

FOTOVOLTAİK THERMAL SİSTEMLERDE KULLANILAN OPTİK FİLTRE SICAKLIĞININ ELEKTRİKSEL PERFORMANSA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Abid USTAOĞLU^{1*}, Tayfun ALTIOK^{2,3}, Hakan BÜYÜKPATPAT⁴, Şuheda KALTAKKIRAN¹

¹Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği, Bartın, Türkiye

²Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bartın, Türkiye

³Mescier Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Bartın, Türkiye

⁴Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Bartın, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, geleneksel fotovoltaik (PV) panel mimarisinin ötesine geçilerek optik filtre entegreli bir fotovoltaik-thermal (PVT) sistemi tasarlanmış ve sistemin su sıcaklığına bağlı elektriksel ve termal performansı, eş zamanlı olarak test edilen klasik bir PV sistemle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Panel, özel olarak sızdırmaz şekilde kapatılmış bir hazne içerisine yerleştirilmiş, bu hazne içerisindeki saf su, peristaltik bir pompa yardımıyla kapalı çevrim halinde dolaştırılarak panelin yüzey sıcaklığı kontrol altında tutulmuştur. Deneysel çalışma kapsamında, PV ve PVT sistemlerin elektriksel verimleri hesaplanmış, PVT sistemde dolaşan akışkan sayesinde elde edilen termal enerji miktarı belirlenmiştir. Sonuçlar, optik filtreli PVT sistemin düşük ve orta sıcaklıklarda PV sistemine göre daha yüksek elektriksel verim sağladığını ve ortalama %72,1'lik termal verimiyle toplam verimin %77'ye ulaştığını ortaya koymuştur. Ancak, akışkan giriş sıcaklığı 40 °C'ye yaklaştığında PVT sistemin soğutma etkisi azalmış; bu da PV hücre sıcaklığının artmasına ve kısa sürede akım, gerilim ve verimde ani düşümlere neden olmuştur. Giriş sıcaklığı 23 °C'ye düşürüldüğünde ise elektriksel parametrelerde hızlı bir toparlanma gözlemlenmiştir. Ayrıca, PV sistemi dış ortamla doğrudan temas ettiğinden rüzgârdan kaynaklanan taşımimla daha iyi soğuma sağlarken, PVT sistemin performansında gözlenen değişim, akışkan sıcaklığı ile güçlü bir ilişki göstermiştir ve bu durum deneysel verilerde açıkça izlenmiştir. Çalışma, optik filtreli PVT sistemlerin toplam enerji verimliliğini artırmada etkili olduğunu, ancak bu etkinin akışkan sıcaklığının kontrolüne doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik termal (PVT) sistem, Optik filtre, Elektriksel performans, Akışkan sıcaklığı, Deneysel analiz

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF OPTICAL FILTER TEMPERATURE ON THE ELECTRICAL PERFORMANCE IN PHOTOVOLTAIC THERMAL SYSTEMS

Extended Abstract

In this study, a photovoltaic-thermal (PVT) system integrated with an optical filter was developed by going beyond the conventional photovoltaic (PV) panel architecture. The electrical and thermal performance of the system, dependent on water temperature, was experimentally analyzed in comparison with a conventional PV system tested simultaneously. The panel was placed inside a specially sealed chamber, and deionized water within the chamber was circulated in a closed loop using a peristaltic pump to control the surface temperature of the panel. Within the scope of the experimental study, the electrical efficiencies of the PV and PVT systems were calculated, and the amount of thermal energy obtained through the circulating fluid in the PVT system was determined. The results showed that the optical filter-integrated PVT system provided higher electrical efficiency than the PV system at

***Sorumlu Yazar (Corresponding Author):** Abid USTAOĞLU

Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği,
Bartın, Türkiye
austaoglu@bartin.edu.tr

Geliş (Received) : 11.07.2025

Kabul (Accepted) : 28.07.2025

Basım (Published) : 31.07.2025

low and moderate fluid inlet temperatures, reaching up to 77% total efficiency with an average thermal efficiency of 72,1%.

However, when the fluid inlet temperature approached 40 °C, the cooling effect of the PVT system diminished, leading to an increase in PV cell temperature and a sudden drop in current, voltage, and overall performance. When the inlet temperature was reduced to 23 °C, a rapid recovery in electrical parameters was observed. Additionally, while the PV system benefited more from convective cooling due to its direct exposure to the environment, the observed performance variation of the PVT system showed a strong correlation with the fluid temperature, as seen in the experimental data. The study demonstrates that optical filter-integrated PVT systems are effective in improving total energy efficiency; however, this effectiveness is directly dependent on controlling the fluid inlet temperature.

Keywords: Photovoltaic thermal (PVT) system, Optical filter, Electrical performance, Fluid temperature, Experimental analysis

1. Giriş

Günümüzde enerji üretimi, sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler açısından yeniden değerlendirilmesi gereken en kritik konular arasında yer almaktadır (Zengin & Yamaçlı, 2024). Fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve karbon salımına bağlı çevresel zararlar, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisi sistemleri hem doğrudan hem de dolaylı uygulamaları ile büyük bir potansiyel sunmaktadır. Ancak güneş enerjisinden elektrik elde etmek amacıyla kullanılan fotovoltaik (PV) sistemlerin verimlilikleri, çeşitli çevresel ve yapısal faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktörlerin başında ise panel yüzey sıcaklığının artması gelmektedir. Panel sıcaklığının yükselmesi, yarı iletken malzemelerin taşıyıcı mobilitesini düşürerek verim kaybına neden olmaktadır. Bu sınırlamaları aşmak ve PV sistemlerden elde edilen enerji miktarını artırmak amacıyla geliştirilen PVT (Fotovoltaik Termal) sistemler hem elektrik hem de ısı enerjisi üretimine olanak tanıyan hibrit sistemlerdir. PVT sistemlerin verimliliğini artırmak için optik filtre kullanımı, dikkat çeken bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu filtreler, yalnızca belirli dalga boylarını hücreye yönlendirerek hücrenin aşırı ısınmasını önlerken, istenmeyen termal yüklerin oluşmasını engellemektedir. Böylece daha stabil bir sıcaklık aralığında çalışan PV hücrelerin elektriksel verimliliği korunmuş olur.

