

Güneş Enerjili Hava Kollektöründe Akış Yerinin Isıl Verime Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Mesut Abuşka

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Akhisar Meslek Yüksek Okulu, Makine Bölümü, Akhisar, Manisa, +90 236 4126896
mesut.abuska@cbu.edu.tr

Geliş / Received: 9 Haziran (June) 2016
Kabul / Accepted: 7 Aralık (December) 2016
DOI: 10.18466/cbayarfbe.280659

Özet

Bu çalışmada düz yutucu plakalı, selektif boyalı güneş enerjili hava kollektöründe akış yerinin ısı verime etkisinin deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Aynı özelliklere sahip iki kolektörlü bir deney düzeneği kurulmuştur. İlk kollektörde hava, yutucu plakanın üstünden (önden geçişli) ikincisinde ise altından (arkadan geçişli) akacak şekilde kurulum yapılmıştır. Yutucu plakalar alüminyumdan imal edilmiş ve selektif boya ile boyanmıştır. Deneyler iki farklı kütleli debide icra edilmiştir. Deneyler Mayıs 2015 ayı içerisinde eş zamanlı olarak Akhisar/Manisa'da benzer açık hava koşullarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde güneş ışınımı, kollektör hava çıkış hızları, kollektör hava giriş-çıkış sıcaklıkları, yutucu plaka yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Ölçüm verileri baz alınarak ısı analizleri yapılmıştır. 0.07 kg/s debide önden geçişli kollektör ısı verimi ortalama değerler ile %37.1, arkadan geçişli kollektör için ise %43.5 olurken 0.13 kg/s debide önden geçişli kollektör için ısı verim %62.6, arkadan geçişli kollektör için de %56.2 değerleri elde edilmiştir. 0.07 kg/s hava debisi için arkadan geçişli kollektörün, 0.13 kg/s hava debisi için ise önden geçişli kollektörün daha verimli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler - Arkadan geçişli, düz yutucu plaka, güneş enerjili hava kollektörü, önden geçişli, ısı verim

Experimental Investigation of the Effect of Flow Path to Thermal Efficiency in Solar Air Collector

Abstract

The aim of this study is to determine the effect of the flow path to thermal efficiency in the selective coated flat plate solar air collector experimentally. An experimental setup consists of two same characteristics of collectors is established. The setup is made in a way as which the air flow over the absorber plate (front-pass) in the first collector and the air flow under the absorber plate (back-pass) in the second collector. The absorber plates are made of aluminum and coated with selective paint. The experiments were conducted in two different mass flow rates. The experiments were carried out simultaneously in May 2015 Akhisar/Manisa under similar weather conditions. In the experiments, solar radiation, the air velocities at the exit collector, the collector air inlet, and outlet temperatures, the absorber surface temperatures were measured. Thermal analysis was conducted by measurement data. The average thermal efficiency is obtained as 37.1-43.5% for 0.07 kg/s, 62.6-56.2% for 0.13 kg/s in front and back pass type collector, respectively. The results showed that the back-pass collector for 0.07 kg/h air flow rate and the front-pass collector for 0.13 kg/h air mass flow rate are more efficient than other.

Keywords: Back pass, flat plate absorber, solar air collector, front pass, thermal efficiency.

1 Giriş

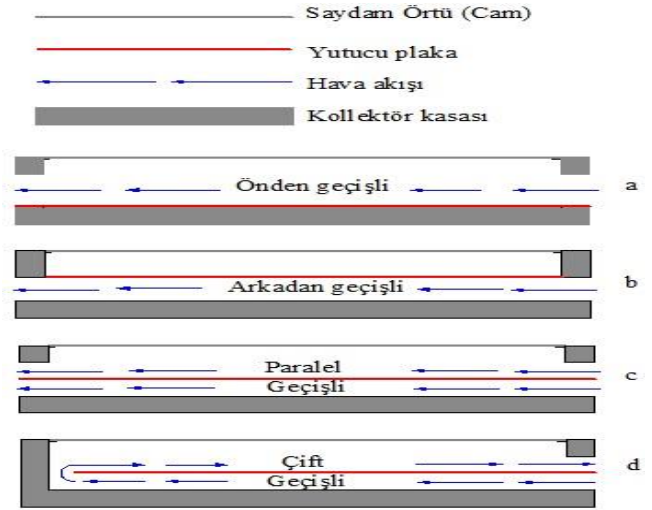
Geleneksel enerji fiyatlarının artması, hava kirliliği ve küresel ısınma gibi çevresel etkilerden dolayı güneş

