



Kare Desenli Soğurucu Yüzeyin Güneş Hava Kollektör Verimine Etkisinin Sayısal Analizi

Sharif Eyyublu¹, Mahmut Sami Büker^{2,3*}

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-9700-5187), sharifeyyublu@gmail.com

^{2*} Necmettin Erbakan Üniversitesi, Enerji ve Yarı iletkenler Araştırma Grubu, BITAM, Konya, Türkiye (ORCID:0000-0002-0896-2293), msbuker@erbakan.edu.tr

³ Uçak Mühendisliği / Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye (ORCID:0000-0002-0896-2293), msbuker@erbakan.edu.tr

(2nd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2022, March 10-13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1086722)

ATIF/REFERENCE: Eyyublu, S., Büker, MS. (2022). Kare desenli Soğurucu Yüzeyle Sahip bir Güneş Hava Kollektörünün HAD Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 763-768.

Öz

Bu çalışmada, kare desenli alüminyum soğurucu yüzeyle sahip bir güneş hava kollektörünün HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri yapılmıştır. Güneş hava kollektörünün verimliliğini arttırmak için kare desenli, pürüzlü bir alüminyum soğurucu yüzeyle kullanılmıştır. Kollektör içerisindeki çalışma havası, kollektörün sağ, sol ve alt kenarlarından, 15mm aralıklı ve 5mm çapında delikler yardımıyla çekilmektedir. Isı transferi ve hava akış özelliklerinin incelenmesi amacıyla kenar hava alıklı bir güneş hava kollektörünün HAD analizleri yapılmış, farklı ışınım ve kütle debileri altında sistemin optimum çalışma aralıkları belirlenerek karşılaştırılmıştır. Alüminyum kare yapılı kollektörün, 600 W/m², 800 W/m², 1000 W/m², 1200 W/m² ışınım, 0.01-0.015 kg/s kütle debileri ve 20 °C sabit hava giriş sıcaklığı için termal analizleri gerçekleştirilmiş ve çıkan havanın sıcaklık değerleri bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş hava kollektörü, HAD, Sayısal analiz, Soğurucu plaka, ANSYS.

Numerical Analysis on Solar Air Collector provided with Square Patterned Absorber Surface

Abstract

In this study, CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis of the solar air collector were carried out. An aluminum absorber surface with a square geometry is used to increase the thermal efficiency of the solar air collector. The working air inside the collector is drawn in with the help of holes with a diameter of 5mm at 15mm intervals on the right, left and bottom edges of the collector. CFD analysis of the solar air collector were performed to examine the heat transfer and air flow properties, and the optimum operating ranges of the system were determined and compared under different radiation and mass flow rates. Thermal analysis of the square patterned aluminum absorber collector were carried out for 600 W/m², 800 W/m², 1000 W/m², and 1200 W/m² radiation at 0.01-0.015 kg/s mass flow rates and 20°C constant air inlet temperature and the temperature values of the outlet air has been obtained.

Keywords: Solar air collector, CFD, Numerical analysis, Absorber, ANSYS.

* Sorumlu Yazar: msbuker@erbakan.edu.tr

1. Giriş

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında büyük bir potansiyele sahip olan güneş enerjisi sürdürülebilir olması ile ön plana çıkmaktadır. Bunun yanı sıra güneş enerjisi sistemleri termik ve enerji üretimi ile birlikte basit tasarım ve yapıları nedeniyle büyük oranda kullanılmaktadır [1].

Güneş termal enerji sistemlerinde düşük sıcaklık uygulama alanları orta ve yüksek sıcaklık uygulama alanlarına kıyasla çok daha fazla kullanılmaktadır [2]. Güneş hava kolektörleri ise, su veya hava ısıtma, kurutma ve damıtma gibi bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [3][4] [5][6][7].

Güneş hava kolektörleri ile ilgili literatürde bir çok sayısal ve deneysel araştırma mevcuttur. Bunun yanı sıra güneş hava kolektörlerinin verimli çalışmasını artıracak soğurucu yüzeylerle ilgilide araştırmalar yer almaktadır. Kolektör içerisinde kullanılacak olan soğurucu yüzeyin geometrik şekli, boyutları, kanatçık gibi yapılar kolektör verimini etkileyecek etkenlerdendir. Emici yüzeylerin geometrik şekilleri, V-şekilli, oluklu, çukurlu, sinusoidal, nervürlü ve altıgen petek yapısı bir çok araştırmacı tarafından araştırılmıştır [8], [9], [10], [11], [12], [13].

