

Konsantrasyonlu Fotovoltaik Termal Bir Sistemde Soğutucu Akışkan Tipi ve Kanal Geometrisinin Elektriksel Verim ve Isıtma Kapasitesine Etkisi

Burak Kurşun^{1*}, Korhan Ökten¹⁺

¹Makine Mühendisliği/Teknoloji Fakültesi, Amasya Üniversitesi, Amasya, Türkiye

*Sorumlu yazar: burak.kursun@amasya.edu.tr

+Konuşmacı: korhan.okten@amasya.edu.tr

Sunum/Makale Tipi: Sözlü sunum / Tam metin

Özet – Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte artan sera gazı emisyonları ve küresel ısınma problemleri yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını önemli ölçüde artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, biyokütle enerjisi ve hidrojen enerjisi olarak sınıflandırılabilir. Güneş enerjisi büyük ölçüde ısı radyasyon yayması, temiz ve sınırsız olması bakımından yenilenebilir enerji kaynakları arasında çok önemli bir yere sahiptir. Konsantrasyonlu fotovoltaik termal sistemler (KFVT) güneş enerjisinden elektrik ve ısı enerji elde edilmesinde kullanılan cihazlardan bir tanesidir. KFVT sistem ile güneş enerjisi direkt olarak elektriğe çevrilmekte ve bu sırada fotovoltaik modül üzerinde oluşan atık ısıdan akışkanların ısıtılmasında faydalanılmaktadır. Bu çalışmada bir KFVT sistemde farklı akışkan kullanılması ve kanal geometrisinin değiştirilmesi durumunda oluşan elektrik üretimi ve ısı kapasitesi termodinamik olarak incelenmiştir. KFVT sistem dikdörtgen bir akışkan kanalına sahip olup dikdörtgen kanalın en/boy oranı değiştirilerek elde edilen modül sıcaklıkları, elektrik üretimi ve akışkan sıcaklıkları birbiri ile karşılaştırılmıştır. Isı transfer akışkanı olarak organik soğutucular kullanılmıştır. Akışkanların değişken termodinamik özellikleri sistemin elektriksel verimini ve atık ısı miktarını farklı oranlarda etkilemiştir. Termodinamik analizler sonucu elde edilen bulgular elektrik üretimini, modül sıcaklıklarını, akışkan çıkış sıcaklıklarını ve sistem verimini içeren grafikler halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler – Fotovoltaik termal sistem, Güneş enerjisi, Soğutucu akışkan

I. GİRİŞ

Güneş enerjisinin büyük oranda ısı enerji yayması, sınırsız ve çevre dostu olması endüstriyel alandaki kullanımının yaygın hale gelmesine olanak sağlamıştır. Konsantrasyonlu fotovoltaik termal (KFVT) sistemler güneş enerjisi uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır. KFVT sistemlerle güneş enerjisi direkt olarak elektrik enerjisine çevrilebilmekte ve fotovoltaik (FV) modül üzerinde oluşan atık ısıdan akışkanların ısıtılması amacı ile faydalanılabilmektedir. KFVT sistemlerdeki elektriksel verimin ve atık ısı kazanımının artırılmasına yönelik literatürde deneysel ve sayısal çalışmalar mevcuttur.

Bahaidarah vd. yaptığı deneysel ve sayısal çalışmada FV modül üzerinde cam koruyucu bulunması ve bulunmaması durumunda atık ısı kazanımı ve elektriksel verimi ekonomik faktörleri göz önünde bulundurarak araştırmışlardır [1]. Amanlou vd. ise hava soğutmalı bir KFVT sistemde FV modül üzerindeki sıcaklık dağılımının üniform olması için sekiz farklı geometriye sahip yayıcı kullanmıştır [2]. Çalışma sonuçlarıyla yayıcı kullanımı ile elektriksel verimin arttığı ortaya konulmuştur. Hava soğutmalı bir KFVT sistemde çift hava geçiş geometrisinin ve kanat kullanımının atık ısı kazanımına etkisi Elsafi ve Gandhidasan tarafından araştırılmıştır [3]. Elde edilen sonuçlar kanat ve çift hava geçiş geometrisi kullanımı ile yıllık elektrik enerjisi ve atık ısı kazanımının sırasıyla 3% ve 8% oranında arttığını göstermiştir. Sharaf ve Orhan tarafından yapılan çalışmada ise KFVT sistemlerin termal olarak seri ve paralel

