

# Farklı Soğurucu Yüzey Tiplerine Sahip Düzlemsel Kolektörlerin Deneysel Analizi

Mustafa Bahadır ÖZDEMİR<sup>1</sup>, Mehmet Mustafa YATARKALKMAZ<sup>2</sup>, Gökay DAĞLI<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, ANKARA

<sup>2</sup>Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA

(Geliş/Received : 17.08.2016 ; Kabul/Accepted : 22.10.2016)

## ÖZ

Bu çalışmada alüminyum ve bakır soğurucu yüzey tiplerine sahip, diğer özellikleri birbirinin aynı olan iki adet düz plaka kolektör, TS EN 12975-2 standardına uygun ve güneş takip sistemi olan deney düzeneğinde test edilmiştir. Güneş ışınım şiddeti ve suyun giriş-çıkış sıcaklıkları kullanılarak TS EN 12975-2 standardında belirtilen şekilde kolektörlerin enerji verimleri hesap edilerek karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan karşılaştırma neticesinde 40°C'ye kadar alüminyum soğurucu yüzeyli kolektörün veriminin daha yüksek olduğu tespit edilmişken, 40°C'den daha fazla sıcaklıklarda bakır soğurucu yüzeyli kolektörün veriminin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kolektörlerin ekserji verimleri hesaplanarak mukayese edilmiştir. Yaklaşık 55 °C'ye kadar kolektörlerin ekserji verimlerinin 0,037 olduğu, sıcaklığın yaklaşık 70°C'ye çıkarıldığında ise bakır yüzeyli soğurucu alana sahip kolektörün ekserji veriminin 0,064 iken alüminyum soğurucu yüzeyli kolektörün ekserji veriminin 0,059 olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık yaklaşık 80°C'ye çıkarıldığında ise her iki kolektörün de ekserji verimlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bakır yüzeyli kolektörün ekserji verimi 0,056'ya düşerken, alüminyum yüzeyli kolektörün ekserji verimi 0,051'e düşmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş Enerjisi, Düz Plaka Kolektör, Alüminyum Soğurucu Yüzey, Bakır Soğurucu Yüzey, Enerji, Verim, Ekserji.

## Experimental Analysis of the Flat Plate Collectors Having Different Types of Absorber Surface

### ABSTRACT

In this study, the two flat plate collectors, which have aluminum and copper absorber surface type, and other features of which are identical, were tested in the experimental setup having the sun seeker system and conforming to TS EN 12975-2. Energy efficiencies of solar collectors were calculated and compared as specified in TS EN 12975-2 by using solar radiation and water inlet-outlet temperatures. As a result of the comparison, it was determined that the efficiency of the collector having aluminum absorber surface is higher up to 40°C, while the efficiency of the collector having copper absorber surface was found to be higher at temperatures higher than 40°C. Exergy efficiency of collectors were also calculated and compared. It was observed that the exergy efficiencies of collectors are the 0,037 up to about 55°C, while the exergy efficiency of the collector with the copper surface absorbent area was 0.064 while the exergy efficiency of the aluminum absorbent surface collector was 0.059 when the temperature was increased to about 70°C. When the temperature was increased to about 80°C, the efficiency of exergy was observed to decrease in both collectors. The exergy efficiency of the copper surface collector decreased to 0.056, while the exergy efficiency of the aluminum surface collector decreased to 0.051.

**Keywords:** Solar Energy, Flat Plate Collector, Aluminum Absorber Surface, Cooper Absorber Surface, Energy, Efficiency, Exergy.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan enerji talebi ve fosil kaynakların kısıtlı rezervleri, insanlığı farklı enerji kaynakları arayışına yıllar önce yöneltmiştir. Yapılan çalışmalar, araştırmalar neticesinde yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak enerji üretilmeye başlatılmıştır. Bu durum, kısıtlı kaynaklar ve enerjide dışa bağımlılık göz önünde bulundurulduğunda Türkiye için önem arz etmektedir. Ülkemizin potansiyeli yenilenebilir enerji kaynakları açısından yüksektir. Yenilenebilir enerji kaynak potansiyeli olarak 2014 yılı verilerine göre 23640,9 MW hidrolik enerji, 3629,7 MW

rüzgâr enerjisi, 40,2 MW güneş enerjisi, 288,2 MW biokütle enerjisi, 404,9 MW jeotermal enerji kurulu gücü bulunmaktadır [1]. Bu enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerji miktarları ise hidrolikten 40396,1 GWh, rüzgârdan 8385,4 GWh, biokütleden 1171,2 GWh, jeotermalden 2249,9 GWh'dir [1]. 2014 yılı verilerine göre güneş enerjisinin elektrik üretimine katkısı %0 (17,4 GWh) olmuştur. Bu durumun aksine ısı üretiminde güneş enerjisinden faydalanma oranı daha yüksektir. Güneş enerjisinden faydalanılarak 2003 yılında 350 bin TEP ısı üretilmişken bu rakam 2010 yılında 432 bin TEP'dir. 2014 yılında ise üretilen ısı miktarı 795 bin TEP'tir [1].

Teknolojide yaşanan gelişmeler ve azalan maliyetler sayesinde ısı üretme amacıyla güneş enerjisinden faydalanma oranları ülkemiz şartlarında artmıştır.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: gokaydagli01@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 441-449

Türkiye güneş enerji potansiyel atlası [2] incelendiğinde Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri toplam güneş radyasyonu açısından diğer bölgelere nazaran daha yüksek bir potansiyele sahiptir. Bu bölgeler yüksek sıcaklık uygulamaları ve elektrik üretimi açısından yüksek potansiyele sahiptir. İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgeleri orta sıcaklık uygulamaları açısından daha uygundur. Bu bölgeler elektrik üretilmesi açısından uygun güneş radyasyonuna sahip değildir. Karadeniz ve Marmara bölgeleri ise düşük sıcaklık uygulamaları için daha uygundur.

Yapılan literatür incelemesinde konuyla ilgili benzer çalışmalar yapıldığı tespit edilmiştir. Benzer bir çalışmada düzlemsel kolektörlerde su dolaşım miktarının, depo suyu sıcaklıklarına ve verime olan etkisi Değirmenci tarafından yapılan deneylerde incelenmiştir. Deneyler esnasında kolektördeki su debisi artırıldığında, verimin teorik olarak artmasına rağmen suyun depolanma sıcaklıkları düşmüştür. Deneylerde su dolaşım miktarı, 28,88 kg/h ile 90 kg/h aralığında değiştirilmiştir. Deneylerde 8 mm bakır borulu ve 3,6 L kapasiteli düzlemsel kolektör kullanılmıştır. Yapılan deneylerde en uygun su dolaşım miktarı 28,88 kg/h ile 39,6 kg/h aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu aralıktaki su dolaşım miktarına göre verim aralığı %76-%88, depolanan suyun sıcaklığı 44°C-38°C olarak tespit edilmiştir [3].

