

Mini-Channel Cooling of a Photovoltaic Cell

Onur Erkan ^{1*}, Musa Özkan ¹ and Oğuz Arslan ¹

¹Mechanical Engineering, Bilecik Şeyh Edebali University, Bilecik-Turkey
*(onur.erkana@bilecik.edu.tr)

Abstract – : In this article, cooling of a mono-crystalline photovoltaic cell (PV) having 0,00128 m² top surface area was studied using Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The PV cell was exposed to different solar radiation values in both no-cooling and cooling conditions. Mini-channel cooling was performed by means of 12 aluminum rectangular channels having 0,0018 m hydraulic diameter and 40 mm length. Water flow rate in channels was calculated corresponding to the Reynolds numbers ranging from 500 to 2300 and its effect on the cooling was examined. Results show that the temperature of the top surface of PV panel increases up to 57 °C under no-cooling condition and our analysis revealed that it can be decreased to 25 °C when the mini-channel cooling is in progress.

Keywords – photovoltaic cell, solar energy, mini-channel flow, cooling, renewable energy.

Mini Kanal İle Fotovoltaik Hücre Soğutma

Onur Erkan ^{1*}, Musa Özkan ¹ ve Oğuz Arslan ¹

¹Makine Mühendisliği, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik-Türkiye
*(onur.erkana@bilecik.edu.tr)

Özet – Bu makalede, üst yüzey alanı 0,00128 m² olan bir mono kristalin fotovoltaik (photovoltaic - PV) hücresinin soğutulması Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle araştırılmıştır. PV hücresi hem soğutmasız hem de soğutmalı durumlarda farklı güneş ışınımı değerleri için analiz edilmiştir. Soğutma sisteminin, 0,0018 m hidrolik çapa sahip, 40 mm uzunluğunda 12 adet alüminyum dikdörtgen mini kanallardan oluştuğu ve soğutucu akışkan olarak su kullanıldığı dikkate alınmıştır. Suyun kütledebisi 500 ≤ Re ≤ 2300 aralığında hesaplanmıştır ve debinin soğutma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre soğutmasız analizlerde 57 °C'ye kadar ısınan PV hücresi yüzey sıcaklığı, mini-kanal soğutma yöntemi kullanılarak 25 °C'ye kadar soğutulmuştur.

Anahtar Kelimeler – fotovoltaik hücre, güneş enerjisi, mini kanal akışı, soğutma, yenilenebilir enerji.

I. GİRİŞ

Günümüz dünyasının en önemli konularından birisi enerji ve onun verimli bir şekilde kullanımını olmuştur. Kayıpları en aza indirmek, maliyetleri düşürmek, atık enerjiyi geri kazanmak gibi konuların üstesinden gelerek elde edilen kaynakları en etkin biçimde kullanmak başlıca araştırma konularındandır. Enerji üretimindeki yüksek maliyetler, fosil yakıtların giderek tükendiği bu günlerde ortaya çıkan en önemli sorundur. Bu soruna karşılık getirilen çözüm ise kaynağına para ödenmeyen ve tükenmeyen yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımınıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelim bu alan üzerine yapılan araştırmaların çoğalmasına ve verim artırma çalışmalarının önünün açılmasına sebep olmuştur.

Güneş, yüksek güç yoğunluğuna sahip, ulaşılması kolay, karmaşık teknoloji gerektirmeyen, çevreye herhangi bir zararı olmayan önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bu avantajlarına ek olarak daha birçok avantajı olan Güneş enerjisi yoğun talep görmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde özellikle güneş enerjisi ile çalışan sistemlerde birçok iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Araştırmacıların sıklıkla üzerinde durdukları bu iyileştirme çalışmalarından birisi de fotovoltaik (photovoltaic-PV) hücrelerinin soğutulmasıdır.

PV modül soğutması aktif veya pasif olarak yapılabilir. Aktif sistemler pompa, fan gibi enerji harcayan ekipmanlar gerektirirken, pasif sistemlerde bunlara gerek yoktur [1]. PV hücrelerinin soğutulmasını Grubišić-Čabo vd. [2] pasif soğutma teknikleri, ısı boru soğutması, aktif soğutma teknikleri, nano akışkan soğutması, termoelektrik soğutma olarak beş ana başlık altında toplamışlardır.