bağlanması koşullarındaki elektriksel ve ısı verim incelenmiştir [4]. Çevresel ve ekzergoekonomik faktörler göz önüne alındığında paralel bağlantının, güç çıktısı ve termodinamik faktörler göz önüne alındığında ise seri bağlantının daha avantajlı olduğu aktarılmıştır. Karathanassis vd. FV modüle monte edilmiş farklı kanat konfigürasyonları ile soğutma kapasitesini artırarak atık ısı kazanımı ve elektrik üretiminde iyileşme sağlamıştır [5]. Baljit vd. ise KFVT sistemde akışkan kanalında çift hava geçiş geometrisi ve içerisinde su akışı olan serpantin sistemi kullanmışlardır [6]. Yapılan analizlere göre soğutucu kanalda çift akışkan kullanımının, atık ısı kazanımını ve elektriksel verimi önemli ölçüde artırdığı gözlenmiştir. Fotovoltaik modülün sıvı-katı fazındaki faz değişim malzemesi ile soğutulmasının yaygın olarak kullanılan su soğutmalı yöntemle karşılaştırılması Liu vd. tarafından gerçekleştirilmiştir [7]. Elde edilen sonuçlarla faz değişim malzemesinin kullanımı ile günlük ortalama ısı ve elektriksel verimin arttığı ortaya konulmuştur. Ceylan vd. benzer şekilde KFVT sistemde faz değişim materyali olarak parafin kullanmış böylece atık ısının depolanmasını sağlamıştır [8]. Enerji depolanmanın eklenmesiyle birlikte daha etkin bir soğutma sağlanarak KFVT sistemin ısı ve elektriksel verimi artırılmıştır. Ahmed ve Radwan KFVT sistemde geleneksel silikon tabaka yerine nano-kompozit tabakalardan oluşan yeni bir yapı kullanarak sistemin ısı ve elektriksel verimini artırmışlardır [9]. Radwan ve Ahmed'in diğer bir çalışmada ise KFVT sistemde atık ısı kazanımı için dikdörtgen şekilli mikro kanallar kullanılmıştır [10].

Mikro kanalların farklı konfigürasyonları için değişken oranlarda ısı ve elektriksel verim artışı sağlanmıştır.

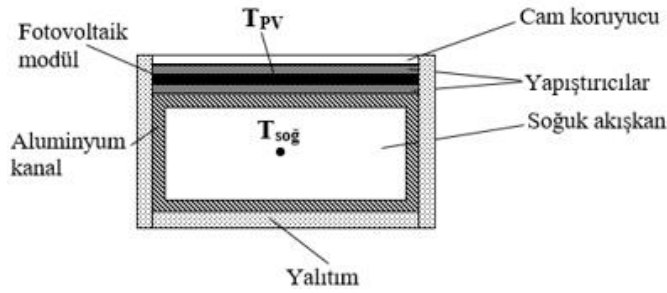
Bu çalışmada ise dikdörtgen bir akışkan kanalına sahip KFVT sistemde değişken kanal en/boy oranları için beş farklı soğutucu organik akışkan kullanılmıştır. Belirli bir akışkan debisi için kanal geometrisinin değişimiyle FV modülden akışkana farklı oranlarda ısı transferi aktarılmıştır. Ayrıca farklı soğutucu akışkan tipleri için elektrik üretimi ve atık ısı kazanımı araştırılarak en uygun kanal geometrisi ve akışkan tipi belirlenmeye çalışılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Termodinamik analizler için kullanılan KFVT sistem bileşenleri ve çözümleme için oluşturulan matematiksel model aşağıda verilmiştir.

A. Konsantrasyonlu Fotovoltaik Termal Sistem

KFVT sistem fotovoltaik modül, etilen vinil asetat yapıştırıcılar, cam koruyucu, alüminyum akışkan kanalı ve yalıtımdan meydana gelmektedir (Şekil 1). Fotovoltaik modül ile güneş enerjisi direkt olarak elektrik enerjisine çevrilmektedir. Modüle meydana gelen atık ısının büyük bir kısmı soğuk akışkan tarafından emilirken diğer kısmı iletim, konveksiyon ve radyasyon ısı transfer mekanizmaları ile ısı kaybı olarak dış ortama aktarılmaktadır.



