



SERİ BAĞLI U-BORULU VAKUM TÜPLÜ GÜNEŞ KOLEKTÖRÜNÜN ISIL VERİMİ VE BASINÇ DÜŞÜMÜNÜN DENEYSEL İNCELENMESİ

İsmail ÖZCAN^{1*}, Arif Emre ÖZGÜR², Ahmet ÖZSOY²

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Keçiborlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü
Isparta, Türkiye

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Güneş Enerjisi,
Vakum Tüp,
Kolektör Verimi,
Basınç Düşümü.

Öz

Günümüzdeki çevresel sorunların en başında küresel ısınma gelmektedir. Bu sorunun çözümünün temiz enerji kaynaklarından geçtiği genel bir kanıdır. Güneş enerjisi de bu temiz enerji kaynaklarından olup, günümüzde elektrik enerjisi üretimi, sıcak su hazırlama, kurutma ve birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Bununla birlikte, elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılan fotovoltaik sistemlerin verimleri nispeten düşüktür. Düzlemsel toplayıcılar ile elde edilecek akışkan sıcaklığında ise bir sınır vardır. Kurutma uygulamalarının da havalı düzlemsel toplayıcılar ile yapılması, birim kuru ürün için gerekli toplayıcı alanını arttırmaktadır. Dolayısıyla, güneş enerjisinin bu üç ana alanda, daha yüksek verim ile değerlendirilebileceği araştırma geliştirme çalışmaları sürmektedir. Bu çalışmada vakum tüplü, seri bağlı U-borulu bir güneş kolektörü iç ortamda test edilerek verim eğrileri oluşturulmuştur. Çalışmada literatürdeki çoğu çalışmada kullanılan vakum tüplerden farklı olarak dış çapı 70 mm olan 10 adet vakum tüp ve bunların içine yerleştirilen 8 mm dış çaplı, U forma getirilmiş, seri bağlı çelik borular kullanılmıştır. Sirkülasyon pompası ve sisteme entegre edilmiş bir plakalı ısı değiştirici ile kapalı bir çevrim oluşturularak, güneş simülatörü ile iç ortam şartlarında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Simülatörden güneş kolektörü üzerine ortalama 902 W/m² ışınım şiddeti halojen lambalarla sağlanmıştır. Deneyler, U-borular içindeki akışkan debisi için 3 farklı değerde ve 4 farklı giriş sıcaklığı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada kolektör veriminin %60 ile %78 arasında değiştiği görülmüştür. U-borulu güneş kolektörünün giriş-çıkış arası basınç düşümü 59-65 kPa arasında değişmektedir. Elde edilen analiz sonuçlarına bakıldığında, büyük çaplı vakum tüpe sahip ve seri bağlanmış çelik borulu toplayıcı kullanımının, kolektör çıkış sıcaklığında artış sağlamakla birlikte basınç düşümü de yüksek olduğundan, sistem seçiminde pompalama gücünün de dikkate alınması gerekmektedir.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL EFFICIENCY AND PRESSURE DROP OF A SERIAL CONNECTED U-PIPE EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTOR

Keywords

Solar Energy,
Evacuated Tube,
Collector Efficiency,
Pressure Drop.

Abstract

Global warming is at the forefront of today's environmental problems. It is a general belief that the solution to this problem is through clean energy sources. Solar energy is one of these clean energy sources, and it is used in electrical energy production, hot water preparation, drying and many industrial applications today. However, the efficiency of photovoltaic systems commonly used in electricity generation are relatively low. Also, there is a limit in the fluid temperature to be obtained with flat plate collectors. Drying applications with planar collectors also increase the required collector area. Therefore, research and development studies are ongoing in which solar energy can be evaluated with higher efficiency. In this study, a solar collector with evacuated tube and series connected U-pipe was tested indoors and efficiency curves were formed. In the study, 10 vacuum tubes with an outer diameter

* İlgili yazar / Corresponding author: ismailozcan@isparta.edu.tr , +90-505-959-4272

of 70 mm and series connected steel tubes with a diameter of 8 mm placed inside them were used. A closed cycle was created with circulation pumps and a plate heat exchanger integrated into the system, and measurements were performed under indoor conditions using a solar simulator. An average of 902 W/m² radiation intensity from the simulator to the solar collector is provided by halogen lamps. The experiments were carried out at 3 different values for the fluid flow rate in the U-pipes and with 4 different inlet temperatures. In the experimental study, it was observed that the collector efficiency ranged between 60% and 78%. The pressure drop between the inlet and outlet of the U-tube solar collector varies between 59-65 kPa. Looking at the analysis results, the use of a series-connected steel tube collector with a large diameter evacuated tube provides an increase in the collector outlet temperature, but since the pressure drop is high, the pumping power should also be taken into account in the system selection.

Alıntı / Cite

Özcan, İ., Özgür, A. E., Özsoy, A., (2022). Seri Bağlı U-Borulu Vakum Tüplü Güneş Kolektörünün Isıl Verimi Ve Basınç Düşümünün Deneysel İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1445-1454.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

İ. Özcan, 0000-0003-0541-5662
A. E. Özgür, 0000-0001-6382-5462
A. Özsoy, 0000-0003-0911-9799

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	15.12.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	09.06.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	20.06.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Dünyada her geçen gün nüfusa ve endüstrileşmedeki artış bağlı olarak enerji ihtiyacı artmaktadır. Artan bu enerji talebinin karşılanmasında, fosil yakıtlar halen yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fosil yakıtların yanması ile birlikte ortaya çıkan gazlar sonucunda, küresel ısınma ve asit yağmurları gibi çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Küresel ısınma ve çevresel sorunlar ile mücadele etmede yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusunda gelişim göstermeye mecbur kalınmıştır. Dünya ile birlikte ülkemizde de bu alanda araştırma ve geliştirme faaliyetleri yapılmakta ve devam etmekte, yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanabilmek için bilimsel ve teknolojik çalışmalar ile bu alandaki yatırımlar her geçen gün artış göstermektedir.

