

Hava Soğutmalı PVT Panellerde Panel Yüzey Sıcaklığını Etkileyen Kontrol Parametrelerinin Optimizasyonu

Ahmet Numan ÖZAKIN¹, Ferhat KAYA^{2*}

ÖZET: Panel yüzey sıcaklığı PV panelin performans parametreleri üzerinde çok önemli etkiye sahiptir. Özellikle yaz aylarında görülen panel yüzey sıcaklığındaki aşırı yükselme panel veriminde ciddi düşümlere neden olur. Bu olumsuz durum panel yüzeyi soğutularak minimize edilebilir. Bu çalışmada, hava soğutmalı PVT sistemine kanatçıklar eklendi. Kontrol parametrelerinin (panelin arka yüzey sıcaklığı, fan hızı, kanal derinliği, kanatçık konfigürasyonu, kanatçık malzemesi) panel yüzey sıcaklığına, kanatçık sıcaklığına ve çıkış sıcaklığına etkisi Taguchi Yöntemi kullanılarak incelendi ve en uygun tasarım kombinasyonu belirlendi. Ayrıca ANSYS FLUENT analizi ile elde edilen görüntüler analiz edildi. Çalışmamızda monokristal panel kullanıldı. Bakır, alüminyum ve pirinç malzemelerden yapılmış kanatçıkların sık ve seyrek konfigürasyonları için deneyler yapıldı. Panel yüzey sıcaklığı, kanatçık sıcaklığı ve çıkış sıcaklığı için en etkili parametrelerin kanatçık konfigürasyonu, fan hızı ve kanal derinliği olduğu görüldü. Optimal tasarım kombinasyonu, panel yüzey sıcaklığı için A2-B3-C2-D3-E2 olduğu, kanatçık sıcaklığı için A1-B1-C3-D2-E2 olduğu, çıkış sıcaklığı için A1-B1-C3-D2-E3 olduğu bulundu.

Anahtar Kelimeler: Hava bazlı PVT, kanatçık, panel yüzey sıcaklığı, Taguchi yöntemi, varyans analizi

Optimization of Control Parameters Affecting Panel Surface Temperature in Air-Cooled PVT Panels

ABSTRACT: Panel surface temperature has a significant effect on panel performance parameters. The tremendous increase in panel surface temperature, especially seen in the summer months, leads to significant reductions in panel efficiency. In this study, fins to the air-cooled PVT system was added. The effect of the design parameters (surface temperature of back of the panel, airflow velocity, depth of duct, fin configuration, fins materials) on the panel surface temperature, fin temperature and outlet temperature was investigated using the Taguchi Method, and the optimal design combination was determined. In addition, the images obtained by ANSYS FLUENT analysis were analyzed. In our study, monocrystalline panels were used. Experiments were conducted for the frequent and sparse configurations of the fins made of copper, aluminum and brass materials. It was observed that while most effective parameters for panel surface temperature, fin temperature and outlet temperature were the fin configuration, fan speed and duct depth. The optimal design combination was found to be A2-B3-C2-D3-E2 for panel surface temperature, A1-B1-C3-D2-E2 for fin temperature, A1-B1-C3-D2-E3 for outlet temperature.

Keywords: Air-based PVT, fin, panel surface temperature, Taguchi Method, analysis of variance

¹ Ahmet Numan ÖZAKIN (Orcid ID: 0000-0003-2656-2450), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Atatürk, Erzurum, Turkey

² Ferhat KAYA (Orcid ID: 0000-0002-8165-83000), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Iğdır, Iğdır, Turkey

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ferhat KAYA, e-mail: ferhat.kaya@igdir.edu.tr

GİRİŞ

Fotovoltaik (PV) paneller güneşten gelen ışığı direkt elektrik enerjisine dönüştürür. PV panellerin enerji dönüşüm verimleri panel çeşidine ve dış ortam şartlarına bağlı olarak %8-20 arasındadır. Güneşten gelen radyasyonun bir kısmı yansıtılır, çok büyük bir oranı ısıl enerjiye dönüşür ve panel sıcaklığının aşırı ısınmasına yol açar. Panel yüzeyleri özellikle yaz aylarında aşırı ısınır ve elektrik veriminin düşmesine neden olur. Panel yüzeyinde ideal çalışma sıcaklığının üzerindeki her 1 °C sıcaklık artışı elektrik verimini yaklaşık % 0.5 azaltır (Gang ve ark., 2011; Kumar ve Rosen. 2011; Dubey ve Tay. 2013; Baloch ve ark., 2015; Yang ve Athienitis, 2015; Chandel ve Agarwal, 2017; Shukla ve ark., 2017; Özakin ve Kaya, 2019). PVT sistemleri hem elektrik üretimi için hem de atık ısıyı PV panellerinden uzaklaştırarak farklı faydalı amaçlarda (iç mekan ısıtma, su ısıtma, meyve veya sebze kurutma vb) kullanmak için tasarlanmışlardır. PVT sistemlerinde soğutucu olarak hava, su, nano-akışkanlar ve PCM'ler kullanılır (Joshi ve Tiwari, 2007; Dubey ve Tay, 2008; Kumar ve Rosen, 2011a; Saidur ve ark., 2012; Elsaifi ve Gandhidasan, 2015; Yang ve Athienitis, 2015; Bayrak ve ark., 2017; Chandel ve Agarwal, 2017; Slimani ve ark., 2017; Chauhan ve ark., 2018; Kazemian ve ark., 2018; Wu et al., 2019; Özakin ve Kaya, 2019).

Yapılan bir çalışmada fotovoltaik panelin sıcaklık profili zamana bağlı olarak kararsız ortam şartlarında incelenmiş (Jones ve Underwood, 2001). Bulutlu ve açık atmosfer koşullarında, 24.5 °C ortam sıcaklığında PV modül sıcaklığının 27-52 °C aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. S. Arabistan'ın Dahran şehrinde gerçekleştirilen bir çalışmada su bazlı PVT kullanılarak hücre sıcaklığının Haziran ayında 71.2 °C'den 45.1 °C'ye, Aralık ayında ise 48.3 °C'den 36.4 °C'ye düştüğü görülmüştür (Baloch ve arkadaşları, 2015). Irak'ın Kerkük şehrinde gerçekleştirilen bir çalışmada, polikristal panel kullanılan hava soğutmalı PVT'nin termodinamik analizi yapılmış, fan hava hızı 0.024 m³sn⁻¹ den 0.057 m³sn⁻¹ ye yükseltildiğinde elektrik ve termal verimlerin sırasıyla %20 ve %44 oranında arttığı ifade edilmiştir (Ömer ve Zala, 2018). Tiwari ve Sodha (2007) havanın kütle akış hızı arttıkça sistemin toplam veriminin arttığını belirtmişlerdir. Avustralya'nın Sidney şehrinde sırsız, tek geçişli, açık döngülü bir hava bazlı PVT sisteminin analizinde hava kütle debisinin arttıkça, termal ve elektriksel verimlerin sırasıyla %55 ve %12.2'ye yükseldiği ifade edilmiştir (Bambrook ve Sproul, 2012). Sarhaddi ve ark., 2010 sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel ölçümlerin iyi bir uyum içinde olduğunu bildirmişler. Ayrıca, PVT sistemin ısı verimi, elektriksel verimi, genel enerji verimi ve ekserji veriminin sırasıyla yaklaşık %17.18, %10.01, %45 ve %10.75 olduğunu ifade etmişler.