Güneş hava kolektörleri ile ilgili birçok HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) çalışmaları yapılmıştır [14]. Anil Singh vd. dairesel nervürlü güneş hava kolektörünün termal özellikleri üzerine simülasyona dayalı bir HAD çalışması yapmıştır. Çalışmanın nihai amacı ısı transfer özelliklerini araştırmak olmuştur [15]. Farklı akış şekline sahip bir güneş hava kolektörünün termal performansı üzerine yapılmış HAD analizi sonucunda kolektör içerisindeki çalışma havasının ısınma süresi uzatılarak, emici yüzeyden maksimum ısı transferi sağlanmıştır [16].

Bu çalışmada ise güneş hava kolektörü içerisindeki çalışma havasının kolektör içersinde kalma süresini arttırmak için kare yapılı bir geometrik yapı kullanılmış ve kolektörün HAD analizi gerçekleştirilmiştir. Analizleri gerçekleştirilmiş güneş hava kolektörü çalışma havasını kolektörün kenar kısımlarından çekecek şekilde fasat tipi olarak tasarlanmıştır. Kolektör kenarlarından çekilmiş çalışma havası kolektörün arka tarafından fan yardımıyla çekilerek iç mekana aktarılacak şekildedir. Bir simülasyon aracı olan ANSYS 2020R2 programı yardımıyla farklı ışıma ve kütle debilerinde analizleri gerçekleştirilmiş, kolektörün termal özellikleri ayrıntılı şekilde alt bölümlerde açıklanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, iç geometrisi kare desenli olan güneş hava kolektörünün hava akışının HAD simülasyonu ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Kare desenli soğurucu yüzeye sahip hava kolektörünün simülasyon çalışması, kütle akış hızı ve güneş radyasyonu değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. HAD simülasyonunu gerçekleştirilirken bir çok araştırmacının kullandığı türbülans metodları çözücü olarak kullanılmıştır [17], [18]. Bu çalışmanın amacı güneş hava kolektörünün ısı transferi performansını üst seviyelere çıkaracak tasarımı geliştirmek, farklı hava akış değerleri altında kolektörün verimliliğini artırmak ve yüksek verim elde etmek için optimum radyasyon değerlerini bulmaktır. Bu amaçla kare yapılı geometrinin (700x500 mm) termal özelliklerinin simülasyona dayalı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Analizleri gerçekleştirilen kolektörün akış analizi için türbülans çözücü model olarak SST k- ω modeli kullanılmıştır [19]. Analiz çalışmasında radyasyon yoğunluğunu çözmek için akış ve ısı transferinin üç temel çeşidini birleştirecen DO (Discrete Ordinates) radyasyon modeli seçilmiştir. [20].

2.1. Yönetim Denklemleri

Süreklilik denklemi genellikle yük, kütle, enerji ve momentumun korunmasını tanımlar ve şu şekilde yazılır [21]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u})$$

Kütle korunumu [21]:

$$\frac{\partial \rho_f u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_f v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_f w}{\partial z} = 0$$

Momentum korunumu [21]:

$$u \frac{\partial \rho_f u}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_f u}{\partial y} + w \frac{\partial \rho_f u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$u \frac{\partial \rho_f v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_f v}{\partial y} + w \frac{\partial \rho_f v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$u \frac{\partial \rho_f \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_f \omega}{\partial y} + w \frac{\partial \rho_f \omega}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) + \rho_f g$$

Enerji denklemi [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho E + p) \vec{v} = \nabla \cdot k_{eff} \nabla T + S_h$$

Akışkan bölgesi için enerji korunumu [21]:

$$u \frac{\partial \rho_f c_{pf} T_f}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_f c_{pf} T_f}{\partial y} + w \frac{\partial \rho_f c_{pf} T_f}{\partial z} = \lambda_f \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} \right) - \nabla \cdot q_{rad}$$

SST k- ω modeli için taşınım denklemi [21]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \\ + S_k \end{aligned}$$