Dağ tarafından yapılan çalışmada düzlem yüzeyli kolektörlerde kullanılan boruların şekilleri değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında diğer parametreler sabit tutularak sadece boru şekilleri farklı iki sistem üzerinden deneyler yapılmıştır. Boru şekilleri olarak, klasik dairesel kesitli boru ve oval kesitli borular kullanılmıştır. On gün süren deneyler sonucundan, verim değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Oval borulu kolektörlerde verim %46,34 çıkarken dairesel borulu kolektörlerde verim %43,84 çıkmıştır [4].

Çakır tarafından yapılan çalışmada güneş enerjisinin önemi vurgulanmıştır. Çalışmada güneş enerjisi sistemine bir ısı üreticisi eklenerek 198 m<sup>2</sup> kapalı bir alan ısıtılmaya çalışılmıştır. Vakum borulu kolektör sistemine ek bir ısıtıcı eklenerek ısı analizi gerçekleştirmek için iki farklı sistem kullanılmıştır. Sistemlerin ilkinde kolektör yatak eksenle 40° açı yapmak kaydıyla konumlandırılmıştır ve sistemdeki boylere elektrikle çalışan direnç eklenmiştir. Diğer sistemde ise kolektör yatay zemine dik olarak konumlandırılmıştır. Deneyler 2008 yılının Ekim ve Kasım aylarında ve 2009 yılının Ocak ve Mayıs aylarında yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kolektörlerin verimleri hesaplanarak mukayese yapılmıştır [5].

Aktaş tarafından yapılan benzer bir çalışmada güneş enerjili doğal dolaşım ve endirekt kullanma sıcak suyu hazırlama sistemlerinde ısı değiştiricilerde genişletilmiş yüzeyin ısı verim bakımından etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deney düzeneği olarak iki ayrı sistem tasarlanıp üretilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde genişletilmiş yüzeyli sistemin klasik sisteme göre

ortalama olarak %4 daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber akış hızının artırıldığı zamanlarda ısı veriminin arttığı tespit edilmiştir [6].

Taze tarafından yapılan çalışmada düzlemsel kolektör verimine etki eden üç parametrenin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Boru geçiş sayısı, boru malzemesi ve boru-yutucu plaka birleşim yönteminin verim üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için dış ortam şartlarına uygun bir deney düzeneği kurulmuştur. Yapılan deneylerde beş farklı kolektör kullanılmış ve verime etkileri kayıt altına alınmıştır. Deneyler sonucunda boru geçiş sayısı artırıldığı zaman verimin %20 arttığı belirlenmiştir. Boru malzemesinde alüminyum yerine ısı iletim katsayısı daha yüksek bir malzeme kullanıldığında verimdeki değişimin %2'den fazla olmadığı görülmüştür. Kenetleme birleşimine sahip kolektörlerin veriminin, lazer kaynaklı birleşimli olanlara göre % 10 daha az olduğu belirlenmiştir [7].

Furbo ve diğerleri, Arcon Solvarme A / S güneş ısıtma tesisleri için iki düz plaka güneş kolektörünü Danimarka Teknik Üniversitesi'nde güneş kolektörleri için yapılan test laboratuvarında test etmişlerdir. Test edilen iki kolektör de aynı şekilde tasarlanmıştır. Kolektörlerin birinde soğurucu ile cam yüzey arasında ETFE folyo koyulurken, diğer kolektörde soğurucu ile cam yüzey arasına herhangi bir madde koyulmamıştır. Kolektörlerin verimleri farklı akış hızlarında test edilmiştir. Ölçülen verimler neticesinde, kolektörlerin verimleri akışın bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Yapılan testler sonucunda hesap edilen verim ile ölçülen verim arasında çok büyük farklar ortaya çıkmamıştır [8].

Furbo ve diğerleri, yaptıkları bir başka çalışmada ise yeni bir dinamik test modeli kullanmışlardır. Bu transfer fonksiyon metodu iki yeni kolektör parametresi üzerinde test edilmiştir. Parametrelerin biri kolektörün iç ısı transferi yeteneğinin gösterirken, diğeri ise veri işlemede akışkanın termal kapasitesini elde edebilen ortalama akışkan sıcaklığına bağlı kolektör terimini ifade etmiştir. Doğru ve istikrarlı ikinci dereceden elde edilen etki faktörlerini araştırmak için teorik analiz ve deneysel doğrulama uygulanmıştır. Deneylerde, bir adet düzlemsel kolektör ve bir adet vakum tüp kolektör kullanılmıştır. Bu iki tip kolektör hem yeni dinamik modelde hem de klasik metot da test edilerek karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonrasında, gelişmiş fonksiyon metodunun bu iki tip kolektör için doğru ve sağlam sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [9].

Maldonado ve diğerleri, güneş enerjili su ısıtıcıların tasarımını, yapısını ve anlık verimini incelemişlerdir. Çalışmada, kolektörün enerji dengesine dayalı bir termal analiz geliştirmişlerdir. Kolektörün geometrisi ve boyutları termal analiz sonuçları ve kolektörün yapımında kullanılan malzemelerin termik özellikleri tarafından belirlenmiştir. Güneş kolektörü boyutu 100 litrelik bir depolama tankı ile beraber 1,4 m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Kolektörün ulaştığı en yüksek sıcaklık 55°C olarak ölçülürken, bu sıcaklık geceleri 47,6 °C'ye düşmüştür. Deneyler sonucunda kolektörün debisi

0,0038 ile 0,04 kg/s aralığında, ortalama verimi ise %30,2 olarak ölçülmüştür [10].

Dragsted ve diğerleri yazdıkları makalede, meteorolojik referans yılları girdi olarak kullanıldığı zaman ve çok yıllık hava verileri girdi olarak kullanıldığı zaman güneş kolektörlerinin modellenmiş termal performanslarındaki değişikliklerin bir incelemesini sunmuşlardır. İnceleme, 1975-1990 arasındaki periyoda dayanan Danimarka referans yılının kullanmanın, çok yıllık ölçülmüş hava girdilerine nispeten %39'a kadar sapmayla sonuçlanacağını göstermiştir. 2001-2010 arasındaki periyoda dayanan daha yeni yerel referans yılları için azami sapma %25 olmuştur. Yapılan çalışmada, ayrıca küresel radyasyonda bir artışla birlikte kullanım oranında bir artış göstermiştir. Bu, güneş radyasyonunu artırmayla birlikte termal performansı artırmaya ek olarak, güneş radyasyonu kullanımının ayrıca daha iyi olduğu sonucu elde edilmiştir [11].

Kaan düzlemsel kolektörlerin performansını artırmaya yönelik bir çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmada düzlemsel bir kolektör sistemine motorlar eklemiştir. Eklenen motorlar yardımıyla sistemin güneşi takip etmesi sağlanmıştır. Deneyler farklı çalışma ortamlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre performans analizleri yapılmıştır [12].

Şahin çalışmasında güneş açılarından faydalanarak düzlemsel kolektörlerde sıcaklığın artırılması yönünde iki farklı sistem kurmuştur. Yapılan çalışma sonucunda düzlemsel kolektöre verilen eğimin sıcaklık artmasına bir etkisi olmadığı sonucu tespit edilmiştir [13].