Şekil 1 Konsantrasyonlu fotovoltaik termal sistem bileşenleri

KFVT sistemin boyutları ve bileşenlerin ısı özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. KFVT sistem boyutları ve malzemelerin ısı özellikleri [11]

Malzeme	Kalınlık (m)	Genişlik (m)	Isıl iletkenlik (W/mK)	Yayılcılık
Cam	3×10^{-3}	0.185	0.8	0.90
FV hücre	3×10^{-4}	0.165	147	-
Yapıştırıcı	1.3×10^{-6}	0.185	0.38	-
Alüminyum	4×10^{-3}	0.185	211	-
Cam yünü	3×10^{-2}	0.245	0.035	0.50

Fotovoltaik modülün verimi aşağıda verilen Eş. (1) ile hesaplanmıştır [12].

$$\eta_{FV} = \eta_{ref} \left[1 - \beta_{ref} (T_{FV} - T_{ref}) + \gamma \log I \right] \quad (1)$$

Burada, η_{ref} ve β_{ref} sırası ile 25°C ’deki modül verimini ve referans sıcaklık katsayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada M-Si fotovoltaik hücre tipi kullanılmış ve η_{ref} ve β_{ref} sırası ile 0.25 ve 9.03×10^{-4} 1/K olarak

alınmıştır. β_{ref} değeri geniş sıcaklık aralığında az miktarda değişebilmektedir. Bu çalışmadaki sıcaklık aralığı göz önünde bulundurularak sabit kabul edilmiştir. T_{ref} ise referans sıcaklık değeri (25°C) ve I direkt solar radyasyon ($I=964 \text{ W/m}^2$) değeridir. Eş. (1)’de $\gamma \log I$ ifadesi düşük konsantrasyon değerleri için ihmal edilebilmektedir [12,13].

Fotovoltaik panele gelen net güneş enerjisi Eş. (2) ile hesaplanmıştır,

$$\dot{Q}_{FV} = ICA_{FV}\eta_{opt} \quad (2)$$

Denklemden C konsantrasyon oranı ($C=30$), A_{FV} fotovoltaik modül alanı ($A_{FV}=2.475 \text{ m}^2$) ve η_{opt} ise optik verimdir. Optik verim 0.85 olarak alınmıştır [14].

Güneş radyasyonunun elektrik enerjisine dönüşen kısmı ise (\dot{W}_{elek}) Eş. (3) ile bulunur,

$$\dot{W}_{elek} = \dot{Q}_{FV}\eta_{FV}\eta_{inv} \quad (3)$$

Burada η_{FV} fotovoltaik modül verimini, η_{inv} ise inverter verimini ifade etmektedir. İnverter verimi $\eta_{inv}=0.90$ olarak alınmıştır [14].

Fotovoltaik modüle oluşan atık ısı değeri ise aşağıdaki denklemlerle hesaplanır,

$$\dot{Q}_{atk} = \dot{Q}_{FV} (1 - \eta_{FV}) \quad (4)$$

Dış ortama aktarılan ısı transferiyle birlikte enerji dengesi Eş. (5) ile ifade edilebilir,

$$\dot{Q}_{atk} = \dot{Q}_{abs,soğ} + \dot{Q}_{kayıp} \quad (5)$$

Burada $\dot{Q}_{abs,soğ}$ soğuk akışkan tarafından emilen ısı, $\dot{Q}_{kayıp}$ ise dış ortama olan toplam ısı kaybıdır. $\dot{Q}_{abs,soğ}$ ve $\dot{Q}_{kayıp}$ Şekil 2’de gösterilen ısı direnç ağına göre hesaplanmıştır. KFTV sistemin tüm katmanlarındaki sıcaklık dağılımının üniform olduğu kabul edilmiştir. Katmanların çok ince olması nedeniyle yan yüzeylerinden dış ortama olan ısı kayıpları, kanal yan yüzeyinden olan ısı kayıplarına oranla ihmal edilebilir seviyededir. Bu nedenle cam, FV hücre ve yapıştırıcı katmanlarının yan yüzeylerinden olan ısı kayıpları ihmal edilmiştir. Isı transfer mekanizmalarını içeren ısı dirençler Eş. (6), (7) ve (8) ile hesaplanmıştır.