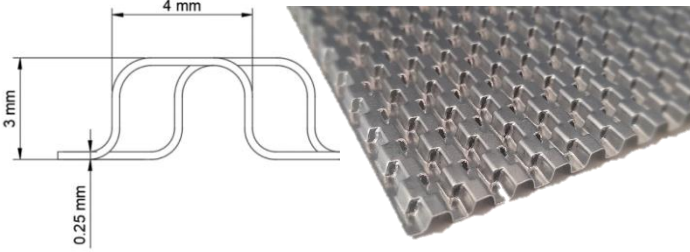
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \end{aligned}$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \rightarrow \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \rightarrow S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

$$(C_{1\epsilon} = 1.44), (C_2 = 1.9), (\sigma_k = 1.0), (\sigma_\epsilon = 1.2)$$

2.2. HAD Modeli

Bu çalışmada yapılan araştırmalar sonucunda kollektör ölçüleri 500x700mm belirlenmiş, hava girişi kollektörün kenarlarındaki delikler yardımıyla çekilecek şekilde tasarlanmıştır. Emici yüzey olarak kare desenli yapı ısı transfer yüzeyinin artırılması için kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Kare desenli geometri ve teknik boyutlar.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Alüminyum soğurucu yüzeye sahip güneş hava kollektörü için sıcaklık artışına bağlı olarak soğurucu yüzeyin sıcaklık değişimi ve akışın hız konturları bu kısımda açıklanacaktır. Güneş hava kollektörünün, dört farklı ışınım (600, 800, 1000 ve 1200 W/m² ve farklı debiler (0.001kg/s ve 0.015kg/s) için gerçekleştirilen analizlerde sıcaklık ve hız dağılımları aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre hava çıkış sıcaklık değerleri tabloda gösterilmiştir:

Tablo 2. Havanın ışıma bağlı çıkış sıcaklık değerleri

Işınım W/m ²	Kütle debisi kg/s	Giriş sıcaklığı K	Çıkış sıcaklığı K
1200	0,01	292,15	338,991
1200	0,015	292,15	327,324
1000	0,01	292,15	333,732
1000	0,015	292,15	323,464
800	0,01	292,15	328,242
800	0,015	292,15	319,254
600	0,01	292,15	322,567
600	0,015	292,15	314,925

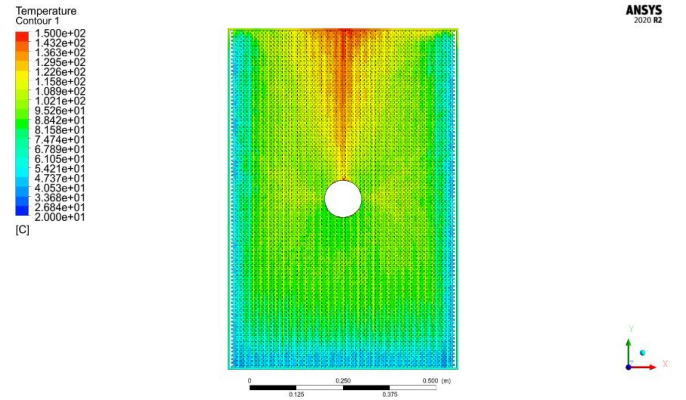
3.1. 1200 W/M² Işınım Değeri İçin Sıcaklık Dağılımı

Güneş hava kollektörü tasarlanırken kollektörün üç kenar kısmından hava çekiş delikleri açılmıştır. Soğurucu yüzeyin sıcaklık dağılımına bakıldığında yüzey sıcaklığının kollektörün hava girişi olmayan yukarı kısımlarında daha yüksek değerlere (150 °C) ulaştığı görülmektedir (Şekil 2). Kollektör kenarından merkezdeki hava çekiş fanına doğru ise soğurucu yüzey sıcaklığının azaldığı görülmüştür. Soğurucu yüzey sıcaklığının hava tarafından büyük ölçüde soğurulduğu görülmektedir. Kollektör çıkışındaki havanın kütle debisi artırıldığında ise hava çıkış sıcaklığı azalmıştır (Şekil 3). Bunun sebebi artan hava hızından dolayı havanın soğurucu yüzey sıcaklığını diğer kütle debisine göre daha az soğurmasıdır.