Ülkemizdeki yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden olan güneş enerjisi, hem güneşlenme süresi, hem de birim alana gelen toplam enerji olarak son derece önemli bir kaynaktır. Ülkemizin güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olması ve 2023 yılı için 5000 MW kurulu güneş santrali hedefinin olması, güneş enerjisine ilgiyi artırmaktadır (Akdağ ve Yeroğlu, 2019). Güneş enerjisi günümüzde elektrik enerjisi üretimi, sıcak su hazırlanması ve kurutma gibi önemli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Güneş enerjisini kullanmanın en basit ve en verimli yolu, güneş kolektörlerinin kullanıldığı ısıtma uygulamaları için onu termal enerjiye dönüştürmektir ve bu işlem çeşitli sistemlerle geliştirilmektedir (Saydam vd., 2021). Bunlardan birisi de vakum tüplü güneş kolektörleridir. Yapılan çalışmalarda, vakum tüplü toplayıcıların orta çalışma sıcaklığına sahip sistemler arasında toplayıcı verimi açısından daha elverişli olduğu ortaya konmuştur.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Sabiha vd. (2015), vakum tüplü kolektörlerin diğer kolektörlere nazaran daha yüksek verimli olduğunu ve bu kolektörlerin orta çalışma sıcaklıklarında kullanım için daha iyi bir alternatif olduğunu belirtmişlerdir. Mehmood vd. (2019), vakum tüplü güneş kolektörlerinin benzer çalışma koşulları altında düz plakalı kolektörlere göre %25-%40 daha verimli olduğunu ifade etmişlerdir. Literatürdeki U-borulu vakum tüplü toplayıcılarla ilgili diğer çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir. Bahrami ve Bahrami (2021), İran şartlarında 4 farklı iklim için U-borulu vakum tüplü bir güneş enerjisi modelleyerek termal analizini gerçekleştirmişlerdir. Cam tüp boyu, çapı, kütle akış hızı, absorber alanı gibi parametrelerin toplayıcı verimine etkisinin incelendiği çalışmada, cam tüpün boyunun sabit olduğu durumda çapının artırılmasının toplayıcı verimini arttırdığını belirtmişlerdir.

Dündar (2007), vakum tüp toplayıcılar ile farklı tipteki düzlemsel toplayıcıların performans ve verim karşılaştırmalarının yapıldığı bir çalışma ortaya koymuştur. Çalışma, Karabük ili şartlarında deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçta vakum tüplü toplayıcıların karşılaştırılan toplayıcı sistemlerine oranla daha verimli oldukları belirlenmiştir. Çalışmada diğer toplayıcılara nazaran vakum tüplü toplayıcıların düşük ışınım şiddetlerinde de iyi bir performans ortaya koyduğu belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada Zambolin ve Col (2010), düzlemsel güneş kolektörleri ile vakum tüplü kolektörlerin günlük enerji verimliliğini karşılaştırmışlardır. Düzlemsel kolektörde, daha fazla yansıma kaybı nedeniyle sabah ve öğleden sonra saatlerinde kolektörün optik veriminin düştüğünü, vakum tüplü kolektörün ise geometrisi nedeniyle absorber alanının çoğunun günün uzun

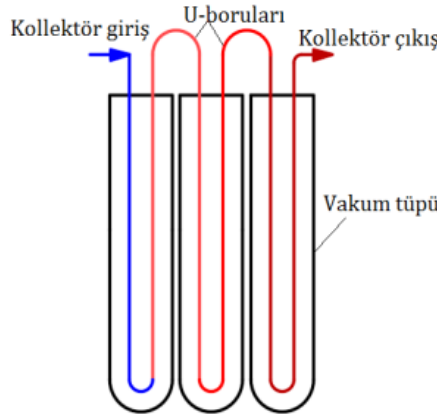
süresi boyunca ışınım maruz kalacağı için bu verim kayıplarının azaldığını belirtmişlerdir. Düz plakalı kolektör ile vakum tüplü kolektörün enerji, ekserji ve ekonomik analizlerinin yapıldığı çalışmada Özdemir ve Yatarkalkmaz (2015), vakum tüplü kolektörün veriminin %59 ile %75, düz plakalı kolektör veriminin ise %33 ile %72 arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Yapılan deneylerde çalışma sıcaklığının artmasıyla kolektör verimleri arasındaki farkın açıldığı görülmüştür. Öte yandan bir güneş kolektörünün daha verimli kullanılması için yataya eğimli ve güneşe azami maruz kalacak şekilde yerleştirilmesi önemlidir. Bu konuda Ong vd. (2013), yaptıkları çalışmada eğimli ve dikey konumdaki aynı tanktan beslenen iki farklı vakum tüplü kolektörü karşılaştırmış, eğimli panel sisteminin dikey panel sistemine göre daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Toplam güneş ışınımı ortalama 4.5 kWh/m² olan bir günde, beklenen ortalama su sıcaklığı artışı, eğimli panel sistemi için 138 °C ve dikey panel sistemi için yaklaşık 98 °C olacağını belirtmişlerdir.

Suita-Olcha vd. (2021), Lublin (Polonya) şartlarında, hava koşullarının ve çalışma parametrelerinin vakum tüplü güneş kolektörünün ısı ve ekserji verimlerine etkisini araştırmışlardır. Temmuz ve Ağustos ayları için ortalama termal kazanç sırasıyla 163 W/m² ve 145 W/m² olarak bulunmuştur. Güneş kolektörünün ortalama aylık enerji verimlerinin de yine sırasıyla %45,3 ve %32,9 olduğunu ifade etmişlerdir. Bir diğer çalışmada Norveç'in bulutlu ve soğuk iklim koşullarında 7,8 m²'lik bir vakum tüplü güneş kolektörünün performans analizi gerçekleştirilmiş, bir evsel güneş enerji sisteminden %72'ye varan bir termal verimle yılda 2200 kWh'e kadar ısı elde edilebileceği belirtilmiştir (Popsueva vd., 2021).

Yukarıda incelenen literatürdeki bazı çalışmalar göstermektedir ki; güneş enerjisi destekli vakum tüplü sistemlerin kullanımı halen yeniliğini korumakta ve bu alanda yapılan çalışmalar devam etmektedir. Yapılan bu çalışmada, üç farklı çalışma akışkanı debisi ve boru içerisindeki Re sayısı değişimi ile seri bağlı U-borulu vakum tüplü bir kolektörün verimliliği ve basınç düşümü deneysel olarak araştırılmıştır. Literatürde, bu çalışmanın odaklandığı seri bağlı U-borulu vakum tüplü kolektörlerin verimliliğini ve basınç düşümünü inceleyen başka bir çalışmaya rastlanmamıştır.