A. Pasif Soğutma Teknikleri

Pasif soğutma tekniklerinde enerji harcayan pompa, fan gibi elemanlar bulunmaz. Bu yöntem ile yapılan soğutmada etkili olan mekanizma iletim ve doğal taşınımıdır. Pasif soğutma yöntemleri üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalara göre pasif sistemler daha az verim artışı sağlamalarına rağmen kurulum maliyetlerini düşürdüklerinden dolayı birçok durumda aktif soğutma sistemlerine tercih edilirler. Örneğin, Güneş ışını yoğunluğunun az olduğu durumlarda pasif sistemlerin kullanılması uygun olabilir. Ayrıca, özellikle PV panelin arkasından yapılan aktif soğutma sistemlerinde pompalama maliyetleri hesaba katıldığında, pasif soğutma yöntemleri bazen aktif soğutma yöntemlerine göre daha avantajlı olmaktadır [2].

Pasif soğutma sistemlerinde hava pasif soğutma oldukça yaygın kullanılır. Cuce vd. [3] polikristalin PV hücre üzerinde deneysel bir çalışma yapmışlardır. PV hücrelerinden birine ısıyı yaymak için alüminyum kanatçık eklemişlerdir. Ölçümleri kıyaslayabilmek için kanatçık eklenmemiş başka bir PV hücresi kullanmışlardır. Çalışmada 200 W/m^2 'den 800 W/m^2 'ye kadar çeşitli ışınım değerlerini kullanmışlar ve farklı ortam sıcaklıklarında deneyleri yapmışlardır. Kanatçık ile soğutma yapılan PV hücresinin elektrik verimliliğinde %9 artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Pasif soğutma sistemlerinde özel bir versiyon olarak kullanılan faz değiştiren malzeme PCM (Phase Change Materials) soğutması da birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Hassan [4] daha verimli olabilecek bir PCM malzemesini araştırdığı doktora tez çalışmasında hem iç hem de dış mekânda 500 W/m^2 , 750 W/m^2 , 1000 W/m^2 ışınım şiddeti altında küçük ve büyük boyutlardaki soğutma sistemini kullanmıştır. Uygun PCM malzemesi ile 1000 W/m^2 güneş ışınımı altında 5 saatlik bir periyotta panelin ön yüzey sıcaklığında $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik bir azalma olduğunu göstermiştir. Güç kazanımı ise referans PV hücresinden %9,7 daha fazla olarak kaydedilmiştir.

Pasif soğutma sistemlerinde akışkan olarak suyun kullanıldığı araştırmalar da mevcuttur. Bu kapsamda suya batırma, termosifon etkisi, kılcalık etkisi gibi yöntemler kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Rosa-Clot vd. [5] mono-kristalin PV paneli soğutmak için bir batırma tekniği kullanmışlardır. Bu çalışmada sıcaklık $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de tutulmuş ve 4 cm derinlikte verim %11'e kadar arttırılmıştır ancak su içine batırmanın derinliği arttıkça güneş ışınımının yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmiştir. El-Seesy vd. [6] Kahire'nin çevre şartlarında termosifon etkisi ile PV modül soğutması yapmışlardır. Bunun için 46 cm x 56,5 cm ölçülerinde polikristalin PV hücresinin altına soğurucu bakır borular yerleştirmişlerdir. Boruları PV modüle sabitlemek için silikon dolgu macunu kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda PV veriminde yaklaşık olarak %2 artış elde etmişlerdir. PV/T (photovoltaic/thermal) sisteminin toplam verimi ise %42,45 olarak kaydedilmiştir. Ayrıca bu pasif soğutma yöntemlerinden biraz daha farklı olarak Zhu vd. [7] Güneş ışınımındaki fotonlara müdahale etmeden sadece ısıyı toplayıp ortama atan silikon saydam bir tabaka ile PV modül soğutması çalışması yapmışlardır.

B. Aktif Soğutma Teknikleri

Aktif soğutma teknikleri pasif soğutma tekniklerine oranla daha fazla verim artışı sağlamaktadır. Aktif soğutma yöntemleri PV/T gibi atık ısının işe yarayacağı sistemler ve ana amacın elektriksel verimi arttırmak olduğu durumlar için oldukça uygundur [2]. Araştırmacılar tarafından PV modülü aktif olarak soğutmak için çok çeşitli yollar denenmiştir. PV modülü önünden, arkasından veya hem önünden hem arkasından zorlanmış taşınım ile soğutma yaparken su, hava, nano akışkan gibi farklı akışkanlar kullanılarak birçok soğutma sistemi geliştirilmiştir.