Isıl kayıpları azaltmak amacıyla PVT sistemlere optik filtreler entegre edilmiştir. Bu filtreler, belirli dalga boyu aralıklarının geçişine izin verirken diğerlerini yansıtır veya soğurur; böylece PV yüzeyindeki ısı yük azaltılır. Yapılan çalışmalar, kızılötesi dalga boylarının filtrelenmesinin PV verimliliğini artırdığını ve bileşen ömrünü uzattığını göstermiştir (Huang & Markides, 2021; Hsu vd., 2016). Ayrıca, seçici filtreler, filtrelenen spektrumdan ısı enerjisinin geri kazanılarak ikincil ısıtma uygulamalarında kullanılmasına da olanak tanımaktadır. Geleneksel PV sistemler ile geliştirilmiş PVT düzenekleri arasında karşılaştırmalı analizler birçok araştırmacı tarafından yapılmıştır. Son yıllarda güneş spektrumunun farklı dalga boylarına ayrılması yoluyla, her bir spektral bileşenin uygun şekilde değerlendirilmesini amaçlayan spektral ayrıştırma (spectral beam splitting) yaklaşımı dikkat çekmektedir. Bu kapsamda bu yöntemi kullanarak geliştirdikleri LIPGECOS sisteminde soğuk ayna ile güneş spektrumunu ikiye ayırmış; görünür bölgeyi aydınlatma, kızılötesi bölgeyi ise elektrik üretimi için kullanmışlardır. Sistem %15 enerji verimi ve 347 lm/W aydınlatma etkinliğiyle, spektral ayrıştırmanın çok işlevli kullanım açısından potansiyelini ortaya koymuştur (Kandilli & Külahlı, 2017). Spektral ışın ayırma yönteminin termodinamik ve ekonomik performansına ilişkin çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Kandilli (2016), yoğunlaştırılmış güneş ışımasını soğuk ayna ile ayırıştırarak hem aydınlatma hem elektrik üretimi sağlayan LIPGECOS sisteminin eksergoekonomik analizini gerçekleştirmiştir. Yapılan hesaplamalarda sistemin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %15 ve %9 olarak bulunmuş, en yüksek birim ekserji maliyetinin fiber optik demette (199,47 \$/GJ) gerçekleştiği raporlanmıştır. Yakın dönem literatürde, optik filtrelerin güneş ışımasının spektral bileşenlerine etkisi su bazlı sistemler üzerinden de incelenmiştir. Su bazlı spektral ayrıştırma filtresi (SSF) içeren bir sistem, geleneksel PV panellere kıyasla PV hücre sıcaklığını %93 oranında düşürebildiğini ve elektriksel verimi %29,4'e kadar artırdığını göstermiştir. Yüksek ortam sıcaklıklarında yapılan deneysel ve sayısal analizler, suyun filtre kalınlığı ve debisinin sistem performansına olan etkisini detaylı olarak ortaya koymuştur (Safan vd., 2024). Spektral ayrıştırma yönteminin hibrit PV/T sistemlerdeki uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar hem elektriksel hem de termal bileşenlerin optimum spektral aralıklarla beslenmesini hedeflemektedir. Yoğunlaştırılmalı bir hibrit PV/T kolektör tasarımı, ışımanın 732 nm ve 1067 nm dalga boylarında bölünmesini sağlayan çok katmanlı ince film filtreler kullanarak bir ışın izleme (ray tracing) modeli geliştirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bu spektral bölme yaklaşımıyla geleneksel CPV sistemlerine göre %47 daha fazla güç çıkışı elde edilebileceği gösterilmiştir (Crisostomo vd., 2015).

Bu kapsamda yapılan çalışmalar, spektral ayrıştırma teknolojisinin farklı sistem bileşenleri ve tasarım stratejileriyle entegrasyonunun, PV/T sistemlerinin verimliliğini ve çok işlevli kullanım potansiyelini önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymaktadır.

Lineer Fresnel yansıtıcı (LFR) ve ITO-EG nanoakışkan optik filtreli yenilikçi bir PVT sistem tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Teorik hesaplamalar ve CFD simülasyonları kullanarak yapılan çalışmada, sistemin %29,6 fotoelektrik ve %18,52 termal verimlilik sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, sistemin güneş izleme hatalarına karşı yüksek adaptasyon kabiliyeti gösterdiği gözlemlenmiştir (Wang vd., 2021). (Taylor vd., 2012) Hibrit PVT sistemler için nanoakışkan tabanlı optik filtrelerin teorik optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışmada, nanoakışkanların hem hacimsel güneş ışımasını soğurucusu hem de ısı transfer akışkanı olarak kullanılabileceği vurgulanmış, farklı PV hücre türleriyle yapılan karşılaştırmalarda geleneksel filtrelere kıyasla yüksek performans ve düşük maliyet potansiyeli ortaya konmuştur. (Lee vd., 2023) Güneş spektrumunu kontrol eden emülsiyon filtreli, ayırık (de-coupled) bir PVT sistem geliştirmiştir. Çalışmada, UV, görünür ve yakın IR ışımlarını soğurarak ısı enerjiye dönüştüren emülsiyon filtresi sayesinde PV modül sıcaklığı 46,7 °C 'den 33,1 °C 'ye düşürülmüş ve toplam enerji verimliliği %84,4'e ulaşmıştır. Ekonomik analiz sonuçlarına göre, emülsiyon filtreli sistemin geri ödeme süresi 8,89 yıl ile diğer sistemlere göre daha kısa bulunmuştur. (Huang & Markides, 2021) yarı saydam güneş hücrelerini hem elektrik üreticisi hem de spektral ayırıcı optik filtre olarak kullanan yenilikçi bir spektral-ayırıcı hibrit PVT sistem önermiştir. Çalışmada CdTe, perovskit ve polimer tabanlı yarı saydam hücreler ile hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda ısı enerji üretimi sağlanmış, perovskit hücreli sistemin %13,8 elektriksel verimlilik ve %43,6 toplam ısı verimlilikle öne çıktığı görülmüştür. Bu tasarım, ek optik bileşen ihtiyacını ortadan kaldırarak hem verimlilik hem de maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. (Barthwal & Rakshit, 2024) oksit bazlı nanoakışkanlarla çalışan optik filtreler aracılığıyla spektral ışın ayırma (SBS) prensibini PVT sistemlerde uygulamışlardır. Rayleigh saçılmasına dayalı geliştirilen optik modelle ZnO, Fe₃O₄ ve SiO₂ nanoakışkanlarının 300–2500 nm aralığındaki geçirgenlik ve soğurma özellikleri analiz edilmiştir. ZnO bazlı nanoakışkanların etilen glikol ile daha kararlı ve daha az aglomerasyonlu yapılar oluşturduğu, bu sayede ışık geçiş ve soğurma performanslarının arttığı rapor edilmiştir. (Tu vd., 2023) silikon tabanlı yoğunlaştırılmış PVT (CPV/T) sistemlerinde yüksek kaliteli ısı çıktılarının artırılması amacıyla, vakum tüplü bir alıcıya entegre edilmiş katı-sıvı kombinasyonlu hacimsel filtre içeren yeni bir lineer CPV/T sistemi önermiştir. Monte Carlo Işın İzleme (MCRT) ve Sonlu Hacim Yöntemi (FVM) birlikte kullanılarak sistemin üç boyutlu sayısal modeli geliştirilmiş ve LightTools yazılımıyla yapılan optik simülasyonlar ile filtre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. En uygun filtre kombinasyonları olarak HB700+su ve HB700+PG belirlenmiş; ITO kaplama ile optik verimlilik %88,94, toplam ekserji verimliliği ise %14,92 'ye ulaşmıştır. (Huang vd., 2021) akışkan bazlı spektral ayırıcı yoğunlaştırıcı hibrit PV-termal (SSPVT) kolektörlerin performansını inceleyerek hem yüksek sıcaklıkta ısı enerji hem de yüksek elektrik verimi elde edilebileceğini göstermiştir. Geliştirilen iki boyutlu modelle, PV modülünün yüksek sıcaklıklı filtre akış kanalından termal olarak ayrılmasının elektrik verimini artırdığı ortaya konmuştur. Si güneş hücresi kullanılan sistemde %17,5 elektriksel, %49,5 düşük sıcaklıkta ve %19,5 yüksek sıcaklıkta ısı verim elde edilmiş; optik filtrenin alt ve üst kesim dalga boylarının bu dağılım üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmıştır.