Çaylıoğlu yaptığı çalışmada ısı borularının öneminden bahsetmiştir. Farklı özellikteki ısı borularının güneş kolektörlerindeki kullanımından ve verime katkılarında bahsedilmiştir. Isı borularında R134a, R22 ve metanol akışkanları kullanılmış ve farklı tipteki fitil yapıları kullanılmıştır. TS EN 12795-1 standardına uygun olarak deney düzeneğinde gerçekleştirilen verim deneyi sonuçları ve performans değerlendirmeleri yapılmıştır [14].

Makhanlall ve Jiang yaptıkları çalışmada yeni geliştirilen bir tekniği termodinamik analize dayanarak incelemişlerdir. İnceleme, nasıl termodinamik 2. kanunu analizinin, soğurucu ve cam kapak arasındaki mesafede sıkıştırılmış havanın su buharı tarafından ikame edildiği FPSC (düz plaka güneş kolektörü) için 1. analiz yaklaşımını tamamlamak için kullanılabileceğini göstermiştir. Analizde, güneş ışınması, eğim açısı ve farklı yayma değerleriyle soğurucuların kullanımı incelenmiştir [15].

Wang ve diğerleri, yaptıkları çalışmada orta sıcaklık kolektörler olarak vakum tüp güneş kolektörleri kullanmışlardır. Yapılan çalışmayla beraber tüplerin güneş geçirgenliği, sol-jel yöntemi ile biriktirebilecek gözenekli SiO<sub>2</sub> yansıma önleyici kaplama ile 0,94 yükseltilmiştir. Deneydeki vakum tüplerin vakumlanma işlemi 450 °C'de gaz çıkartılması ile yapılmıştır ve buharlaşabilen ve buharlaşamayan gaz gidericilerin kombinasyonlu kullanımı ile muhafaza edilmiştir.

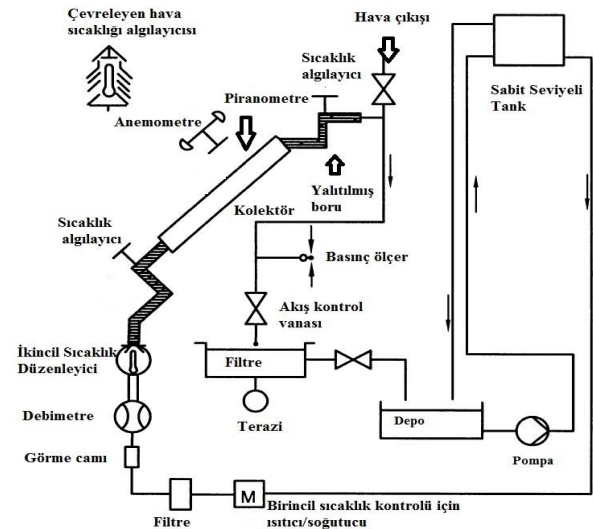
Yüzeyleri anti-oksidan ile temizlenen bakır U tüplere güneş ayırıcı tabakadan çalışma sıvısına ısı transfer edebilmek için alüminyum kanatlar kaynatılmıştır. Pürüzsüz alüminyum sacdan imal edilmiş, yüzeyinin güneş yansıtma oranı 0,91 olan bileşik parabolik yoğunlaştırıcı, güneş radyasyonunu yoğunlaştırmak için uygulanmıştır. Yapılan deneylerde, anlık verimlilik 25°C ile 150°C arasında ölçülmüştür ve 150°C'de ve %50,2 termal verimliliğe tekabül eden verimin denklemi  $\eta = 0,691 - 0,83T_m - 0,0035GT_m^2$  olarak edilmiştir [16].

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de uzun zamandır kullanılan düz plaka kolektörlerin enerji ve ekserji verimlerinin analizi yapılarak, alüminyum veya bakır soğurucu yüzeylere sahip kolektörler mukayese edilmiştir. Bu amaçla TS EN 12795-2 standardına uygun olarak kolektörler, test düzeneğinde ölçümler yapılarak karşılaştırma yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Materyal (Material)

Deneyler, TS EN 12795-2 standardına uygun olarak kurulmuş deney standında gerçekleştirilmiştir. Deney standı iki eksenli güneş takip sistemine sahiptir. Güneşten gelen ışınımı daha verimli kullanmak amacıyla geliştirilmiş bu sistemlerde yer alan iki motor sayesinde takip sistemi iki eksenli hareketle güneşin konumuna göre pozisyonunu ayarlayabilmektedir. Bu sayede sistem güneş ışınlarını sürekli 90° açıyla alabilmektedir.



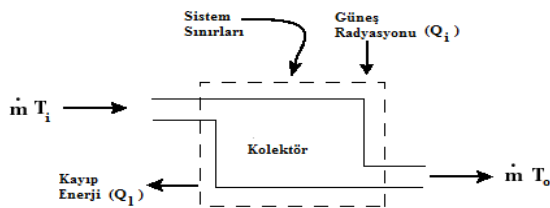
Şekil 1. Deney düzeneği devresinin şematik gösterimi (Schematic view of the test rig) [17]

Kolektörlerin anlık verim deneylerine başlanmadan önce deney düzeneğine bağlanan kolektörler ön şartlandırma işlemine tabii tutulur. Deneyde kullanılacak kolektörler gözle muayene edilir. Muayene edilen kolektörlerde herhangi bir hasar bulunmamalıdır. Kolektörlerin açıklık örtüsünün temiz olup olmadığı kontrol edildikten sonra eğer kolektör bileşenlerinde rutubet varsa kolektörü

kurutmak için 80°C'deki su rutubet kuruyana kadar sistemde dolaştırılır. Deneye başlanmadan önce boş kolektör en az 700 W/m<sup>2</sup> ışınlanma altında 5 saat bekletilir. Deneye başlanabilmesi için ışınlanma yoğunluğu en az 700 W/m<sup>2</sup> olması gerekmektedir. Kolektör açıklığındaki doğrudan güneş ışınması gelme açısı, kolektör için gelme açısı değiştiricinin dik gelmedeki değerinden ± % 2'den daha fazla değişme olmayacak aralıkta olmalıdır. Tek camlı düz plaka kolektörler için, kolektör açıklığındaki doğrudan güneş ışınması gelme açısı 20° den daha azsa, bu şart genel olarak yeterlidir. Dağılan ışınlanma yoğunluğu %30'dan daha fazla olduğunda kolektör deneye tabi tutulmaz. Deney ortamındaki rüzgâr hızı 3 m/s ±1 m/s olması gerekmektedir. Deneyde kolektör açıklık alanının metre kare başına 0,02 kg/s akışkan kullanılır [17].