Teo vd. [8] bir PV/T tasarlayıp üretmişler ve deneysel olarak incelemişlerdir. PV modülün arkasına hava kanalları yerleştirerek soğutma yapmışlardır. Kanalların şekillerini optimize etmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

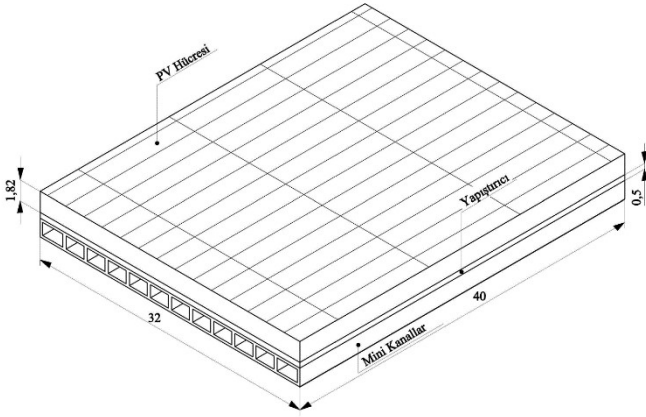
analizi kullanmışlardır. Bu analizlerde, soğutma olmadığı durumda PV modülün sıcaklığının $68 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar çıktığını ve elektriksel verimin %8,6'ya kadar düştüğünü gözlemlemişlerdir. Hava soğutmasını kullanarak PV modül sıcaklığının $38 \text{ }^\circ\text{C}$, elektriksel verimin ise %12,5 civarında kalmasını sağlamışlardır. Havanın kütleli debisinin 0,055 kg/s olduğu durumda PV modülden çekilen ısının en fazla olduğunu bulmuşlardır. Bunlar gibi pek çok farklı araştırmacı tarafından hava aktif soğutma yönteminin kullanıldığı çalışmalar yapılmıştır.

Soğutucu akışkan olarak su kullanılan aktif soğutma teknikleri, suyun ısı kapasitesinin yüksek olmasından dolayı daha iyi soğutma sağlayabilirler. Ayrıca sıvılar hemen hemen sıkıştırılmaz olarak kabul edildiğinden dolayı pompanın tükettiği enerjinin kompresör veya fanın tükettiği enerjiden az olması da su soğutmasının tercih sebebi olabilir. Du vd. [9] konsantre fotovoltaik sisteminin (CPV) soğutmasını yapmışlardır. Deneyde 1,08 m uzunluğunda ve 0,14 m genişliğinde mono kristalin PV modül kullanmışlardır. Soğutma için modülün arkasında alüminyum plaka üzerine yerleştirilmiş iç çapı 10 mm olan iki boru kullanmışlardır. Deneylerin sonucunda sıcaklığın $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar düştüğünü gözlemlemişlerdir. Elektriksel verimin 0,03 kg/s su debisine kadar hızla arttığını bu noktadan sonra yaklaşık olarak %8,3 civarında sabit kaldığını gözlemlemişlerdir. Bahaidarah vd. [10] benzer bir şekilde mono kristalin PV modülü içinden su akan kapalı bir kasa ile soğutmuşlardır. Onlar da soğutulmayan modüle kıyasla maksimum verimde %2,8 artış gözlemlerken, modül sıcaklığında $10 \text{ }^\circ\text{C}$ azalış gözlemlemişlerdir. Moharram vd. [11] farklı olarak PV modülü ön yüzünden soğutmuşlardır. Soğutmanın sonucu olarak toplam verim artışı yaklaşık %1,5 olmuştur. Ayrıca bu yöntemin, tozun önemli bir faktör olduğu Sahra ve Orta Doğu gibi bölgelerde PV panelinin ön yüzeyini temiz tutacağını belirtmişlerdir. Smith vd. [12] yoğunlaştırılmış Güneş ışınımı altında PV hücrelerini ön taraftan sprey su soğutması ile soğutmuşlardır. Onlar da mono kristalin PV panel kullanmışlardır. Sürekli su soğutması sonucunda pompanın güç tüketimi de göz önüne alındığında net güç kazancının %4,6 olduğunu göstermişlerdir.