Sonuç olarak PVT sistemlerde optik filtrelerin ve gelişmiş soğutma yöntemlerinin entegrasyonu, güneş enerjisi araştırmalarında umut verici bir yön temsil etmektedir. Optik iyileştirmeler ısı gerilimi azaltırken, gelişmiş sıvılar etkin ısı uzaklaştırılmasına katkı sağlamaktadır. Her iki stratejinin iyi kontrol edilen deneysel bir düzende bir araya getirilmesi henüz tam anlamıyla optimize edilmemiştir ve bu durum daha fazla araştırma ve yenilik için önemli bir fırsat sunmaktadır. Ayrıca akışkan sıcaklığının PVT sistem performansı üzerinde etkisini inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Panel, özel olarak tasarlanmış kapalı bir hazne içerisine yerleştirilmiş; bu hazne içerisindeki saf su dolaştırılarak panelin yüzey sıcaklığı kontrol altına alınmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde, PV ve PVT sistemlerin elektriksel verimleri hesaplanmış, ayrıca PVT sistemde elde edilen termal enerji miktarı belirlenmiştir. Akışkan sıcaklığının sistem performansına etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Deneysel kurulumun güvenilirliğini ve sonuçların karşılaştırmalı analizini sağlamak amacıyla, PVT sistemin hemen yanına eşdeğer özellikte ikinci bir fotovoltaik panel yerleştirilmiş ve bu referans panelin de gerilim, akım ve sıcaklık değerleri eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Böylece klasik PV panel ile optik filtreli ve aktif soğutmalı PVT panelin performansları doğrudan karşılaştırılmış ve verim farklılıkları grafiksel olarak sunulmuştur.

Yapılan bu deneysel çalışma ile, optik filtre entegreli ve sıvı soğutmalı PVT sistemlerin geleneksel PV sistemlere kıyasla ne derece performans avantajı sağladığı detaylı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, hem PV sistemlerin geliştirilmesine katkı sunmakta hem de hibrit güneş teknolojilerinin daha yaygın ve verimli kullanımına ışık tutmaktadır.

2.1. Güneş Radyasyonu

Toplam küresel güneş radyasyonu yüzeye gelen yatay doğrudan ve yatay yayılı güneş radyasyonunun toplamı şeklinde denklem (1) ile ifade edilmektedir [10]

$$H = H_b + H_d = I_b \sin \alpha_s + H_d \quad (1)$$

Bu denklemde H yatay yüzeye gelen küresel güneş radyasyonunu, H_b yatay doğrudan güneş radyasyonunu ve H_d yatay difüz güneş radyasyonunu göstermektedir. Ayrıca I_b doğrudan radyasyonu $\sin \alpha_s$ ise güneş yükseklik açısını göstermektedir ve denklem (2) ile ifade edilmektedir [10]

$$\sin \alpha_s = \sin \delta_d \sin \varphi + \cos \delta_d \cos \varphi \cos \omega \quad (2)$$

Bu denklemde δ_d deklinasyon açısını, φ enlem açısını ve ω saat açısını göstermektedir. Eğimli bir paneldeki güneş radyasyonu denklem (3) ile ifade edilmektedir [10]

$$q_s = I_b \cos \theta + H_d \cos^2 \frac{\beta}{2} + H \rho_r \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

Bu denklemde q_s eğimli paneldeki güneş radyasyonunu, θ geliş açısını, β güneş panelinin eğim açısını ve ρ_r potansiyel yansımayı göstermektedir. Geliş açısı denklem (4) ile ifade edilmektedir [10]

$$\cos \theta = \sin \delta_d \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta_d \cos(\varphi - \beta) \cos \omega \quad (4)$$

Küresel güneş radyasyonunu ölçmek için bir piranometre kullanılabilir. Sadece yatay küresel güneş radyasyonu (H) bilindiği durumda yayılı veya doğrudan güneş radyasyonu hesaplamak için denklem (5) ile ifade edilen K_T hava açıklık endeksi kullanılabilir [10]

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (5)$$

K_T açıklık endeksi, H yatay küresel güneş radyasyonunun H_0 dünya dışı yatay toplam küresel radyasyona oranı olarak ifade edilmektedir. Açıklık endeksi değeri $0.35 \leq K_T < 0.85$ aralığında olmadığında I_b doğrudan radyasyon değeri sıfır olur. I_b doğrudan radyasyon değeri denklem (6) ile ifade edilmektedir [11,12].

$$I_b = -520 + 1800K_T \quad (6)$$

2.2. Elektriksel Performans

PV modülün maksimum güç çıkışı denklem (7) ile ifade edilmektedir. Fotovoltaik modülün maksimum akımı I_{MP} ve maksimum voltajı V_{MP} ile gösterilmektedir. Bu değerler devredeki yük koşulları altında akım ve voltaj ölçümlerine göre yaklaşık olarak hesaplanır [13]

$$P_{MP} = I_{MP} V_{MP} \quad (7)$$

Fotovoltaik modülün mükemmelliği doluluk faktörü FF denklem (8) ile ifade edilmektedir. Bu denklemde I_{SC} fotovoltaik modülün kısa devre akımını, V_{OC} açık devre voltajını göstermektedir ve bu değerler multimetre cihazının doğrudan güneş hücrelerine bağlanmasıyla ölçülebilir [13]

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (8)$$

Bir fotovoltaik modülün verimliliği, PV modülünden üretilen enerjinin eğimli yüzeydeki gelen güneş radyasyonuna oranı olarak denklem (9) ile ifade edilmektedir [13]

$$\eta_{elekt} = \frac{P_{MP}}{\dot{Q}_{güneş,g}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{\dot{Q}_{güneş,g}} \quad (9)$$

Bu denklemde $\dot{Q}_{güneş,g}$ fotovoltaik yüzeye ulaşan toplam güneş ışıını gücüdür ve denklem (10) ile ifade edilmektedir [13]

$$\dot{Q}_{güneş,g} = q_s C_r A_{PV} \quad (10)$$

Bu denklemde C_r geometrik yoğunlaştırıcı oranını ve A_{PV} fotovoltaik hücre alanını göstermektedir.

2.3. Termal Performans

Fotovoltaik panelin soğutucu akışkan ile soğutulması esnasında ısı enerjisi kazanımı denklem (11) ile ifade edilmektedir.

$$Q_{ısı} = \dot{V}_f \rho_f c_{p,f} (T_{f,çık} - T_{f,gir}) \quad (11)$$

Bu denklemde $\dot{V}_f$ sistemin hacimsel akış oranını, ρ_f soğutucu akışkanın yoğunluğunu, $c_{p,f}$ soğutucu akışkanın özgül ısı kapasitesini, $T_{f,gir}$ ve $T_{f,çık}$ ise sırasıyla soğutucu akışkanın giriş ve çıkış sıcaklığını göstermektedir. Sistemin ısı verimliliği denklem (12) ile ifade edilmektedir.

$$\eta_{ısı} = \frac{\dot{Q}_{ısı}}{\dot{Q}_{güneş,g}} \quad (12)$$

Sistemin toplam verimliliği sistemin ısı ve elektriksel veriminin toplamı olarak denklem (13) ile ifade edilmektedir.