Deney başlangıcında piranometre yardımıyla güneş ışınımı ölçülür. Anemometre yardımıyla rüzgâr hızı ölçülür ve termometre yardımıyla ortam sıcaklığı ölçülür. Deney düzeneği sensörler yardımıyla güneşin gelme açısına göre güneşi takip etmektedir. Sistem çalıştırıldıktan sonra depodan alınan su, deney şartına göre direkt ya da ön ısıtıcı tarafından ısıtılarak kolektöre iletilir. Kolektörün giriş kısmında suyun sıcaklığı ve debisi ölçülür. Daha sonra kolektör içinde ısınan su sıcaklığı ve debisi ölçülerek tekrar depoya gönderilir. Kolektörün su girişinde bulunan ölçüm aletleri yardımıyla, suyun sıcaklığı ve debisi ölçülür. Kolektörde ısınan suyun çıkış bölümünde tekrar sıcaklığı ve debisi ölçülür. Sisteme bağlı olan bilgisayar yardımıyla üç saniyelik aralıklarla sonuçlar alınır ve kaydedilir. Verim formülü yardımıyla kolektörün anlık verisi hesaplanır. Deneylerin standarda uygun olarak gerçekleştirilebilmesi için giriş sıcaklığı azami sıcaklık en az 80°C civarında olana kadar deneye devam edilir. Toplam 16 veri noktası elde edebilmek için, akışkan giriş sıcaklıkları için en az dört bağımsız veri elde edilir. Anlık verimliliğin modellenebilmesi için en küçük kareler regresyonuyla beraber ikinci dereceden bir eğri kullanılır [17].

## 2.2. Metot (Method)



Şekil 2. Kolektör kontrol hacmi

Kontrol hacmi (Şekil 2) belirtilen kolektör için termodinamiğin birinci kanunu olan enerji denklemini yazabiliriz.

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * \Delta T \quad (1)$$

Eş. 1'de verilen Q akışkanın gerçek faydalı enerjisini ifade etmektedir.  $c_p$  değeri ortalama akışkan sıcaklığına bağlı olarak Eş. 2'de görüldüğü gibi hesaplanır [17].

$$c_p(T) = 4,217 - 3,358 * 10^{-3} * T_m + 1,089 * 10^{-4} * T_m^2 - 1,675 * 10^{-6} * T_m^3 + 1,309 * 10^{-8} * T_m^4 - 3,884 * 10^{-11} * T_m^5 \quad (\text{kJ/kgK}) \quad (2)$$

$$T_m = \frac{T_o - T_i}{2} \quad (3)$$

Kolektöre gelen enerjinin bir kısmı akışkana aktarılırken bir kısmı da kaybolmaktadır. Enerjinin tamamının kolektör akışkan sıvısına aktarılamamasından dolayı kolektör verimliliği ortaya çıkmaktadır. Kolektör verimliliğine, faydalı gücün dâhil edilmesiyle beraber kolektörde tutulan güneş enerjisi Eş. 4'teki gibi hesaplanır.

$$\dot{Q} = A_c * G * \eta \quad (4)$$

Uygulamada verim hesabı Eş. 5'te ifade edildiği şekilde hesaplanır [17]. Yapılan ölçümler neticesinde  $\eta_0, a_1$  ve  $a_2$  değerleri kolektörün karakteristik parametreleri olarak program tarafından hesaplanmaktadır.

$$\eta = \eta_0 - \frac{a_1(T_m - T_a)}{G} - \frac{a_2(T_m - T_a)^2}{G} \quad (5)$$

Düşürülmüş sıcaklık farkı, ışınım altındaki ısı transfer akışkanının ortalama sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farktır. Eş. 6'daki gibi ifade edilir.

$$T_m^* = \frac{T_m - T_a}{G} \quad (6)$$

TS EN 12975-2 standardına göre en küçük kareler metodu kullanılarak, enerji verimliliği  $\eta$ , aşağıdaki şekilde bir verimlilik eğrisi elde etmek için istatistiksel eğri uydurularak hesaplanması için kolektörlerin enerji verimi Eş. 5 ve 6'ya göre yeniden düzenlendiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilir. Standarda göre normal olarak, en küçük kareler regresyonuyla ulaşılabilen, bir ikinci-derece eğri grafiklerde kullanılmalıdır [17].

$$\eta = \eta_0 - a_1 T_m^* - a_2 G (T_m^*)^2 \quad (7)$$

Ekserji, enerjinin iş yapabilme yeteneği olarak ifade edilir. Ekserji analizi yardımıyla sistemlerin ısı kayıplarının miktarının ve niteliğinin belirlenmesine yardımcı olur. Kolektörün ekserjisi aşağıda ifade edildiği gibi hesaplanır.

$$E_{xc} = G * A_c * \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) \quad (8)$$

Kolektörde dolaşan akışkanın ekserjisi ise Eş. 8'deki gibi hesaplanır.

$$E_{xf} = \dot{m} * [(h_o - h_i) - T_a * (s_o - s_i)] \quad (9)$$

$$(h_o - h_i) = c_p * (T_o - T_i) \quad (10)$$

$$(s_o - s_i) = c_p * \ln\left(\frac{T_o}{T_i}\right) \quad (11)$$

Eş. 9, 10 ve 11'i tekrar düzenlendiğinde Eş. 12 elde edilir.

$$\psi = \dot{m} * c_p * (T_o - T_i - T_a * \ln\left(\frac{T_o}{T_i}\right)) \quad (12)$$

Sistemin ekserji verimliliğini hesaplayabilmek için akışkanın çıkan ve giren ekserjisi arasındaki fark ile güneşten gelen ekserjiden faydalanılır [18].

$$\eta_{2nd} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_o - T_i - T_a \cdot \ln(\frac{T_o}{T_i}))}{G \cdot A_c \cdot (1 - \frac{T_a}{T_s})} \quad (13)$$

### 3. DENEY VE ANALİZ SONUÇLARI (EXPERIMENT AND ANALYSIS RESULTS)

Yapılan deneylerde soğurucu yüzey alan ölçüleri birbiriyle aynı iki adet düz plaka kolektör kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kolektörlerin ikisinde de 10 mm çapında 12 adet bakır boru kullanılmıştır. Kolektörlerin

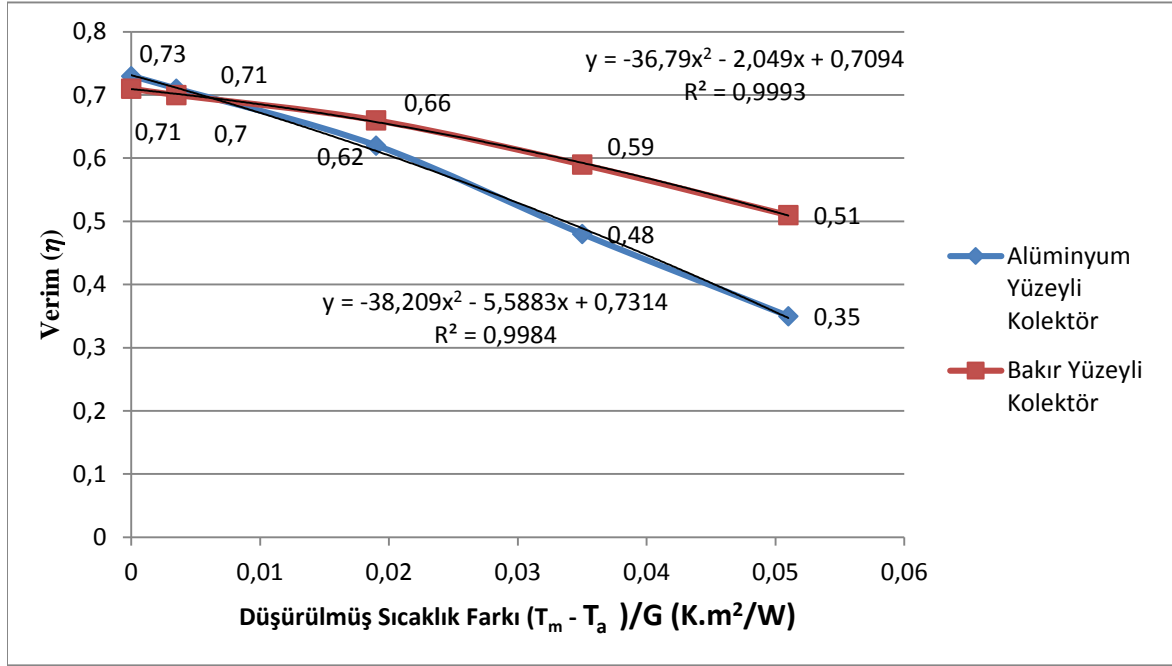
kasası alüminyum eloksallı kaplamalıdır. Ayrıca her iki kolektörde de düşük demirli 4 mm kalınlığında temperli düz cam kullanılmıştır. Yalıtım malzemesi olarak taş yünü kullanılmıştır. 1 numaralı kolektörde soğurucu yüzey alüminyum iken, 2 numaralı numunede ise soğurucu yüzey tipi bakırdır. Çizelge 1'de alüminyum soğurucu yüzey tipine ait kolektörün anlık ve ikinci dereceden verimi değerleri verilmiştir. Çizelge 2'de ise bakır soğurucu yüzeyi olan kolektörün anlık ve ikinci dereceden verim değerleri verilmiştir. Alüminyum soğurucu yüzeyli kolektör için  $a_1$  değeri 3,601,