enerjisi kullanımını ve zorunluluğunu artırmaktadır. Dünya’da ve Türkiye’de alternatif enerji kaynaklarından güneş enerjisinin kullanım oranı ve talebi her geçen gün artmaktadır. Güneş enerjisi başlıca kullanımları ısıtma ve elektrik üretimidir. Güneş enerjili ısıtıcılar su ısıtma, mahal ısıtma, tarımsal ürünlerin kurutulması ve endüstriyel ısıtma işlemlerde kullanılmaktadır. Türkiye’de güneş enerjisinden faydalanma çoğunlukla sıcak su hazırlama şeklindedir. Güneş enerjisinin diğer bir faydalanma şekli olan hava ısıtma yönteminin kullanımı da önem kazanmaya başlamıştır. Güneş enerjili hava kollektörleri (GEHK) evsel kullanımda ortam ısıtmada, endüstriyel kullanımda ise tarımsal kurutma işlemlerinde kullanılmaktadır. Türkiye güneş ışınımı açısından yüksek bir potansiyele sahip olmakla birlikte güneş enerjisinin hava ısıtma konusunda kullanımı oldukça azdır. Türkiye sahip olduğu coğrafik konumla günlük 7.2 saat güneşlenme süresi ve 3.6 kWh/m² ışınım ortalama değerleri ile oldukça iyi bir potansiyele sahiptir. Çalışmanın gerçekleştirildiği Mayıs ayında Manisa (38°55’K-27°50’D) için 5.94 kWh/m²-gün global radyasyon ve 9.49 h güneşlenme süresi ortalama değerlerine sahip olup genel olarak hava ısıtma tekniğinin kullanımına oldukça uygunluk göstermektedir [1].

GEHK, güneş ışınımını absorbe etmek ve ısıyı yutucu plakadan akış havasına transfer etmek gibi iki fonksiyona sahip bir ısı değiştiricisi tipidir. GEHK uzun ömürlü, hafif, korozyon gibi problemleri olmayan düşük maliyetli basit hava ısıtma cihazlardır. Klasik bir hava ısıtma kollektörü etrafı iyi yalıtılmış bir kasa, bu kasa içine yerleştirilen bir yutucu plaka ve en üste ise bir saydam örtüden meydana gelir. Hava akımının doğal veya cebri olması durumuna göre de sistemde fan yer alır. GEHK’nde yutucu plaka ve hava arasındaki ısı transfer katsayısı düşüktür. Bu nedenle hava kollektörlerinin ısı verim değerleri düşük kalmaktadır.

Literatürde, yutucu plaka ve hava arasındaki ısı taşınım katsayısını iyileştirmek için birçok düzenleme önerilmiştir. Bu düzenlemeler ağırlıklı olarak yutucu plakanın malzeme cinsi ve geometrisi, akış tipleri, kanal geometrisi, selektif yüzeyler ve saydam örtü üzerinedir. GEHK’nde akış tipinin değiştirilmesi önemli performans iyileştirme metodlarından biridir. Şekil 1’de saydam örtülü GEHK’nde akış yolu tipleri

verilmiştir. Saydam örtü kullanılan GEHK’nde hava akış yolu tipleri; a-yutucu plakanın üzerinden akış-önden geçişli, b-yutucu plakanın altından akış-arkadan geçişli, c-aynı anda yutucu plakanın hem altından hem de üstünden akış-paralel geçişli, d-yutucu plakanın iki tarafını da dolaşacak şekildeki akış-çift geçişlidir.