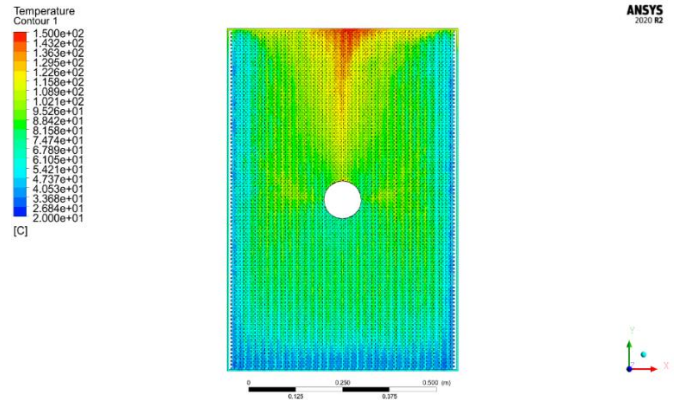
Analizi yapılacak tasarımlar çözüm ağı modellemesi ANSYS Mesh çözücüsü yardımıyla oluşturulmuştur. Kollektörün üst kısmında yerleşen yüzey güneş ışınının etki ettiği yarı saydam bir sınır duvarıdır.

Analiz süreci boyunca kullanılan sınır koşulları aşağıdaki gibidir:

- Hava giriş sıcaklığı sabittir (292.15K),
- Kollektörün yan duvarlarından olan ısı kayıpları dikkate alınmamıştır,
- Türbülans viskozite oranı %10'dur,
- Türbülans kayıp oranı %5'tir,
- Analiz sabit durumda çözülmüştür.



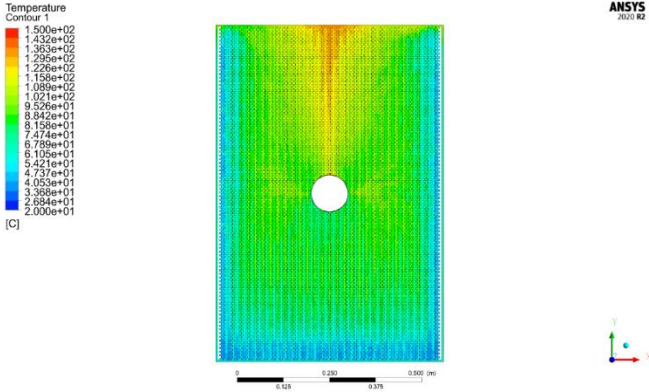
Şekil 2. 0.01 kg/s kütle debisinde emici yüzeyin sıcaklık dağılımı



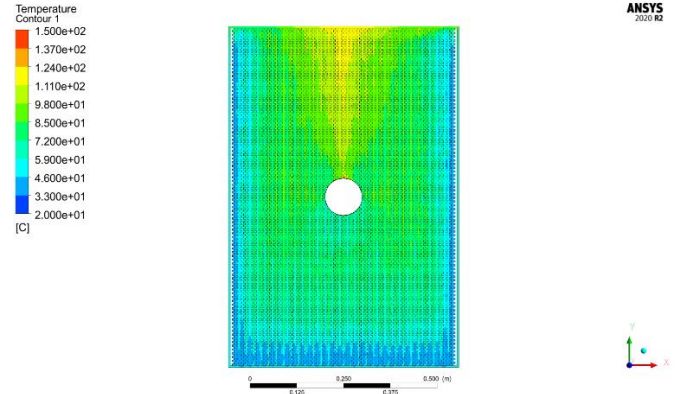
Şekil 3. 0.015 kg/s kütle debisinde emici yüzeyin sıcaklık dağılımı

3.2. 1000 W/M² Işınım Değeri İçin Sıcaklık Dağılımı

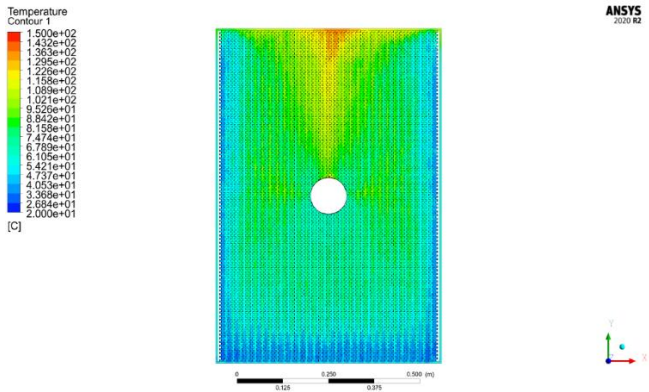
Kollektör içindeki soğurucu yüzeyin sıcaklık değişim konturlarına bakıldığında iki analiz sonucunda da soğurucu yüzey sıcaklığı hava çekişi olmayan tarafta 140 °C'ye ulaşmıştır. (Şekil 4, Şekil 5) Hava çekişi olan taraflarda ise bu sıcaklık hava tarafından neredeyse tümüyle soğurulmuştur. Analiz sonuçlarına bakıldığında, çıkış havasının kütle debisi artırıldığında artan hava hızından dolayı ısının soğurulmasında azalmıştır.



