

Fotovoltaik Güneş Panellerinin Sıvıya Daldırma Yöntemi ile Soğutulmasında Kanal Geometrisi ve Panel Konumunun Etkisi

Burak KURŞUN¹, Korhan ÖKTEN^{*1}, Gonca DEDE²

¹Amasya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Amasya

²Amasya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği, Amasya

Geliş tarihi: 18.08.2016

Kabul tarihi: 10.10.2016

Öz

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten sistemlerde fotovoltaik hücrelerin soğutulması sistem verimini artırmaktadır. Bu hücrelerin soğutulması için birçok yöntem ve parametre mevcuttur. Bu çalışmada alt yüzeyinde kanatçıklar bulunan fotovoltaik güneş panelinin dielektrik sıvıya daldırma yöntemi ile soğutulmasında soğutma kanalı geometrisi ve panel konumunun fotovoltaik hücre sıcaklıklarına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizler kanal çıkış genişliği, panelin eksenel ve radyal yöndeki konumu parametreleri için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, parametre değerlerinin değişimi ile oluşan ek basınç kayıpları hesaplanarak soğutma için gerekli enerji gereksinimi ortaya konulmuştur. Analizler sonucunda kanal çıkışının daraltılması ve panelin eksenel konumunun kanal çıkışına yakın olması durumunda fotovoltaik hücreler için daha etkin soğutma sağlandığı gözlemlenmiştir. Sayısal çalışma sırasında elde edilen bulgular sıcaklık, basınç değişimi, hız ve sıcaklık kontörlerini içeren grafikler halinde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik hücre, Güneş paneli, Sıvıya daldırma

Effect of Channel Geometry and Panel Position at Cooling of Photovoltaic Solar Panels with Liquid Immersion Method

Abstract

Today, energy consumption have increased significantly because of developed technology. Therefore, using of fossil fuels have increased step by step. All of these have caused increasing of renewable energy sources and sustainable energy researches. In this study, the effect of cooling channel geometry and panel position on the temperature of photovoltaic cells are investigated at cooling of the photovoltaic solar panel that has fins on its bottom surface, with liquid immersion cooling method, numerically. Numerical analyses are carried out for parameters of channel outlet width, axial and radial position of the panel. Also, additional pressure losses that occurred with variation of parameter values are calculated and energy requirement is introduced for cooling. In consequence of analyses, it is observed that more effective cooling is provided in the case of narrowing of the channel outlet and panel position is close to channel outlet. Findings obtained during the numerical study are presented as graphics that include temperature, variation of pressure, and velocity contours in detail.

Keywords: Photovoltaic cell; Solar panel; Liquid immersion

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Korhan ÖKTEN, korhan.okten@amasya.edu.tr

1. GİRİŞ

Son yıllarda, artan enerji ihtiyacını karşılamak amacı ile yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır. Bu enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri de güneş enerjisidir. Güneş enerjisinden elektrik üreten fotovoltaik sistemler giderek artmakta ve bu sistemlerin iyileştirilmesine ilişkin çalışmalar önem arz etmektedir.

Fotovoltaik sistem tasarımında en önemli parametreler; düşük ve düzgün dağılımlı hücre sıcaklığı, sistem güvenilirliği ve kapasite yeterliliğidir. Ancak, fotovoltaik hücrelerin soğutulması bu tür sistemlerde en büyük sorun olarak görülmektedir. Bu durum fotovoltaik hücrelerin %25 verimle çalışmasından dolayı kayıp enerjinin bir kısmının ısı enerjisine dönüşmesiyle meydana gelmektedir. Bu hücrelerdeki aşırı sıcaklık artışı kısa vadede verim düşüşüne sebep olurken uzun vadede geri dönüşü olmayan arızalara neden olabilmektedir [1].

Fotovoltaik sistemlerin soğutulması aktif ve pasif olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Pasif soğutma genellikle ısınan yüzeye kanatçıklar yerleştirilmesiyle gerçekleşmektedir. Aktif soğutma ise fotovoltaik hücrelerin ısınan yüzeylerinin akışkan vasıtasıyla soğutulmasına dayanmaktadır [2]. Yüksek yoğunluklu güneş ışınlarının etki ettiği sistemlerde aktif soğutmanın daha etkin olduğu görülmüştür [3].