Şekil 1. GEHK’nde akış yolu tipleri

Parker ve ark. V kıvrımlı yutucu plakalı GEHK’nde önden, arkadan ve çift taraflı geçişin ısı performans testlerini yaparak analiz etmişlerdir [2]. Ong çalışmasında düz yutucu plakalı GEHK’nde dört farklı akış tipinin matematik modelini, ısı performans tahminlemesi için oluşturmuştur. Havanın yutucu plakanın üzerinden, altından, eşzamanlı olarak hem alttan ve üstten ayrıca saydam örtüsüz olmak üzere dört farklı yapılandırma incelenmiştir [3]. Metwally ve ark. kıvrımlı ve geleneksel beş farklı dizayn GEHK’nün performanslarını deneysel olarak karşılaştırmalı incelemişlerdir. Testler; Kahire iklimik koşullarında, 0.01-0.1 kg/sm² arası debide, 650-950 W/m² arası ışınım ve beş metre uzunluğundaki kollektörlerde gerçekleştirilmiştir. Arkadan geçişli kollektör verimi önden geçişli kollektör verimine göre tüm operasyon koşullarında daha yüksek çıkmıştır [4]. Hegazy çalışmasında düz yutucu plakalı GEHK’ünde üç farklı (a-arkadan geçişli, b-önden geçişli ve c-paralel geçişli) akış yeri düzenlemesi ve kanal geometrisi önerilerek uygulanabilirlikleri analitik kriterler açısından incelenmiştir. Isıl verim açısından sırası ile çift geçişli, arkadan geçişli ve önden geçişli olmak üzere daha yüksek değerler elde edilmiştir [5]. Velmurugan ve ark. GEHK’nde önden, arkadan ve çift

CBÜ Fen Bil. Dergi., Cilt 12, Sayı 3, 473-478 s

geçişli akış tipini deneysel olarak üç farklı debide (24.84 – 50.04 – 75.05 kg/h) eşzamanlı olarak ısıl performans açısından analiz etmişlerdir. Tüm test koşullarında ısıl verim sırası ile çift geçişli, önden geçişli ve arkadan geçişli olmak üzere yüksek çıkmıştır [6]. Tyagi ve ark. Düz yutucu plakalı GEHK'nde önden, arkadan ve çift geçiş tiplerini deneysel olarak incelemişler ve en yüksek verim çift geçişli kollektörde gerçekleşmiştir. Önden geçişli kollektör arkadan geçişli kollektöre göre daha yüksek ısıl verim değeri tespit edilmiştir [7].

Bu çalışmada, selektif boyalı düz yutucu plakalı kollektörlerde önden geçiş ve arkadan olmak üzere akış tipleri, ısıl verim dikkate alınarak deneysel olarak test edilmiştir.

2 Materyal ve Metot

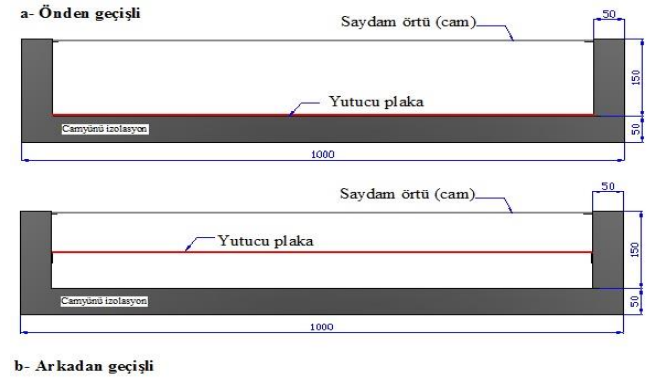
Bu çalışmada, selektif boyalı düz yutucu plakalı GEHK'nün hava akış yeri dikkate alınarak deneysel incelemesi yapılmıştır. Bu amaçla iki kolektörlü bir deney seti kurulmuştur. İlk kollektör önden geçişli, ikinci kollektör ise arkadan geçişli olarak yapılandırılmıştır. Deneylerde kullanılan GEHK'leri; kollektör kasası, alüminyum yutucu plaka, cam, hava dolaşım fanları ve ölçüm cihazlarından oluşmaktadır. Kurulan test düzeneğindeki hava ısıtma kollektörlerinin başlıca özellikleri Çizelge 1.'de, test düzeneğinin resmi Şekil 2.'de ve kollektörlerin kesit çizimleri Şekil 3.'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kollektörlerin teknik özellikleri

Sistem Elemanı	Teknik Özellikler
Kasa	0.8 mm dkp sac, 1000x2000x200 mm
İzolasyon	50 mm cam yünü
Yutucu plaka	900x1900x1 mm, alüminyum
Saydam örtü	900x1900x3.2 mm, düşük demirli cam
Sızdırmazlık	Epdm fitil, silikon, kanal bandı
Yut. plaka boyası	Selektif boya, ϵ : 0.20-0.49, α : 0.88-0.94
Fanlar	48W, 225 m ³ /h, tanjansiyel fan



