



## Adana iklim koşullarında Organik Rankine Çevrimi ile bütünleşik düzlem-plakalı ve vakum tüplü kolektörlerin ısı verimlerinin karşılaştırılması

### Comparison of heat efficiencies of flat-plate and vacuum tube collectors integrated with Organic Rankine Cycle in Adana climate conditions

Ayhan ATIZ<sup>1</sup> , Mehmet KARAKILCIK<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>İlköğretim Matematik ve Fen Bilimi Eğitimi Bölümü, Eğitim Fakültesi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Antalya, Türkiye.

ayhan.atiz@alanya.edu.tr

<sup>2</sup>Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye.

kkilcik@cu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 24.10.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 29.04.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.34033

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada, düzlemsel güneş kolektörleri (DGK'lar) ile vakum tüplü güneş kolektörlerinin (VTGK'ler) termodinamik performansı, elektrik ve hidrojen üretimi numerik olarak karşılaştırıldı. Her iki sistem analizi Adana iklim koşullarında bir yıl boyunca yapıldı. DGK'lar ve VTGK'lar güneş enerjisinden ısı enerjisi üretebilen güneş enerjisi teknolojileridir. Bunlar çeşitli yerlerde sıcak su ihtiyacı veya ısınma ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Ancak, günümüzde elektriğin birçok yerde kullanılmasından dolayı, her geçen gün elektrik üretimi daha kıymetli hale gelmektedir. Böylece, insanlık elektriği çeşitli kaynaklardan üretmenin yollarını aramaktadır. Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) düşük ve yüksek sıcaklıklardaki kaynaklardan elektrik üretebilen çok önemli makinalardır. Bu sayede, DGK'larda ve VTGK'larda üretilen ısı enerjisi bir pompa yardımıyla ORÇ'ye aktarılarak elektrik üretilmiştir. ORÇ' de üretilen elektrik bir elektroliz sistemine aktarıldı ve burada suyun elektrolizi ile hidrojen üretilmiştir. Sistemin termodinamik analizi Mühendislik Eşitlik Çözümleyici (EES) benzetim programı ile yapılmıştır. Sonuçlara göre, güneş enerjisi ve ortam sıcaklığı artışıyla birlikte DGK ve VTGK' den oluşan sistemin termal verimi ve dolayısıyla da ORÇ'nin güç üretim verimi artmıştır. Bu artışlar sayesinde, hidrojen üretimi de önemli ölçüde artmıştır. Bu nedenle, Temmuz ayında VTGK'lar ve DGK'ların ısı verimleri sırasıyla maksimum %6.25 ve %5.46 olarak bulundu.

**Anahtar kelimeler:** Güneş enerjisi, Düzlemsel ve vakum tüplü güneş kolektörü, Organik Rankine çevrimi, Elektrik ve hidrojen üretimi, Enerji verimi

#### Abstract

In this study, the thermodynamic performance of solar collectors (FPSCs) and vacuum tube solar collectors (VTSCs), electricity and hydrogen production were numerically compared. Both systems were analyzed for one year in Adana climate conditions. FPSCs and VTSCs are solar energy technologies that can produce heat energy from solar energy. They are used in various places to meet the need for hot water or warming. However, today electricity is used more in many places, electricity generation is becoming more valuable every day. Thus, humanity seeks to produce electricity from various sources. Organic Rankine Cycle (ORC) is a very important machine that can produce electricity from sources at low and high temperatures. In this way, the heat energy produced in the FPSCs and VTSCs was transferred to the ORC by means of a pump and electricity was generated. The electricity produced in the ORC was transferred to an electrolysis system where hydrogen was produced by electrolysis of water. The thermodynamic analysis of the system was carried out by the Engineering Equation Analyzer (EES) simulation program. According to the results, with the increase of the solar energy and ambient temperature, the thermal efficiency of the system consisting of the FPSCs and VTSCs and thus the power production efficiency of ORC increased. Thanks to these increases, hydrogen production has also increased significantly. Thus, in July, the maximum thermal efficiency of VTSCs and FPSCs was found as 6.25% and 5.46%, respectively.