Bu çalışmada aktif soğutma yöntemi ele alınmıştır. Bu bağlamda bir mono kristalin PV hücresinin hem soğutmasız hem de soğutma olması durumunda yüzey sıcaklığının ne olacağı HAD analizi ile araştırılmıştır. PV hücresinin 230 W/m^2 ile 980 W/m^2 değerleri arasında değişen Güneş ışınımını altında olduğu varsayılmıştır. Her bir ışınım değeri için beş farklı kütleli debide analizler gerçekleştirilmiştir.

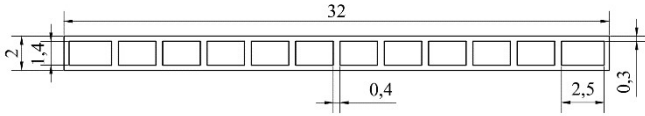
II. MATERYAL VE METOT

HAD analizleri için Şekil 1'de ki model ele alınmıştır. Eni 32 mm, boyu 40 mm ve yüksekliği 1,82 mm olan, $0,00128 \text{ m}^2$ 'lik yüzey alanına sahip bir PV hücresinin altına, 12 adet alüminyum mini kanal yerleştirilerek soğutma yapılacağı kabul edilmiştir. PV hücresi ve kanallar arasındaki birleşimin ise 9 W/mK ısı iletim katsayısına sahip alüminyum bızlı yapıştırıcı ile yapıldığı varsayılmıştır.



Şekil 1. PV Hücresi Ve Kanalların Birleşimi

Şekil 2’de gösterilen alüminyum mini kanalların hidrolik çapı 0,0018 m ve kanal uzunluğu 40 mm’dir. Kanallar yüksekliği 1,4 mm genişliği 2,5 mm olan dikdörtgen kesite sahiptir.



Şekil 2. Alüminyum Kanalların Ön Görünüşü

Çalışma akışkanı olarak su kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı ve suyun kanallara giriş sıcaklığı 25 °C olarak ele alınmıştır. PV hücresinin üst yüzeyinden sisteme sabit ısı akısı verilmiştir. Bu sabit ısı akısını belirlemek için Bahaidarah vd.’nin [10] yaptığı çalışma örnek alınmıştır. Yazarlar çalışmalarında saat 9 ile 16 arasında her saat başı ölçüm olarak Güneş ışınım değerlerini kaydetmişlerdir. En fazla Güneş ışınımı değerini saat 11’de 979 W/m² olarak ölçmüşlerdir. Bahaidarah vd.’nin [10] çalışmasında kullandıkları veriler, bu çalışmada da 230 W/m² ile 980 W/m² aralığında değişecek şekilde 8 adet ısı akısı olarak kullanılmıştır.

Baviere vd. [13] pürüzsüz mikro kanallarda laminardan türbülansa geçişin kanal boyutlarından etkilenmediğini ve geleneksel kanal içi akışta kritik kabul edilen 2300 civarında gerçekleştiğini bulmuşlardır. Benzer sonuçlar Bucci vd. [14], Schmitt ve Kandlikar [15] tarafından da raporlanmıştır. Bundan dolayı yapılan analizlerde laminardan türbülanslı akışa geçişin olduğu kritik Reynolds sayısı 2300 olarak alınmıştır. Çalışmada kullanılan parametrelerden birisi olan soğutucu suyun kanallara giriş hızı akışın laminar rejimde kalacağı $500 \leq Re \leq 2300$ aralığında hesaplanmıştır. Bu Reynolds sayılarına karşılık gelen kanala giriş hızı ve kütleli debiler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Re sayılarına karşılık gelen giriş hızı ve kütleli debiler

Re	Giriş Hızı (m/s)	Kütleli Debi (kg/s)
500	0,19	0,0079
1000	0,38	0,0158
1500	0,57	0,0238
2000	0,762	0,0317
2300	0,876	0,0365

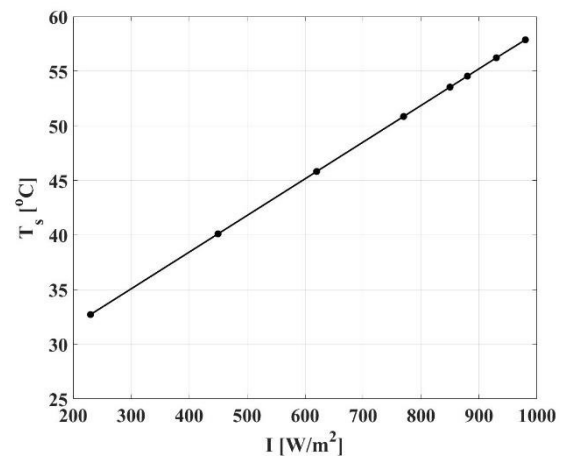
HAD analizlerinde aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Suyun giriş sıcaklığı 25 °C alınmıştır.
- Üst yüzey hariç diğer tüm yüzeyler ile 25 °C’deki ortam havası arasında doğal taşınım ile ısı transferi olduğu kabul edilmiştir.
- Kanalların çıkışının atmosferik basınca açıldığı kabul edilmiştir.