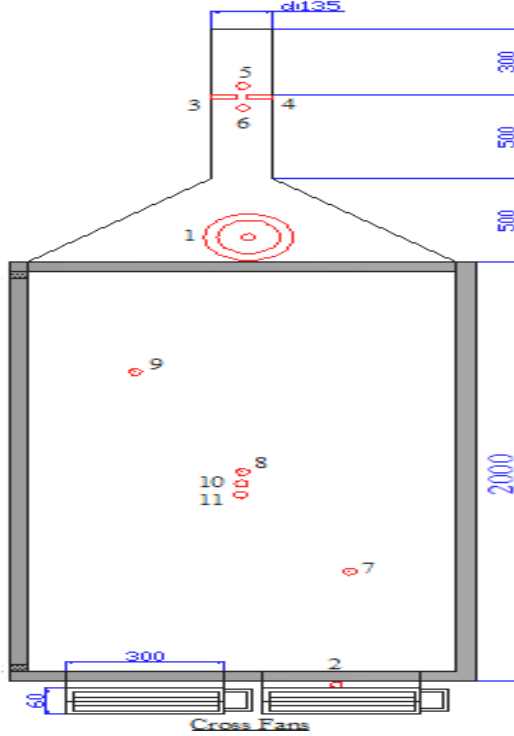
Şekil 2. Deney seti



Şekil 3. Kollektörlerin kesit görünüşleri

Deney setindeki ölçüm noktaları Şekil 4.'de verilmiştir. Bu amaçla kollektör girişinden, çıkışından (iki noktadan), yutucu plaka yüzeyinden (üç noktadan) sıcaklık ölçümleri T tipi ısıl çift ve PT100 tipi sensörler ile yapılmıştır. Kollektör çıkışında iki noktadan hotwire tip anemometre ile hava hızı ölçümü yapılmıştır. Güneş ışınım değeri kollektör üzerine monte edilen piranometre ile ölçülmüştür. Kollektör açılı Manisa'nın enlem derecesi olan 38° olarak ayarlanmıştır. Deney setinin ölçümlerinde 16 kanallı Comet MS6D universal tip datalogger ve 4 kanallı Comet S0141 PT1000 tip sıcaklık datalogger'ı kullanılmıştır. Datalogger'ların kayıt aralığı beş dakika olarak ayarlanmıştır. Testler 8:30 ile 17:30 arası yapılmıştır. Analizlerde 9:00 ve 17:00 saatleri arasındaki veriler dikkate alınmıştır.

Cihaz	Model	Aralık	Hassasiyet
Piranometre	Delta Ohm LP PYRA 02 AC	0-2000 W/m ²	10 W/m ²
Anemometre	Delta Ohm HD403TS1	0.2-40 m/s	0.2 m/s
T tipi ısı çifti	Elimko	-35+250 °C	0.5 °C
PT1000 tipi sıcaklık sensörü	Comet SN234	-80+200 °C	0.15 °C
PT1000 tipi yüzey sıcaklık sensörü	Comet SN166	-30+200 °C	0.15 °C
Termal kamera	Flir SC325	-20+350 °C	±2 %



Şekil 4. Ölçüm noktaları

Deney setinde aşağıdaki noktalardan:

1. Global ışıınım değeri (I)
2. Kollektör giriş havası sıcaklığı (T_i)
- 3-4. Ort. hava çıkış hızı (V₁-V₂)
- 5-6. Ort. hava çıkış sıcaklığı (T₀₁-T₀₂)
- 7-8-9. Ort. yutucu plaka yüzey sıcaklığı (T_{p1}-T_{p2}-T_{p3}) değerleri ölçülmüştür.