**Çizelge 1.** Alüminyum soğurucu yüzeyli düz plaka kolektör deney ve analiz sonuçları (Experiment and analysis results for aluminium absorber surface flat plane collector)

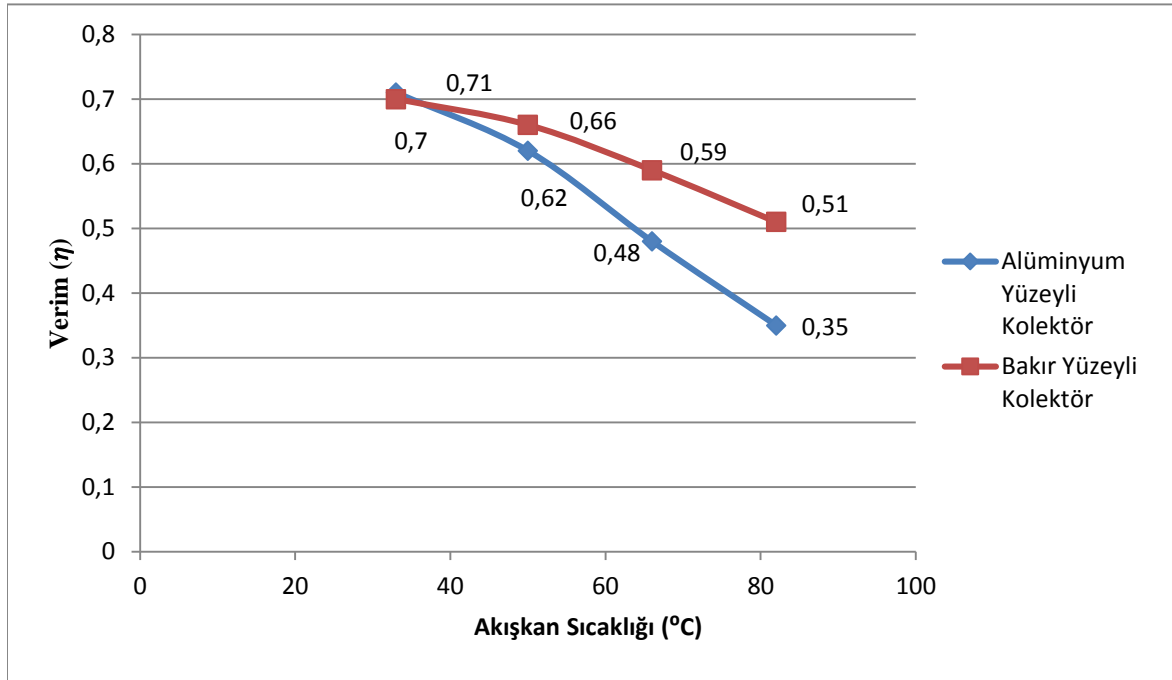
İŞİNİM ŞİDDETİ (W/m <sup>2</sup> )	DEBİ (kg/dk)	GİRİŞ SICAKLIĞI (T <sub>i</sub> ) (°C)	ÇIKIŞ SICAKLIĞI (T <sub>e</sub> ) (°C)	ÇEVRE SICAKLIĞI (T <sub>a</sub> ) (°C)	ORTALAMA SICAKLIK (T <sub>m</sub> ) (°C)	VERİM (η)	EKSERJİ VERİMİ (η <sub>2nd</sub> )
1045	1,98	28,93	38,2	31	33,57	0,713	0,006
1045	1,98	28,84	38,15	31,5	33,50	0,715	0,005
1042	1,98	28,9	38,12	31	33,51	0,713	0,006
1037	1,98	28,87	37,94	30,5	33,41	0,711	0,007
1032	1,97	46,87	54,45	31	50,66	0,622	0,035
1027	1,97	47,01	54,55	30,5	50,78	0,617	0,037
1015	1,97	47,04	54,47	31,5	50,76	0,623	0,035
1019	1,97	46,98	55,1	30,7	51,04	0,616	0,040
1011	1,98	63,35	70,24	30,5	66,80	0,482	0,058
1005	1,98	63,32	70,32	30,9	66,82	0,484	0,059
1004	1,98	63,35	70,3	30,6	66,83	0,481	0,059
1017	1,98	63,3	70,5	31	66,90	0,487	0,060
1022	1,98	78,15	83,05	30	80,60	0,331	0,055
1020	1,98	78,32	83,01	31,5	80,67	0,347	0,051
1017	1,98	78,4	82,95	32	80,68	0,352	0,049
1019	1,98	78,45	82,97	32,2	80,71	0,354	0,049

**Çizelge 2.** Bakır soğurucu yüzeyli düz plaka kolektör deney ve analiz sonuçları (Experiment and analysis results for copper absorber surface flat plane collector)