$$R_{kond} = L_{kalınlık} / kA_{s,kond} \quad (6)$$

$$R_{konv} = 1 / hA_{s,konv} \quad (7)$$

$$R_{konv} = 1/h_{birleşik} A_{s,birleşik} \quad T_{çevre} \approx T_{ortam} \quad (8)$$

Denklemlerde $L_{kalınlık}$ katman kalınlıklarını, $A_{s,kond}$, $A_{s,konv}$ ve $A_{s,birleşik}$ sırasıyla iletim, taşınım ve birleşik ısı transferi yüzey alanlarıdır. h ve $h_{birleşik}$ ise sırasıyla akışkan ile ilgili taşınım değerini ve taşınım ile ışınım etkilerini içeren birleştirilmiş ısı transfer katsayısını ifade etmektedir. Hesaplamalarda kolaylık oluşturması açısından çevre ve ortam sıcaklıkları yaklaşık olarak birbirine eşit alınmıştır. Taşınım ve ışınım etkilerini içeren birleştirilmiş ısı transfer katsayısı Eş. (9) ile bulunmuştur [15].

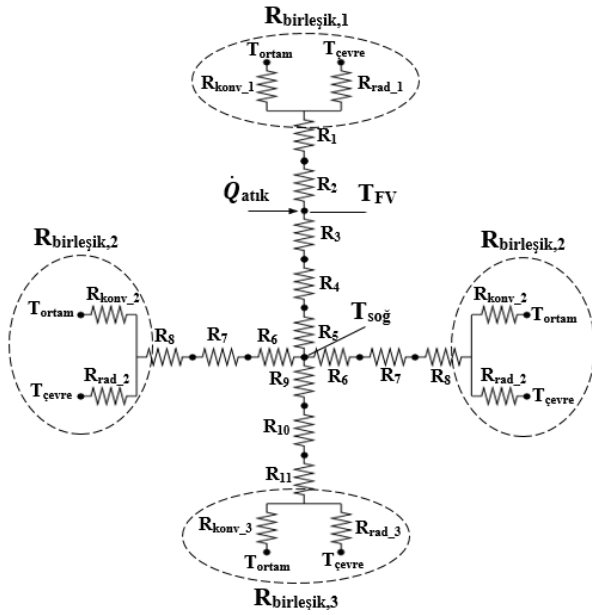
$$h_{birleşik} = h_{konv} + h_{rad} \quad (9)$$

Burada h_{konv} ve h_{rad} sırası ile taşınım ve ışınım ile ilgili ısı transfer katsayılarını belirtmektedir. Bu ısı transfer katsayıları Eş. (10) ve (11) ile bulunmuştur,

$$h_{konv} = 2.8 + 3V_{rüzgar} \quad (10)$$

$$h_{rad} = \sigma \varepsilon (T_s^2 + T_{çevre}^2) (T_s + T_{çevre}) \quad (11)$$

Burada $A_{s,rad}$ ışınım ısı transfer yüzey alanı, σ Stefan Boltzmann sabiti, ε yayıcılık katsayısı ve T_s yüzey sıcaklığıdır. Rüzgar hızı $V_{rüzgar}=1$ m/s alınmıştır.



- 1-Cam (iletim), 2-Yapıştırıcı üst (iletim), 3-Yapıştırıcı alt (iletim)
 4-Kanal üst (iletim), 5-Akışkan üst (taşınım), 6-Akışkan yan (taşınım)
 7-Kanal yan (iletim), 8-Yalıtım yan (iletim), 9-Akışkan alt (taşınım)
 10-Kanal alt (iletim), 11-Yalıtım alt (iletim)

Şekil. 2 Isıl direnç ağı ve ısı transfer mekanizmaları

Akışkan bölgesindeki ısı transfer katsayısı (h) Eş. (12)'deki dikörtgen bir kanal için verilen Nu sayısı bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır [11].

$$Nu = \begin{cases} 3.66 + \frac{(0.49 + 0.02/Pr) \left(\frac{Re Pr D_h}{L} \right)^{1.12}}{\left(1 + 0.065 \left(\frac{Re Pr D_h}{L} \right)^{0.7} \right)} & Re < 2300 \\ \frac{\left(\frac{f}{8} \right) Re Pr}{K_1(f) + K_2(Pr) \left(\frac{f}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} & Re \geq 2300 \end{cases} \quad (12)$$