Çizelge 2. Test cihazları ve özellikleri

İmal edilen GEHK'leri ısı yönünden termal kamera ile kontrol edilmiştir. Hava hızları dimmer yardımı ayarlanmış ve her iki kollektör için eşitlenmiştir. Deneyler 0.07 kg/s ve 0.13 kg/s olmak üzere iki ayrı hava debisi için gerçekleştirilmiştir. Deneyler Manisa Celal Bayar Üniversitesi Akhisar Yerleşkesinde bulutsuz açık hava koşullarında gerçekleştirilmiştir. Testler çift tekerrürlü olarak icra edilmiş olup sonuçların birbiriyle aynı karakterde çıktığından analizlerde sadece birer günün değerleri dikkate alınmıştır. Deneylerde kullanılan test cihazları ve özellikleri Çizelge 2.'de verilmiştir. Testlerde kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları, global güneş radyasyonu ve kollektör çıkış hava hızı parametreleri ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Ölçümlere dayalı veriler ekseninde ısı verim ve kütleli debi hesaplanmıştır. Ölçüm parametrelerine dair belirsizlikler eşitlik 1 ile hesaplanmıştır [8].

$$W = [(X_1)^2 + (X_2)^2 + \dots + (X_n)^2]^{1/2} \quad (1)$$

Çizelge 3. Ölçüm parametrelerinin belirsizlikleri

Parametre	Birim	Toplam hata
Giriş sıcaklığı	°C	± 0.15
Çıkış sıcaklığı	°C	± 0.15
Yüzey sıcaklıkları	°C	± 0.86
Hava hızı	m/s	± 0.28
Global güneş radyasyonu	W/m ²	± 10

Kollektör hava debisi ve termal verim değerleri için belirsizlikler sırası ile %0.24 ve %1.05 belirlenmiştir.

3 Isıl Verim Analizi

Sistemde yararlı ısı enerjisi, kollektörde sirküle eden havanın giriş ve çıkış sıcaklığına dayalı olarak,

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad (2)$$

olarak belirlenir. Eşitlikte \dot{m} , sistemde sirküle eden havanın kütleli debisi (kg/s), c_p dolaşım havasının özgül ısıdır (J/kgK), T_i ve T_o sistemde dolaşan

akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır (°C). Sistemde sirküle eden havanın kütleli debisi ise,

$$\dot{m} = \rho V A_k \quad (3)$$

ile belirlenir. Eşitlikte ρ sirküle eden havanın yoğunluğu (kg/m³), V sirküle eden havanın hızı (m/s), A_k ise GEHK'nün çıkış kanalının kesit alanı (m²)'dir. Termodinamiğin I. kanunu esasınca GEHK'nün ısı verimi,

$$\eta = \frac{Q_u}{I A_c} \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanır. Eşitlikte, η ısı verimi, I GEHK'nün saydam örtüsü yüzeyine gelen global güneş radyasyonunu (W/m²), A_c ise güneş ışınımının etki ettiği alüminyum yutucu plaka alanıdır (m²).

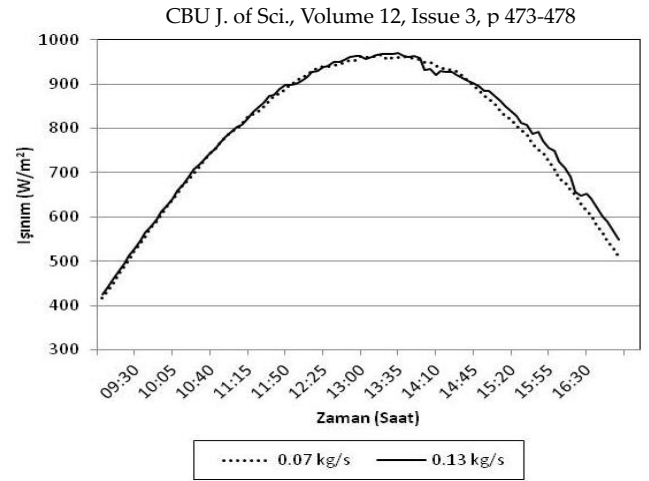
4 Bulgular ve Tartışma

0.07 kg/s debideki deneyler 16-17 Mayıs 2015, 0.13 kg/s kütleli debideki deneyler de 18-19 Mayıs 2015 tarihlerinde icra edilmiştir. Alt indislerde "1" önden geçişli kollektörü, "2" ise arkadan geçişli kollektörü temsil etmektedir. Deneysel veriler ve kollektör verimlerinden oluşan özet veri çizelgesi Çizelge 4.'de verilmiştir.