Fotovoltaik hücrelerinin sıcaklık değerinin düşürülmesi ve yüzeye üniform dağılması sistem verimini artırmaktadır [4]. Literatürde bu saptamadan hareket ile yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Flourscheutz, pasif soğutma sistemlerini düz ve kanatlı düzlemler için karşılaştırmıştır. Kanatlı yüzeylerin düz yüzeylere göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Ancak kanatlı yüzey imalatı maliyetli olduğundan iyi bir seçenek olarak görülmemiştir. Bu çalışmanın sonucunda düşük yoğunluklu güneş ışınları için düz yüzeyler yeterliken yüksek yoğunluklu güneş ışınları için kanatlı yüzeyler kullanmanın daha uygun olduğu görülmüştür [5]. Cui ve arkadaşları, 400 suns değerinde herhangi bir soğutma olmadan fotovoltaik hücre sıcaklığının

1200°C olacağını ön görmüştür. Ancak soğutucu bir panel kullanıldığında bu değer önemli ölçüde azalacağı ve hücre sıcaklığının 37°C'ye düşeceği belirlenmiştir [6]. Natarajan ve arkadaşları, fotovoltaik güneş hücrelerinin soğutulması ile ilgili pasif soğutmalı ve soğutma sistemi olmayan iki modeli kıyaslamışlardır. Bu çalışmanın sonucunda 5 mm boyunda ve 1 mm kalınlığında kanatlı modelin en verimli model olduğu görülmüştür [7]. Coventry [8], fotovoltaik hücreleri soğutmak için aktif soğutma yöntemi ve soğutucu akışkan olarak su kullanmıştır. Bunun yanında korozyona ve donmaya karşı, suya katkı maddeleri eklenmiştir. Bu karışım bir pompa yardımı ile basınçlandırılarak hücrelerin soğutulması ve ısının geri kazanılması için kullanmıştır. Ek olarak soğutma yüzeyine kanatçıklar yerleştirerek ısı transferi yüzey alanını artırmış ve sonuçları incelemiştir. Yang Sun ve arkadaşları doğrudan daldırılmalı soğutma için dikdörtgen kanal kullanarak farklı sıvılar için verimlilik analizi yapmıştır. Yapılan çalışmada daldırma sıvısı kalınlığının ve kanal geometrisinin verimliliğe etkisini incelemiştir [9].

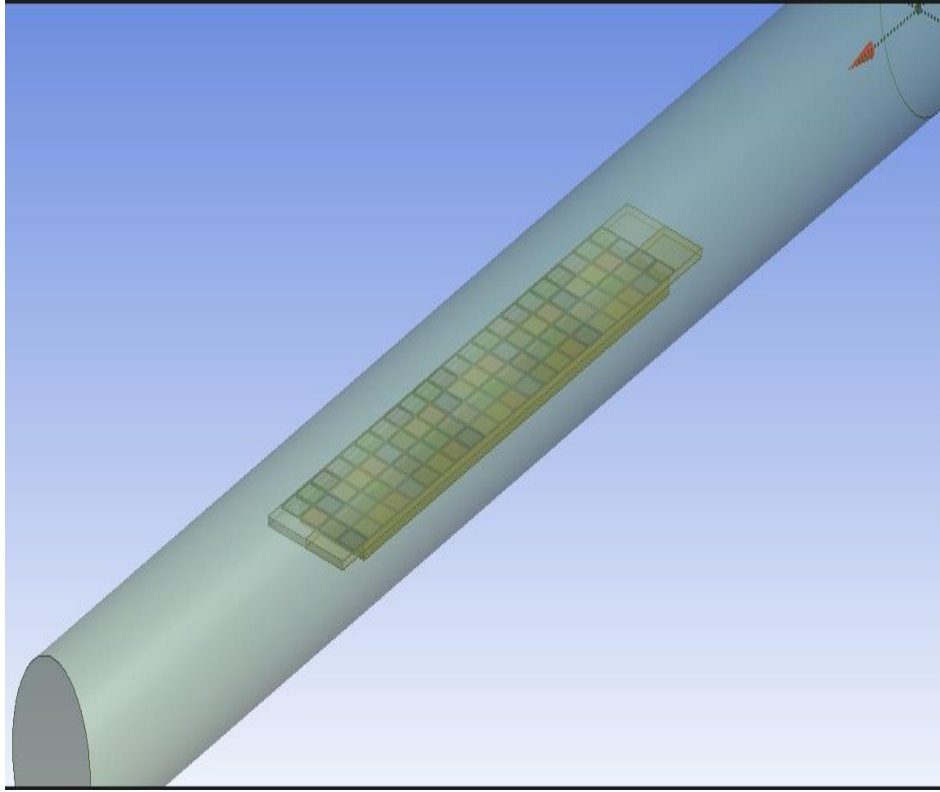
Bu çalışmada, fotovoltaik hücrelerin soğutulması sırasında, kanal çıkış boyutlarına, panelin eksenel ve radyal konumunun fotovoltaik hücre sıcaklığına olan etkisi incelenmiştir. Bunun yanında geometri ve konum değişimlerinin oluşturacağı basınç kayıpları belirlenmiş ve sonuçlar sıcaklık, basınç değişimi ve hız kontörlerini içeren grafikler halinde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