**Keywords:** Solar energy, Flat plate and vacuum tube solar collector, Organic Rankine cycle, Electricity and hydrogen production, Energy efficiency

## 1 Giriş

Son zamanlarda doğal enerji kaynaklarından faydalanma biçimi, kullanılabilir enerji kaynaklarının giderek azalması ve dünyada enerji politikalarındaki değişikliklerle birlikte çok farklı boyutlara ulaşmıştır. Endüstrileşme ve nüfus artışıyla gelen hızlı kentleşmenin getirdiği enerji kullanım artışı, insanlığı değişik enerji biçimlerini kullanmaya itmektedir. Güneş enerjisinin bir enerji kaynağı olarak sürekli ve çevre dostu olması, işletme yönünden masraflarının az olması ve uygulanabilirlik açısından hemen her yerde bulunabilmesi nedeniyle güneş enerjisi ile ilgili çalışmalar günümüz dünyasında giderek daha büyük önem arz etmektedir [1]. Güneş enerjisinden yararlanarak ısı enerjisi üreten sistemler güneş kolektörleridir. Güneş kolektörleri binaların sıcak su ihtiyacını karşılamak için güneş enerjisini doğrudan ısı

enerjisine dönüştüren teknolojileridir. Güneş radyasyonu kolektörün camından geçerek enerjisini kolektörün içindeki suya aktararak kolektörde başlangıçtaki sıcaklığına göre daha yüksek sıcaklıkta ısı enerjisi elde edilir. Böylece ısı enerjisi herhangi bir zamanda ihtiyaç duyulduğunda kullanılmak üzere bir tankta depolanır [2]. Güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştüren en önemli teknolojilerin başında düzlemsel ve vakum tüplü güneş kolektörleri gelmektedir. Her iki kolektör üzerine yapılan çalışmalar onların verimlerin yükseltmesi üzerine olmuştur. Örneğin düzlemsel güneş kolektörünün farklı soğurucu yüzey tabakasına sahip kolektörün performansları karşılaştırıldı [3]. Kolektörün soğurucu plakasının malzemesi, kalınlığı ve alanı gibi parametrelerin onun performansı üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Ayrıca yapıldığı malzemenin ısı geçirgenliğinin düşük olması onun performansını etkileyen etmenlerdendir [4]. Düzlemsel

kollektörün enerji veriminin yükselmesi onun daha yüksek sıcaklıklarda bir akışkan elde edilmesinin sağlar. Bu yüzden üretilen düzlem kollektörlerin enerji veriminin yükseltilmesi son derece önemlidir [5]. Güneş kollektörü teknolojilerinden bir diğeri de, iyi derece termal performansa sahip ve sıcak su üretimde avantajlı olan vakum tüplü güneş kollektörleridir [6]. Vakum tüplü güneş kollektörlerinin içine giren suyun sıcaklığını kısa sürede güneş enerjisini kullanarak yüksek sıcaklıkta çıkış suyu elde edebilen güneş kollektörüdür [7]. Vakum tüplü kollektörlerden elde edilen sıcak su birçok farklı amaçlar için kullanılabilir. Bunlardan biri depoladığı ısı enerjisinin normal bir ailenin ısınma ihtiyacının önemli bir kısmını karşılanabilir [8]. Her iki sistemde kollektörler tarafından güneş enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülmesi ile elektrik enerjisi üretilmesi çok önemlidir. Çünkü her iki sistemde en önemli bileşenlerden biri, elektrik enerjisi kullanılarak üretilen hidrojenidir. Güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisini kullanarak elektrik üretebilen makineler ORÇ'dir. Bu makineler düşük sıcaklıklarda elektrik üretebilen çok önemli bir teknolojidir. Böylece bu elektrik daha sonra kullanılmak üzere bir elektroliz sistemi ile hidrojene döndürülebilir [9].