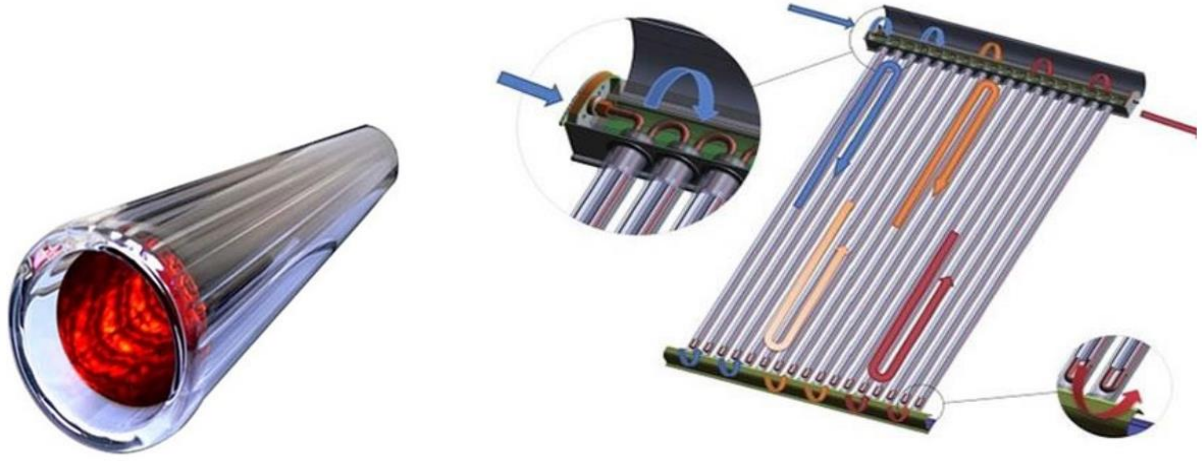
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Vakum tüp teknolojisi borosilikat cam kullanılarak, iki cam tüp arasının vakum edilmesiyle üretilir. Bu vakum, termal enerjiyi yüksek oranda koruyarak, daha yüksek bir verim elde edilmesine imkân sağlamaktadır. Tüplerin silindirik biçiminden dolayı güneş ışınları daha çok dik açı ile gelir ve verim artışı sağlar. Vakum tüplü kolektörlerde ısı aktarımı cam tüp içerisine yerleştirilen borularla sağlanır. Vakum tüplü kolektör kullanılan sistemlerde U-borular seri ya da paralel bağlanabilir. Seri bağlı sistemlerde (Şekil 1) basınç kayıpları yüksek olabileceği gibi, akışkan çıkış sıcaklığı da nispeten daha yüksektir.



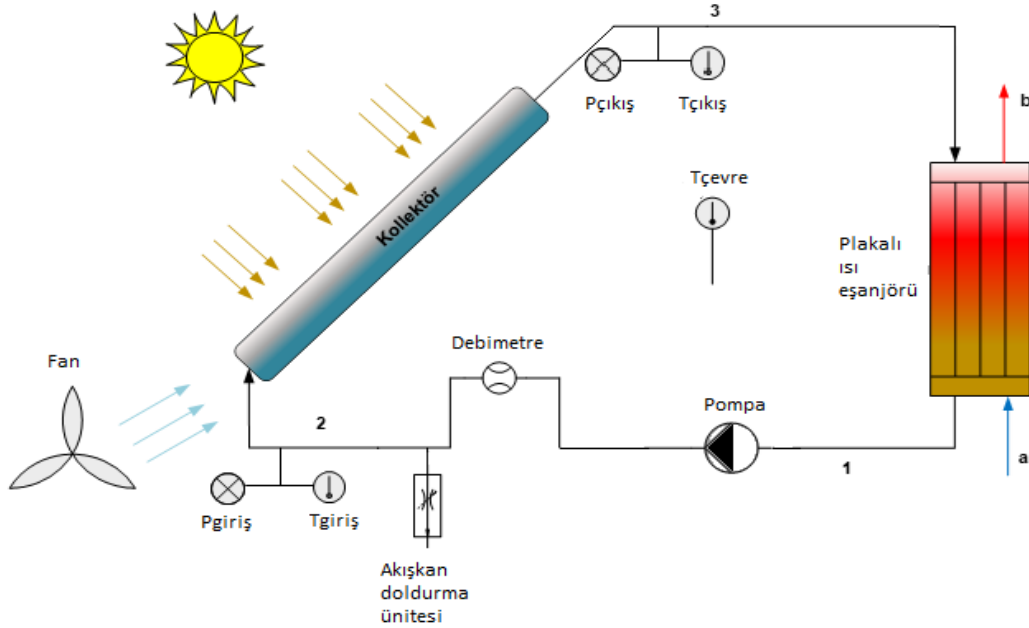
Şekil 1. Seri bağlı U-borulu sistem (Serial connected U-pipe system) (Özsoy ve Galip, 2018a).

Bu çalışmada U-borulu kanatsız bir sistem tercih edilmiştir. Kullanılan vakum tüp ve U-boruların cam tüp içine yerleşimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Vakum tüpü ve U-borularının tüpteki yerleşimi (Evacuated tube and placement of U-pipes in the tube) (Sunmax internet sitesi, 2021).

Bu çalışmada vakum tüplü U-borulu bir güneş kolektörü, sirkülasyon pompası ve sisteme entegre edilmiş bir plakalı ısı değişirici ile güneş simülatörü kullanılarak iç ortam şartlarında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'de deneysel çalışmada kullanılan sistemin şematik çizimi verilmiştir.