İŞİNİM ŞİDDETİ (W/m <sup>2</sup> )	DEBİ (kg/dk)	GİRİŞ SICAKLIĞI (T <sub>i</sub> ) (°C)	ÇIKIŞ SICAKLIĞI (T <sub>e</sub> ) (°C)	ÇEVRE SICAKLIĞI (T <sub>a</sub> ) (°C)	ORTALAMA SICAKLIK (T <sub>m</sub> ) (°C)	VERİM (η)	EKSERJİ VERİMİ (η <sub>2nd</sub> )
1038	2,25	27,51	36,2	29,1	31,86	0,704	0,007
1038	2,25	27,55	36,4	28,9	31,98	0,703	0,008
1039	2,25	27,57	36,41	28,7	31,99	0,702	0,008
1045	2,25	27,61	36,52	29,4	32,07	0,704	0,007
1035	2,2	44,42	52,45	31,4	48,44	0,658	0,036
1035	2,2	44,41	52,44	30,4	48,43	0,654	0,039
1041	2,2	44,43	52,5	31,1	48,47	0,657	0,037
1038	2,2	44,5	52,53	31	48,52	0,656	0,037
1001	2,2	62,5	69,6	32,2	66,05	0,589	0,063
1009	2,2	62,5	69,61	31,9	66,06	0,589	0,063
1015	2,2	62,51	69,71	31	66,11	0,586	0,065
1005	2,2	62,54	69,73	32	66,14	0,589	0,064
1049	2,2	81,07	85,7	30,8	83,39	0,512	0,058
1050	2,2	81,1	85,49	30	83,30	0,509	0,055
1052	2,2	81,05	85,59	31	83,32	0,514	0,056
1051	2,2	81,09	85,54	32	83,32	0,519	0,054



Şekil 3. Kolektörlerin enerji verimlerinin düşürülmüş sıcaklık farkına oranının karşılaştırılması (Comparison of the efficiency of the collectors to decreased temperature difference rate)



Şekil 4. Kolektörlerin enerji verimlerinin akışkan sıcaklığına göre karşılaştırılması (Comporasion of efficiency of the collectors to fluid temperature)

$a_2$  değeri ise 0,085 olarak bulunmuştur. Bakır yüzeyle kolektör için ise  $a_1$  değeri 2,971,  $a_2$  değeri ise 0,019 olarak bulunmuştur.

Eş. 5'te ifade edilen formül kullanılarak iki farklı tipteki kolektörün enerji verimleri hesap edilerek, sonuçlar Çizelge 1 ve Çizelge 2'de belirtilmiştir. Eş. 13'deki formül yardımıyla ise kolektörlerin ekserji verimleri hesap edilerek Çizelge 1 ve Çizelge 2'de belirtilmiştir. Yapılan enerji analizi sonucunda, kolektörlerin enerji

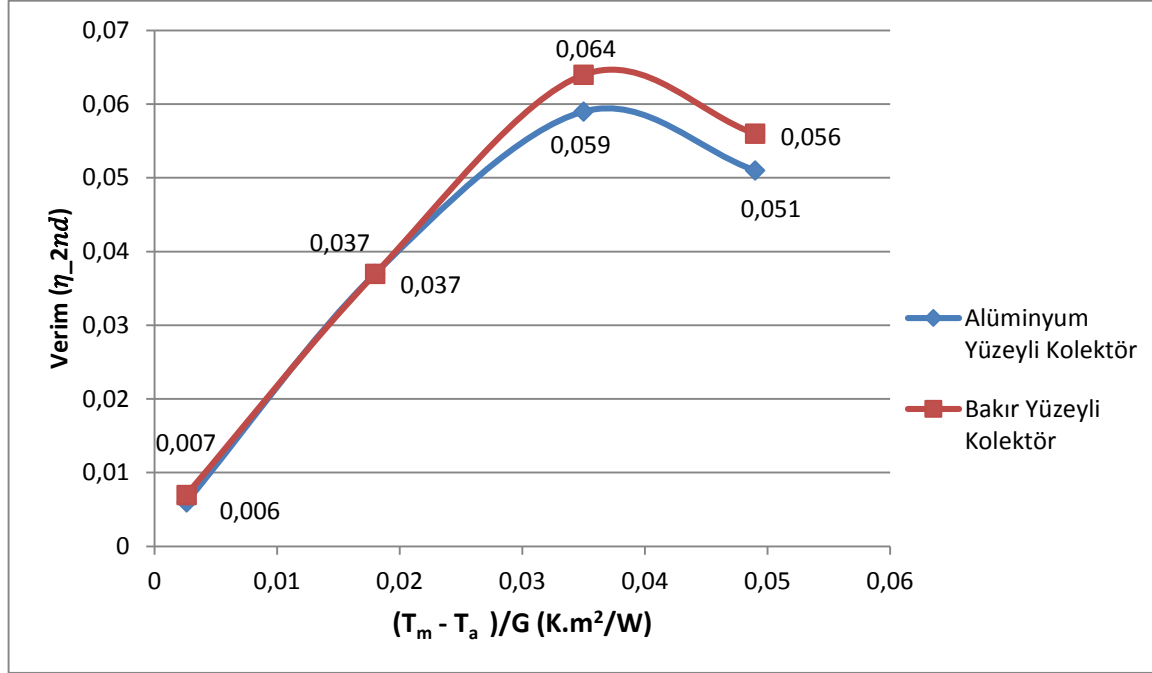
verimlerinin düşürülmüş sıcaklık farkına oranı karşılaştırılarak Şekil 3, Şekil 5'de gösterilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda Şekil 3'te farklı tipteki iki düz plaka kolektörün verim sonuçlarının kıyaslaması verilmiştir. Düşürülmüş sıcaklık farkı sıfır olduğunda alüminyum soğurucu yüzeyle olan kolektörün verimi %73,14 iken, bakır soğurucu yüzeyle düz plaka kolektörün verimi %70,94 elde edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde alüminyum soğurucu yüzeyle kolektörün

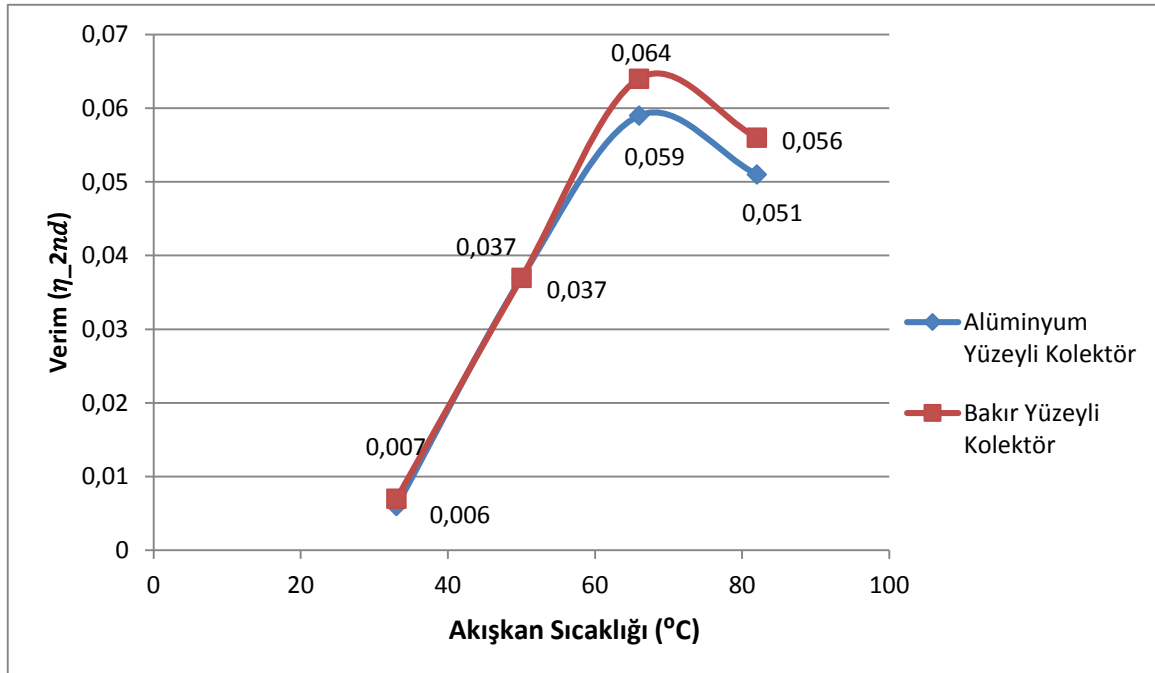
verimi bakır yüzeyli düz plaka kolektörününkinden % 3,11 daha fazladır. Deney düzeneği güneş takip eden bir sistem olduğu için deneylerin farklı zamanlarda olmasına rağmen kolektörlerin aldığı güneş ışınımları yaklaşık aynıdır. İki kolektör üzerinde yapılan deney sonucunda artan akışkan çalışma sıcaklığı ile beraber kolektörlerin veriminin düştüğü gözlenmiştir. Yapılan deneylerde