2. FİZİKSEL MODEL

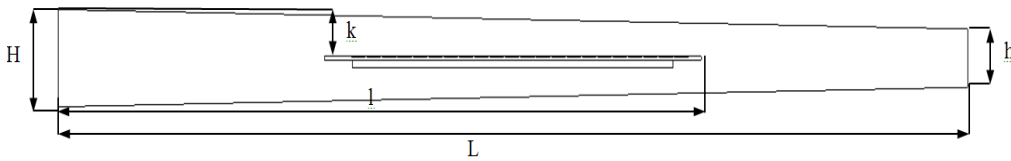
Şekil 1'de çalışmada ele alınan silindirik soğutucu kanal ve alt yüzeyinde kanatçıklar bulunan fotovoltaik güneş paneli geometrisi görülmektedir. Kanal, fotovoltaik hücre ve panel ölçüleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılması amacı ile Xiang ve arkadaşları [10] tarafından yapılan çalışmadaki ölçülerle aynı alınmış ve soğutucu akışkan olarak deiyonize (saf) su kullanılmıştır. Şekil 2'de ise ısı transferini artırılması amacı ile değiştirilmiş kanal geometrisi verilmiştir. Analizlerde kanal çıkışı farklı oranlarda daraltılmış ve panel eksenel ve radyal yönde farklı konumlara yerleştirilmiştir.

Güneş paneli 88 adet silisyum fotovoltaik hücreden ve bakır kanatçıklı panelden oluşmaktadır. Soğutucu kanal ise cam malzemedir. Xiang ve arkadaşları [10] tarafından

gerçekleştirilen çalışmada enine yönde sıcaklık değişiminin ihmal edilebilir seviyede olması nedeni ile bu çalışmada geometri iki boyutlu olarak ele alınmıştır (Şekil 2).



Şekil 1. 3 boyutlu model



Şekil 2. İki boyutlu model

3. SAYISAL MODEL

Çalışmada akışkanın sıkıştırılmaz, Newtonian ve taşınım özelliklerinin sabit olduğu kabul edilerek analizler kararlı ve türbülans akış koşulları için gerçekleştirilmiştir. Eksenel yöndeki sıcaklık dağılımının elde edilmesi için kullanılan temel korunum denklemleri kartezyen tensör formunda

eşitlik 1’de verilmiştir. Temel korunum denklemleri, süreklilik (1), momentumun korunumu (2 ve 3) ve enerji denkleminde (4) oluşmaktadır.

$$\text{Süreklilik denklemi: } \frac{\partial(\overline{\rho u})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho y})}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\text{x- Momentum: } \left(\frac{\partial(\overline{\rho uu})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho vu})}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\text{y- Momentum: } \left(\frac{\partial(\overline{\rho uv})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho vv})}{\partial y} \right) = \rho g - \frac{\partial \overline{P}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$\text{Enerji: } \frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho u c_p T}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho v c_p T}) = \frac{\partial}{\partial x} \left((k_i + k_t) \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((k_i + k_t) \frac{\partial \overline{T}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

Belirtilen denklemlerde k_t , türbülanslı eddy iletkenliği μ , eddy viskozitesi, μ_t türbülanslı eddy viskozitesi, ρ , yoğunluk, T , sıcaklık, u , x yönündeki hız vektörü, v , y yönündeki hız vektörü, c_p özgül ısı, P , basıncı temsil etmektedir.