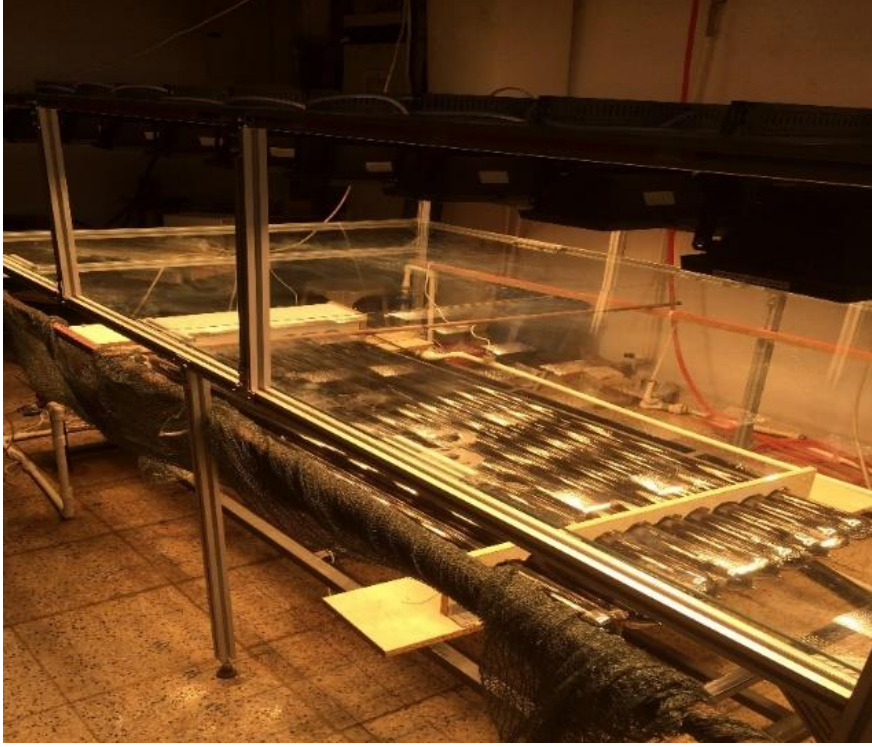
Şekil 3. Sistemin şematik görünümü (Schematic view of the system)

Çalışmada ilk olarak 8 mm dış çapa sahip çelik borunun U-formuna getirilip, toplamda 10 adet U borusundan oluşan seri bağlı bir toplayıcı boru sistemi oluşturulmuştur. Cam tüpler ile ölçme ve kontrol elemanlarının bağlanarak bir sistem haline getirilmiştir. U-borulara herhangi bir kanat eklemesi yapılmamıştır. U-borular, literatürdeki çoğu çalışmada kullanılan vakum tüplerden farklı olarak dış çapı 70 mm olan 10 adet vakum cam tüpün içine yerleştirilmiştir. Deneyde kullanılan vakum tüplü U-borulu güneş kolektörünün teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Vakum tüplü U-borulu kolektörün teknik özellikleri (Technical characteristics of vacuum tube U-tube collector)

Cam tüp	Dış cam tüp çapı (m)	0,070
	İç cam tüp çapı (m)	0,057
	Cam tüp uzunluğu (m)	2
	Cam tüp sayısı (ad)	10
Kolektör Alanı	2,0*0,07*10	1,4
U-borusu	Dış çap (m)	0.008
	Et kalınlığı (m)	0.001

Deneysel çalışma sürecinde, güneş kolektörlerinin dış ortam şartlarında güneş ışınımı ile performans ölçümlerinin gerçekleştirilmesi, dış ortamın sıcaklığı, ışınımın açısı, şiddeti gibi kolektör veriminde etkisi bulunan verilerin zamana bağlı değişim göstermeleri, sağlıklı veri elde etme konusunda problem teşkil edebilmektedir. Bu sebeple istenilen değerlerde ayarlanabilir ışınım şiddetleri belirleyerek çalışmak ve dış ortamda karşılaşılabilecek risklerden ve diğer unsurlardan kaçınabilmek amacıyla güneş simülatörü kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'de güneş simülatöründe test edilen U-borulu vakum tüplü güneş kolektörünün cam tüpleri görülmektedir.



Şekil 4. Güneş simülatörü ve toplayıcının görünümü (View of solar simulator and collector)

TS EN ISO 9806 güneş kolektörleri test standardına uygun olarak oluşturulan güneş simülatöründe ortalama 902 W/m^2 ışınım şiddeti sağlanmıştır. Güneş kolektörlerinin test edilmesinde TS EN 12975 standartlarında belirtilen ve Tablo 2'de verilen, deneylerde müsaade edilen sapma değerlerine uyulmuştur.

Tablo 2. TS EN 12975 Standardında belirlenen sınır şartları (Boundary conditions determined in the TS EN 12975 standard)

Parametre	Müsaade edilen sapma
İşınım şiddeti	$\pm 50 \text{ W/m}^2$
Ortam sıcaklığı	$\pm 1 \text{ K}$
Akışkanın kütle debisi	$\pm \%1$
Kolektör giriş sıcaklığı	$\pm 0,1 \text{ K}$

Kolektörün giriş ve çıkış akışkan sıcaklığı Pt100 tipi sıcaklık ölçüm elemanları ile ölçülmüştür. Sistemde dolaşan akışkanın debisi Krohne marka debimetre ile ölçülmüştür. Kolektörden çıkan akışkanın kolektörde aldığı ısı, plakalı bir ısı değiştirici ile sistemden çekilmiştir. Böylece kapalı devre olarak çalışan deney sisteminde kolektöre giren akışkan sıcaklığı sabit tutulmuştur. Sistemdeki kolektörün altına ve üstüne yerleştirilen birer adet K tipi termokupl ile ortam sıcaklığı ölçülmüş, ölçülen bu sıcaklıkların ortalaması dış ortam sıcaklığı olarak alınmıştır. Basınç ölçümleri ise Ahlborn FDA 602 L marka basınç sensörleri ile gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve basınç ölçümleri Ahlborn Almemo 5690-2 ile kaydedilmiştir. Kullanılan cihazlar ve ölçüm hassasiyetleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Ölçümlerde kullanılan cihazlar ve hassasiyetleri (The devices used in the measurements and their sensitivities)

Cihaz	Kullanım Amacı	Hassasiyet
Pt100	Akışkan sıcaklık ölçümü	$\pm 0,05$ °C
K tipi termokupl	Çevre sıcaklığı ölçümü	$\pm 0,05$ °C
Krohne hacimsel debimetre	Akış debi ölçümü (18-180 l/h)	$\pm \%1,16$
Ahlborn FLA613-GS	Işınım şiddeti ölçümü	$\pm \%10$
Ahlborn FDA 602 L	Basınç sensörü	$\pm 0,05$