K_1 ve K_2 fonksiyonları ve sürtünme katsayısı (f) aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır,

$$K_1(f) = 1 + 3.4f \quad (13)$$

$$K_2(Pr) = 11.7 + 1.8 Pr^{-\frac{1}{3}} \quad (14)$$

$$f = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} \quad (15)$$

Reynolds (Re) ve Prandtl (Pr) sayısı ise Eş. (16) ve (17) ile bulunur,

$$Re = \rho V D_h / \mu \quad (16)$$

$$Pr = \mu c_p / k_{akışkan} \quad (17)$$

Akışkanın tüm termofiziksel özellikleri ortalama akışkan sıcaklığına göre belirlenmiştir. Akışkan kanalındaki ısı transfer katsayısı ise Nu sayısına bağlı olarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır,

$$h = k_{akışkan} Nu / D_h \quad (18)$$

$\dot{Q}_{abs,soğ}$ ve $\dot{Q}_{kayıp}$ ısı transfer değerleri ise sırasıyla Eş. (19) ve (20) ile hesaplanmıştır,

$$\dot{Q}_{abs,soğ} = \frac{T_{FV} - T_{soğ}}{R_3 + R_4 + R_5} \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{kayıp} = \frac{T_{FV} - T_{çevre}}{R_1 + R_2 + R_{birleşik,1}} + 2 \left(\frac{T_{soğ} - T_{çevre}}{R_6 + R_7 + R_8 + R_{birleşik,2}} \right) + \left(\frac{T_{soğ} - T_{çevre}}{R_9 + R_{10} + R_{11} + R_{birleşik,3}} \right) \quad (20)$$

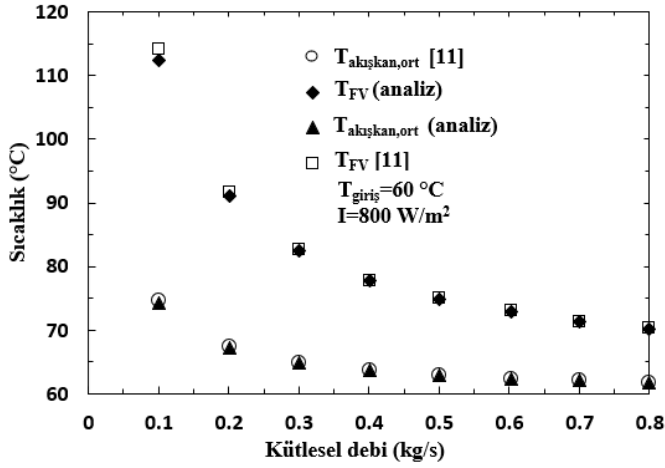
B. Çözüm Prosedürü

Çözümleme işleminin başlangıcında KFVT sistem için boyutsal özellikler ve güneş ışınımı ilgili değerler tanımlanmıştır. Belirli bir akışkan giriş sıcaklığına göre ($T_{giriş}=40^\circ C$) ortalama akışkan sıcaklığı ($T_{soğ}$) tahmin edilmiş ve analiz sonucunda bulunan akışkan çıkış sıcaklığı kullanılarak ortalama akışkan sıcaklığı ($T_{soğ}$) yeniden

hesaplanmıştır. Daha sonra tahmin edilen ve hesaplanan ortalama akışkan sıcaklıkları birbiri ile karşılaştırılmıştır. İterasyonlar tahmin edilen ve hesaplanan ortalama akışkan sıcaklıkları arasındaki fark 0.1 °C'den az olana kadar devam etmiştir.

C. KFVT Sistemin Matematiksel Modelinin Doğrulanması

KFVT sistemin termodinamik analizi EES ticari paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. KFVT sistemi literatürde mevcut olan çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 4'de 60 °C'de su giriş sıcaklığı ve $I=800 \text{ W/m}^2$ ısı akısı değeri için KFVT sistemin analiz sonuçlarının ortalama su ve FV modül sıcaklığı açısından literatürde mevcut olan çalışma sonuçları ile karşılaştırılması verilmiştir. Analiz ve literatür çalışması sonuçları arasındaki ortalama su sıcaklığı açısından en yüksek fark 1.5%, FV modül sıcaklığı açısından ise 0.56% civarındadır. Bu durum analiz sonuçlarının literatür çalışmaları ile uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.