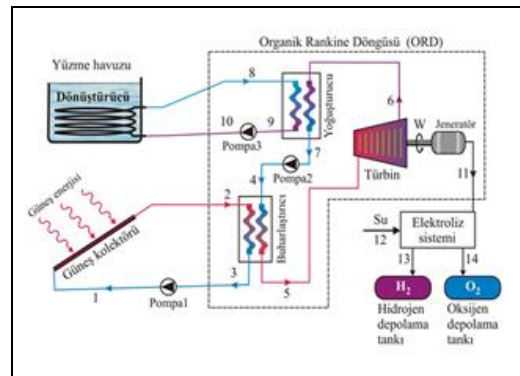
Şuana kadar düzlemsel ve vakum tüplü güneş kollektörlerinden yararlanarak hidrojen enerjisi üreten sistemler çok sınırlıdır. Yapılan çalışmalar sadece bir yaz günü için başka kaynaklarla bütünleşerek yapılan çalışmalardır. Örneğin bir güneş havuzu ve düzlemsel kollektörlerden oluşan bütünleşmiş bir sistemde bir gün için uygun sıcaklıkta ısı enerjisi elde edilir. Bu ısı dönüştürücüler aracılığıyla ORÇ'ye pompa tarafından gönderilmiştir. Bu sistemin ısı enerjisinden yararlanarak ORÇ'de yardımcıyla önemli elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu elektrik bir elektroliz sisteminde kullanılarak ciddi miktarda hidrojen enerji üretimi yapılmıştır [10]. Bununla birlikte güneş havuzu ve vakum tüplü kollektörlerden oluşan bütünleşmiş bir sistemin de elektrik ve hidrojen üretim performansı sadece bir gün için gene yaz ayında incelenmiştir. Sistemin çok iyi derecede elektrik ve hidrojen üretim performansına sahip olduğu bulunmuştur [11]. Özellikle güneş enerjisi ile üretilen enerji sınırlı zaman dilimi içerisinde üretilmektedir. Oysa hidrojen, herhangi bir sistemde üretilen fazla elektrik enerjisini depolama yaparak istenilen bir zamanda tekrar kullanıma sunabilmektedir [12]. Güneş enerjisi dünyada bol olduğundan ondan üretilen elektrik enerjisi hem temiz hem de hemen hemen her yerde bulunur. Dolayısıyla dünyada güneş enerjisinden yararlanarak fazla enerjiyi hidrojen enerjisine dönüştürmek ve depolanması son derece sürdürülebilir bir yöntemdir [13]. Farklı sistemleri birbiri ile bütünleştirerek hidrojen üretiminin artırılması mümkündür [14].

Bu çalışmada, DGK'lar ve VTGK'lar gibi güneş enerjisi teknolojilerinden yararlanarak oluşturulan iki sistemin ısı verimi, elektrik ve hidrojen üretim performansı araştırıldı. Her iki sistem Adana iklim koşullarında bir yıl boyunca performansları karşılaştırıldı. Şuana kadar yapılmış çalışmalarda, Adana için bir yıl boyunca DGK'lar ve VTGK'lar için elektrik ve hidrojen üretimi karşılaştırılması yapılmamıştır. Bu yüzden bu çalışmanın amacı bir yıl boyunca sistemlerin hidrojen ve elektrik üretim performanslarının aylara göre nasıl değiştiğini belirlenmesi üzerinedir. Bunun için sistemlerin ürettiği ısı enerjisi su yardımıyla, ORÇ'ye pompa tarafından gönderilmiştir. Böylece ORÇ'de hangi aylarda ne kadar elektrik üretimi yapıldığı bulundu. Üretilen bu elektrik elektroliz sistemine aktararak hidrojen üretilirdi. Tüm bu analizler termodinamik sistemlerde kabul görmüş Mühendislik Eşitlik Çözümleyici (EES) benzetim programında yapıldı. Sonuç

olarak, kesinlikle çevreye zarar vermeyen, temiz yenilebilir enerji kaynağından elektrik ve hidrojen üreten sistemler kuruldu.