HAD analizleri yapılması için Şekil 1’deki model oluşturulduktan sonra katı ve sıvı hacimler tanımlanarak ayrıştırma (meshleme) işlemi yapılmıştır. Belirtilen Reynolds sayı aralığında türbülanslı akış bölgesi olmadığı için programda laminar model seçilmiştir. Daha sonra PV hücresinin ve yapıştırıcının yoğunluk, ısı iletim katsayısı, özgül ısı gibi malzeme özellikleri programa girilmiştir. Sınır koşulları kanal girişlerinde hız parametresi kullanılacak şekilde tanımlanmıştır. Giriş hızı Tablo 1’deki gibi toplamda beş farklı hız olarak alınmış ve analizler buna göre yapılmıştır. Ayrıca bu aşamada suyun kanala giriş sıcaklığı da 25 °C olarak tanımlanmıştır. Kanal çıkışlarının atmosferik basınca açıldığı kabul edilmiştir. Üst yüzey duvar olarak tanımlanıp, analizlerde bu yüzeye sabit ısı akısı uygulanmıştır. Sabit ısı akısı olarak 230,450, 620, 770, 850, 880, 930, 980 W/m² değerleri kullanılmıştır. Geriye kalan tüm yüzeyler de duvar olarak tanımlanıp, 25 °C sıcaklıktaki ortam ile aralarında doğal taşınım ile ısı transferi analiz edilmiştir. Daha sonra ilgili denklemlerin iteratif çözümlerinin yapılabilmesi adına tüm hücrelere başlangıç değer ataması yapılmıştır. Tüm bu işlemlerin ardından program çalıştırılarak iteratif çözümlerin 10⁻³ hassasiyette yakınsaması sağlanmıştır. Çalışmada 5 adet Reynolds sayısı ve 8 adet sabit ısı akısı değeri kullanılarak toplam 40 adet analiz yapılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

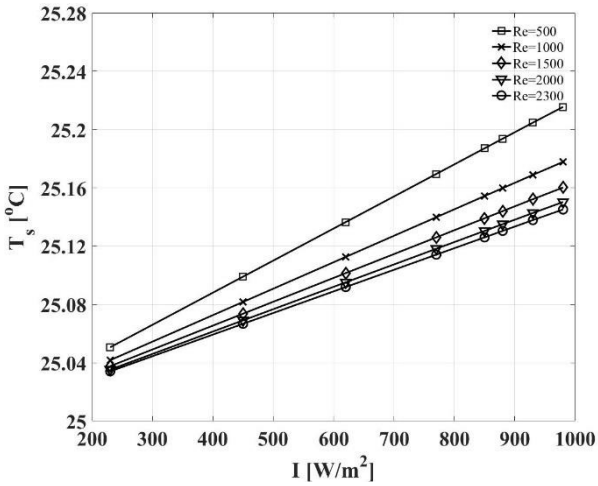
Bir mono kristalin PV hücresinin belli Güneş ışınımı değerlerinde soğutma olmadan sıcaklığının ne olduğunu ve bu sıcaklığın alüminyum kanallar ile aktif su soğutması yaparak ne kadar düşürülebileceğini görmek için HAD analizleri yapılmıştır. Her bir ışınım değeri için beş farklı kütleli debide analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Soğutmasız Durumda PV Üst Yüzey Sıcaklığının Işınım Değerlerine Göre Değişimi