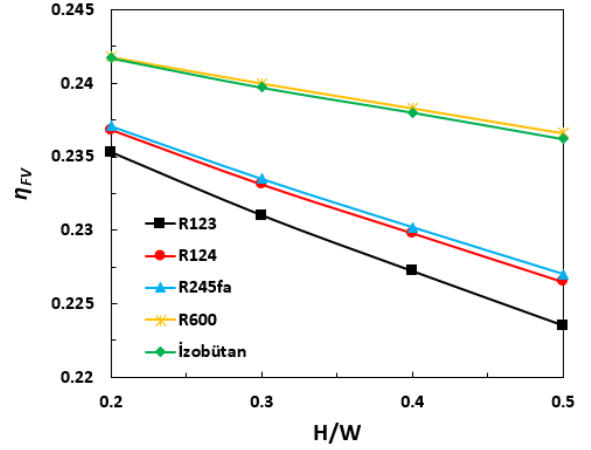


Şekil 3. Analiz sonuçlarının doğrulanması

III. BULGULAR

Termodinamik analizler beş farklı soğutucu akışkan tipi ve dört farklı kanal en/boy oranı (H/W) için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular elektriksel verim, elektrik üretimi, FV modül sıcaklığı ve akışkanın KFVT sistemden çıkışı sıcaklığı göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. Tüm parametre değerleri için akışkan debisi ($\dot{m}_{akışkan}$) 2 kg/s olarak alınmıştır.

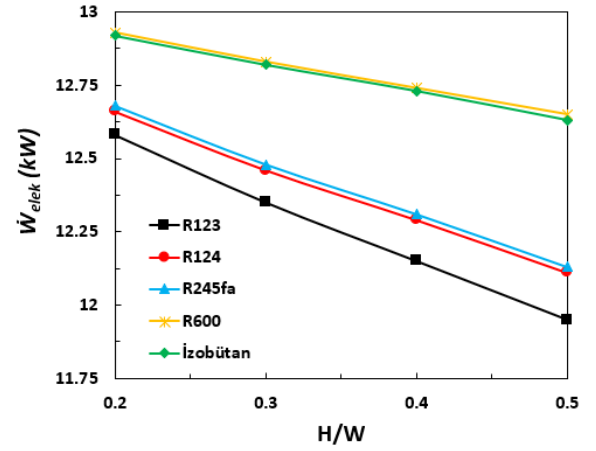
Şekil 4'de H/W oranına göre verim değişimi görülmektedir. Tüm akışkan tipleri için H/W oranının artışıyla verimde düşme meydana gelmiştir. H/W oranındaki artışa en duyarlı akışkanın R123 olduğu görülmektedir. En yüksek elektriksel verim ise R600 ve İzobütan akışkanları için elde edilmiştir.



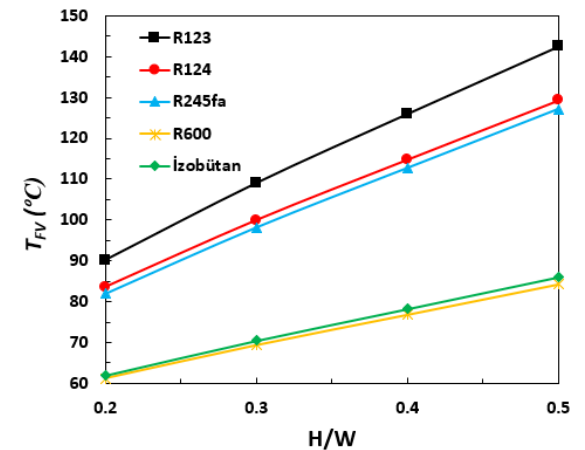
Şekil 4. H/W oranına göre elektriksel verim değişimi

Şekil 5'de ise H/W oranı değişimi sonucunda elde edilen elektrik üretimi (\dot{W}_{elek}) görülmektedir. Şekil 4'deki verim değerlerine paralel olarak elektrik üretimi H/W oranının artışıyla düşmüş ve en yüksek elektrik üretimi R600 ve İzobütan için elde edilmiştir.

Şekil 6'da verim ve elektrik üretiminde en önemli paya sahip olan FV modül sıcaklığının (T_{FV}) H/W oranına göre değişimi görülmektedir. Beklenildiği gibi en yüksek modül sıcaklıkları R123 akışkanı için meydana gelmiştir. T_{FV} sıcaklığının R600 ve İzobütan için en düşük olması elektriksel verimlerinin de en yüksek olmasını sağlamıştır.