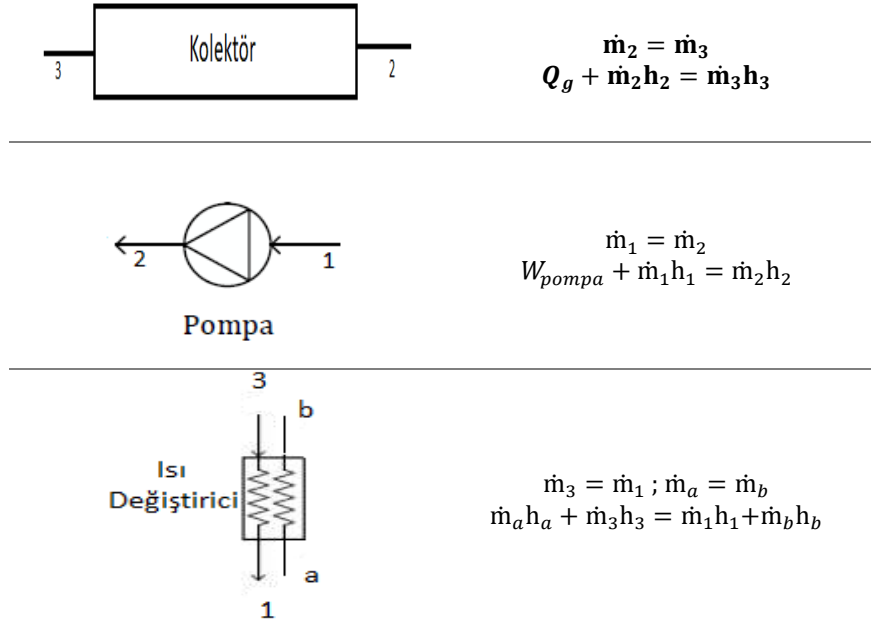
3.1. Verim Analizi (Efficiency Analysis)

Önerilen sistemin termodinamik analizini gerçekleştirmek için, kütle ve enerji denge bağıntılarının dikkate alınması gerekmektedir. Bu bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$\text{Kütle dengesi:} \quad \sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1)$$

$$\text{Enerji dengesi:} \quad \sum \dot{m}_g \cdot h_g = \sum \dot{m}_ç \cdot h_ç \quad (2)$$

Yukarıdaki bağıntılarda kullanılan alt indislerdeki “g” ve “ç” ifadeleri sisteme giren ve çıkan olarak tanımlanır. “m” kütleli debiyi, “h” ise entalpiyi ifade etmektedir. Sistem bileşenlerinin kütle ve enerji denge bağıntıları ise **Tablo 4**'te verilmiştir (Dinçer ve Rosen, 2013; Çengel ve Boles, 2015).

Tablo 4. Sistem bileşenlerinin kütle ve enerji denge denklemleri (Mass and energy balance equations of system components)

Güneş kolektörlerinde verim hesaplamaları, toplayıcı tarafından akışkana aktarılan enerjinin (\dot{Q}_a), kolektör yüzeyine gelen toplam ışıma enerjisine (\dot{Q}_g) oranının belirlenmesi ile gerçekleştirilir. Alınan ısı enerjisi, akış hattı üzerinden ölçülen sıcaklıklar ve debi değerleri kullanılarak hesaplanır. Güneş kolektörü verimi Eşitlik (3) ve Eşitlik (4)'deki gibi yazılabilir.

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_g} \quad (3)$$

$$\eta_k = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A I} \quad (4)$$

Burada \dot{m} (kg/s) akışkanın kütleli debisini, C_p (J/kg°C) akışkanın özgül ısısını, ΔT (°C) akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının farkını, A (m^2) kolektör alanını ve I (W/m^2) ışıma şiddetini ifade etmektedir. Güneş kolektörlerinin verimi dış ortam sıcaklığı, ışıma şiddeti ve kolektörün ortalama akışkan sıcaklığı ile değişir. Bu değişim azaltılmış sıcaklık olarak tanımlanmıştır. T^* ile ifade edilen bu değer Eşitlik (5)'te gösterilmiştir.

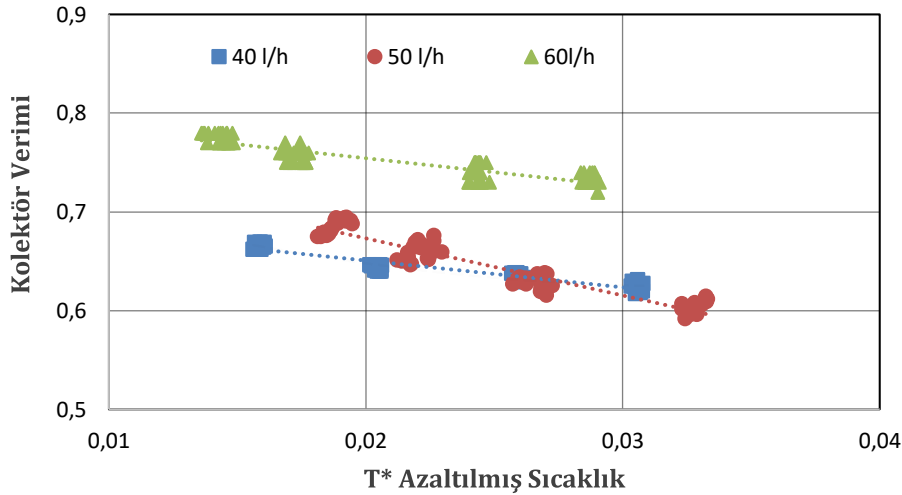
$$T^* = \frac{T_k - T_ç}{I} \quad (5)$$

Burada gösterilen T_k (°C) kolektördeki ortalama akışkan sıcaklığını T_c (°C) ise çevre sıcaklığını ifade etmektedir. Kolektördeki ortalama akışkan sıcaklığı, akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalaması $((T_2 + T_3)/2)$, çevre sıcaklığı ise kolektörün üst ve alt sıcaklıklarının aritmetik ortalaması olarak alınır. Çünkü güneş simülatöründe lambalar tarafından üretilen ısı bir hava perdesi tarafından ortamdan uzaklaştırılıyor olmakla birlikte, kolektörün üst ve alt tarafındaki ortam sıcaklığı aynı olmamaktadır (Özsoy ve Galip, 2018b). Bu nedenle ortam sıcaklığı olarak kolektörün üst ve alt kısımlarının sıcaklıklarının ortalamasının alınmasının daha uygun olacağı belirlenmiştir.