rüzgâr hızı az olduğu için rüzgârdan kaynaklı kayıplar göz ardı edilmiştir. Alüminyum soğurucu yüzeyli kolektördeki enerji veriminin düşüşü, bakır yüzeyli kolektöre göre daha fazladır.

Verim sonuçları dikkate alındığında Şekil 4'te 30-35 °C gibi düşük sıcaklıklarda iki kolektöründe verimleri yaklaşık birbirine yakındır. Bakır yüzeyli kolektörün



Şekil 5. Kolektörlerin ekserji verimlerinin düşürülmüş sıcaklık farkına oranının karşılaştırılması ( Comparison of exergy efficiency of the collectors to decreased temperature difference rate)



Şekil 6. Kolektörlerin ekserji verimlerinin akışkan sıcaklığına göre karşılaştırılması ( Comparison of exergy efficiency of the collectors to fluid temperature)

verimi ortalama 0,70 iken, alüminyum yüzeylininki ortalama 0,71'dir. Ama artan çalışma sıcaklığıyla beraber bakır yüzeyli kolektörün verimindeki düşüş alüminyum yüzeyliden daha düşüktür. Deneylerde artırılan çalışma sıcaklığıyla beraber kolektör verimleri arasındaki fark gittikçe artmıştır. 50 °C'de gerçekleştirilen deneylerde kolektör verimleri arasındaki fark çok azdır. Bu çalışma sıcaklığında bakır yüzeyli kolektörün enerji verimi 0,66'ya düşmüşken, alüminyum soğurucu yüzeyli kolektörünki 0,62'ye düşmüştür. Bu sıcaklık değerinde bakır yüzeyli kolektörün verimi %6,45 daha fazladır. Yaklaşık 66°C'de ise bakır yüzeylininki 0,59 düşmüşken, alüminyum yüzeylinin enerji verimi 0,48'e düşmüştür. 82 °C'de gerçekleştirilen deneyler sonucunda ortaya çıkan verim sonuçları arasındaki fark çok fazladır. 82 °C'de bakır soğurucu yüzeyli kolektörün verimi 0,51 iken, alüminyum yüzeyli kolektörün verimi 0,35'tir. Bu sıcaklıkta bakır yüzeyli kolektörün verimi, alüminyum yüzeyli kolektörün enerji veriminden %45,7 daha fazladır.

Şekil 5 ve Şekil 6'da kolektörlerin ekserji verimleri kıyaslanmıştır. Her iki kolektöründe ekserji verimi 60-65 °C çalışma sıcaklığına kadar artış göstermektedir. Bu sıcaklıkta bakır yüzeyli kolektörün ekserji verimi % 6,4 iken alüminyum yüzeyli kolektörün ekserji verimi % 5,9 olmuştur. Bu sıcaklıktan sonra sistemin ekserjisi düşmektedir. 50 °C'de iki tipteki kolektörün ekserji verimleri aynı değerdedir. Düşük sıcaklıklarda bakır yüzeyli kolektörün ekserji verimi % 0,7 iken, alüminyum yüzeylininki %0,6'dır. 60-65 ° C'ye kadar kolektörlerin ekserji verimleri yaklaşık olarak aynı değerdedir. Sistemlerin maksimum ekserji veriminde bakır yüzeyli kolektörün verimi diğerinden % 8,5 daha fazladır. En yüksek çalışma sıcaklığında ise bakır yüzeylinin verimi % 9,8 daha fazladır.

Bu sonuçların elde edilmesinde en büyük pay soğurucu yüzeylerin ısı iletkenlik katsayılarıdır. Bakırın ısı iletkenlik katsayısı alüminyumunkinden yüksektir. Isı iletkenliğin fazla olmasından dolayı bakır soğurucu yüzey güneşten aldığı ışınımı taşıyıcı borulara ve dolayısıyla akışkan sıvıya daha fazla aktarabilmektedir. Bu da yüksek çalışma sıcaklıklarında daha fazla enerjiyi akışkana aktarabilmesini sağlamaktadır. Dolaylı olarak da bakır soğurucu yüzeyin ekserji verimliliği daha yüksektir. Alüminyum soğurucu yüzeyin ısı iletkenlik katsayısının daha düşük olmasından dolayı güneşten gelen ışımandan yüksek sıcaklıklarda faydalanma oranı daha düşüktür. Bu durumda ısı kayıpların daha çok olmasına ve sistemin ekserjisinin düşük olmasına neden olmaktadır.

#### 4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER (DISCUSSION AND SUGESSTIONS)

Deney sonuçları kullanılarak önce sistemin enerji analizi yapılmıştır. Enerji analizinden sonra sistemin birinci verimi hesaplanmıştır.Yapılan analiz neticesinde düşük sıcaklıklarda verim farkı %3,11 iken uygulama sıcaklığı 80° C'ye çıkarıldığında iki kolektör arasındaki verim

farkı %45,7'ye ulaşmıştır. Artan sıcaklıkla beraber bakır yüzeyli kolektörün verimi %70'den %51'e düşerken, alüminyum yüzeyli kolektörün verimi %71'den %35'e düşmüştür. Daha sonra sistemin ekserji analizi yapılmış ve kolektör tipleri için sistem ekserji verimleri kıyaslanmıştır. Yaklaşık 30-35° C arasında kolektörlerin ekserji verimleri aynıdır ve %0,7'dir. Sıcaklık 70 ° C'ye yükseldikçe kolektörlerin ekserji verimleri yükselmiştir. Bakır soğurucu yüzeyli kolektörün ekserji verimi %6,4'e yükselmişken, alüminyum yüzeyli kolektörün verimi ise %5,9'a yükselmiştir. Bu sıcaklıklardan sonra her iki kolektöründe ekserji verimlerinde düşüş gözlenmiştir. Bakır yüzeyli kolektörün ekserji verimi %5,6'ya düşmüşken, alüminyum yüzeylininki ise %5,1'e düşmüştür. Yapılan analizler ve karşılaştırmalar neticesinde bakır soğurucu yüzey tipli düz plaka kolektörün veriminin daha iyi olduğu ve daha uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışma neticesinde güneş kolektörlerinde kullanılan soğurucu yüzeyin hangi maddeden yapıldığının önemi vurgulanmıştır. Bakırın ısı iletkenlik katsayısının alüminyumdan daha fazla olması kolektörün verimini olumlu yönde etkilemektedir. Kolektörlerde soğurucu yüzey olarak daha iletken bir metalin kullanılması kolektörün verimini daha da artıracaktır.