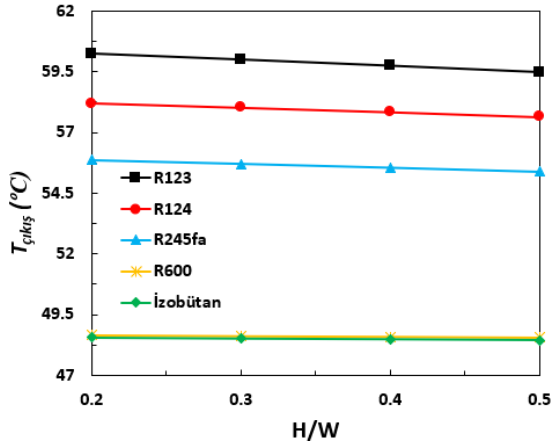


Şekil 5. H/W oranına göre elektriksel elektrik üretimi



Şekil 6. H/W oranına göre FV modül sıcaklığı değişimi

Şekil 7 ise akışkanların KFVT sistemden çıkış sıcaklıklarının parametrelere göre değişiminin incelenmesi amacı ile oluşturulmuştur. Elektriksel verim değerinin en düşük olduğu R123 akışkanı kullanımı durumunda en yüksek çıkış sıcaklıkları elde edilmiştir. Tüm akışkan tipleri için H/W oranının değişimi çıkış sıcaklıklarını çok düşük miktarda etkilemiştir. R600 ve İzobütan için bu değişim ihmal edilebilir seviyededir.



Şekil. 7 H/W oranına göre akışkan çıkış sıcaklığı değişimi

IV. TARTIŞMA

Akışkan kanalı için H/W oranının artışı sabit debi değeri için akış hızını düşürdüğünden FV modülden akışkana olan ısı transferinin de azalmasına neden olmuştur. Isı transferindeki azalma modül sıcaklığının artışına sebep olduğundan H/W oranının artışıyla tüm akışkan tipleri için elektriksel verimde ve elektrik üretiminde düşme meydana gelmiştir. Akışkan çıkış sıcaklıkları da yüksek H/W değerlerinde atık ısı kazanımının düşmesi sonucu azalmıştır.

Soğutucu akışkanların termodinamik özelliklerinin farklılık göstermesi akış hızlarının ve ısı çekebilme özelliklerinin de farklı olmasına neden olmuştur. Örneğin İzobütanın yoğunluk değerinin diğer akışkan tiplerine göre düşük olması aynı debi değeri için akışkan hızının daha yüksek olmasını ve böylece ısı transferinin de artmasını sağlamıştır. Bu nedenle en düşük modül sıcaklıkları ve en yüksek elektriksel verim değerleri İzobütan için elde edilmiştir. Diğer yandan İzobütan'ın özgül ısı değerinin yüksek olması sıcaklığının KFVT sistem çıkışında diğer akışkan tiplerine göre düşük olmasına neden olmuştur. R123 akışkanının yoğunluk değerinin yüksek olması belirli bir debi değeri için akışkan hızını düşürmesine rağmen düşük özgül ısı değeri, sıcaklığının KFVT sistem çıkışında daha fazla olmasını sağlamıştır. Yukarıda bahsedilen temel nedenlerden ötürü İzobütan ve R123 kullanımı için sırasıyla elektriksel verim değerleri 23.62-24.17% arasında ve 22.35-23.53% arasında değişmiştir. KFVT sistemden çıkış sıcaklığı ise İzobütan için yaklaşık 48.5 °C değerinde iken R123 için bu değer 59.4-60.25 °C aralığında değişmiştir.

V. SONUÇLAR

KFVT sistem için farklı H/W oranları ve soğutucu akışkan tipleri için elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- H/W oranının artışı akışkan hızını düşürerek taşınım katsayısı ve ısı transferinin de azalmasına neden

olmuştur. Bu nedenle H/W oranının artışıyla verim, sıcaklık ve güç üretiminde düşüş meydana gelmiştir.