Düzlemsel kolektörlerin performans analizi için ışınım gelen alan belirlenirken kolektör alanı baz alınmaktadır. Vakum tüplü kolektörlerde ise ışınım gelen alanı belirlemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunun nedeni silindirik yapıdaki vakum tüplerin kullanılmasıdır. Vakum tüplü toplayıcıların dış ortamda, güneş ışınımı altında yapılan performans testlerinde ışınlar paralel olarak gelmekte olup, kolektör absorber alanı üzerinde ısı enerjisine dönüşmektedir. Güneş simülatöründe, iç ortam şartlarında yapılan deneylerde, ışınımın geldiği kaynak kolektöre yakın mesafede olduğu ve çok sayıda ışık kaynağı (lamba) kullanıldığı için, ışınların geliş açıları farklılıklar oluşmaktadır (Özsoy ve Galip, 2018a). Bu çalışmada absorber alanı olarak kolektörün toplam alanı kullanılmıştır.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Deneyler, her ölçümden önce sistemin rejimde olması sağlanarak, 3 farklı debi ve 4 farklı kolektör giriş sıcaklığı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ölçümler standartlara uygun olarak dörder defa tekrarlanmıştır. Kolektör giriş sıcaklıkları 30 °C, 35 °C, 40 °C ve 45 °C olarak belirlenmiştir. Deneyler süresince çevre sıcaklığı 23-27 °C arasında değişmiştir. Kolektörde akışkan debisi, verimdeki değişimi gözlemlemek için, 40 l/h, 50 l/h ve 60 l/h olarak uygulanmıştır. Ölçümler iç ortam şartlarında, ortalama 902 W/m² ışınım şiddeti sağlanan bir güneş simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Absorber alanı olarak kolektörün toplam alanı alınmıştır. Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen verilerle verim analizi yapılmış ve farklı akışkan debileri için kolektörün verim eğrileri belirlenmiştir. Akışkan debilerine göre kolektör veriminin değişimi Şekil 5'te verilmiştir.

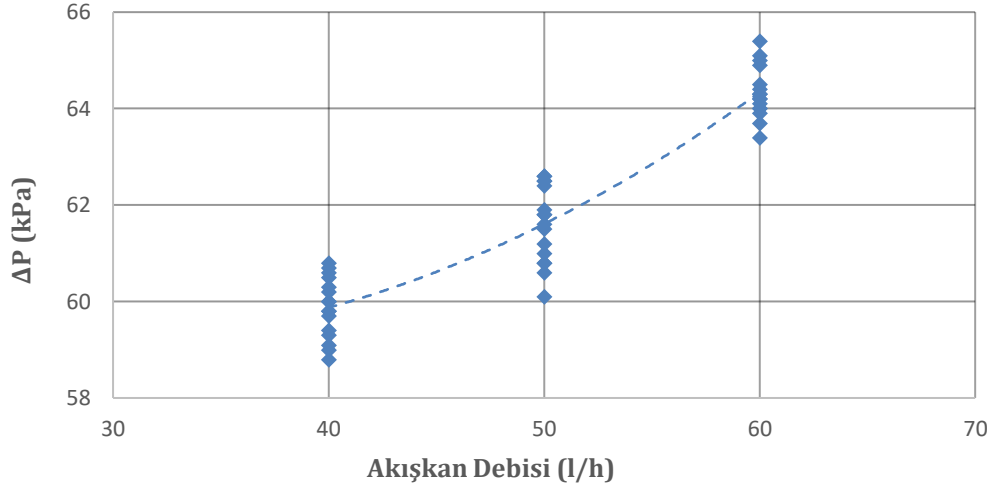


Şekil 5. Akışkan debisi değişiminin kolektör verimine etkisi (Effect of fluid flow rate change on collector efficiency)

Grafikte sabit ışınım şiddetinde, akışkan debisinin artmasıyla kolektör veriminin artışı görülebilmektedir. Bunun yanı sıra azaltılmış sıcaklığın artmasının da kolektör verimine etkisi negatiftir. Bununla ilgili yapılan bir çalışmada da (Nie vd., 2017), azaltılmış sıcaklık azaldıkça termal verimlerin arttığını ve büyüme hızının kademeli olarak azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca kütle akış hızının artmasının da termal verimliliği arttırdığını ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda sabit kütleli akış hızında ve %34,28'lik azaltılmış sıcaklık düşüşünde, 535 W/m² ve 735 W/m²'lik bir güneş ışınımı ile termal verimliliğin büyüme oranlarının sırasıyla %12,21 ve %7,82 olduğunu belirlemişlerdir. Yine sabit azaltılmış sıcaklıkta ve %66,67'lik kütle akış hızı artışında, 535 W/m² ve 735 W/m²'lik güneş ışınımında termal verimliliğin büyüme oranlarını sırasıyla %24,08 ve %14,42 olarak belirlemişlerdir.

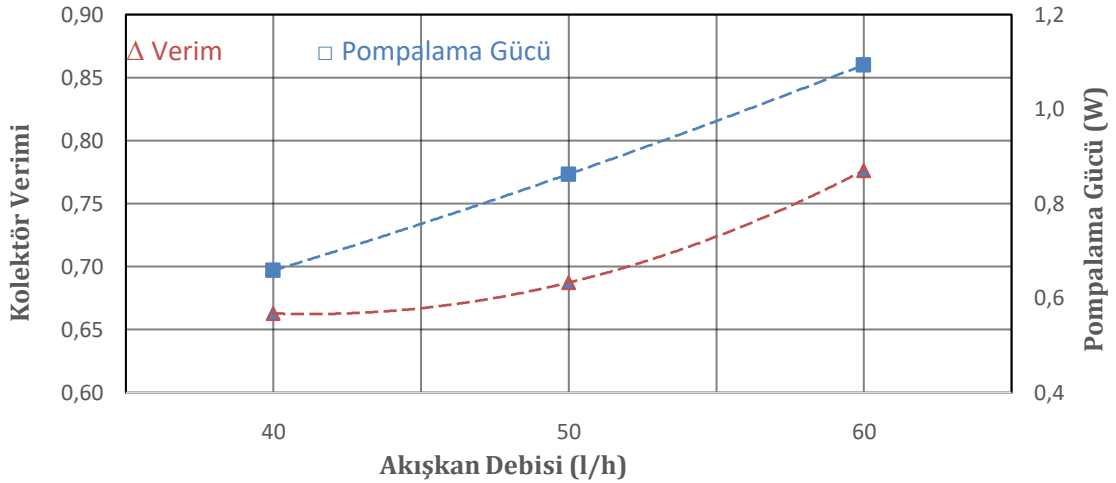
Şekil 6'da ise kolektördeki toplam basınç farkının akışkan debisine göre değişim eğrisi verilmiştir. 30 °C sabit giriş sıcaklığında üç farklı akışkan debisi ile gerçekleştirilen ölçümler neticesinde basınç farkının akışkan debisi ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar Özsoy ve Galip'in (2018a) seri bağlı 17 borudan oluşan toplam 2,4 m² alana sahip güneş kolektöründe de elde edilmiştir. Ancak Özsoy ve Galip'in çalışmasında 17 borulu kolektörde 10/9mm'lik bakır borular kullanılmıştır. Toplam 17 borudaki basınç düşümü bu çalışma için kullanılan 10 boru için karşılığı, akışkan debisine göre yaklaşık 5 kPa ile 21 kPa arasında değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan 10 borulu 8/6 mm'lik çelik borulu sistemdeki basınç düşümü ise akışkan debisine göre 59-