## 2 Sistem açıklaması

Şekil 1'de, sistemin tüm bileşenleri görünmektedir. Bu sistemde en önemli bileşenlerinden birisi 10 m<sup>2</sup> alana sahip düzlemsel ve vakum tüplü güneş kollektörüdür. Çünkü, DGK'lara ve VTGK'lara gelen güneş enerjisinin önemli bir kısmını kendi içerisindeki suya aktarır ısı enerjisi elde etmektedir. Böylece suyun sıcaklığını düşük dereceden yüksek dereceye kısa zamanda ulaştırırlar. Şekil 1'de görüldüğü gibi sistem, güneş kollektörlerinden (düzlemsel ve vakum tüplü kollektörlerden), pompa, ORÇ ve elektroliz sisteminden oluşmaktadır. Bu sistemde pompa1 aracılığıyla ılık su kollektöre gönderilir. Bu su kollektörden güneş enerjisi yardımıyla ısınarak ORÇ'ye gönderilir. ORÇ'ye gelen sıcak suyun etkisinden yararlanan izobütan akışkanı pompa yardımıyla buharlaştırıcıya ısınarak türbine gönderilir. Böylece türbin dönerek elektrik üretmeye başlar. Bu çevrim böyle devam eder. Üretilen elektrik elektroliz sisteme aktararak hidrojen üretimi gerçekleşir. Sistemde hedeflenen ürünler ısı, elektrik ve hidrojenidir. İki sistemdeki tüm hesaplamalar Mühendislik Denklem Çözücü (EES) programı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de görülen sistemin çalışma prensibi şu şekildedir. Başlangıçta su, güneş enerjisini kullanarak yüksek sıcaklıktaki suya ulaşmak için düşük sıcaklıkta, 1 No.lu noktadan pompa1 aracılığıyla güneş kollektörüne girer. Kısa sürede sıcaklığını artıran su kollektörden çıkarak 2 No.lu noktadan buharlaştırıcıya girer. Buharlaştırıcı, pompa2 yardımıyla ORÇ içindeki izobütan akışkanının sıcaklığını artırarak 3 No.lu noktadan çıkmasını sağlar. Sıcak izobütan, 5 No.lu noktadan türbine enerjisinin büyük bir kısmını burada aktarır ve buhar izobütan enerjisinin büyük kısmını türbinde kinetik enerjiye dönüştürür. Böylece kinetik enerji, jeneratör yardımıyla elektriğe dönüştürülür. Bundan sonra, türbinden çıkan izobütan yoğunlaştırıcıya 6 No.lu noktadan girer ve yoğunlaşarak 7 No.lu noktadan dışarı çıkar. İzobütan pompa2 yardımıyla 4 No.lu noktadan tekrar buharlaştırıcıya geri döner. Böylece izobütan ORÇ içerisinde çevrim bu şekilde devam eder. Ayrıca yüzme havuzundan gelen su, yoğunlaştırıcıya 10 No.lu noktadan girer ve 8 No.lu noktadan biraz ısınarak yüzme havuzuna girer. Burada su enerjisinin bir kısmını yüzme havuzuna aktarır ve soğur. Böylece suyun çevrimi bu şekilde tamamlanır. Son olarak, su 12. noktadan elektroliz sistemine girer ve 11. noktadan gelen elektrik yardımıyla su elektrolizde bileşenlerine ayrılır. Böylece su, 13 ve 14 noktasından hidrojen ve oksijen olarak ayrılır. Buradan elde edilen hidrojen miktarı hesaplanır.



Şekil 1: Hidrojen üretim sistemi.

### 3 Sistemdeki bileşenlerin analizi

#### 3.1 Düzlemsel Güneş kolektör

Düzlemsel güneş kolektörü (DGK), güneş enerjisinin toplandığı ve herhangi bir akışkana ısı enerjisi olarak aktarıldığı çeşitli tür ve biçimlerdeki aygıtlardır. DGK, üstten alta doğru, camdan yapılan üst örtü, cam ile soğuran plaka arasında yeterince boşluk, kolektörün en önemli parçası olan siyah emici plaka, arka ve yan yalıtım ve yukarıdaki bölümleri içine alan bir kasadan oluşmuştur. Gelen güneş enerjisinin büyük bir kısmı emici tabaka tarafından soğurularak metal borular içindeki taşıyıcı akışkana aktarılır. Aktarılan enerji taşıyıcı sıvı tarafından kullanılmak veya depolanmak üzere taşınır. Düzlemsel kolektör tarafından üretilen yararlı enerji ( $\dot{Q}_Y$ ) aşağıdaki eşitlikle bulunur [15]:

$$\dot{Q}_Y = \eta_{DK} A_{DK} \dot{E} \quad (1)$$

Burada,  $\eta_{DK}$ , DGK'ların ısı verim,  $ADK=10 \text{ m}^2$  düzlem kolektörün toplam güneş enerjisi soğurma alanıdır. DGK'ların ısı verimi kolektöre giren ve çıkan suyun sıcaklığının yanında çevre sıcaklığı ve gelen güneş enerjisine bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilir [16]:

$$\eta_{DK} = 0.70 - 3.4 \frac{(T_m - T_0)}{\dot{E}} \quad (2)$$

Burada,  $T_m$ , DGK'ların ortalama sıcaklığıdır.  $\dot{E}$  Kolektörün yüzeyine anlık olarak gelen güneş enerjisidir.  $T_0$  Çevre sıcaklığıdır.  $T_m$ , kolektörün giriş ve çıkış sıcaklığına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$T_m = \frac{T_{g,VTG} + T_{c,VTG}}{2} \quad (3)$$

Burada,  $T_{g,DK}$ , DGK'lardan oluşan sisteme giren suyun sıcaklığı ve  $T_{c,DK}$ , sistemden çıkan suyun sıcaklığıdır.