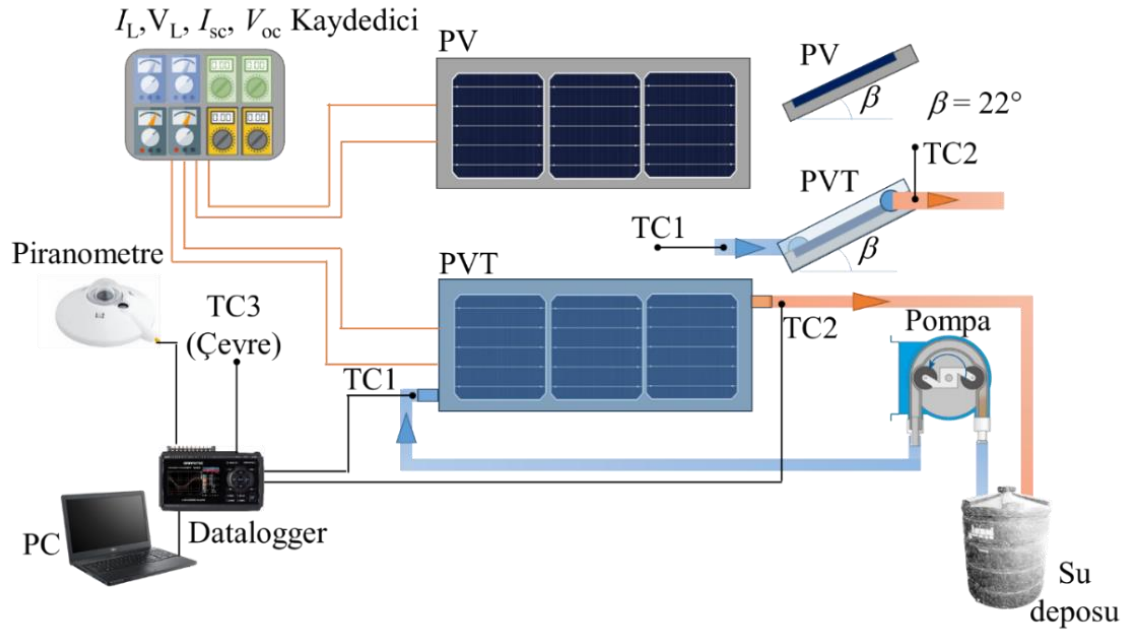
$$\eta_{toplam} = \eta_{ısı} + \eta_{elekt} \quad (13)$$

2.4. Deney sistemi

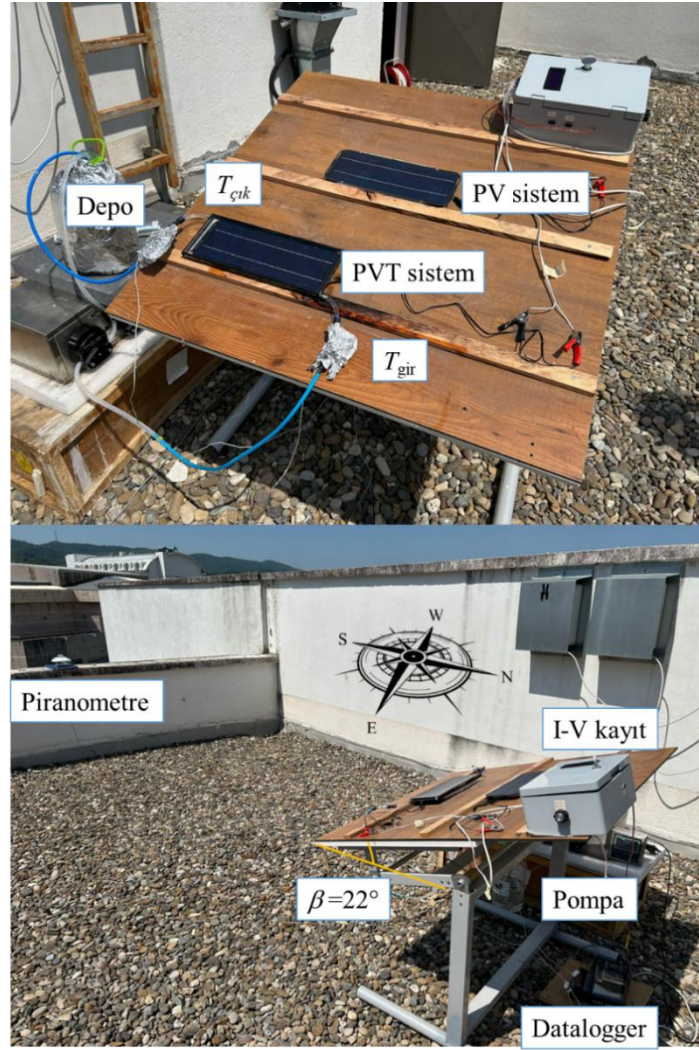
PV ve PVT sistemlerin deneysel analizi 10 Haziran 2025 tarihinde Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İdari Bina çatısında (41,6°K, 32,3°D) gerçekleştirilmiştir. Sistemde sıvı dolaşımı, $\pm\%0,5$ debi hassasiyetine sahip Shenchen markalı YZ1515x DF600 modeli peristaltik pompa ile sağlanmıştır. Soğutucu akışkanın hacimsel debisi 150 ml/dk olarak ayarlanmıştır. Güneş ışıını ve sıcaklık verilerinin kaydı için Hioki LR8450 veri kaydedici ile U8550 voltaj/sıcaklık modülü birlikte kullanılmıştır. Bu veri kaydedicinin voltaj ölçüm hassasiyeti kayıt değerinin $\pm\%0,3$ 'ü ve toplam ölçüm aralığının $\pm\%0,1$ 'i olarak belirtilmiştir. Akışkanın giriş ve çıkışı ve çevre sıcaklıkları ölçülmüştür. Sıcaklıkların ölçümünde $\pm\%0,4$ hassasiyete sahip K tipi termokupllar tercih edilmiştir. Yatay düzleme gelen toplam güneş ışıını ölçümleri, EKO MS-410 piranometre ile gerçekleştirilmiş olup, bu cihazın kalibrasyon, doğruluk ve çevresel etkilerle birlikte toplam belirsizliği standart koşullar altında yaklaşık $\pm\%3$ 'tür. PV panellerin elektriksel performansının izlenebilmesi amacıyla, akım (I), kısa devre akımı (I_{sc}), gerilim (V) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) değerlerini kaydedebilen özel bir I-V ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Ayrıca, sistemdeki suyun toplanması ve sürekli dolaşımının sağlanması için bir su deposu kullanılmıştır. Sistem güneşten en iyi şekilde faydalanabilmek için güneşe yönlendirilmiş ve deneyin yapıldığı gün yüzeye güneş öğlesinde dik gelecek şekilde 22° olacak şekilde ayarlanmıştır.

Şekil 1’de deney sisteminin şematik diyagramı gösterilmiştir. Şekil 2 sistemin deneysel sistemin fotoğrafı gösterilmiştir.

Bu çalışmada, optik filtre entegreli PVT sistemin performansı, klasik bir PVT sistemle değil, doğrudan yaygın olarak kullanılan bir PV panel ile karşılaştırılmıştır. Bu tercih, sistemde kullanılan optik filtrenin ve aktif sıvı soğutmanın elektriksel ve termal performans üzerindeki etkilerini temel bir PV referansına göre izole biçimde değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Böylece elde edilen iyileşmelerin doğrudan optik ve ısı katkılara bağlı olarak ortaya çıktığı daha net şekilde analiz edilebilmiştir.



Şekil 1. PVT ve PV sistem deneyinin şematik diyagramı



Şekil 2. PVT ve PV sistem dış ortam deney fotoğrafı

2.5. Optik filtre

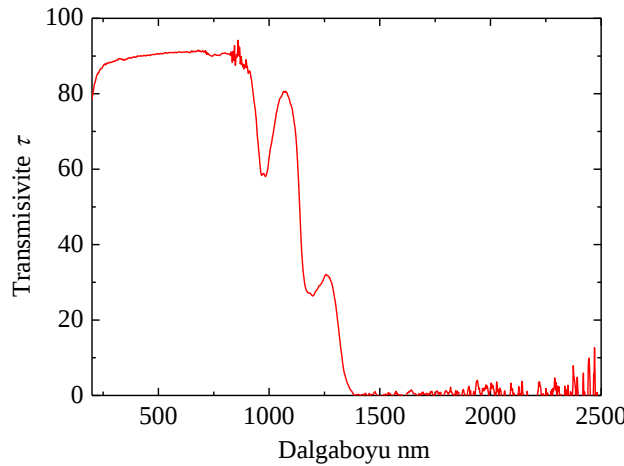
Bu çalışmada kullanılan saf (deiyonize) suyun, PV yüzeyi üzerinden akarken taşınım yoluyla soğutma sağlamanın yanı sıra, güneş spektrumu içerisindeki görünür ve yakın kızılötesi bölgedeki ışınımı geçirerek elektrik üretimini desteklemesi, buna karşılık daha uzun dalga boylarındaki termal ışınımı absorbe ederek PV yüzeyinde oluşabilecek aşırı ısınmayı sınırlaması amaçlanmıştır.