Isı transferini artırmak ve böylece panelden daha fazla miktarda atık ısı çekmek için kanatçıklar kullanılır. Alüminyum kanatçık kullanılan PVT sisteminde hava kütle debisi 0.0316 kg sn⁻¹den 0.09 kg sn⁻¹ ye yükselirken toplam verimin %49.15' ten %62.82' ye yükseldiği belirtilmiştir (Alfegi et al. 2009). Kanatçık ilave edilmiş çift geçişli bir hava soğutmalı PVT sistemi incelenmiş ve hücre sıcaklığının 88 °C'den 66 °C'ye ifade edilmiş (Kumar ve Rosen, 2011b). Ayrıca, 500 W m⁻² ışınım değeri ve 25 °C giriş havası sıcaklığı için fan hızı 0.03 m sn⁻¹den 0.15 m sn⁻¹ e yükseltildiğinde, termal verim %46' dan %62' ye ve elektrik veriminin ise %15' den %17' ye yükseldiği vurgulanmıştır. Türkiye'nin Erzurum ilinde gerçekleştirilen bir çalışmada hava bazlı PVT sisteminin enerji ve ekserji analizleri incelenmiştir. Seyrek (27 adet) ve sık (55 adet) kanatçık kullanılması sonucunda polikristal ve monokristal panellerin ekserji veriminin sırasıyla %70 ve %30 arttığı, termal veriminin ise sırasıyla %55 ve %70 arttığı bildirilmiştir. Ayrıca, panel yüzey sıcaklığının 10-15 °C aralığında azaldığı kaydedilmiştir. Singapur'da yapılan bir çalışmada su soğutmalı PVT' nin analizinde ısı verim ve elektrik veriminin monokristal panel için %40.7 ve %11.8, polikristal panel için %39.4 ve %11.5 olduğu gözlenmiştir (Dubey ve Tay, 2013). Ayrıca, soğutma sonrası verimde % 0.4 artış gözlenmiştir. Hindistan'ın Yeni Delhi şehrinde

yapılan araştırmada PVT sisteminin toplam termal veriminde %18 artış sağlandığı ifade edilmiştir (Tiware ve ark., 2006). İran'ın Kirman şehrinde gerçekleştirilen bir çalışmada hava soğutmalı PVT sisteminin deneysel ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırmış (Shahsavar ve Ameri, 2010).

Panelden daha fazla miktarda ısının çıkarılmasını sağlamak için hava kanalının ortasına alüminyum tabaka yerleştirilmiştir. Deneylerde farklı sayılarda fan (iki, dört ve sekiz fan) kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar ile çok uyumlu olduğunu, fan sayısının elektrik verimini artırmada etkili olduğu ve fotovoltaik panellere cam kapak yerleştirilerek ısı verimin artırılacağı ifade edilmiştir. S. Arabistan'ın Dahran şehrinde su soğutmalı PVT sisteminde yapılan bir çalışmada verimin %9 arttığı, hücre sıcaklığının %20 azaldığı, sayısal ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu bildirilmiştir (Bahaidarah ve ark., 2013). Hindistan'ın Kottayam şehrinde PCM kullanılan su bazlı PVT sisteminde gerçekleştirilen bir çalışmada elektrik, termal ve toplam verimlerin sırasıyla %13.72, %26.87 ve %40.59 olduğu, ve konvansiyonel PV panel ile karşılaştırıldığında elektrik veriminde %17.33 oranında bir artış sağlandığı kaydedilmiştir (Maatallah ve ark., 2019). Yeni Delhi'de yapılan bir çalışmada, ince film kullanılan su bazlı PVT sisteminde elektrik, termal ve ekserji verimi incelenmiş (Gaur ve Tiware, 2014). Elektrik verimi konvansiyonel panelde %6.85 iken PVT sisteminde %7.36 olduğu, PVT'nin genel termal ve ekserji verimlerinin sırasıyla %22 ve %7.33 olduğu belirtilmiştir.

Bir sistemin performansı üzerinde etkili olan işletme parametrelerinin optimizasyonu sistemi iyileştirmek ve performansı artırmak için son derece önemlidir. Son yıllarda farklı analiz metotları ile PV panellerin optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Hindistan, Yeni Delhi'de bazı parametrelerin (kanalın uzunluğu ve derinliği, fan hızı, tedlar ve cam kalınlığı, giriş sıvısı sıcaklığı) PVT sisteminin verimi üzerindeki etkisi Genetik Algoritma (GA) kullanılarak analiz edilmiş. Optimizasyon sonrası toplam ekserji verimliliğinde ve toplam termal verimde sırasıyla %4.6 ve %13.14 oranında iyileşme olduğunu ifade etmişler (Singh ve ark., 2015a). Tayvanda gerçekleştirilen bir araştırmada Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve Taguchi Metodu kullanılarak PVT sisteminin elektrik ve ısı verimini etkileyen parametrelerin optimizasyonu yapılmış (Kou ve ark., 2019). Optimize edilmiş PVT sisteminin elektrik ve ısı verimlerinin sırasıyla %12.74' den %14.29' a ve %4.06' dan %44.96' ya yükseldiğini açıklamışlar. Başka bir çalışmada, PVT sistemindeki parametrelerin (kanal derinliği, kanal uzunluğu, ısı transfer katsayısı) optimizasyonu Genetik Algoritma (GA) kullanarak incelenmiş ve %16.88 ekserji verimi elde edilebileceği bildirilmiştir (Singh ve ark. 2015b). Başka bir çalışmada PVT sistemindeki parametrelerin (kanal derinliği, kanal uzunluğu, akışkanın akış hızı, hücreden çevreye toplam ısı aktarım katsayısı hücreden sıvıya toplam ısı aktarım katsayısı, akışkandan çevreye toplam ısı transfer katsayısı) optimizasyonu Genetik Algoritma - Bulanık Sistem (GA-BS) yaklaşımı kullanılarak incelenmiş, ve GA yaklaşımı kullanılan PVT ile GA'sız PVT'in performansları karşılaştırılmıştır (Singh ve Agrawal, 2015).