Burada k_s hesaplama bölgesine bağlı olarak silisyum hücrelerin ya da bakır panelin ısı iletim katsayısını ifade etmektedir.

3.1. Standart k-ε Modeli

Güneş paneli ve silisyum hücreler içerisindeki sıcaklık dağılımlarının hesaplanması için ise kararlı koşullarda iletimle ısı transferi gerçekleştiği kabul edilerek Denklem 5 ile verilen ısı iletim denklemleri kullanılmıştır.

Yukarıdaki diferansiyel denklemlerin çözülmesi için standart k-ε modeli tercih edilmiştir. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve kinetik enerjiye bağlı olarak oluşan enerji kayıp oranı (ε) değerlerinin bulunması için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$k_s \nabla^2 T = 0 \quad (5)$$

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{ve} \quad k_t = \frac{\mu_t C_p}{\sigma_t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \overline{\rho u k}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho v k}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \mu_t \Phi - \rho \varepsilon + \frac{C_4 \beta \mu_t}{\sigma_t} \left(g \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \overline{\rho u \varepsilon}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho v \varepsilon}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \phi - C_{2\rho} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{C_\mu (1 - C_3) \beta \rho k}{\sigma_t} \left(g \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (8)$$

Burada türbülans kinetik enerji üretimi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

3.2. Sınır Koşulları

$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} \right) \quad (9)$$

Diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan sınır şartlarında kanal giriş bölgesinde hız, sıcaklık ve basınç değişkenleri başlangıç değerinde ($u=u_{\text{giriş}}$, $v=0$, $T=T_{\text{giriş}}$, $P=P_{\text{giriş}}$) kanal çıkışında ise basınç haricinde tüm değişkenlerin x eksenine doğrultusundaki değişimleri sıfır alınmıştır. Katı çeperler üzerinde kaymama koşulu tanımlanmıştır ($u=0$, $v=0$). Silisyum hücrelerin üst yüzeylerine elektrik üretimi sonrasında oluşan ısınma miktarını

Diğer türbülans model sabitleri ise $C_\mu=0,09$, $C_1=1,44$, $C_2=1,92$, $C_3=1,0$, $C_4=0,0$, $\sigma_k=1,0$, $\sigma_\varepsilon=1,30$, $\sigma_t=0,9$ şeklindedir.

modellemek amacı ile sabit ısı akısı değerleri verilmiştir ($\dot{q} = \dot{q}_{\text{sınır}}$). Silindirik cam kanalın dış yüzeylerinde ise ısı akısı değeri sıfır alınarak ($\dot{q} = 0$) yalıtılmış olması sağlanmıştır. Sınır koşulları için verilen değerler Çizelge 1'de görülmektedir.

Çizelge 1. Sınır şartlarının değerleri

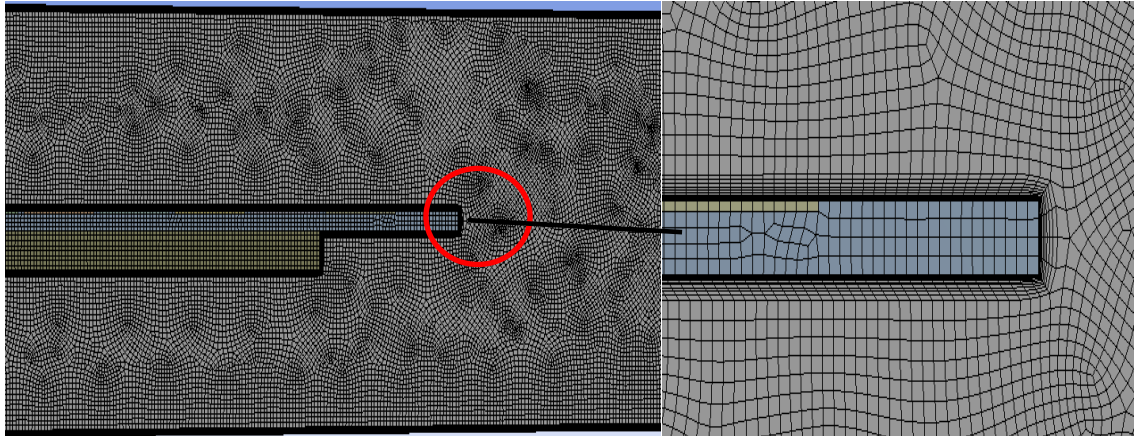
$u_{\text{giriş}}(\text{m/s})$	$T_{\text{giriş}}(^{\circ}\text{C})$	$P_{\text{giriş}}(\text{bar})$	$\dot{q}_{\text{sınır}}(\text{W/m}^2)$
0,32	25,1	1	148000