Çizelge 4. Deneysel verilerin özet çizelgesi

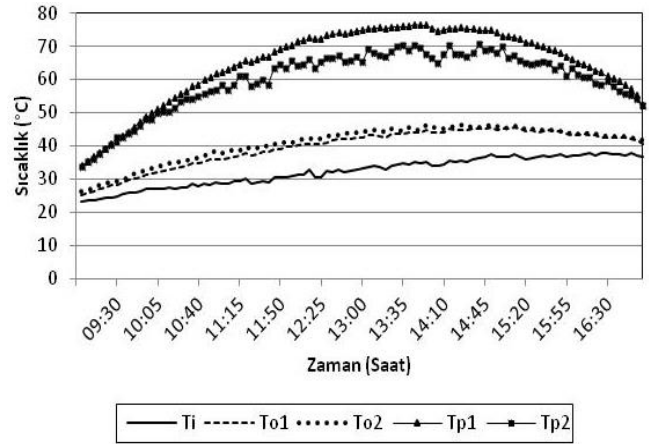
Değer	I (W/m ²)	T _i (°C)	T _{o1} (°C)	T _{o2} (°C)	T _{p1} (°C)	T _{p2} (°C)	η ₁ (%)	η ₂ (%)
17 Mayıs 2015, $\dot{m}=0.07$ kg/s								
Min.	416.5	23.1	25.1	26.1	33.8	33.7	19.6	29.1
Maks.	966.8	38.0	45.4	46.4	76.5	70.6	44.3	51.8
Ort.	782.6	32.2	39.5	40.7	64.4	59.6	37.1	43.5
18 Mayıs 2015, $\dot{m}=0.13$ kg/s								
Min.	425.6	24.5	27.3	27.0	37.5	36.3	35.5	40.4
Maks.	968.9	38.5	45.6	44.6	76.7	71.2	76.2	70.0
Ort.	793.7	33.5	40.2	39.5	65.4	61.5	62.6	56.2

Şekil 5.'de 0.07 kg/s ve 0.13 kg/s debideki deneylerin güneş ışınımının zamana göre değişimi verilmiştir. Her iki debi için gerçekleştirilen deneylerdeki ışınım değerleri birbirine oldukça yakın bir seyir izlemiştir. Ortalama değerler ile ışınım, 0.07 ve 0.13 kg/s debi için (17-18 Mayıs) gerçekleştirilen testlerde yaklaşık olarak 10 W/m² bir farklılık göstermiştir.



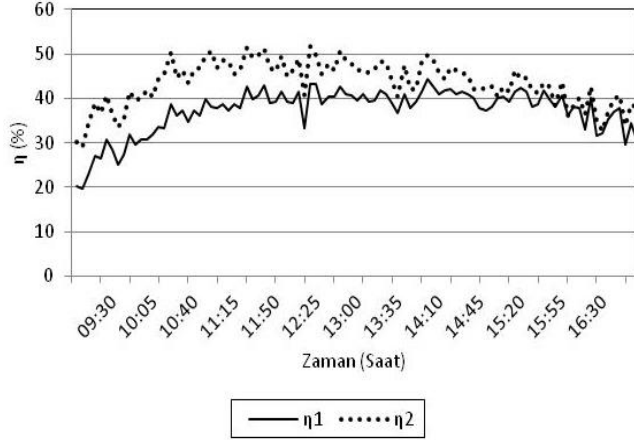
Şekil 5. Işınımın zamana göre değişimi ($\dot{m}=0.07$ kg/s ve $\dot{m}=0.13$ kg/s için)

Şekil 6.'da 0.07 kg/s debideki deney için kollektör giriş sıcaklığı, kollektör çıkış sıcaklıkları ve yutucu plaka sıcaklığının zamana göre değişimi verilmiştir. Giriş hava sıcaklığı ortalaması 32.2°C'dir. Önden geçişli kollektör ortalama çıkış sıcaklığı 39.5°C, arkadan geçişli kollektör ortalama çıkış sıcaklığı ise 40.7°C ölçülmüştür. Önden ve arkadan geçişli kollektörlerin yutucu plaka sıcaklık ortalamaları sırası ile 64.4 – 59.6°C ölçülmüştür.