Şekil 4. 0.01 kg/s kütle debisinde emici yüzeyin sıcaklık dağılımı



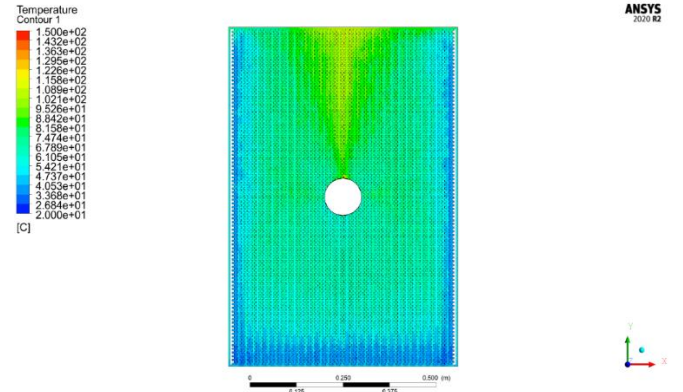
Şekil 7. 0.015 kg/s kütle debisinde emici yüzeyin sıcaklık dağılımı



Şekil 5. 0.015 kg/s kütle debisinde emici yüzeyin sıcaklık dağılımı

3.4. 600 W/M² Işınım Değeri İçin Sıcaklık Dağılımı

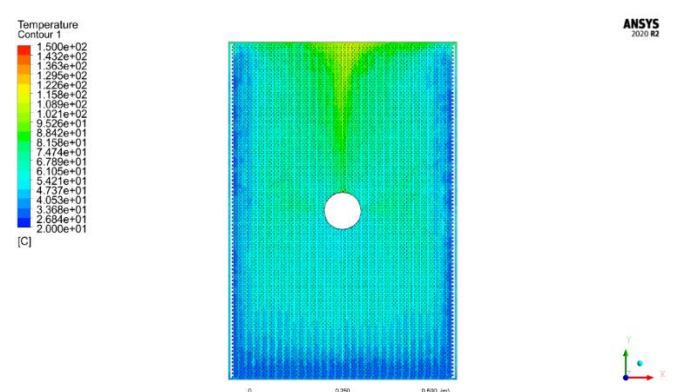
Analiz sonuçlarına baktığımızda kollektör içindeki emici yüzeyin sıcaklık değişimi 0.01 kg/s ve 0.015 kg/s kütle debilerinde sırasıyla 115 °C ile 108 °C olmuştur (Şekil 8, Şekil 9). Hava girişli kısımlarda, bu sıcaklıkların hava tarafından tam olarak soğurulduğu görülmüştür.



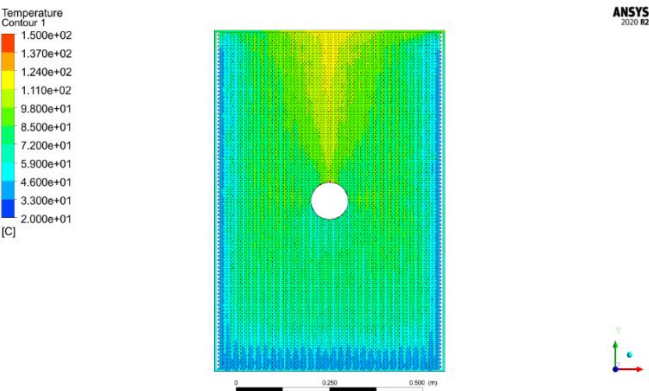
Şekil 8. 0.01 kg/s kütle debisinde emici yüzeyin sıcaklık dağılımı

3.3. 800 W/M² Işınım Değeri İçin Sıcaklık Dağılımı

Analiz sonuçları, kollektör içindeki soğurucu yüzeyin sıcaklık değişiminin sırasıyla 0.01 kg/s kütle debisinde 130 °C, 0.015 kg/s kütle debisinde ise 120 °C olmuştur (Şekil 6, Şekil 7).