4. SAYISAL ÇÖZÜMLEME

Korunum denklemlerinin ayrıklaştırılması ve çözülmesinde sonlu hacimler yöntemi

kullanılmıştır. Öncelikle deneysel sonuçlarla uyum sağlayacak şekilde hücre yapısı oluşturulmuştur. Tüm geometri için 0,5 mm boyutunda dörtgen hücre yapısı kullanılmış ve katı çeperlerde yığılma faktörü 10 alınarak hücre yapısı sıklaştırılmıştır (Şekil 3).

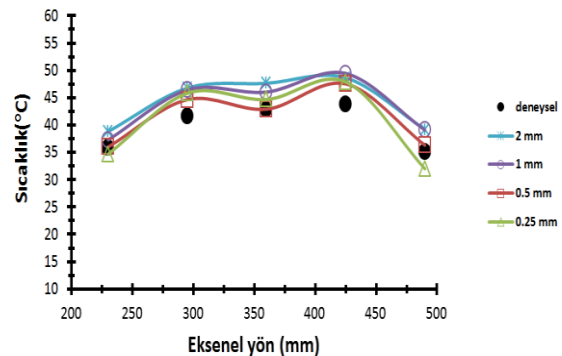
Korunum denklemlerinin ayrıklaştırılmasında birinci dereceden up wind metodu uygulanmış ve hız, basınç ve sıcaklık değerlerinin bulunmasında SIMPLE metodu kullanılmıştır. Sayısal çözümler kalıntı değerlerinin süreklilik, momentum, k ve ϵ denklemleri için 1×10^{-3} 'den, enerji denklemi için ise 1×10^{-6} 'dan az olduğu koşula kadar devam etmiştir.



Şekil 3. Hücre dağılımı ve yapısı

4.1. Sayısal Sonuçların Doğruluğu

Fotovoltaik panel üzerinde elde edilen sıcaklık değerlerinin doğruluğunun ve sayısal çözümün hücre yapısından bağımsızlığının kontrolü amacı ile sayısal sonuçlar farklı hücre boyutları için elde edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. 0,25 ve 0,5 mm hücre boyutları için sıcaklık değerlerinin deneysel sonuçlarla uyum sağladığı ve birbirine çok yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4). Bu nedenle problemin çözümü için hesaplama zamanını kısaltması ve en yüksek hata oranının yaklaşık %4 olması sebebi ile 0,5 mm büyüklüğündeki hücre yapısı tercih edilmiştir.



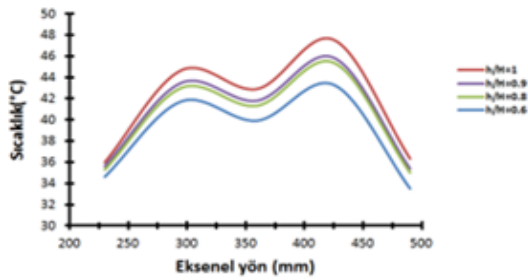
Şekil 4. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sayısal analizler kanal çıkış genişliği, panelin eksenel ve radyal yöndeki konumu parametrelerinin farklı değerleri için gerçekleştirilmiştir. Parametre değerlerine bağlı olarak oluşan sıcaklık değerleri, basınç kayıpları aşağıda verilen kısımlarda sunulmuştur.

5.1. Kanal Çıkış Boyutunun Etkisi

Şekil 5a'da görüldüğü gibi dört farklı h/H oranı için çözümlenmiş ve kanal çıkışının daraltılması sonucunda panel üzerindeki sıcaklıkların düştüğü anlaşılmıştır. Bu durum daralma ile birlikte akışkan hızının kanal çıkışına doğru artmasının taşınım ile ısı transferini de artırması sonucu oluşmaktadır (Şekil 6 ve 7).