Şekil 6. Kollektör giriş-çıkış havası ve yutucu plaka sıcaklıklarının zamana göre değişimi ($\dot{m}=0.07$ kg/s için)

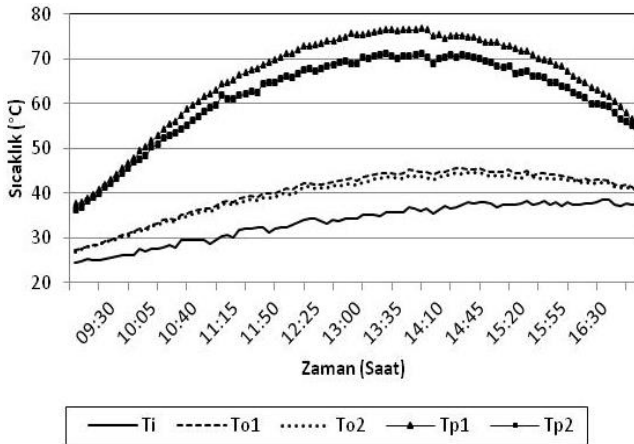
Şekil 7.'de 0.07 kg/s debideki deney için her iki kollektör ısı veriminin zamana göre değişimi verilmiştir. Önden ve arkadan geçişli kollektörlerin ısı verimleri ortalama olarak sırası ile % 37.1 ve 43.5 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. Isıl verimin zamana göre değişimi ($\dot{m}=0.07\text{kg/s}$ için)

0.07 debi değerinde icra edilen deneyde ortalama değerler ile arkadan geçişli kollektör için çıkış hava sıcaklığı 1.2°C yüksek, yutucu plaka sıcaklığı 4.8°C düşük ve ısıl verimi %6.4 daha yüksek çıkmıştır. Arkadan geçişli kollektör çıkış havası sıcaklığının daha yüksek çıkması yutucu plakadan havaya olan ısı transferinin daha yüksek olması sonucunu gerektirdiği için yutucu plaka sıcaklığı beklenildiği gibi düşük çıkmıştır ve ısıl verim de buna bağlı olarak daha yüksek çıkmıştır.

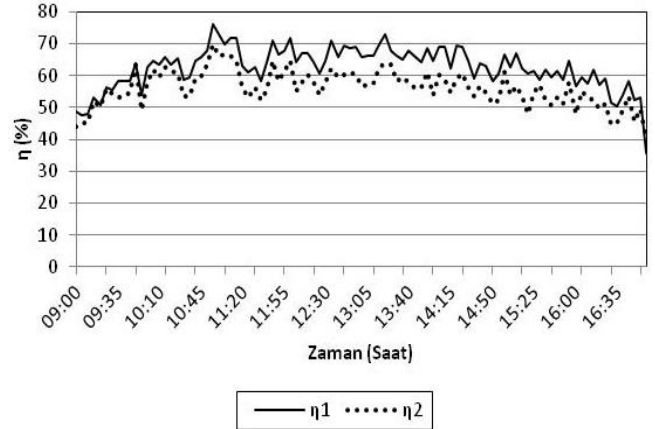
Şekil 8.'de 0.13 kg/s debideki deney için kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları ile yutucu plaka sıcaklıklarının zamana göre değişimi verilmiştir. Giriş hava sıcaklığı ortalama olarak 33.5°C gerçekleşmiştir. Ortalama değerler ile kollektör çıkış sıcaklıkları önden geçişli için 40.2°C , arkadan geçişli için ise 39.5°C değerleri elde edilmiştir. Yutucu plaka sıcaklık ortalamaları ise önden geçişlide 65.4°C ve arkadan geçişlide ise 61.5°C çıkmıştır.



Şekil 8. Kollektör giriş-çıkış ve yutucu plaka sıcaklıklarının

zamana göre değişimi ($\dot{m}=0.13\text{ kg/s}$ için)

Şekil 9.'da 0.13 kg/s debideki için kollektör ısıl verimlerinin zamana göre değişimi verilmiştir. Ortalama değerler ile önden geçişli kollektör ısıl verimi %62.6, arkadan geçişli kollektör için ise %56.2 belirlenmiştir.