Sıcak su elde etmek için doğalgazdan, elektrikli şofbenlerden ya da kazanlardan yararlanılmaktadır. Doğalgazda dışarı olan bağımlılığımız, elektrik üretiminde kullanılan kaynakları ithal etmemiz ve kazan sistemleriyle sıcak su elde etmenin zahmetli olduğu düşünüldüğünde güneş kolektörleri ile sıcak su elde etmek hem ekonomik yönden hem de pratiklik yönünden avantajlar sağlamaktadır. Su ve elektrik kesintilerinin çok sık yaşandığı yerlerde su ısıtma ve depolama amacıyla kullanılan bu sistemler, çevre dostu olma özelliğiyle de ön plana çıkmaktadır. Enerjide dışa bağımlılık ve artan enerji ücretleri düşünüldüğünde sıcak su elde etme amaçlı kolektör sistemleri önem kazanmaktadır. Sistemlerin uzun ömürlü olması, bakımlarının olmaması ve işletme kolaylığı gibi avantajları bulunan bu sistemlerin yaygınlaşması enerjide dışa bağımlılığı azaltmaya yardımcı olacaktır. Yaklaşık 20 yıl ömre sahip bu kolektörlerin verimleri göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışma hangi tip soğurucu yüzeye sahip kolektörün kullanılması gerektiğine yardımcı olacaktır.

#### SİMGELER (SYMBOLS)

G	Işınım Şiddeti (W/m <sup>2</sup> )
Q̇	Transfer edilen ısı miktarı (W)
m	Suyun kütlesi (kg)
ṁ	Kütleli debi (kg/s)
c <sub>p</sub>	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kg.K)
T	Sıcaklık (°C)



$T_m^*$	Düşürülmüş sıcaklık farkı (K.m <sup>2</sup> /W)
$\eta$	Enerji verimi
$\eta_0$	Sıfır ısı kaybı katsayısı
$\eta_{2nd}$	İkinci dereceden verim
$a_1$	Isı kaybı katsayısı
$a_2$	Sıcaklığa bağlı ısı kaybı katsayısı
$\psi$	Ekserji (W)
$A_c$	Kolektör yüzey alanı (m <sup>2</sup> )
H	Entalpi (kJ/kg)
S	Entropi (kJ/kg.K)
E	Enerji (J)

**Alt indisler** (Sub Indices)

o	Çıkış
i	Giriş
m	Ortalama
a	Çevre
s	Güneş
xc	Kolektör ekserjisi
xf	Akışkan ekserjisi

**Kısaltmalar** (Abbreviations)

EN	Avrupa Normu
Eş	Eşitlik
TS	Türk Standardı

**KAYNAKLAR** (REFERENCES)

1. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Mavi Kitap - Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Bağlı, İlgili ve İlişkili Kuruluşlarının Amaç ve Faaliyetleri, **ETKB**, Ankara, 2-11, (2015).
2. İnternet: Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (2010), URL:<http://www.webcitation.org/quer?url=http%3A%2F%2Fwww.eie.gov.tr%2FMyCalculator%2FDefault.aspx&date=2016-02-24>, Son Erişim Tarihi: 24.02.2016.
3. Değirmenci, H. Düzlemsel Güneş Kolektörlerinde Su Dolaşım Miktarının Kolektör Verimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, **Yüksek Lisans Tezi**, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 20-68, (2006).
4. Dağ, H. Güneş Enerji Sistemlerinde Kullanılan Dairesel Borulu Kolektör ile Oval Borulu Kolektörlerin Deneysel İncelenmesi, **Yüksek Lisans Tezi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 44-69, (2005).
5. Çakır, G. Vakum Borulu Kolektör ve Ek Isıtıcı Kullanarak Kapalı Bir Alanın Isıtılmasının Analizi, **Yüksek Lisans Tezi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 55-122, (2009).
6. Aktaş, M. Güneş enerjili sistemlerde ısı değiştirici yüzeyin ve akışın ısı performans üzerindeki etkileri. **Politeknik Dergisi**, 12(4): 243-246, (2009).
7. Taze, G. Düz Güneş Kolektörü Verimini Etkileyen Bazı Parametrelerin Deneysel İncelenmesi, **Yüksek Lisans**

- Tezi**, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 35-110, (2010).
8. Furbo, S. , Chen, Z. , Perers, B. , Fan, J. and Andersen, E. Efficiencies of flat plate solar collectors at different flow rates. **Energy Procedia**, 30(30): 65-72, (2012).
  9. Furbo, S. , Chen, Z. , Perers, B. , Fan, J. , Andersen, E. , Wang, Z. and Kong, W. Investigation of thermal performance of flat plate and evacuated tubular solar collectors according to a new dynamic test method. **Energy Procedia**, 30(30): 152-161, (2012).
  10. Maldonado, R. D. , Huerta, E. , Corona, J.E. , Ceh, O. , Leon, A. I. and Henandez, I. Design and construction of a solar flat collector for social housing in Mexico. **Energy Procedia**, 60(57): 2159-2166, (2014).
  11. Dragsted, J. , Furbo, S. , Andersen, E. , Perers, B. and Nielsen, K. P. Calculated thermal performance of solar collectors based on measured weather data from 2001-2010. **Energy Procedia**, 70(70): 49-56, (2015).
  12. Kaan, Ö. Düzlemsel Kolektörlerde Performans Artırma Yöntemlerinin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Maliyet Analizi, **Yüksek Lisans Tezi**, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 13-71, (2006).
  13. Şahin, T. Düzlemsel ve Bükülmüş Kolektörlerin Deneysel İncelenmesi, **Yüksek Lisans Tezi**, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 32-50, (2010).
  14. Çaylıoğlu, E. Farklı Tipteki Isı Borularının Güneş Kolektöründe Kullanımı ve Isıl Verimlerinin Araştırılması, **Yüksek Lisans Tezi**, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 37-70, (2011).
  15. Makhanlall, D. , Jiang, P. Performance analysis and optimization of a vapor filled flat plate solar collector. **Energy Procedia**, 70(70): 95-102, (2015).
  16. Wang, J. , Yin, Z. , Qi, J. , Ma, G. and Liu X. Medium temperature solar collectors with all glass solar evacuated tubes. **Energy Procedia**, 70(70): 126-129, (2015).
  17. Türk Standardları Enstitüsü TS EN 12975-2: Isıl güneş enerji sistemleri ve bileşenleri - Güneş enerjisi kolektörleri-Bölüm 2: Deney metotları, **TSE**, Ankara, 26-107, (2006).
  18. Ge, Z. , Wang, H. , Zhang, S. and Guan, X. Exergy Analysis of Flat Plate Solar Collectors. **Entropy**, 2(16): 2549-2567, (2014).