- Elektriksel verim ve güç üretimi göz önüne alındığında R600 ve İzobütan soğutucuların daha etkin olduğu gözlenmiştir. Fakat yüksek akışkan sıcaklıklarına ise R123 akışkanı kullanımı ile ulaşılmıştır.
- KFVT sistemin kullanım amacı ve yerine bağlı olarak sistem gereksinimleri farklı olabilmektedir. Elektrik üretimi ve akışkan sıcaklığı ihtiyaçları göz önüne alınarak uygun soğutucu akışkan seçiminin yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Bahaidarah, H. M., Gandhidasan, P., Baloch, A. A., Tanweer, B., and Mahmood, M. "A comparative study on the effect of glazing and cooling for compound parabolic concentrator PV systems—Experimental and analytical investigations." *Energy conversion and management*, vol. 129, pp. 227-239, Dec. 2016.
- [2] Amanlou, Y., Hashjin, T. T., Ghobadian, B., and Najafi, G. "Air cooling low concentrated photovoltaic/thermal (LCPV/T) solar collector to approach uniform temperature distribution on the PV plate." *Applied Thermal Engineering*, vol. 141, pp. 413-421, Aug. 2018.
- [3] Elsafi, A. M., and Gandhidasan, P. "Comparative study of double-pass flat and compound parabolic concentrated photovoltaic–thermal systems with and without fins." *Energy conversion and management*, vol. 98, pp. 59-68, Jul. 2015.
- [4] Sharaf, O. Z., and Orhan, M. F. "Comparative thermodynamic analysis of densely-packed concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collectors in thermally in-series and in-parallel receiver configurations." *Renewable energy*, vol. 126, pp. 296-321, Oct. 2018.
- [5] Karathanassis, I. K., Papanicolaou, E., Belessiotis, V., and Bergeles, G. C. "Design and experimental evaluation of a parabolic-trough concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) system with high-efficiency cooling." *Renewable energy*, vol. 101, pp. 467-483, Feb. 2017.
- [6] Baljit, S. S. S., Chan, H. Y., Audwinto, V. A., Hamid, S. A., Fudholi, A., Zaidi, S. H., ... and Sopian, K. "Mathematical modelling of a dual-fluid concentrating photovoltaic-thermal (PV-T) solar collector." *Renewable energy*, vol. 114, pp. 1258-1271, Dec. 2017.
- [7] Liu, L., Jia, Y., Lin, Y., Alva, G., and Fang, G. "Numerical study of a novel miniature compound parabolic concentrating photovoltaic/thermal collector with microencapsulated phase change slurry." *Energy conversion and management*, vol. 153, pp. 106-114, Dec. 2017.
- [8] Ceylan, İ., Gürel, A. E., Ergün, A., and Tabak, A. "Performance analysis of a concentrated photovoltaic and thermal system." *Solar Energy*, vol. 129, pp. 217-223, May. 2016.
- [9] Ahmed, M., and Radwan, A. "Performance evaluation of new modified low-concentrator polycrystalline silicon photovoltaic/thermal systems." *Energy conversion and management*, vol. 149, pp. 593-607, Oct. 2017.
- [10] Radwan, A., and Ahmed, M. "The influence of microchannel heat sink configurations on the performance of low concentrator photovoltaic systems." *Applied energy*, vol. 206, pp. 594-611, Nov. 2017.
- [11] Qu, W., Hong, H., Su, B., Tang, S., and Jin, H. "A concentrating photovoltaic/Kalina cycle coupled with absorption chiller." *Applied energy*, vol. 224, pp. 481-493, Aug. 2018.
- [12] Skoplaki, E., and Palyvos, J. A. "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations." *Solar energy*, vol. 83, pp. 614-624, May. 2009.
- [13] Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M., and Poggi, P. "Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences." *Applied thermal engineering*, vol. 25, pp. 2854-2877, Dec. 2005.
- [14] Kosmadakis, G., Manolagos, D., & Papadakis, G. "Simulation and economic analysis of a CPV/thermal system coupled with an organic Rankine cycle for increased power generation." *Solar Energy*, vol. 85, pp. 308-324, Feb. 2001.

- [15] Y. A. Çengel, *Heat and Mass Transfer*, 3rd ed., McGraw-670 Hill Education, 2006.
- [16] Kribus, A., Kaftori, D., Mittelman, G., Hirshfeld, A., Flitsanov, Y., and Dayan, A. "A miniature concentrating photovoltaic and thermal system." *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 3582-3590, Dec.2006.