Şekil 9. Zamana göre ısıl verim değişimi ($\dot{m}=0.13\text{ kg/s}$ için)

0.13 debi değerinde icra edilen deneyde ortalama değerler ile arkadan geçişli kollektör için çıkış hava sıcaklığı 0.7°C düşük, yutucu plaka sıcaklığı 3.9°C yüksek ve ısıl verimi %6.4 daha düşük çıkmıştır. Arkadan geçişli kollektör yutucu plaka sıcaklığının daha yüksek çıkması yutucu plakadan havaya olan ısı transferinin düşük olmasını ve dolayısıyla ısıl verimin düşük çıkmasıyla neticelenmiştir.

GEHK'nün tasarım parametrelerinden biri olan hava geçiş tipi (önden-arkadan-çift-paralel geçişli vb.) kollektör ısıl verimini etkileyen unsurlardan biridir. Literatürde birbirinden farklı kollektör tasarımlarında ve test düzeneklerinde yapılmış çalışmalarda hem önden geçişli kollektör tipinin [6-7] hem de arkadan geçişli kollektör tipinin [4-5] diğerine göre ısıl veriminin daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Bu durumun farklı kollektör tasarımları (kollektör boyutları, kanal yüksekliği, yutucu plaka geometrisi vb.) ve kullanılan farklı kollektör unsurlarının (saydam örtü, selektif yüzey, yutucu plaka malzemesi cinsi vb.) etkisi olduğu sonucuna varılabilir.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada alüminyum düz yutucu plakalı, selektif boyalı, 38° kollektör açılı, düşük demir oranlı 3.2mm kalınlığındaki solar tip camların kullanıldığı, 15 cm kanal yüksekliğine sahip GEHK'nde iki farklı debi için

Manisa (Mayıs 2015) hava koşullarında yapılan performans testlerindeki ölçüm parametrelerine bağlı olarak önden ve arkadan geçiş tipinin ısı analizi Termodinamiğin I. kanuna göre yapılmıştır. 0.07 kg/s debi için önden geçişli kollektör ısı verimi ortalama olarak %37.1, arkadan geçişli kollektör için de ortalama olarak %43.5 değerleri elde edilmiştir. 0.13 kg/s debideki deney için önden geçişli kollektör için ısı verim ortalama olarak %62.6, arkadan geçişli kollektör için de ortalama olarak %56.2 değerleri elde edilmiştir.

Özet olarak düşük debili çalışma koşullarında arkadan geçişli, yüksek debili çalışma şartlarında önden geçişli GEHK'nün daha verimli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kollektör ısı verimi, ışınum ve hava debisi artışına paralel olarak artmıştır. Gelecek çalışmalarda kollektör ısı verimi; kanal yüksekliği, yutucu plaka malzemesi ve geometrisi, kollektör açısı, saydam örtü malzemesi gibi unsurlar açısından incelenebilir.

Kaynaklar

- [1] Anon. Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası. 2007, (www.eiei.gov.tr)
- [2] Parker, B.F.; Lindley, M.R.; Colliver, D.G. and Murphy, W.E. Thermal Performances of Three Solar Air Heaters. *Solar Energy*. 1993; 51, 6, 467-479.
- [3] Ong, K.S. Thermal Performance of Solar Air Heaters: Mathematical Model and Solution Procedure. *Solar Energy*. 1995; 55, 2, 93-109.
- [4] Metwally, M.N.; Abou-Ziyan, H.Z.; El-Leathy, A.M. Performance of Advanced Corrugated-Duct Solar Air Collector Compared with Five Conventional Designs. *Renewable Energy*. 1997; 10, 4, 519-537.
- [5] Hegazy, A.A. Performance of Flat Plate Solar Air Heaters with Optimum Channel Geometry for Constant/Variable Flow Operation. *Energy Conversion and Management*. 2000; 41, 401-417.
- [6] Velmurugan, P. and Kalaivanan, R. Effect of Diverse Stream Patterns on the Performance of Solar Air Heater. *Int J. of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2013; 2, 1, 65-70.
- [7] Tyagi, R.K.; Ranjan, R.; Kishore, K. Performance Studies on Flat Plate Solar Air Heater Subjected to Various Flow Patterns. *Applied Solar Energy*. 2014; 50, 2, 98-102.
- [8] Holman, J.P. *Experimental Methods for Engineers*. 6th ed. Singapore: McGraw-Hill;1994