Deneyde kullanılan su örneğine ait ölçülmüş spektral geçirgenlik verileri Şekil 3'te sunulmuştur. Su, görünür dalga boyu aralığında (400–700 nm) oldukça yüksek geçirgenliğe sahiptir (%85'in üzerinde) ve 900 nm'nin üzerinde bu geçirgenlik kademeli olarak azalmaktadır. Özellikle yakın kızılötesi bölgede, 980 nm, 1200 nm ve 1450 nm merkezli absorpsiyon bantları, su moleküllerinin titreşim modlarından kaynaklanmakta olup, geçirgenliği %10'un altına kadar düşürmektedir.

Bu absorpsiyon bantları, güneş spektrumunun termal radyasyon bölgesi olarak da bilinen 1000–2500 nm aralığında yoğunlaşmaktadır. Bu bölgede taşınan enerji, PV hücreler tarafından elektriksel olarak değerlendirilmez; ancak aşırı ısınmaya neden olabilir. Ölçülen geçirgenlik verileri, suyun bu dalga boylarındaki ışınımı etkin şekilde absorbe ettiğini göstermekte ve böylece PV yüzeyine ulaşan termal yükü sınırlandırarak sistemin soğutma performansını destekleyebileceğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular, suyun seçici spektral filtre olarak kullanılmasının bu bağlamda etkili bir yöntem olabileceğine işaret etmektedir. Özellikle kızılötesi ışınının sınırlandırılması yoluyla PV yüzeyinde oluşabilecek ısı yükünü azaltılmasına anlamlı katkılar sağlayabileceğini göstermektedir.

Saf (deiyonize) su, görünür bölgedeki ($\sim 400\text{--}700\text{ nm}$) ışınım için oldukça yüksek geçirgenliğe sahip olup kırılma indisi yaklaşık 1.33 civarındadır (Hale & Querry, 1973). Bu dalga boyu aralığında absorpsiyon katsayısı ihmal edilebilir düzeydedir ($<0.01\text{ m}^{-1}$). Ancak 900 nm 'nin üzerindeki kızılötesi bölgelerde suyun absorpsiyon katsayısı hızla artmakta, özellikle 1450 nm ve 1900 nm gibi dalga boylarında değerler 100 m^{-1} 'nin üzerine çıkmaktadır (Wieliczka vd., 2016). Bu durum, buharlaşma öncesi moleküler titreşim rezonanslarına bağlıdır ve suyu bu bölgelerde etkili bir termal radyasyon filtresi haline getirmektedir. Ölçülen spektral transmisivite eğrileri literatürle uyumlu şekilde, görünür bölgeyi geçirgen, IR bölgeyi ise absorban olarak doğrulamaktadır (Segelstein, 1973).



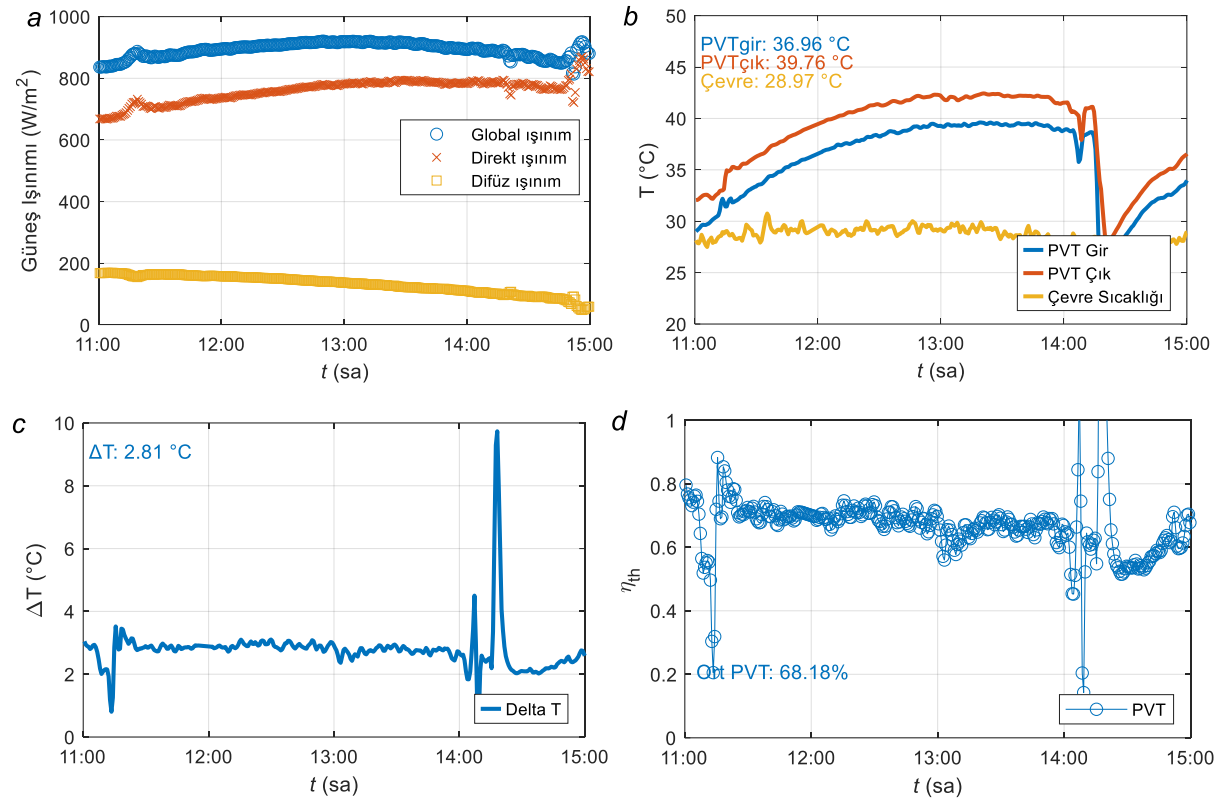
Şekil 3. Deneyde kullanılan saf suyun güneş spektrumu (280-2500 nm) içindeki dalga boyuna bağlı geçirgenlik (transmisivite) değerleri