Yararlı enerji aynı zamanda DGK'lara giren ve çıkan suyun sıcaklığına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{Q}_Y = \dot{m}_s C_s (T_{g,DK} - T_{c,DK}) \quad (4)$$

Burada,  $\dot{m}_s$  suyun anlık olarak kütle dönüş hızı ve  $C_s$  suyun öz ısısıdır.

#### 3.2 Vakum tüplü Güneş kolektör

Vakum tüplü güneş kolektörü (VTGK), yüksek ışık geçirgenliğine sahip silindirik cam tüplerden oluşur. Cam tüpe bulunan iç borunun yüzeyi iyi ışık soğurucu bir malzeme ile kaplanmıştır. Su doğal yolla borularda dolaşımı gerçekleşir. Depo tankından gelen su tarafından soğurulan güneş radyasyonunu ısı enerjisine dönüştürülür ve daha sonra sıcak su tankına ısıtılmış su olarak yükselir [17]. Bu yolla üretilen sıcak su istenilen herhangi bir zamanda kullanılır. Vakum tüplü kolektör tarafından üretilen yararlı enerji ( $\dot{Q}_Y$ ) aşağıdaki gibi elde edilir [15]:

$$\dot{Q}_Y = \eta_{VTG} A_{VTG} \dot{E} \quad (5)$$

Vakum tüplü kolektörünün ısı veriminin gelen güneş enerjisine, giren ve çıkan suyun sıcaklığına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [16].

$$\eta_{VTG} = 0.84 - \frac{2.02(T_m - T_0)}{\dot{E}} - 0.0046 \dot{E} \left[ \frac{(T_m - T_0)}{\dot{E}} \right]^2 \quad (6)$$

Burada,  $\eta_{VTG}$ , VTGK' nün ısı verimi,  $A_{VTG}=10 \text{ m}^2$  vakum tüplü kolektörlerin toplam güneş enerjisi soğurma alanıdır ve  $T_m$ , VTGK'nın ortalama sıcaklığıdır ve aşağıdaki gibi verilir:

$$T_m = \frac{T_{g,VTG} + T_{c,VTG}}{2} \quad (7)$$

Burada  $T_{g,VTG}$ , VTGK' ya giren suyun sıcaklığı ve  $T_{c,VTG}$ , VTGK'dan çıkan suyun sıcaklığıdır. Burada da yararlı enerjinin VTGK 'ya giren ve çıkan suyun sıcaklığına bağlı olarak ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{Q}_Y = \dot{m}_s C_p (T_{g,VTG} - T_{c,VTG}) \quad (8)$$

#### 3.3 Organik Rankine çevrimi

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), kendi içinde yüksek basınçta akışkanın buharlaşmasını sağlar ve bu akışkan ORÇ'de daha düşük bir basınçta kadar genişleyerek mekanik bir iş çıkarır. Çevrim, düşük basınçlı buharın yoğunlaştırılması ve onun tekrardan buharlaştırıcıya sokarak sona erir. Bu nedenle, ORÇ klasik bir buhar santrali ile aynı parçalardan kazan, genişleme cihazı üreten bir iş, bir kondansatör ve bir pompa gibi bileşenleri içerir [18]. Düşük dereceli ısı kaynağı kullanarak gelecek için ümit vaat eden bir enerji dönüştürme teknolojisi olan ORÇ, endüstriyel atık ısı, güneş enerjisi, jeotermal enerji gibi düşük dereceli ısı kaynağından yararlanmaktadır. Son derece yararlı avantajlar sağlaması nedeniyle son yıllarda büyük bir araştırmanın odak noktası olmuştur. Birçok araştırmacı, ORÇ'nin termodinamik analizini ve performansının iyileştirilmesini sağlanmasını için çalışmalar yapmıştır [19]. ORÇ' den elde edilen net güç aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_T - (\dot{W}_{pompa1} + \dot{W}_{pompa2} + \dot{W}_{pompa3}) \quad (9)$$