65 kPa arasında değişmektedir. Basınç düşümünün fazla olması, boru malzemesindeki sürtünme katsayısı yüksek (birisi bakır ve diğeri çelik boru) ve boru iç çapının da küçük olmasında (birisi 9 mm ve diğeri 6 mm) kaynaklanmaktadır. Basınç düşümüne etki eden faktörlerden birisi de sıcaklıkla akışkanın viskozitesindeki değişiktir. Sıcaklık artışı ile basınç düşümündeki azalma Bava ve Furbo'nun (2016) çalışmasında, su ve su-glikol karışımı için incelenmiştir.



Şekil 6. Kolektördeki basınç düşümünün akışkan debisi ile değişimi (Variation of pressure drop in the collector with fluid flow rate)

Şekil 7'de kolektördeki basınç düşümünden kaynaklanan pompalama gücündeki artışın akışkan debisiyle değişimi, 30 °C sabit giriş sıcaklığındaki kolektör veriminin değişimiyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 7. Pompalama gücü ve kolektör veriminin akışkan debisiyle değişimi (Variation of pumping power and collector efficiency with fluid flow rate)

Şekilde de görüldüğü üzere pompalama gücü akışkan debisi ile artış göstermiş, kolektör veriminde ise artış debinin artmasıyla birlikte hız kazanmıştır. Kolektördeki basınç düşümü için gerekli pompalama gücü Eşitlik (6)'dan bulunur.

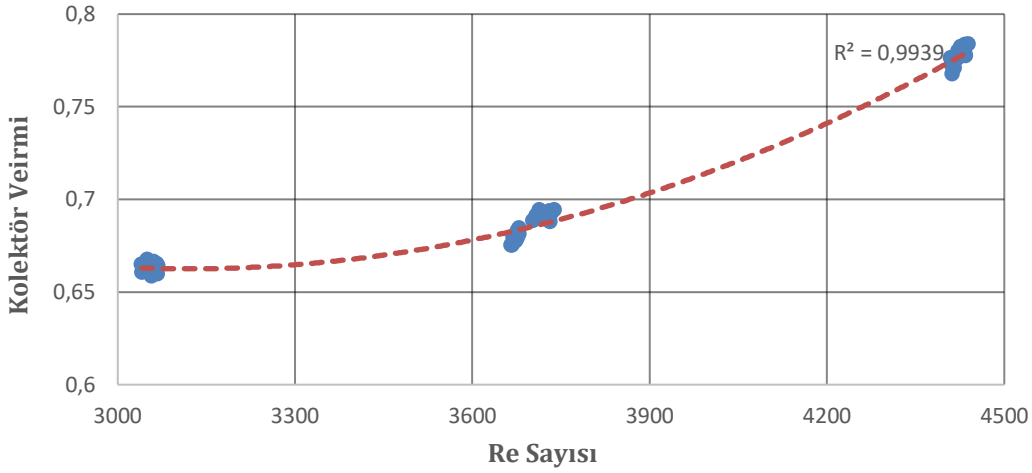
$$PG = \dot{V} \Delta P \quad (6)$$

Burada ΔP kolektör girişinden ve çıkışından ölçülen basınç değerlerinin farkını, \dot{V} (m^3/s) hacimsel debiyi ifade etmektedir.

Kolektör verimi için hata analizi, Eşitlik (7)'de verilen eşitlikten yararlanılarak yapılmıştır. Çalışmada kullanılan cihazların Tablo 3'te verilen ölçüm hassasiyetleri kullanılmış ve kolektör verimi için maksimum hata %10,1 olarak hesaplanmıştır.

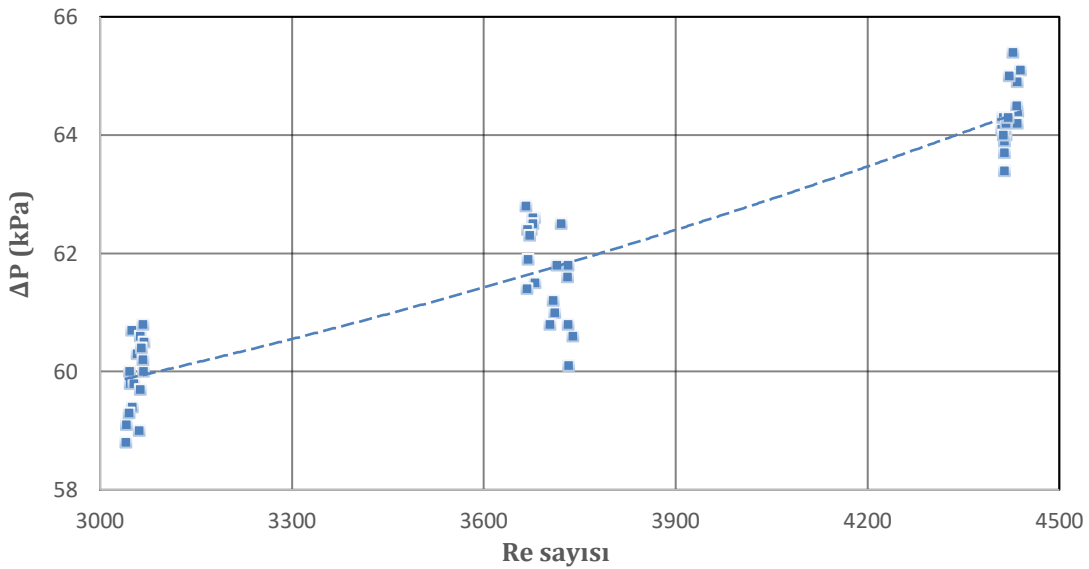
$$W_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial m} W_m\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \Delta T} W_{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial I} W_I\right)^2} \quad (7)$$

Bu eşitlikte \dot{m} kütsel debiyi, ΔT kolektör giriş ve çıkış sıcaklık farkını, I ise ışınlm şiddeti ölçümlerini ifade etmektedir.