Şekil 5. Kanal çıkış boyutunun etkisi a) hücre sıcaklıkları



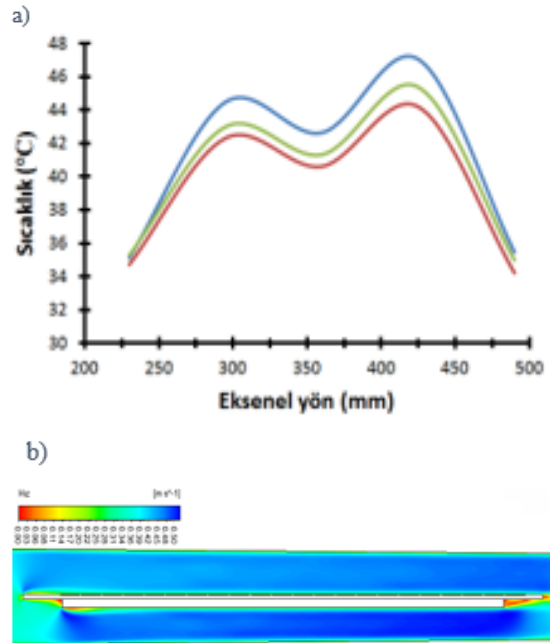
Şekil 6. Kanal çıkış boyutunun etkisi b) hız kontörleri ($h/H=0,6$, $l/L=0,71$, $k/H=0,5$)



Şekil 7. Kanal çıkış boyutunun etkisi c) hız kontörleri ($h/H=1$, $l/L=0,71$, $k/H=0,5$)

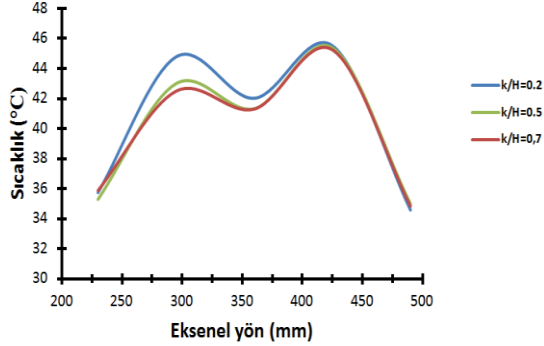
5.2. Panel Konumunun Etkisi

Güneş panelinin eksenel yöndeki farklı konumlarının sıcaklık üzerindeki etkisi incelendiğinde (Şekil 8a) panelin çıkışa yakın bölgeye yerleştirilmesinin hücrelerin sıcaklıklarını düşürdüğü görülmektedir. Bu durum kanal çıkış boyutunun etkisinde bahsedildiği gibi panel alt yüzeyi ile kanal yüzeyi arası mesafenin azalması sonucu akış hızının artmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 8b). Kanal girişinde bu mesafenin artması sonucu akışkan hızının düşmesi ile birlikte hücre sıcaklıkları da artmıştır.



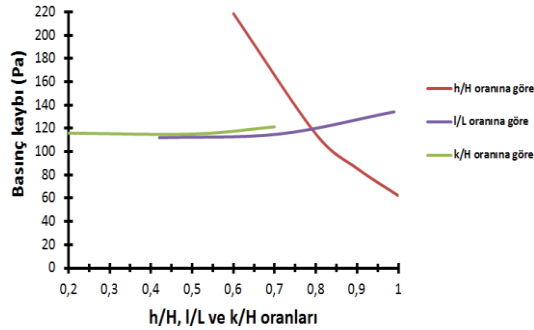
Şekil 8. Eksenel konumun etkisi a) hücre sıcaklıkları, b) hız kontörleri ($h/H=0,8$, $l/L=0,99$, $k/H=0,5$)

Panelin radyal yönde farklı konumlara yerleştirilmesi Şekil 9'dan da anlaşıldığı gibi panelin üst yüzeye yakın olması durumunda ilk sıralardaki hücre sıcaklıklarının artmasına sebep olmuştur. Panel üzerinde son sıralara yaklaşıldığında ise hücre sıcaklıkları tüm parametre değerleri için yaklaşık olarak aynı kalmıştır.