Burada  $\dot{W}_T$  türbin jeneratör gücü,  $\dot{W}_{pompa1}$ ,  $\dot{W}_{pompa2}$  ve  $\dot{W}_{pompa3}$  pompalama güçleridir.

$$\dot{W}_T = \eta_T \eta_G \dot{m}_6 (h_5 - h_6) \quad (10)$$

$$\dot{W}_{pompa1} = \dot{m}_1 (h_1 - h_3) \quad (11)$$

$$\dot{W}_{pompa2} = \dot{m}_4 (h_4 - h_7) \quad (12)$$

$$\dot{W}_{pompa3} = \dot{m}_{10} (h_{10} - h_9) \quad (13)$$

Burada,  $\eta_T$ ,  $\eta_G$ ,  $\dot{m}_1$ ,  $\dot{m}_4$ ,  $\dot{m}_6$ ,  $\dot{m}_{10}$ ,  $h_1$ ,  $h_3$ ,  $h_4$ ,  $h_6$ ,  $h_7$ ,  $h_9$  ve  $h_{10}$  sırasıyla, türbin izentropik verimliliği, jeneratörün mekanik verimidir.  $\dot{m}$  ifadesi 1, 4, 6 ve 10 noktalarındaki akışkanın kütle akış hızı,  $h$  ifadesi 1, 3, 4, 6, 7, 9 ve 10 noktalarının entalpisidir. ORÇ'nin enerji verimi ürettiği net elektrik ile buharlaştırıcıdan çıkan ısıya oranı olarak elde edilir [20].

$$\eta_{ORC} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{bh}} \quad (14)$$

Burada,  $\dot{Q}_{bh}$  buharlaştırıcıdan ORÇ' ye giren ısı miktarıdır.

$$\dot{Q}_{bh} = \dot{m}_5 (h_4 - h_5) \quad (15)$$

Burada,  $\dot{m}_5$ ,  $h_6$  ve  $h_5$  5 No.lu noktadaki çalışılan akışkanın kütle akış hızı, 5 ve 6 noktalarının entalpisidir. ORÇ'deki en önemli bileşenlerden biri buharlaştırıcıdır ve enerji verimi aşağıdaki gibi verilir.

$$\eta_{bh} = \frac{\dot{Q}_{bh}}{\dot{Q}_{Kol,bh}} \quad (16)$$

Burada,  $\dot{Q}_{Kol,bh}$  kolektörlerin buharlaştırıcıya aktardığı ısı enerjisidir ve aşağıdaki elde edilir.

$$\dot{Q}_{Kol,bh} = \dot{m}_2(h_2 - h_3) \quad (17)$$

Burada,  $\dot{m}_2$ ,  $h_2$  ve  $h_3$  2 No.lu noktadaki akışkanın kütle akış hızı, 2 ve 3 No.lu noktadaki entalpisidir.

ORÇ'deki bir diğer önemli bileşenlerden biri yoğunlaştırıcıdır ve enerji verimi aşağıdaki gibi verilir.

$$\eta_{yğ} = \frac{\dot{Q}_{yğ}}{\dot{Q}_{T,yğ}} \quad (18)$$

Burada,  $\dot{Q}_{T,yğ}$ , türbinden yoğunlaştırıcıya aktarılan ısı enerjisidir.  $\dot{Q}_{yğ}$ , yoğunlaştırıcıya giren akışkanın kazandığı ısıdır ve her iki ifade aşağıdaki elde edilir.

$$\dot{Q}_{T,yğ} = \dot{m}_6(h_6 - h_7) \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{yğ} = \dot{m}_{10}(h_8 - h_{10}) \quad (20)$$

Burada,  $\dot{m}_6$ ,  $h_6$  ve  $h_7$  6 No.lu noktadaki akışkanın kütle akış hızı, entalpisidir ve 7 No.lu noktadaki entalpidir. Diğer değişkenler  $\dot{m}_{10}$ ,  $h_{10}$  ve  $h_8$  ise 10 No.lu noktadaki akışkanın kütle akış hızı, entalpisidir ve 8 No.lu noktadaki entalpisidir.