GA-BS yaklaşımı ile optimize edilmiş sistemden elde edilen toplam ekserji verimliliği, GA ve optimize edilmemiş sistemle optimize edilmiş sistemin verimliliğinden sırasıyla %1.27 ve %5.40 daha fazla olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, GA – BS yaklaşımının GA ile kıyaslandığında daha hızlı yakınsamaya sahip olduğu sonucuna varmışlardır. İran'ın Tahran şehrinde yapılan çalışmada PVT sistemin tasarım parametreleri Genetik Algoritma kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir: 1. Giriş havası sıcaklığı, PVT hava toplayıcısının genişliği ve kanal uzunluğu arttığında, PVT sisteminin genel enerji ve termal verimi azalır; 2. Arka yalıtım kalınlığı, tedlar kalınlığı, cam kapağın kalınlığı veya silikon güneş pilinin kalınlığı artarken, PVT sisteminin genel enerji ve termal verimi artar; 3. Kütle akış hızının artması veya ısı transfer katsayısının (ışınım katsayısı) düşürülmesi sonucu genel verim artar; 4. Sayısal simülasyon sonuçları deneysel ölçümlerle uyumludur. Yapılan bir

başka çalışmada PVT sisteminin tasarım parametreleri (kanal derinliği, kanal uzunluğu, tedlar kalınlığı ve cam kapak, vb.) genetik algoritma kullanılarak optimize edildiğinde genel ekserji verimliliğinde %11.27 iyileşme olduğu açıklanmıştır (Singh ve ark. 2014). İran'ın Zahidan şehrinde yapılan çalışmada PVT su toplayıcısının ekserji verimini optimize etmek için Genetik Algoritma (GA) kullanılmış ve maksimum ekserji verimi %11.36 olduğu belirtilmiştir (Sobhnamayan ve ark., 2014). Ayrıca, simülasyon sonuçları ile literatürdeki (Huang et al. 2001) deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu belirtilmiştir. Bir başka çalışmada, PVT'deki tasarım değişkenleri Evrimsel Algoritma (EA) kullanılarak optimize edilmiş, ekserji ve termal verimlilikte sırasıyla %69.52 ve %88.05 oranında iyileşme olduğu bildirilmiştir (Singh ve ark., 2015c).

Literatür çalışmaları incelendiğinde hava bazlı PVT sistemlerinin optimizasyonu konusunda çalışmalar bulunmasına rağmen PVT sisteminin tasarım parametrelerinin panel yüzey sıcaklığına etkisi ve optimizasyonu konusunda bir çalışma olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada, kanatçık ilave edilmiş hava soğutmalı PVT sisteminde kontrol parametrelerin (panelin arka tarafının yüzey sıcaklığı, fan hızı, kanal derinliği, kanatçık konfigürasyonu, kanatçık malzemesi) panel yüzey sıcaklığına etkisi Taguchi Yöntemi kullanılarak incelendi ve en uygun tasarım kombinasyonu belirlendi. Ayrıca varyans analizi (ANOVA) ile parametrelerin etki oranları tesbit edildi.

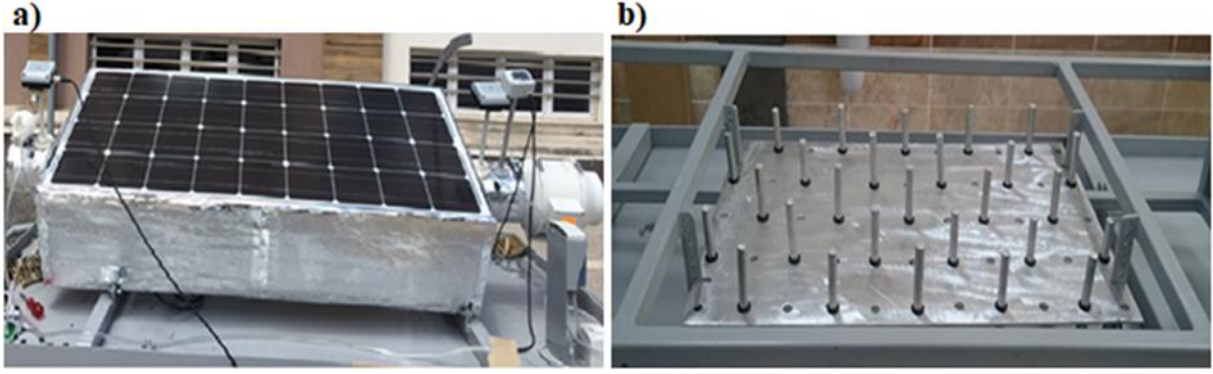
MATERYAL VE YÖNTEM

Deney Düzenegi

Şekil 1.a PV panel ve ölçüm cihazlarından oluşan mobil deney düzenegini göstermektedir. Deneyler Erzurum'da 2016 yılının Temmuz ayında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bahçesinde gerçekleştirildi. Şekil 1.b' de gösterilen hava soğutma kanalının ana iskeleti çelikten imal edilmiştir. Kanalın tabanı ve kenarları Pleksiglas (5mm) ile kaplandı. Pleksiglas'ın kanal ile kesiştiği köşelerde sızdırmazlık silikon ile sağlandı. Isı yalıtımını sağlamak için kanalın tabanı ve yanları 20 mm cam yünü ve en dış kısmı alüminyum bant ile kaplandı. Deneylerde monokristal PV panel kullanıldı ve teknik özellikleri Çizelge 1' de verildi. PVT sisteminde biriken atık ısıyı uzaklaştırmak ve panelin verimliliğini artırmak için kanatçıklar kullanıldı. Bakır, alüminyum ve pirinçten yapılmış kanatçıkların fiziksel özellikleri Çizelge 2' de verilmiştir. Kanalın alt katmanına delikler açılmış ve kanatçıklar o-ring kullanılarak deliklere sabitlenmiştir. PV panel kanalın üstüne sıkıca kenetlenmiş olarak yerleştirilmiştir. Kanalın uzunluğu ve genişliği panelin ölçüleriyle aynı olup derinliği 100 mm' dir. Kanala hava üfleme için S & P eksenel fan kullanıldı. Kanalın giriş ve çıkış hava sıcaklığı NOVUS-RHT sıcaklık ölçer kullanılarak ölçüldü. Panel yüzey sıcaklığı, panel arka sıcaklığı ve kanatçık sıcaklıkları T tipi termokupllar (%40 Ni, %60 Cu alaşımı) kullanılarak ölçüldü. Tüm ölçüm cihazları kalibre edildi ve gerekli aralıklara göre ayarlandı. Fan havası hızı sıcak telli anemometre kullanılarak ölçüldü. Veriler NOVUS marka bir veri kaydedici kullanılarak kaydedildi.

