoltaic panels under natural convection. *Solar Energy, 188*(1), 484–494.

Bostanci, H., Van, D., Saarloos, B. A., Rini, D. P., & Chow, L. C. (2009). Spray cooling of power electronics using high temperature coolant and enhanced surface. *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 609–613.

Browne, M. C., Norton, B., & McCormack, S. (2015). Phase change materials for photovoltaic thermal management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47*, 762–782.

Cazzaniga, R., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., & Tina, G. M. (2012). Floating tracking cooling concentrating (FTCC) systems. *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 514–519.

Cracker, H. (2015). Engineers invent clear coating that boost solar cell efficiency by cooling them. Retrieved from https://gadgtecs.com/2015/09/25/engineers-invent-clear-coating-that-boost-solar-cell-efficiency-by-cooling-them/

Estes, K. A., & Mudawar, I. (1995). Correlation of Sauter mean diameter and critical heat flux for spray cooling of small surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 38*, 2985–2996.

Fayaz, H., Rahim, N. A., Hasanuzzaman, M., Nasrin, R., & Rivai, A. (2019). Numerical and experimental investigation of the effect of operating conditions on performance of PVT and PVT-PCM. *Renewable Energy, 143*, 827–841.

Lin, L. (2003). Heat transfer characteristics of spray cooling in a closed loop. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 46*(1), 3737–3746.

Masters, G. M. (2013). *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons.
Mehrotra, S., Rawat, P., Debbarma, M., & Sudhakar, K. (2014). Performance of solar panel with water immersion cooling technique. *International Journal of Science, 3*, 1161–1172.

Nizetic, S., Coko, D., Yadav, A., & Grubisic-Cabo, F. (2016). Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response. *Energy Conversion and Management, 108*, 287–296.

Oner, V., Yesilyurt, M., Yilmaz, E. Ç., & Omeroglu, G. (2016). Photovoltaic Thermal (PVT) solar panels. *International Journal of New Technology and Research, 2*, 13–16.

Özakın, A. N., Yakut, K., & Khalaji, M. N. (2020). Performance analysis of photovoltaic heat pump (PV/T) combined systems: A comparative numerical study. *Journal of Solar Energy Engineering, 142*(2), 1116–1126.

Rybicki, J. R., & Mudawar, I. (2006). Single-phase and two-phase cooling characteristics of upward-facing and downward-facing sprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 49*(1), 5–16.

Siecker, J., Kusakana, K., & Numbi, B. (2017). A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79*, 192–203.

Smakulski, P. (2016). A review of the capabilities of high heat flux removal by porous materials, microchannel and spray cooling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 104*, 636–646.

Teo, H. G., Lee, P. S., & Hawlader, M. N. A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy, 90*, 309–315.

Wu, S. Y., Wang, T., Xiao, L., & Shen, Z. (2019). Effect of cooling channel position on heat transfer characteristics and thermoelectric performance of air-cooled PV/T system. *Solar Energy, 180*, 489–500.

Yan, Z., & Chan, P. (2011). Spray cooling. In A. Ahsan (Ed.), *Two phase flow, phase change and numerical modeling* (pp. 285–310). Swinburne University of Technology, Australia.

Yesildal, F., Ozakin, A. N., & Yakut, K. (2022). Optimization of operational parameters for a photovoltaic panel cooled by spray cooling. *Engineering Science and Technology, an International Journal, 25*.