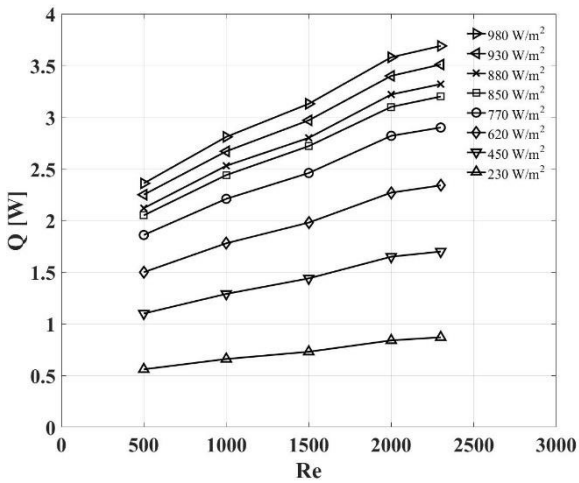
Yapılan analizler sonucunda, Şekil 3'te verilen grafikte de görüldüğü gibi ısı akısı arttıkça yüzey sıcaklığının da arttığı hesaplanmıştır. Soğutmasız durumda PV hücrenin üst yüzey sıcaklığının 230 W/m^2 ile 980 W/m^2 arasında değişen ısı akısı değerlerine göre en az $33 \text{ }^\circ\text{C}$ en fazla $57,87 \text{ }^\circ\text{C}$ olduğu sonucu elde edilmiştir.

PV hücresi su ile farklı kütleli debiler kullanılarak soğutulduğunda Şekil 4'teki grafikte de görüleceği üzere tüm kütleli debiler için PV hücrenin üst yüzey sıcaklığının $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar azaldığı görülmüştür. Soğutma durumunda yüzey sıcaklıkları Reynolds sayısı, yani kütleli debi arttıkça azalmıştır. Ancak kullanılan tüm kütleli debiler ile yüzey sıcaklığı yaklaşık $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar azaltılabildiği görülmüştür.



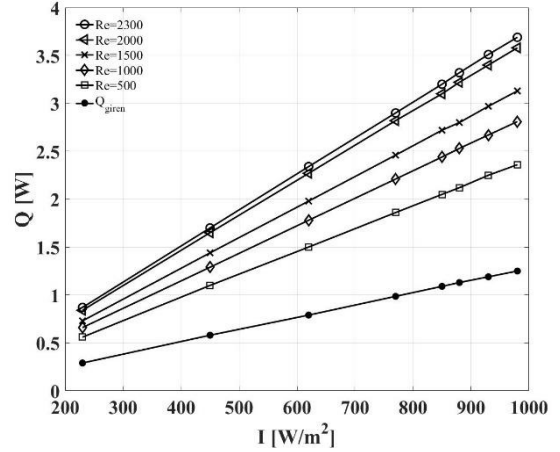
Şekil 4. Farklı Reynolds Sayılarında PV Üst Yüzey Sıcaklığının Işınım Değerlerine Göre Değişimi

Şekil 5'te su ile farklı ışınım değerleri için yapılan soğutma miktarlarına bakıldığında Reynolds sayısı yani kütleli debi arttıkça suyun sistemden çekebildiği ısı miktarının arttığı görülmüştür. Reynolds sayısı ve ısı akısı en yüksek değerlere sahip olduğunda sistemden dışarıya atılan ısının maksimum olduğu aynı şekil üzerinde görülmektedir.



Şekil 5. Her Işınım Değeri İçin Reynolds Sayılarına Bağlı Olarak Su İle Sistemden Dışarıya Atılan Isı Enerjisi Oranı

Sisteme PV hücrenin $0,00128 \text{ m}^2$ 'lik üst yüzeyinden verildiği kabul edilen her bir sabit ısı akısı için giren enerji miktarı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama ve analiz sonuçlarına göre Şekil 6'da görüldüğü gibi sisteme üst yüzeyden giren ısı enerjisi oranının farklı Reynolds sayılarında yapılan soğutma ile sistemden atılan ısı enerjisi oranından az olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Sisteme Giren Ve Sistemden Atılan Isı Enerjisi Oranının Işınım Değerlerine Göre Değişimi

IV. SONUÇ

Bu çalışmada bir mono kristalin PV hücrenin, hidrolik çapı $0,0018 \text{ m}$ olan alüminyum mini kanallar ile soğutulması analiz edilmiştir. Yapılan analizlerden soğutmasız durumda PV hücrenin üst yüzey sıcaklığının $57,87 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısındığı sonucu elde edilmiştir. PV hücrenin üst yüzey sıcaklığının soğutma yapılması halinde yaklaşık $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar soğutulabileceği görülmüştür. Soğutucu suyun kütleli debisi arttıkça soğutma etkisinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Ancak farklı kütleli debiler kullanıldığında elde edilen yüzey sıcaklıkları arasındaki farklar ihmal edilebilir düzeylerde olduğundan, düşük kütleli debilerin yani düşük pompalama maliyetlerinin de bu yöntemle soğutmada yeterli olabileceği sonucu elde edilmiştir.