Çizelge 1. Monokristal panelin teknik özellikleri.

Güç	Üretim Toleransı	Max. Akım	Max. Voltaj	Kısa Devre Akımı	Kısa Devre Voltajı	Ağırlık	Boyutlar
100W	Max 3%	5.17 A	19.35 V	5.53 A	22.6 V	10 kg	1195x545x36 mm



Şekil 1. Deney düzeneği. (a) Dış ortam testleri için monokristal panel kullanılan mobil PVT sistemi ve ölçüm cihazları, (b) Soğutma kanalının seyrek kanatçık konfigürasyonu.

Çizelge 2. Kanatçıkların fiziksel özellikleri.

Kanatçık Malzemesi	Özgül ağırlık (kg d ⁻¹ m ⁻³)	Termal iletkenlik (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Özgül ısı kapasitesi (kcal kg ⁻¹ K ⁻¹)	Direnç (μΩ)	Erime noktası (°C)
Bakır	8.9	336	0.092	1.71	1065-1085
Alüminyum	2.7	200	0.227	2.8	646-657
Pirinç	8.415	100	0.09	6.39	885-890

Optimizasyon Analizi

Çalışma konularına ve amaçlarına göre araştırmacıların farklı optimizasyon yöntemlerini kullandıkları görülmüştür. Bu çalışmada hava soğutmalı PVT sistemde tasarım parametrelerinin panel yüzey sıcaklığına etkisini incelemek ve parametrelerinin en uygun kombinasyonunu belirlemek amaçlanmıştır. Bunun için, minimum denemelerle en kısa şekilde sonuca ulaşmayı sağlayan Taguchi Yöntemi kullanılarak parametrelerin etki dereceleri ve en uygun kombinasyonu belirlendi. Varyans analizi yapılarak parametrelerin etki oranları tesbit edildi.

Taguchi yöntemi

Taguchi Yöntemi bir sistemin performans özellikleri üzerinde etkili olan faktörleri optimize etmek için kullanılır. Taguchi Yöntemi çok sayıda denemeden elde edilen sonuçların minimum denemelerle elde edilmesini sağlar ve kontrol parametrelerinin önem sırasını tanımlar. Ek olarak, bu yöntem sistemdeki en etkili parametreyi ve her parametrenin en iyi seviyesini belirler. Taguchi Yöntemi olası tüm kombinasyonları test etmek yerine kombinasyon çiftlerini test eder. Taguchi yöntemi; ortogonal dizi sinyal/gürültü oranı (signal/noise ratio, S/NR veya SNR), yanıt çizelgesi ve yanıt grafiğinden (Ana Etki Analizinden, Main Effect Analysis (MEA)) oluşur. Denemeler ortogonal dizilerde gösterilir. Kontrol parametreleri tanımlanır ve matrisin sütunlarına atanır. Kontrol parametrelerinin seviye sayıları belirlenir. Sistem için gereken minimum deneme sayısı hesaplanır ki bu sayı matris satırlarının sayısıdır. Matristeki her satır farklı deneme parametresi seviyelerinin bir kombinasyonudur. Ortogonal dizilerin sütunlarındaki kontrol parametrelerinin değerleri SNR'ye dönüştürülür. SNR değerleri kontrol parametrelerinin etki seviyelerini temsil eder. Her parametrenin en yüksek SNR değeri bu parametrenin optimal seviyesini gösterir ve sistemin performansı üzerindeki etkisinin de en yüksek olduğu anlamına gelir. Daha sonra, her bir performans değeri için optimum kontrol faktörleri kullanılarak yanıt grafiği (MEA) çizilir ve kontrol faktörlerinin performans üzerindeki etkisi analiz edilir. SNR üç farklı performans özelliği ile analiz edilir: daha büyük-daha iyidir, nominal-daha iyidir ve daha küçük - daha iyidir. Bu çalışmada SNR değerlerini hesaplamak için Eşitlik 1 kullanıldı (Huy ve ark., 2014; Fan ve ark., 2018; Hong ve ark., 2018; Hosseinzadeh ve ark., 2018; Kou ve ark., 2019). Sinyal faktörü kullanıcı

tarafından kontrol edilen faktörler (çalışmamız için fan hızı, kanal uzunluğu, ve kanatçık malzemesi gibi), gürültü faktörü kontrol edilemeyen ancak işlemin sonucunu etkileyen (dış ortam sıcaklığı ve nem gibi) faktörlerdir (Kotcioglu et al.2013).

$$\frac{S}{N} = -10\log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (1)$$

burada n denemedeki tekrar sayısı, y ise yanıttır.

Varyans analizi

Varyans analizi (ANOVA) kontrol parametrelerinin kalite özelliklerine katkı oranını gösteren, Taguchi analizini destekleyen ve tamamlayan bir analizdir. Taguchi analizi, kontrol parametrelerinin kalite özellikleri üzerindeki etki seviyelerini gösterirken, ANOVA bu parametrelerin katkı oranını temsil eder. Serbestlik derecesi, parametrelerin karelerinin toplamı, karelerin toplamı, parametrelerin varyansı, parametrelerin F-oranı ve parametrelerin birleşiminden oluşur. Kontrol parametreleri 95 veya 99 'luk güven seviyesi kullanılarak test edilir ve Taguchi yönteminde ortogonal dizilerden elde edilen SNR verileri kullanılır. (Le ve ark., 2014; Fan ve ark., 2018; Kuo ve ark., 2019).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Panel yüzey sıcaklığı panel verimi üzerinde çok önemli etkiye sahiptir. Özellikle yaz aylarında panel yüzey sıcaklığında görülen aşırı artış panel verimini olumsuz etkiler. Panel yüzeyi soğutulmuş bu olumsuzluk azaltılabilir. Bu çalışmada kanatçık ilave edilmiş hava soğutmalı PVT' de Taguchi Yöntemi kullanılarak hem tasarım parametrelerinin panel yüzey sıcaklığına etkisi incelendi hem de en uygun tasarım kombinasyonu belirlendi. ANOVA ile tasarım parametrelerinin etki oranları belirlendi. Sonuçlar aşağıda detaylandırılmıştır.