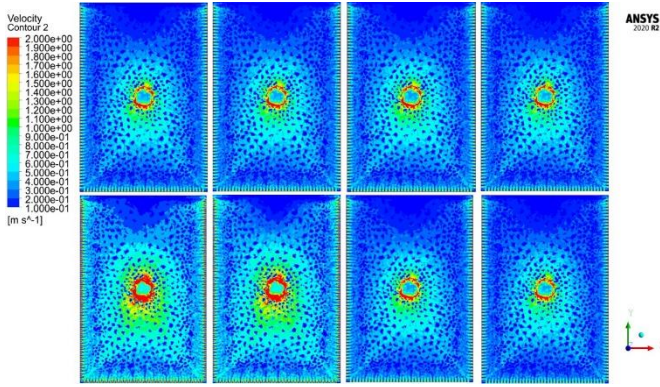
Şekil 9. 0.015 kg/s kütle debisinde emici yüzeyin sıcaklık dağılımı



Şekil 6. 0.01 kg/s kütle debisinde emici yüzeyin sıcaklık dağılımı

3.5 Çalışma Havaasının Hız Dağılımı

Kollektör içerisindeki çalışma havaasının hız dağılımı konturlarından görüldüğü üzere kenar deliklerden merkezdeki çekiş fanına doğru hız artmaktadır. Hava girişi olmayan üst tarafta ise hız değerlerinin çok düşük olduğu görülmüştür. Kollektör fasat tipi olarak tasarlandığı için üst tarafta yağmur veya buna benzer faktörlerin etkisinin azaltılması amacıyla delikler oluşturulmamıştır. Bu sebepten dolayı kollektörün üst kısımlarında, sıcaklık dağılım konturlarında da görüldüğü üzere, hava hızı düşük olmuştur.



Şekil 10. Çalışma havaası hız dağılımı4. Sonuç

Bu çalışmada, bir güneş hava kollektörü tasarımının farklı ışınım değerleri ve kütle debileri altında HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri yapılmıştır. Güneş hava kollektörünün verimini artırmak amacıyla kare desenli geometriye sahip bir alüminyum soğurucu plaka kullanılmıştır. Isı transferi ve hava akış özelliklerini incelemek amacıyla güneş hava kollektörünün HAD analizleri gerçekleştirilmiş, farklı ışınım ve kütle debileri altında sistemin optimum çalışma aralıkları belirlenerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında havanın kütle debisi artırıldığında, çıkış sıcaklığında azalma görülmüştür. Aynı zamanda ışınım değerleri azaldığında çıkış sıcaklığının azalması öngürülür bir durumdur. Sonuç olarak emici yüzey olarak kullanılan kare desenli plakanın kollektör verimliliğini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür.

5. Teşekkür

Bu çalışma, Necmettin Erbakan Üniversitesi BAP Birimi tarafından 2113MER03003 nolu proje ile desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] A. Sharma, R. Pitchumani, R. Chauhan, Solar air heating systems with latent heat storage - A review of state-of-the-art, *Journal of Energy Storage*. 48 (2022) 104013. doi:10.1016/j.est.2022.104013.
- [2] V.P. Katekar, S.S. Deshmukh, Techno-economic review of solar distillation systems: A closer look at the recent developments for commercialisation, *Journal of Cleaner Production*. 294 (2021) 126289. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126289.
- [3] V.P. Katekar, S.S. Deshmukh, A review of the use of phase change materials on performance of solar stills, *Journal of Energy Storage*. 30 (2020) 101398. doi:10.1016/j.est.2020.101398.
- [4] A.E. Kabeel, M.H. Hamed, Z.M. Omara, A.W. Kandeal, Solar air heaters: Design configurations, improvement

methods and applications – A detailed review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 70 (2017) 1189–1206. doi:10.1016/j.rser.2016.12.021.