Şekil 8. Re sayısı ile kolektör veriminin değişimi (Variation of collector efficiency with Re number)

Şekil 8'de ise Re sayısının kolektör verimi üzerindeki etkisinin gösterildiği grafik verilmiştir. Grafikte boru içerisindeki akışın, geçiş rejiminden türbülanslı akış rejimine geçmesi ile kolektör veriminin artışı arasındaki ilişki incelenmiştir. Re sayısının artışı ile birlikte kolektör verimi de artmakta olup, artış türbülanslı bölgede daha fazladır. Akışın türbülanslı rejime geçtiği durumda kolektör veriminin yaklaşık %72 olduğu görülmektedir. Yine Şekil 9'da Re sayısının basınç düşümü ile ilişkisini gösteren grafik verilmiş, beklenildiği gibi Re sayısının artışı ile basınç düşümü de artmaktadır.



Şekil 9. Re sayısı ile basınç düşümünün değişimi (Variation of pressure drop with Re number)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada vakum tüplü seri bağlı U-borulu güneş kolektörünün performans analizi yapılmıştır. İç ortam testi için güneş simülatörü kullanılmış ve 902 W/m^2 ışınlm şiddeti sağlanmıştır. Akışkan olarak su kullanılan test sisteminde üç farklı akışkan debisi ve dört farklı giriş sıcaklığı ile gerçekleştirilen ölçümler neticesinde kolektör veriminin %60 ile %78 arasında değiştiği görülmüştür. Kolektördeki akışkan debisi arttıkça kolektör veriminin de arttığı gözlemlenmiştir. Sistemde kullanılan U-boru çapının küçük olması ve boruların seri bağlı olması nedeniyle sistemdeki basınç kayıplarının fazla olduğu gözlemlenmiştir. U-borulu güneş kolektörünün giriş-çıkış arası basınç düşümü 59-65 kPa arasında değişmektedir. Basınç düşümünün akışkan debisinin artması ile birlikte artış gösterdiği belirlenmiştir. Literatürdeki çoğu çalışmada kullanılan seri bağlı U-borulu vakum tüplü güneş kolektörleri ile daha yüksek sıcaklıklara çıkılması mümkün olmaktadır. Bununla birlikte sistemdeki basınç düşümünün de artması nedeniyle akışkanın sirkülasyonu için daha fazla pompalama gücüne ihtiyaç duyulacağını gösterir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir (No conflict of interest was declared by the authors).

Kaynaklar (References)

- Akdağ, O., Yeroğlu, C., (2019). Malatya yöresi için örnek bir güneş santrali modelinin benzetimi ve şebekeye etkilerinin incelenmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 552-560.
- Bahrami M.A., Bahrami M., 2021. Modeling and thermal parametric analysis of U-pipe evacuated tube solar collector for four different climates in Iran. *Journal of Energy Engineering and Management Science and Technology*, 11 (1), 88-101.
- Bava, F., Furbo, S., 2016. A numerical model for pressure drop and flow distribution in a solar collector with U-connected absorber pipes. *Solar Energy*, 134, 264-272.
- Çengel, Y.A., Boles M.A., 2015. *Thermodynamics: an engineering approach*. 8th ed. Mc. New York: McGraw-Hill.
- Dincer I, Rosen M., 2013. *Exergy: Energy, environment and sustainable development*. 2nd Ed. Oxford, UK: Elsevier Science.
- Dündar, R., 2007. Standart düz kolektörlü güneşli su ısıtma sistemleri ile vakum tüplü güneşli su ısıtma sisteminin verim ve performanslarının Karabük ili şartlarında deneysel olarak karşılaştırılarak incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mehmood, A., Waqas, A., Said, Z., Rahman, S.M.A., Akram, M., 2019. Performance evaluation of solar water heating system with heat pipe evacuated tubes provided with natural gas backup. *Energy Rep.* 5:1432-4.
- Nie, X., Zhao, L., Deng, S. and Lin, X., 2017. Experimental study on thermal performance of U-type evacuated glass tubular solar collector with low inlet temperature, *Solar Energy*, 150, 192-201.
- Ong, K.S., Tong, W.L. and Choong, J.K., 2013. Performance of U-tube solar water heater with vertical and inclined panels. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 0, 1-6.
- Özdemir, M.B., Yatarkalkmaz, M.M., 2015. Farklı tipteki kolektörlerin enerji, ekserji ve ekonomik analizi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1/2, 235-252.
- Özsoy A., Galip M., 2018a. Vakum tüplü U-borulu güneş kolektörünün güneş simülatoründeki test sonuçlarının analizi. *Politeknik Dergisi*, 21(1): 229-236.
- Özsoy A., Galip M., 2018b. Güneş kolektörü testi için güneş simülator tasarımı ve imalatı. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 6(2), 55-62.
- Popsueva, V., Lopez, A.F.O., Kosinska, A., Nikolaev, O., Balakin, B.V., 2021. Field study on the thermal performance of vacuum tube solar collectors in the climate conditions of Western Norway, *Energies*, 14, 2745.
- Sabiha, M. A., Saidur, R., Mekhilef S., Mahian O., 2015. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1038-1054.
- Saydam, D.B., Çeçi, K.N., ve Hürdoğan, E., (2021). V tipi havalı bir güneş kolektörünün ısıl performansının deneysel olarak incelenmesi ve yapay sinir ağları ile modellenmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(4), 1212- 1223.
- Siuta-Olcha, A., Cholewa, T. and Dopieralska-Howoruszko, K., 2021. Experimental studies of thermal performance of an evacuated tube heat pipe solar collector in Polish climatic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 28:14319-14328.
- Sunmax, <http://www.sunmax.com.tr/index.php?t=urd&u=1&uk=9&i=11> (Erişim tarihi: 8.11.2021)
- TS EN ISO 9806, 2014. Güneş enerjisi- Güneş kolektörleri- Deney metotları.
- TS EN 12975-2, 2008. Isıl güneş enerji sistemleri ve bileşenleri-Güneş enerjisi kolektörleri-Bölüm 2: Deney metotları.
- Zambolin, E. and Col, D. D., 2010. Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy*, 84, 1382-1396.