Taguchi Yöntemi İle Optimizasyon Analizi

Taguchi Yönteminde denemeler Minitab18 yazılımı kullanılarak gerçekleştirildi. Bu çalışmada kalite faktörü olarak panel yüzey sıcaklığı, kanatçık sıcaklığı ve çıkış sıcaklığı seçildi. Kontrol parametreleri olarak; kanatçık konfigürasyonu (A), kanatçık malzemesi (B), kanal derinliği (C), fan hızı (D) ve panelin arka yüzey sıcaklığı (E) belirlenmiştir. Her kontrol parametresi için belirlenen seviyeler; Kanatçık konfigürasyonu: Sık (A1), seyrek (A2). Kanatçık malzemeleri: Bakır (B1), alüminyum (B2), pirinç (B3). Kanal derinliği: 50 mm (C1), 75 mm (C2), 100 mm (C3). Fan hızları: 5.1 m s⁻¹ (D1), 5.4 m s⁻¹ (D2) ve 5.7 m s⁻¹ (D3). Panelin arka yüzey sıcaklığı: 47.1°C (E1), 47.8 °C (E2), 48.5 °C (E3). Çizelge 3' te her kontrol parametresine ait seviyeler gösterilmiştir. Deneyler üç farklı malzemeden imal edilmiş kanatçıkların sık ve seyrek konfigürasyonlarında gerçekleştirildi. Fan üç farklı hızda çalıştırılarak hava kanala üflendi. Panelin arka yüzey sıcaklıkları termokupullar ile ölçülerek ortalamaları alınmıştır. Deneysel çalışmamızda kullanılan kanalın derinliği 100 mm'dir. Kanal derinliği seviyelerine 50 mm ve 75 mm değerleri tanımlanarak kıyaslama yapmak amaçlanmıştır. Panel yüzey sıcaklığı, kanatçık sıcaklığı ve çıkış sıcaklığına ait optimal değerleri elde etmek için maksimum SNR değeri ile kontrol parametrelerinin en iyi kombinasyonunu gösteren seviyeler belirlenmiştir.

Çizelge 3. Kontrol parametreleri ve seviyeleri.

Kontrol parametresi	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kanatçık konfigürasyonu (A)	sık (A1)	seyrek(A2)	
Kanatçık malzemesi (B)	bakır (B1)	alüminyum (B2)	pirinç (B3)
Kanal derinliği (C)	50 mm(C1)	75 mm(C2)	100 mm(C3)
Fan hızı (D)	5.1 ms ⁻¹ (D1)	5.4 ms ⁻¹ (D2)	5.7 ms ⁻¹ (D3)
Panelin arka yüzey sıcaklığı (E)	47.1°C (E1)	47.8 °C (E2)	48.5 °C (E3)

Dört kontrol parametresinin seviye sayısı üç ve bir parametrenin de seviye sayısı iki olduğundan $3^4 * 2^1$ olmak üzere tam faktöriyel deney yapılması durumunda 162 deneme gerçekleştirilmelidir. Taguchi Yöntemi sayesinde 162 deneme yerine 18 deneme ile optimum sonuca ulaşılır. Minitab programında deney planı için Çizelge 4'te gösterilen L18 ortogonal dizisi tasarlandı. L18, optimizasyon için gereken minimum deneme sayısı ve ortogonal dizinin satır sayısıdır. Matrisin her satırı, farklı test parametresi seviyelerinin bir kombinasyonudur. Kontrol parametreleri ortogonal dizinin sütunlarına atandı. Ayrıca her test için panel yüzey sıcaklığı, kanatçık sıcaklığı ve çıkış sıcaklığına ait SNR değerleri hesaplanmıştır ve ortogonal dizinin sütunlarına atandı. SNR değerleri hesaplanırken, panel yüzey sıcaklığı için 'daha küçük-daha iyidir (Smaller is better)', kanatçık sıcaklığı ve çıkış sıcaklığı için 'daha büyük-daha iyidir (Larger is better)' performans özellikleri kullanıldı. Çünkü panel yüzey sıcaklığındaki düşüş PV panel performansı için pozitif bir göstergedir, kanatçık sıcaklığı ve çıkış sıcaklığındaki artış ise panelden daha fazla miktarda ısının uzaklaştırıldığı anlamına gelir, bu ise PV panel performansının artması demektir.

Çizelge 4. L18 Ortogonal Deney Tasarımı ve SNR Değerleri

Sıra	Parametreler					T ve SNR değerleri					
	A	B	C	D	E	T(yüzey)	SNR1	T(kanatçık)	SNR2	T(çıkış)	SNR3
1	1	1	1	1	1	302.56	-49.62	309.96	49.83	296.33	49.44
2	1	1	2	2	2	302.05	-49.60	320.20	50.11	297.92	49.49
3	1	1	3	3	3	305.40	-49.70	328.40	50.33	299.50	49.53
4	1	2	1	1	2	305.51	-49.70	320.64	50.12	295.74	49.42
5	1	2	2	2	3	306.70	-49.73	329.30	50.35	299.20	49.52
6	1	2	3	3	1	307.50	-49.76	327.45	50.33	299.40	49.52
7	1	3	1	2	1	305.70	-49.71	326.62	50.28	298.81	49.51
8	1	3	2	3	2	297.28	-49.46	310.27	49.83	295.71	49.42
9	1	3	3	1	3	302.20	-49.61	315.22	49.97	297.07	49.46
10	2	1	1	3	3	297.38	-49.47	311.00	49.86	294.64	49.39
11	2	1	2	1	1	300.86	-49.57	319.03	50.08	294.06	49.37
12	2	1	3	2	2	302.43	-49.61	330.26	50.38	295.22	49.40
13	2	2	1	2	3	299.43	-49.53	319.47	50.09	294.71	49.39
14	2	2	2	3	1	292.51	-49.32	300.70	49.56	293.16	49.34
15	2	2	3	1	2	296.00	-49.43	310.67	49.85	294.33	49.38
16	2	3	1	3	2	301.16	-49.58	323.67	50.20	296.00	49.43
17	2	3	2	1	3	296.42	-49.44	307.24	49.75	292.13	49.31
18	2	3	3	2	1	298.64	-49.50	317.30	50.03	295.33	49.41