- [5] G. Surendhar, G. Srinivasan, P. Muthukumar, S. Senthilmurugan, Investigation of thermal performance in a solar air heater having variable arc ribbed fin configuration, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 52 (2022) 102069. doi:10.1016/j.seta.2022.102069.
- [6] E.M.S. El-Said, M.A. Gohar, A. Ali, G.B. Abdelaziz, Performance enhancement of a double pass solar air heater by using curved reflector: Experimental investigation, *Applied Thermal Engineering*. 202 (2022) 117867. doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117867.
- [7] R. Kumar, Gaurav, S. Kumar, A. Afzal, A. Muthu Manokar, M. Sharifpur, A. Issakhov, Experimental investigation of impact of the energy storage medium on the thermal performance of double pass solar air heater, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 48 (2021) 101673. doi:10.1016/j.seta.2021.101673.
- [8] V.S. Hans, R.P. Saini, J.S. Saini, Heat transfer and friction factor correlations for a solar air heater duct roughened artificially with multiple v-ribs, *Solar Energy*. 84 (2010) 898–911. doi:10.1016/j.solener.2010.02.004.
- [9] A.H. Abdullah, H.Z. Abou-Ziyan, A.A. Ghoneim, Thermal performance of flat plate solar collector using various arrangements of compound honeycomb, *Energy Conversion and Management*. 44 (2003) 3093–3112. doi:10.1016/S0196-8904(03)00013-X.
- [10] D. Jin, J. Zuo, S. Quan, S. Xu, H. Gao, Thermohydraulic performance of solar air heater with staggered multiple V-shaped ribs on the absorber plate, *Energy*. 127 (2017) 68–77. doi:10.1016/j.energy.2017.03.101.
- [11] M. Abuşka, S. Şevik, A. Kayapınar, Experimental analysis of solar air collector with PCM-honeycomb combination under the natural convection, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 195 (2019) 299–308. doi:10.1016/j.solmat.2019.02.040.
- [12] Y. Zhao, T. Meng, C. Jing, J. Hu, S. Qian, Experimental and numerical investigation on thermal performance of PV-driven aluminium honeycomb solar air collector, *Solar Energy*. 204 (2020) 294–306. doi:10.1016/j.solener.2020.04.047.
- [13] S. EYYUBLU, M.S. BÜKER, Alüminyum Balpeteği Soğurucu Yüzeğe Sahip bir Güneş Hava Kollektörünün HAD Analizi, *European Journal of Science and Technology*. (2022) 484–490. doi:10.31590/ejosat.1039534.
- [14] A.S. Yadav, M.K. Dwivedi, A. Sharma, V.K. Chouksey, CFD based heat transfer correlation for ribbed solar air heater, *Materials Today: Proceedings*. (2022). doi:10.1016/j.matpr.2021.12.382.
- [15] A.S. Yadav, V. Shrivastava, A. Sharma, M.K. Dwivedi, Numerical simulation and CFD-based correlations for artificially roughened solar air heater, *Materials Today: Proceedings*. 47 (2021) 2685–2693. doi:10.1016/j.matpr.2021.02.759.
- [16] A.S.T. Tan, J. Janaun, H.J. Tham, N.J. Siambun, A. Abdullah, Performance analysis of a solar heat collector through experimental and CFD investigation, *Materials Today: Proceedings*. (2022). doi:10.1016/j.matpr.2022.02.159.
- [17] F. Afshari, H.G. Zavaragh, B. Sahin, R.C. Grifoni, F.

- Corvaro, B. Marchetti, F. Polonara, On numerical methods; optimization of CFD solution to evaluate fluid flow around a sample object at low Re numbers, *Mathematics and Computers in Simulation*. 152 (2018) 51–68. doi:10.1016/j.matcom.2018.04.004.
- [18] A. Sözen, F.Ş. Kazancıoğlu, A.D. Tuncer, A. Khanlari, Y.C. Bilge, A. Gungor, Thermal performance improvement of an indirect solar dryer with tube-type absorber packed with aluminum wool, *Solar Energy*. 217 (2021) 328–341. doi:10.1016/j.solener.2021.02.029.
- [19] M. Ahsan, Numerical analysis of friction factor for a fully developed turbulent flow using k-ε turbulence model with enhanced wall treatment, *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. 3 (2014) 269–277. doi:10.1016/j.bjbas.2014.12.001.
- [20] K. Rajarajeswari, P. Alok, A. Sreekumar, Simulation and experimental investigation of fluid flow in porous and non-porous solar air heaters, *Solar Energy*. 171 (2018) 258–270. doi:10.1016/j.solener.2018.06.079.
- [21] E. Alic, M. Das, E.K. Akpınar, Design, manufacturing, numerical analysis and environmental effects of single-pass forced convection solar air collector, *Journal of Cleaner Production*. 311 (2021) 127518. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127518.