3. Bulgular ve Tartışma

Deneyssel analiz, 10 Haziran 2025 tarihinde Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İdari Binası'nın çatısında ($41,6^\circ\text{K}$, $32,3^\circ\text{D}$) gerçekleştirilmiştir. Şekil 4(a) 'da global, direkt ve difüz güneş ışınımı değerlerinin deney süresince değişimi görülmektedir. Maksimum global ışınım (H) saat 13:00 civarında $918,5\text{ W/m}^2$ olarak ölçülmüştür. Bu değerde, direkt ışınım (H_b) $781,6\text{ W/m}^2$ iken, yayınık ışınım (H_d) $136,9\text{ W/m}^2$ olarak kaydedilmiştir. Bu durum, toplam küresel ışınımın yaklaşık %85'sinin direkt bileşenlerden ve %14,9 'ünün ise difüz radyasyondan oluştuğunu göstermektedir. Gözlemler, ölçüm süresince gökyüzünün büyük oranda açık olduğunu göstermektedir. Bu güneş ışınımı değerleri doğrudan ışınımdan maksimum düzeyde faydalanan sistemler için uygun koşullar sağlamaktadır. Şekil 4(b) 'de, PVT sistemine ait akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları ile çevre sıcaklığının zaman bağlı değişimi gösterilmiştir. Güneş ışınımının artışıyla birlikte hem giriş hem de çıkış sıcaklıklarında kademeli bir artış gözlenmiştir. Burada çevrimi tamamlayan akışkanın tekrar depoya eklenmesi giriş sıcaklığının da kademeli olarak artışına sebep olmuştur. PV sistemlerin akışkan sıcaklığına bağlı düşmesinden dolayı giriş sıcaklığı tekrar düşürülmüş ve bunun PVT sistem performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çevre sıcaklığı genel olarak sabit kalmış ve yaklaşık 29°C civarında seyretmiştir. Giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın görülebilmesi adına ortalama sıcaklık değerleri belirlenmiştir. PVT sisteme giren akışkanın ortalama sıcaklığı $36,9^\circ\text{C}$ iken çıkış sıcaklığı $39,7^\circ\text{C}$ civarlarındadır. Buda optik filtreli PVT sistemden $2,8^\circ\text{C}$ 'lik ortalama bir fark olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte maksimum giriş sıcaklığı $39,3^\circ\text{C}$ iken çıkış sıcaklığı 42°C civarlarına kadar yükselmiştir. Bu da sistemin elektriksel performansını negatif olarak etkileyecektir. Deney boyunca akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında ortalama $2,8^\circ\text{C}$ 'lik bir fark gözlemlenmiştir (Şekil 4(c)). Bunun için elektriksel performans incelenmelidir. PVT sistemin ortalama termal verimi %68,2 civarlarındadır (Şekil 4(d)). Termal verimin deney boyunca neredeyse stabil olması sıcaklık farkının deney boyunca çok değişmemesinden kaynaklanmaktadır. PVT sistemin PV sisteme göre en büyük avantajlarından biriside şüphesiz termal enerjinin kullanılabilmesidir. PVT sistem elektrik üretiminin yanında kullanılan termal enerji düşünüldüğünde verimlilik açısından önemli bir üstünlük sağladığı açıktır.

Şekil 5'te PV ve PVT sistemlerine ait kısa devre akımı, açık devre voltajı, akım, gerilim, elektriksel güç üretimi ve elektriksel verimlilik değerleri gösterilmektedir.

Akım ve gerilim değerleri sıcaklığa bağlı önemli ölçüde etkilenmiştir. PVT sistem soğutulduğu için yüzey sıcaklığı PV sisteme göre çok daha düşüktür. Ancak bir süre sonra PVT sistemde dolaşan suyun sıcaklığındaki artıştan kaynaklı olarak aniden akım ve geriliminde düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüş saat 12:20 den sonra gerçekleşmiştir. Bu saatteki PVT sistem akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları sırasıyla 40,9°C ve 37,9 °C, olarak ölçülmüştür. 12:20 öncesinde PV yüzey sıcaklığı çok artmıştır. Ancak PVT sistemin yüzey sıcaklığı akışkan sıcaklığına bağlı kademeli olarak artarken PV yüzeyi dış ortama açık haldedir. Ayrıca verilen saatlerden itibaren rüzgâr hızında bir artış gözlemlenmiş ve sıcaklık göreceli olarak azalmıştır. Bununla birlikte rüzgâr PV yüzeyin PVT yüzeye göre daha hızlı soğumasını sağlamıştır. PVT sistemin yüzeyi PV sistem yüzeyi gibi rüzgârdan kaynaklı taşınım ısı kaybı ile soğuma meydana gelmediğinden çevresel değişimlerden çok akışkanın sıcaklığından etkilenmiştir. Bu ani düşüşün akışkan sıcaklığından kaynaklanıp kaynaklanmadığını test etmek için giriş suyu sıcaklığı 14:20 de tekrar 23 °C'ye düşürülmüştür. Bu düşüşle birlikte PVT sistemin yüzey sıcaklığı azalmış ve elektriksel parametrelerde hızlı bir toparlanma gözlemlenmiştir. Bu bulgular, PVT sistemin elektriksel performansının akışkan sıcaklığı ile yakından ilişkili olduğunu ve bu ilişkinin deneysel verilerle desteklendiğini göstermektedir. Ancak çalışmada detaylı bir ısı transferi analizi yapılmadığından, bu yorum yalnızca ölçülen sıcaklık ve elektriksel veri eğilimleri temelinde değerlendirilmiştir.

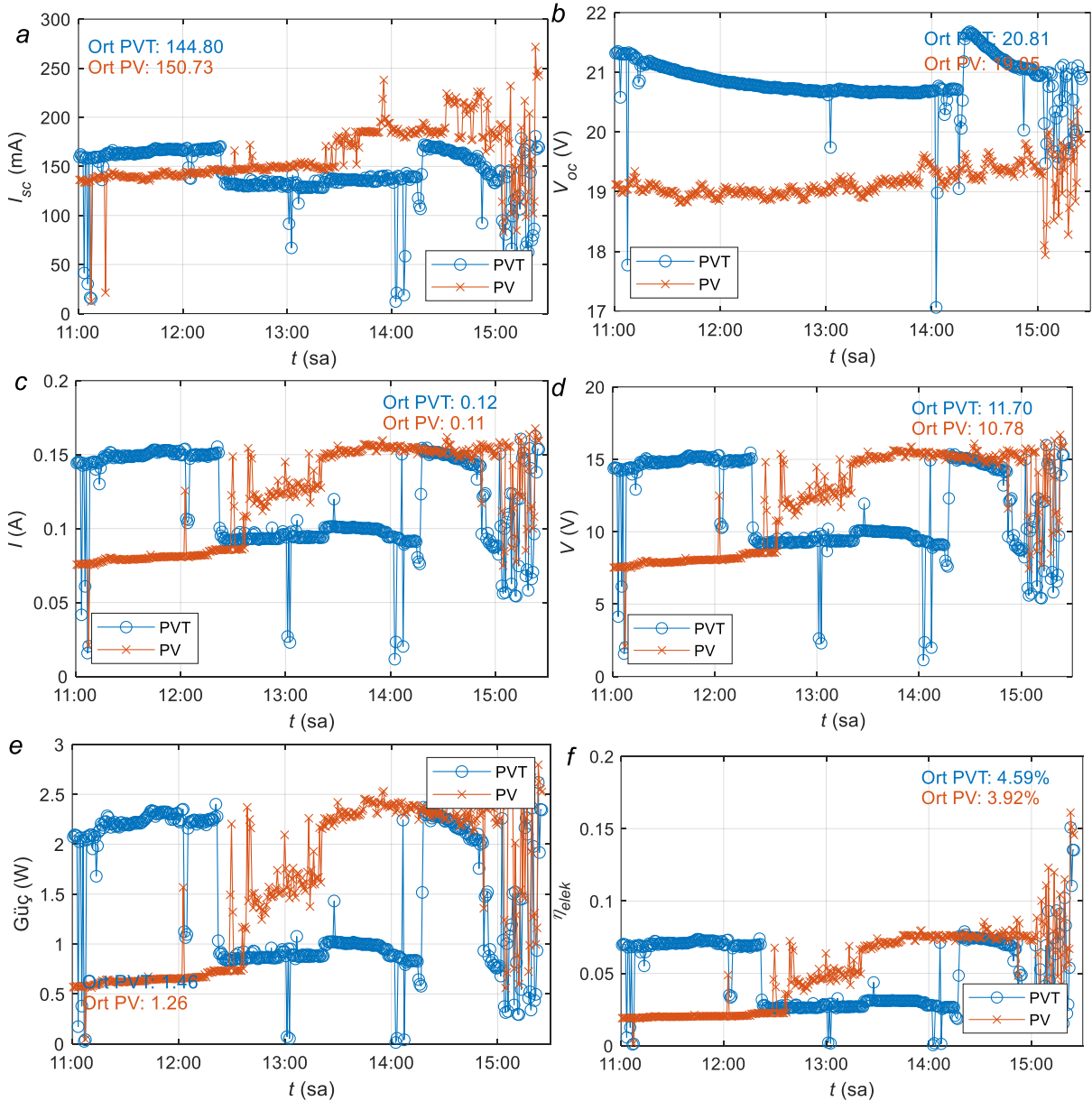


Şekil 4. Global, direkt ve difüz ışıınım değerleri (a), giriş, çıkış ve çevre sıcaklıkları (b), PVT sistemin akışkan çıkış ve giriş sıcaklıkları arasındaki fark (c) ile PVT sistemin termal performansı (d)