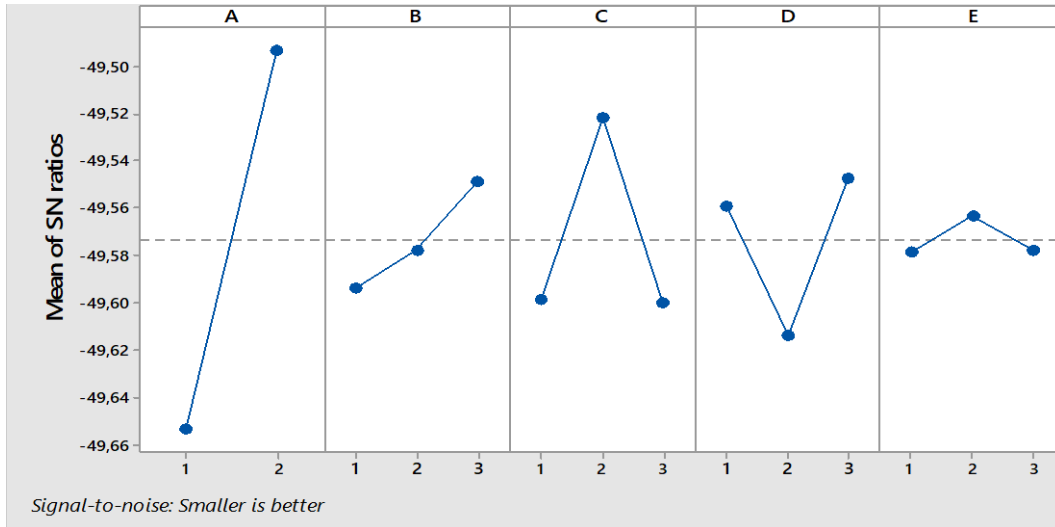
Her parametrenin en yüksek SNR değeri bu parametrenin optimum değerini gösterir. Her denemenin en yüksek SNR değerlerini kullanarak her bir kontrol parametresinin farklı seviyeleri için karşılık gelen değerler elde edildi ve Çizelge 5'te gösterildi.

Çizelge 5. Yüzey sıcaklığını ($T_{yüzey}$), kanatçık sıcaklığını (T_{kanat}) ve çıkış sıcaklığını ($T_{çıkış}$) etkileyen her bir kontrol parametresinin etki dereceleri (Rank) ve katkı oranları (KO). (A: kanatçık konfigürasyonu, B: kanatçık malzemesi, C: kanal derinliği, D: fan hava hızı, E: panelin arka yüzey sıcaklığı).

	$T_{yüzey}$					T_{kanat}					$T_{çıkış}$				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Rank	1	4	2	3	5	3	4	2	1	5	1	4	3	2	5
KO(%)	48.32	2.52	9.76	6.06	0.39	10.30	2.54	11.58	26.36	1.21	62.09	0.72	7.88	14.89	0.61

Çizelge 5' deki Taguchi analizi sonuçları dikkate alındığında, panel yüzey sıcaklığı ($T_{\text{yüzey}}$) üzerinde etkili olan kontrol parametrelerinin sırasıyla kanatçık konfigürasyonu (A), kanal derinliği (C), fan hızı (D), kanatçık malzemesi (B) ve panelin arka yüzey sıcaklığı (E) olduğu; kanatçık sıcaklığı ($T_{\text{kanatçık}}$) üzerinde etkili olan kontrol parametrelerinin sırasıyla fan hızı (D), kanal derinliği (C), kanatçık konfigürasyonu (A), kanatçık malzemesi (B) ve panelin arka yüzey sıcaklığı (E) olduğu; çıkış sıcaklığı ($T_{\text{çıkış}}$) üzerinde etkili olan kontrol parametrelerinin sırasıyla kanatçık konfigürasyonu (A), fan hızı (D), kanal derinliği (C), kanatçık malzemesi (B) ve panelin arka yüzey sıcaklığı (E) olduğu görülmektedir. Ayrıca, panel yüzey sıcaklığı, kanatçık sıcaklığı ve çıkış sıcaklığı için en etkili parametrelerin kanatçık konfigürasyonu, fan hızı ve kanal derinliği olduğu görülmektedir.

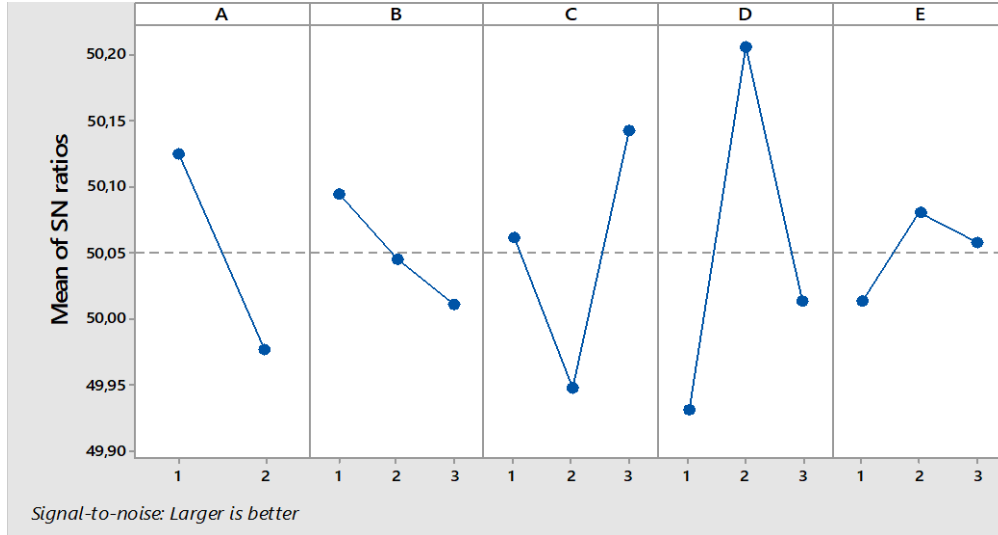
Şekil 2-4' te SNR'e ait yanıt grafikleri görülmektedir. Grafikler yanıt çizelgesindeki optimal kontrol faktörlerine ait değerler kullanılarak çizilmiştir. Şekil 2-4 dikkate alındığında optimal tasarım kombinasyonu, panel yüzey sıcaklığı, kanatçık sıcaklığı ve çıkış sıcaklığı için sırasıyla A2-B3-C2-D3-E2, A1-B1-C3-D2-E2 ve A1-B1-C3-D2-E3 olduğu görülmektedir. Yani sık kanatçık konfigürasyonu, bakır malzemeden yapılmış kanatçık, 100 mm kanal derinliği, 5.7 ms^{-1} fan hızı ve $48.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ panel arka yüzey sıcaklığı hava soğutmalı PVT sistemi için en iyi tasarım kombinasyonudur. Deneyde kullandığımız kanalın derinliği 100 mm olup mevcut durumda en optimal tercih olduğu görüldü. Ayrıca sık kanatçık konfigürasyonu ve bakır kanatçık kullanılması sonucunda daha yüksek elektrik, termal ve ekserji verimleri elde edildiği daha önceki çalışmalarda görülmüştü (Özakin ve Kaya, 2019, Özakin ve Kaya, 2020).