Şekil 9. Radyal konumun etkisi

Şekil 10'da kanal çıkışındaki daralma miktarının ve panel konumunun değişimi sonucunda oluşan basınç kayıpları görülmektedir. En yüksek basınç kaybının kanal çıkışının daralması sonucu ($h/H=0,6$) daralmanın olmadığı duruma göre olduğu anlaşılmaktadır. Eksenel yönde kanal çıkışına yakın bölgeye panelin yerleştirilmesi sonucunda ise basınç kaybı bir miktar artmış fakat radyal yöndeki farklı konumlar küçük değişimler göz ardı edildiğinde basınç kaybını etkilememiştir.



Şekil 10. Farklı parametre değerlerindeki basınç kayıpları

6. SONUÇLAR

Sayısal çalışma sonucunda elde edilen bulgular kanal çıkışının daraltılması ve panelin eksenel konumunun kanal çıkışına yakın olması durumunda fotovoltaik hücreler için daha etkin soğutma koşullarının sağlandığını göstermektedir. En yüksek ısı transferi h/H oranının $h/H=0,6$ olduğu durumda elde edilmiştir. Kanal çıkışının daraltılması panelin kanal çıkışına yakın bölgeye

yerleştirilmesi durumuna göre fotovoltaik hücre sıcaklıklarının dağılımına daha fazla etki etmektedir. Raydal yöndeki panel konumu ise panelin üst yüzeye yakın olması durumunda ilk sıralardaki hücre sıcaklıklarının artmasına sebep olmuştur. Panel üzerinde son sıralara yaklaşıldığında ise hücre sıcaklıkları tüm parametre değerleri için yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Diğer yandan h/H oranının düşürülmesi ısı transferi ile birlikte basınç kaybını da en fazla oranda artırmaktadır. Bu nedenle çalışmada ele alınan parametre değerlerinin sistemin soğutma ihtiyacına göre en uygun şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

7. KAYNAKLAR

1. Royne, A., Dey, C.J., Mills, D.R., 2005. Cooling of Photovoltaic Cells under Concentrated Illumination: A Critical Review, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 86, no. 4, pp. 451–483.
2. Liu, L., Zhu, L., Wang, Y., Huang, Q., Sun, Y., Yin, Z., 2011. Heat Dissipation Performance of Silicon Solar Cells by Direct Dielectric Liquid Immersion under Intensified Illuminations, Sol. Energy, vol. 85, no. 5, pp. 922–930.
3. Zhu, L., Boehm, R.F., Wang, Y., Halford, C., Sun, Y., 2011. Water Immersion Cooling of PV Cells in a High Concentration System, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 95, no. 2, pp. 538–545.
4. Sheeba, K.N., Rao, R.M., Jaisankar, S., 2015. A Study on the Underwater Performance of a Solar Photovoltaic Panel, Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff., vol. 37, no. 14, pp. 1505–1512.
5. Florschuetz, L.W., Truman, C.R., Metzger, D.E., 1981. Streamwise Flow and Heat Transfer Distributions for Jet Array Impingement with Crossflow, J. Heat Transfer, vol. 103, no. 2, p. 337.
6. Min, C., Nuofu, C., Xiaoli, Y., Yu, W., Yiming, B., Xingwang, Z., 2009. Thermal Analysis and Test for Single Concentrator Solar Cells, J. Semicond., Chinese Institute of Electronics, vol. 30, no. 4.
7. Natarajan, S.K., Mallick, T.K., Katz, M., Weingaertner, S., 2011. Numerical

- Investigations of Solar Cell Temperature for Photovoltaic Concentrator System with and Without Passive Cooling Arrangements, *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 50, no. 12, pp. 2514–2521.
8. Coventry, J.S., 2005. Performance of a Concentrating Photovoltaic/thermal Solar Collector, *Sol. Energy*, vol. 78, no. 2, pp. 211–222.
 9. Sun, Y., Wang, Y., Zhu, L., Huang, Q., Xiang, H., 2016. Simulation Study of a Linear Concentrating Photovoltaic Receiver with Direct Liquid-Immersed Solar Cells, *Sol. Energy*, vol. 124, pp. 1–14.
 10. Xiang, H., Wang, Y., Zhu, L., Han, X., Sun, Y., Zhao, Z., 2012. 3D Numerical Simulation on Heat Transfer Performance of a Cylindrical Liquid Immersion Solar Receiver, *Energy Convers. Manag.*, vol. 64, pp. 97–105.