Akışkanın sıcaklığının PV performansı üzerinde bu denli keskin bir etki oluşturmasının temelinde, PV hücrelerin sıcaklığa karşı yüksek hassasiyeti yer almaktadır. PV hücrelerde sıcaklık arttıkça yarı iletken malzemenin bant aralığı daralır ve bu durum açık devre geriliminin (V_{oc}) azalmasına neden olur. Aynı zamanda sıcaklık artışı, yük taşıyıcılarının yeniden birleşme oranını artırarak akımı da olumsuz etkiler. PVT sistemde PV yüzeyi doğrudan bir akışkanla temas ettiğinden, yüzey sıcaklığı esas olarak bu akışkanın sıcaklığına bağlıdır. Akışkanın sıcaklığı arttığında PV yüzeyinden ısı atımı zorlaşır ve yüzey sıcaklığı hızla yükselir. Bu sıcaklık artışı, özellikle 40 $^{\circ}C$ civarındaki kritik eşik değerine ulaşıldığında, PV hücre performansında ani ve keskin düşüşlere yol açar. Bu durum, hücre malzemesinin sıcaklıkla birlikte doğrusal olmayan karakteristikler sergilemesinden kaynaklanır; belirli bir sıcaklık eşiği geçildiğinde verim kaybı hızlanır.

Buna karşın, PV sistemin yüzeyi dış ortamla doğrudan temas halinde olduğundan, özellikle rüzgâr etkisiyle taşınım yoluyla daha etkin bir şekilde soğutulabilir. Nitekim deney sırasında rüzgâr hızının arttığı saatlerde PV yüzey sıcaklığı görece daha düşük kalmış, bu da PV sistemin performansını geçici olarak iyileştirmiştir.

Öte yandan, PVT sisteminde akışkan ile PV yüzey arasında belirli bir ısı direnç bulunur ve akışkanın sıcaklığı yükseldikçe bu dirençten dolayı yüzeyden akışkana olan ısı geçişi azalır. Bu durum PV yüzeyinde ani sıcaklık yükselmelerine neden olarak kısa sürede belirgin performans kayıplarına yol açar. Ani sıcaklık değişimleri, hücre içinde lokal sıcaklık farkları ve mikroskobik gerilim dengesizlikleri oluşturarak geçici verimsizliklere neden olabilir. Tüm bu fiziksel mekanizmalar, akışkan sıcaklığının PV modül yüzey sıcaklığı üzerindeki belirleyici rolünü ve dolayısıyla sistemin elektriksel performansı üzerindeki kritik etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



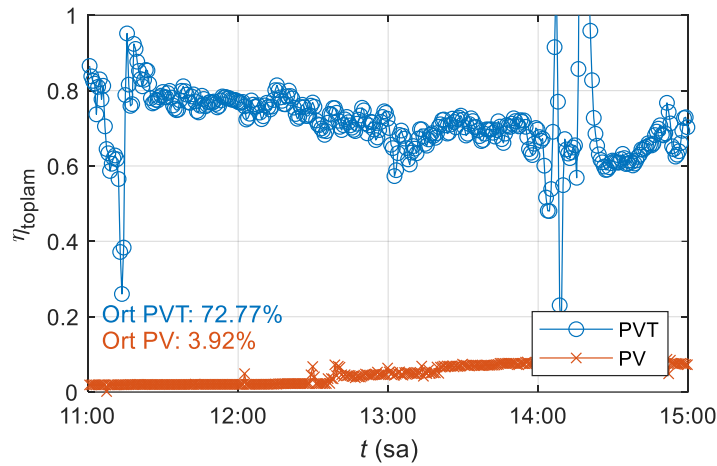
Şekil 5. PV ve PVT sistemlerine ait kısa devre akımı (a) ve açık devre gerilimi (b), akım (c), gerilim (d), elektriksel güç üretimi (e) ve elektriksel verimlilik (f)

Şekil 5f’te sistemin elektriksel verimi gösterilmiştir. Burada PVT sistemin elektriksel verimi 11:00-12:20 arasında ortalama olarak %7,5 civarında ilken PV sistemin yüksek yüzey sıcaklığında kaynaklı olarak %2,1 civarlarında seyretmiştir.

12:20 sonrasında PV yüzey sıcaklığın rüzgâra bağlı olarak azalmasından kaynaklı PV sistemin verimi kademeli olarak artarak saat 14:20 itibari ile %8 civarlarına kadar ulaşmıştır. 12:20 sonrası yüzey sıcaklığa bağlı PVT sistem verimi aniden %3,3 civarlarına düşmüştür.

Rüzgâr hızındaki artışın PVT üzerinde pek bir etkisi olmamıştır. 14:20 sonrası akışkan giriş sıcaklığını düşürülmesi ile PVT sistemin elektriksel verimi tekrar PV sistemin performansını yakalamıştır. Şekil 6'da PVT ve PV sistemlerin toplam verimleri gösterilmiştir. PVT sistemin termal enerjiyi de kullanması dolayısıyla PV sisteme göre önemli bir avantaj sağlamıştır.

PV sistemin verimi yüzey sıcaklığına bağlı olarak %2-8 arasında değişirken belirli zaman aralığında ortalama olarak %3,9 luk performans göstermiştir. Bununla birlikte PVT sistemde yaklaşık %68,2 lik bir termal enerji kullanımı ile toplam performans %72,7 civarlarına kadar yükselmiştir. Burada optik filtre kullanımının akışkan giriş sıcaklığına bağlı olarak avantajları ve dezavantajları gözlemlenmiştir. Sistemin toplam verimini arttırmakla birlikte giriş suyu sıcaklığı artarken verimin azalabileceği ve 40 °C gibi kritik sıcaklıklarda sistem performansının önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6. PV ve PVT sistemlerin toplam verimleri