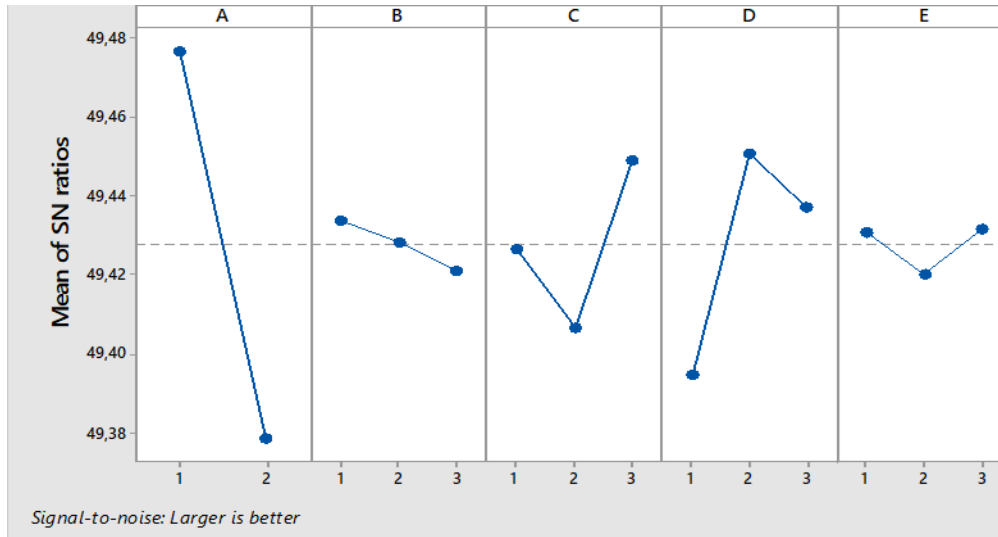
Şekil 2. Kontrol faktörlerinin yüzey sıcaklığı ($T_{\text{yüzey}}$) üzerine etkisini gösteren SNR yanıt grafiği.

Varyans Analizi (ANOVA) İle Kontrol Parametrelerinin Katkı Oranlarının Belirlenmesi

ANOVA için Çizelge 4' deki ortogonal dizilerden elde edilen SNR değerleri kullanıldı. Kontrol parametrelerinin anlamlılık testi %95 güven düzeyine göre yapıldı. ANOVA sonuçlarından elde edilen katkı oranları incelendiğinde Taguchi sonuçlarını desteklediği gözlenmiştir. Kontrol parametrelerinin yüzey sıcaklığı, kanat sıcaklığı ve çıkış sıcaklığına katkı oranları Çizelge 5' te gösterilmiştir. Taguchi analizinde ifade edilen en etkili parametreler olan kanatçık konfigürasyonu, fan hızı ve kanal derinliğinin ANOVA sonrası katkı oranları incelendiğinde; panel yüzey sıcaklığına sırasıyla %48.32, %6.06 ve %9.76; kanatçık sıcaklığına sırasıyla % 10.30, % 26.36 ve %11.58; çıkış sıcaklığına ise sırasıyla % 62.09, % 14.89 ve %7.88 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. Kontrol faktörlerinin kanat sıcaklığı (T_{kanat}) üzerine etkisini gösteren SNR yanıt grafiği.



Şekil 4. Kontrol faktörlerinin çıkış sıcaklığı ($T_{çıkış}$) üzerine etkisini gösteren SNR yanıt grafiği.

Çizelge 5. Çıkış sıcaklığına ait ANOVA çizelgesi (SD: Serbestlik derecesi, KO: Katkı oranı)

Kontrol Parametreleri	SD	Kareler Top.	KO(%)	Ort. Kareler	F değeri	P değeri
A	1	0.000000	62.09	0.000000	35.96	0.000
B	2	0.000000	0.72	0.000000	0.21	0.817
C	2	0.000000	7.88	0.000000	2.28	0.164
D	2	0.000000	14.89	0.000000	4.31	0.054
E	2	0.000000	0.61	0.000000	0.18	0.842
Hata	8	0.000000	13.81	0.000000		
Toplam	17	0.000000	100			

SONUÇ

Bu çalışmada, kanatçık ilave edilen hava soğutmalı PVT sisteminde tasarım parametrelerinin (panelin arka yüzey sıcaklığı, fan hızı, kanal derinliği, kanatçık konfigürasyonu, kanatçık malzemesi)

panel yüzey sıcaklığı, kanatçık sıcaklığı ve kanal çıkış sıcaklığına etkisinin optimizasyonu Taguchi Metodu ve ANOVA kullanılarak incelendi. Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Taguchi analizi sonucu kontrol parametrelerinin etkisi incelendiğinde herbir kalite faktörü için en etkili üç parametrenin: panel yüzey sıcaklığı ($T_{yüzey}$) için sırasıyla kanatçık konfigürasyonu (A), kanal derinliği (C), fan hızı (D) olduğu; kanatçık sıcaklığı ($T_{kanatçık}$) için sırasıyla fan hızı (D), kanal derinliği (C), kanatçık konfigürasyonu (A) olduğu; çıkış sıcaklığı ($T_{çıkış}$) için sırasıyla kanatçık konfigürasyonu (A), fan hızı (D), kanal derinliği (C) olduğu; $T_{yüzey}$, $T_{kanatçık}$ ve $T_{çıkış}$ üzerinde kanatçık malzemesi (B) ve panelin arka yüzey sıcaklığının (E) önemli bir etkisinin olmadığı görüldü.
- Ayrıca optimal tasarım kombinasyonu, panel yüzey sıcaklığı için A2-B3-C2-D3-E2 olduğu, kanatçık sıcaklığı için A1-B1-C3-D2-E2 olduğu, çıkış sıcaklığı için A1-B1-C3-D2-E3 olduğu görülmüştür.
- Mevcut tasarım için en etkili parametreler olan kanatçık konfigürasyonu, fan hızı ve kanal derinliğidir. ANOVA sonrasındaki bu parametrelerin katkı oranları; panel yüzey sıcaklığı için sırasıyla % 48.32, % 6.06 ve %9.76; kanatçık sıcaklığı için sırasıyla % 10.30, % 26.36 ve %11.58; ve çıkış sıcaklığı için sırasıyla % 62.09, % 14.89 ve %7.88 olduğu bulunmuştur.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi tarafından BAP/2015-147 numaralı proje kapsamında sağlanan mali desteğe şükranlarını sunarlar.