İleriki çalışmalarda daha düşük kütleli debiler kullanılarak analizler tekrar edilebilir ve dolayısıyla daha az enerji harcayarak yani daha düşük debiler ile aynı verimlilikte soğutma yapıp yapılamayacağı incelenebilir. Ayrıca, mevcut çalışmada kullanılan mini kanallar ile pasif soğutma işlemi yapılarak elde edilecek sonuçlar burada sunulan sonuçlar ile kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

Conference on Microchannels and Minichannels, Toronto, Ontario, 2005.

- [1] Hasanuzzaman M., Malek A.B.M.A., Islam M.M., Pandey A.K., Rahim N.A., «Global advancement of cooling technologies for PV systems: A review,» *Solar Energy*, no. 137, pp. 25-45, 2016.
- [2] Grubišić-Čabo F., Nižetić S., Marco T.G., «Photovoltaic Panels: A Review Of The Cooling,» *Transactions Of Famena XL*, pp. 63-74, 2016.
- [3] Cuce E., Bali T., Sekucuoğlu S.A., «Effects of Passive Cooling on Performance of Silicon Photovoltaic Cells,» *International Journal of Low-Carbon Technologies*, no. 6, pp. 299-308, 2011.
- [4] Hassan A., *Phase Change Materials for Termal Regulation of Building Integrated Photovoltaics*, Dublin Institute of Technology, 2010.
- [5] Rosa-Clot M., Rosa-Clot P., Tina G.M., Scandura P.F., «Submerged photovoltaic solar panel: SP2,» *Renewable Energy*, no. 35, pp. 1862-1865, 2010.
- [6] El-Seesy I.E., Khalil T., Ahmed M.H., «Experimental Investigations and Developing of Photovoltaic/Thermal System,» *World Applied Sciences Journal*, cilt 19, no. 9, pp. 1342-1347, 2012.
- [7] Zhu L., Raman A., Wang K.X., Anoma M.A., Fan S., «Radiative Cooling of Solar Cells,» *Optica*, cilt 1, no. 1, 2014.
- [8] Teo H.G., Lee P.S., Hawlader M.N.A., «An Active Cooling System for Photovoltaic Modules,» *Applied Energy*, cilt 90, pp. 309-315, 2012.
- [9] Du B., Hu E., Kolhe M., «Performance Analysis of Water Cooled Concentrated Photovoltaic (CPV) System,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 16, pp. 6732-6736, 2012.
- [10] Bahaidarah H., Abdul Subhan, Gandhidasan P., Rehman S., «Performance Evaluation of a PV (Photovoltaic) Module by Back Surface Water Cooling for Hot Climatic Conditions,» *Energy*, cilt 59, pp. 445-453, 2013.
- [11] Moharram K.A., Abd-Elhady M.S., Kandil H.A., El-Sherif H., «Enhancing the Performance of Photovoltaic Panels by Water Cooling,» *Ain Shams Engineering Journal*, cilt 4, pp. 869-877, 2013.
- [12] Smith M.K., Selbak H., Wamser C.C., Day N.U., Krieske M., Sailor D.J., Rosenstiel T.N., «Water Cooling Method to Improve the Performance of Field-Mounted, Insulated, and Concentrating Photovoltaic Modules,» *Journal of Solar Energy Engineering*, cilt 136, 2014.
- [13] Baviere R., Ayela F., Le Person S., Favre-Marinet M., «An Experimental Study of Waterflow in Smooth and Rough Rectangular Microchannels,» *The 2nd International Conference on Microchannels and Minichannels*, Rochester, New York, 2004.
- [14] Bucci A., Celeta G.P., Cumo M., Serra E., Zummo G., «Water Single-Phase Fluid Flow and Heat Transfer in Capillary Tubes,» *The 2nd International Conference on Microchannels and Minichannels*, Rochester, New York, 2004.
- [15] Schmitt D.J., Kandlikar S.G., «Effects of repeating microstructures on pressure drop in rectangular minichannels,» *The 3rd International*