Şekil 6'da PV ve PVT sistemlerin toplam verimleri karşılaştırıldığında, optik filtrenin elektriksel performansa katkısı doğrudan gözlemlenmemektedir. Ancak sistemin ortalama güç çıktıları dikkate alındığında, PVT sistemin 1,46 W ortalama güç ürettiği, PV sistemin ise 1,26 W ile daha düşük çıktıya sahip olduğu görülmektedir. Bu da PVT sistemin ortalama %15,9 oranında daha yüksek güç çıktısı sağladığını göstermektedir. Ancak bu karşılaştırmada, PVT sistemdeki akışkan giriş sıcaklığının zaman zaman yüksek olması nedeniyle hücre sıcaklığının belirli aralıklarda istenilen düzeyde tutulamadığı ve bu durumun verim farkını normal koşullardaki potansiyel farktan daha düşük gösterdiği göz önünde bulundurulmalıdır. Yani daha iyi bir termal yönetimle optik filtrenin elektriksel performansa katkısı çok daha belirgin hale gelecektir. Bu fark, PVT sistemde kullanılan optik filtrenin gelen ışınının bir kısmını termal kazanca yönlendirmesine ve PV modül sıcaklığının kontrol altına alınmasına bağlı olarak oluşmaktadır. Nitekim literatürde de bu durumu destekleyen çeşitli çalışmalar mevcuttur. Örneğin, (Safan vd., 2024), su bazlı spektral ayrıştırma filtresi içeren bir sistemin geleneksel PV panellere kıyasla elektriksel verimi %29,4'e kadar artırdığını raporlamıştır. Benzer şekilde, (Crisostomo vd., 2015) tarafından geliştirilen yoğunlaştırılmalı hibrit PV/T kolektör tasarımı, optik spektrumun belirli dalga boylarında bölünmesi sayesinde geleneksel CPV sistemine kıyasla %47 oranında daha fazla güç çıktısı elde edilmiştir. Bu sonuçlar, optik filtre uygulamasının hem elektriksel hem de termal performans açısından sistem verimliliğine önemli katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, geleneksel PV sistem mimarisinin ötesine geçilerek optik filtre entegreli bir fotovoltaik-termal (PVT) sistem geliştirilmiş ve sistemin elektriksel ve termal performansı, akışkan sıcaklığına bağlı olarak deneysel olarak incelenmiştir. PV ve PVT sistemler eşzamanlı olarak Bartın Üniversitesi çatısında test edilmiş ve farklı sıcaklık koşullarında performans parametreleri detaylı şekilde karşılaştırılmıştır.

- Optik filtreli PVT sistem, düşük ve orta sıcaklıklarda PV sisteme göre daha yüksek elektriksel verim sağlamıştır.
- PVT sistem, ortalama %68 termal verimlilik ile toplamda %72'ye kadar ulaşan sistem verimi sunmuştur.
- Akışkan giriş sıcaklığı 40 °C seviyelerine ulaştığında, PVT sistemin yüzey sıcaklığı artmış ve elektriksel performansta ani düşüşler gözlemlenmiştir.
- Giriş sıcaklığı 23 °C'ye düşürüldüğünde, elektriksel parametrelerde hızlı bir toparlanma gerçekleşmiştir.
- PV sistemi çevresel soğutma koşullarından (örneğin rüzgâr) doğrudan etkilenirken, PVT sistemin gözlenen elektriksel performansı, akışkan sıcaklığı değişimleriyle paralel bir seyir göstermiştir. Bu ilişki deneysel gözlemlerle desteklenmiş olmakla birlikte, çalışmada detaylı bir ısı transfer modeli yer almadığından, bu çıkarımlar doğrudan gözlemsel verilere dayanmaktadır.
- Optik filtre, uygun sıcaklık aralıklarında önemli fayda sağlasa da yüksek sıcaklıklarda bu avantaj ortadan kalkmaktadır.

Sonuç olarak, optik filtre kullanımının elektriksel performansı artırdığı ancak bu avantajın akışkan sıcaklığının kontrolüne bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Özellikle 40 °C civarındaki giriş sıcaklıklarında sistemin elektriksel verimliliğinde ani ve belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Bu nedenle PVT sistem tasarımlarında sadece optik performans değil, aynı zamanda ısı denge ve akışkan sıcaklığı kontrolü de dikkate alınmalıdır. Optik filtreli PVT sistemler, uygun sıcaklık aralıklarında çalıştırıldığında hem elektriksel hem de termal verimliliği birlikte optimize ederek yenilenebilir enerji teknolojileri açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Kaynaklar

1. Barthwal M, Rakshit D. (2024). Selective transmission and absorption in oxide-based nanofluid optical filters for PVT collectors. *Sol Energy Adv*, 4:100078. <https://doi.org/10.1016/J.SEJA.2024.100078>
2. Boes EC, Hall IJ, Prairie RR, Stromberg RP, Anderson HE. (1976). Distribution of direct and total solar radiation availabilities for the USA.
3. Duffie JA, Beckman WA. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Fourth Edition, <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
4. Duffie JA, Beckman WA, Winston R, Kreith F. (19769). *Solar-Energy Thermal Processes*. *Phys Today*, <https://doi.org/10.1063/1.3023429>
5. Hale, G.M., & Querry, M.R. (1973). Optical constants of water in the 200 nm to 200 µm wavelength region. *Applied Optics*, 12(3), 555–563. <https://doi.org/10.1364/AO.12.000555>
6. Hsu PC, Huang BJ, Lin WC, Chang YJ, Chang CJ, Li K, et al. (2016). Effect of switching scheme on the performance of a hybrid solar PV system. *Renew Energy*, 96, 520–530. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.004>
7. Huang G, Markides CN. (2021). Spectral-splitting hybrid PV-thermal (PV-T) solar collectors employing semi-transparent solar cells as optical filters. *Energy Convers Manag*, 248(1), 114776. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114776>
8. Huang G, Wang K, Curt SR, Franchetti B, Pasmazoglou I, Markides CN. (2021). On the performance of concentrating fluid-based spectral-splitting hybrid PV-thermal (PV-T) solar collectors. *Renew Energy*, 174(7), 590–605. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.04.070>
9. Kandilli, C. (2016). Exergoeconomic analysis of a novel concentrated solar energy for lighting-power generation combined system based on spectral beam splitting. *International Journal of Exergy*, 20(3), 239–260. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2016.078927>
10. Kandilli, C. & Külahlı, G. (2017). Performance analysis of a concentrated solar energy for lighting-power generation combined system based on spectral beam splitting. *Renewable Energy*, 111, 357–366. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.032>
11. Lee JW, Song MS, Jung HS, Kang YT. (2023). Development of solar radiation spectrum-controlled emulsion filter for a photovoltaic-thermal (PVT) system. *Energy Convers Manag*, 287(5), 117087. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2023.117087>
12. Safan, Y. M., Abdelrazik, A. S., Elmohlawy, A. E., Abdel-Moneim, S. A. & Salem, M. R. (2024). Investigating the performance of photovoltaic panels using optical water spectral splitting filter: An experimental and computational analysis. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 16(4), 043503. <https://doi.org/10.1063/5.0215914>

- 13.Segelstein, D.J. (1981).** The Complex Refractive Index of Water. Master's Thesis, University of Missouri, Kansas City.
- 14.Taylor RA, Otanicar T, Rosengarten G. (2012).** Nanofluid-based optical filter optimization for PV/T systems. *Light Sci Appl*, 1(34),1–7. <https://doi.org/10.1038/lsa.2012.34>.
- 15.Tiwari GN, Dubey S. (2009).** Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications. Royal Society of Chemistry, <https://doi.org/10.1039/9781849730952>
- 16. Tu L, Ma Y, Han X, Zhu M. (2023).** Numerical analysis of a modified combined volumetric filtered concentrating PV/T system using MCRT and FVM coupled method. *J Clean Prod*, 410:137296. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137296>
- 17. Wang G, Wang B, Yuan X, Lin J, Chen Z. (2021).** Novel design and analysis of a solar PVT system using LFR concentrator and nano-fluids optical filter. *Case Stud Therm Eng*, 27(5),101328. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2021.101328>
- 18.Wieliczka, D.M., Weng, S. & Querry, M.R. (1989).** Wedge shaped cell for highly absorbent liquids: infrared optical constants of water. *Applied Optics*, 28(9), 1714–1719. <https://doi.org/10.1364/AO.28.001714>
- 19. Zengin, N. & Yamaçlı, R. (2024).** İklim Değişikliği Konulu Lisansüstü Çalışmaların Bibliyometrik Analizi Tt- Bibliometric Analysis Of Graduate Studies On Climate Change. *Bartın Univ Int J Nat Appl Sci*, 7(2), 27–40. <https://doi.org/10.55930/jonas.1387511>