KAYNAKLAR

- Ali Alfegi EM, Sopian K, Othman MY, Yatim B, 2009. The effect of flow rates on the performance of finned single pass. double duct photovoltaic thermal solar air heaters. *European Journal of Scientific Research*. 25(2). 339-344.
- Al-Waeli AHA, Sopian K, Kazem HA, Chaichan MT, 2017. Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 77: p. 109-130.
- Bahaidarah HMS, Subhan A, Gandhidasan P, Rehman S, 2013. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy*. 59: p. 445-453.
- Bayrak F, Hamdeh NA, Alnefaie KA, Öztop HF, 2017. A review on exergy analysis of solar electricity production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 74: p. 755-770.
- Chauhan A, Tyagi V, Anand S, 2018. Futuristic approach for thermal management in solar PV/thermal systems with possible applications. *Energy Conversion and Management*. 163: p. 314-354.
- Cuce E, Cuce PM, Bali T, 2013. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Applied Energy*. 111: p. 374-382.
- Dubey S, Tay AAO, 2013. Testing of two different types of photovoltaic–thermal (PVT) modules with heat flow pattern under tropical climatic conditions. *Energy for Sustainable Development*. 17(1): p. 1-12.
- Elsafi AM, Gandhidasan P, 2015. Comparative study of double-pass flat and compound parabolic concentrated photovoltaic–thermal systems with and without fins. *Energy Conversion and Management*. 98: p. 59-68.
- Gang P, Huide F, Tao Z, Jie J, 2011. A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system. *Solar Energy*. 85(5): p. 911-921.
- Gaur A, Tiwari GN, 2014. Performance of a-Si thin film PV modules with and without water flow: An experimental validation. *Applied Energy*. 128: p. 184-191.
- Huang BJ, Lin TH, Hung WC, Sun FS, 2001. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy*. 70(5):443-448.
- Jones AD, Underwood CP, 2001. A thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy*. 70(4):p.349–359.
- Joshi AS, Tiwari, A, 2007. Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic–thermal (PV/T) air collector. *Renewable Energy*. 32(13): p. 2223-2241.

- Kasaeian, AB, Akhlaghi MM, Golzari S, Dehghani M, 2013. Modeling and optimization of an air-cooled photovoltaic thermal (PV/T) system using genetic algorithm. *Applied Solar Energy* 49. p.215–224.
- Kazemian A, Hosseinzadeh M, Sardarabadi M, 2018. Effect of glass cover and working fluid on the performance of photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study. *Solar Energy*. 173: p. 1002-1010.
- Kumar R, Rosen MA, 2011a. A critical review of photovoltaic–thermal solar collectors for air heating. *Applied Energy*. 88(11): p. 3603-3614.
- Kumar R, Rosen MA, 2011b. Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins. *Applied Thermal Engineering*. 31. p.1402–1410.
- Nadda R, Kumar A, Maithani R, 2018. Efficiency improvement of solar photovoltaic/solar air collectors by using impingement jets: A review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*. 93: p. 331-353.
- Omer KA, Zala AM, 2018. Experimental investigation of PV/thermal collector with theoretical analysis. *Renewable Energy Focus*. 27: p. 67-77.
- Özakin AN, Kaya F, 2019. Effect on the exergy of the PVT system of fins added to an air-cooled channel: A study on temperature and air velocity with ANSYS Fluent. *Solar Energy*. 184: p. 561-569.
- Özakin AN, Kaya F, 2020. Experimental thermodynamic analysis of air-based PVT system using fins in different materials: Optimization of control parameters by Taguchi method and ANOVA. *Solar Energy*. 197: p. 199-211.
- Sarhaddi F, Farahat S, Ajam H, Behzadmehr A, Mahdavi Adeli M, 2010. An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector. *Applied Energy* 87. 2328–2339.
- Shukla A, Kanta K, Sharma A, Biwole PH, 2017. Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 160: p. 275-286.
- Singh S, Agarwal S, Tiwari GN, Chauhan D, 2015a. Application of genetic algorithm with multi-objective function to improve the efficiency of glazed photovoltaic thermal system for New Delhi (India) climatic condition. *Solar Energy* 117: p. 153-166.
- Singh S, Agrawal S, Avasthi DV, 2014. Optimization of design parameters of glazed hybrid photovoltaic thermal module using genetic algorithm. *International Conference on “CIPECH14”*. p. 458–463.
- Singh. S. Agrawal. S.. 2015. Parameter identification of the glazed photovoltaic thermal system using Genetic Algorithm–Fuzzy System (GA–FS) approach and its comparative study. *Energy Conv.Manag.* 105: p. 763-771.
- Singh S, Agrawal S, Tiwari A, Al-Helal LM, Avasthi DV, 2015b. Modeling and parameter optimization of hybrid single channel photovoltaic thermal module using genetic algorithms. *Solar Energy* 113: p. 78-87.
- Singh S, Agrawal S, Gadh R, 2015c. Optimization of single channel glazed photovoltaic thermal (PVT) array using Evolutionary Algorithm (EA) and carbon credit earned by the optimized array. *Energy Conversion and Management*. 105: p. 303-312.
- Slimani MEA, Amirat M, Kurucz I, Bahria S, Hamidat A, 2017. A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions. *Energy Conversion and Management*.. 133: p. 458-476.
- Sobnamayan F, Sarhaddi F, Alavi MA, Farahat S, Yazdanpanahi J, 2014. Optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector based on exergy concept. *Renewable Energy*. 68:p.356–65.
- Tiwari A, Sodha MS, Chandra A, Joshi JC, 2006. Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90(2): p. 175-189.
- Tiwari A, Sodha. MS, 2007. Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: experimental validation of theoretical model. *Solar Energy Materials and Solar Cells* . 91:p. 17–28.
- Wu SY, Wang T, Xiao I, Shen ZG, 2019. Effect of cooling channel position on heat transfer characteristics and thermoelectric performance of air-cooled PV/T system. *Sol. Energy* 180: p. 489-500.
- Yang T, Athienitis AK, 2015. Experimental investigation of a two-inlet air-based building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system. *Applied Energy*. 159: p. 70-79.