### 3.4 Tüm sistemin enerji analizi

Her iki sistemin ısı verimini hesaplamak ve karşılaştırmak termodinamik açıdan son derece önemli bir bilgidir. Çünkü sistemlerin enerji verimini karşılaştırması termodinamik açıdan bir değerlendirme yapmamıza katkı sağlar [21]. Bu amaçla, bir sistemin performansını enerjilik açıdan iyi daha anlamak için, ısı veriminin belirlenmesi gereklidir. Sistemi kapalı bir çevrim olarak düşünürsek sistem için enerji verimi pompalardan kullandığı elektrikten bağımsız olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\eta_{sistem} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_Y} \quad (21)$$

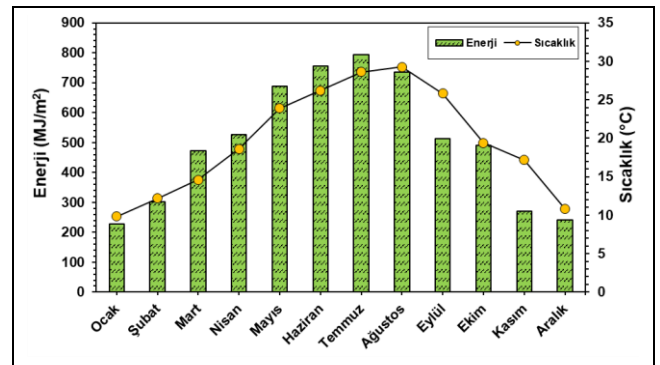
Tablo 1'de, her iki sistemde kullanılan bazı akışkanların sıcaklıkları, basıncı ve kütle akış hızı parametresi verilmiştir. Bu değerler termodinamik hesaplamaları yapmak için EES programı kullanılmıştır. Sistemdeki parametrelerden 1, 3, 4, 6, 7, 8, 9 ve 10 bütün bir yıl boyunca sabit tutuldu. Burada 1 numaralı akışkan kolektörün giriş suyu sıcaklığıdır. Yıl boyunca bu sıcaklık sabit alınarak kolektörlerinin verimini etkilememesi amaçlandı. Denklem 2 ve 6'ya bakıldığında eğer bu sıcaklık sabit tutulmazsa kolektörün verimini aylara göre kıyaslanması zordur. Bu yüzden bu çalışmada kolektörün giriş sıcaklığı 31 °C alındı. Bununla birlikte, sistemdeki diğer 0, 2 ve 5 parametreleri ise çevre sıcaklığı, gelen güneş enerjisine ve buharlaştırıcının verimine göre değiştiği için onlar sabit tutulmamıştır. Yıl boyunca değişimleri grafiğe aktarılmıştır.

Tablo 1: Her iki sistem için önemli parametreler.

No	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basıncı (kPa)	Kütle akış hızı (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)
1	H <sub>2</sub> O	31	200	0.015	130
3	H <sub>2</sub> O	30	200	0.015	125.8
4	İzobütan	30	2000	0.00375	272.6
6	İzobütan	35	1750	0.00375	284.9
7	İzobütan	29	1750	0.00375	270
8	H <sub>2</sub> O	30	200	0.00015	125.8
9	H <sub>2</sub> O	25	200	0.00015	104.9
10	H <sub>2</sub> O	26	200	0.00015	109.1

## 4 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada, vakum tüplü ve düzlemsel güneş kolektörlerinin çalışmasıyla hidrojen üreten iki farklı sistem kurulmuştur. Bu sistemlerde düşük sıcaklıktaki suyun güneş enerjisi aracılığıyla sıcaklığı artırıldıktan sonra sistemlerin termodinamik analizleri yapılmaktadır. Bunun için kurulacak sistemin güneş enerjisiyle çalıştığından öncelikle yatay yüzeyine gelen güneş enerjisi ve her ayın ortalama sıcaklığı bilinmelidir. Böylece her ay için iki sistemin ürettiği ısı enerjisinin değişiminin bu iki parametreden nasıl etkilendiği bulunabilir. Şekil 2'de bir yıl boyunca her ay için toplam yatay yüzeye gelen güneş enerjisi ve sıcaklık verilmiştir. Bu veriler Adana Meteoroloji İstasyonundan elde edilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi, Adana için yatay yüzeye gelen güneş enerjisi en fazla Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında olup sırasıyla 756 MJ/m<sup>2</sup>, 792 MJ/m<sup>2</sup> ve 735 MJ/m<sup>2</sup>'dir. Gelen enerjisi en az olduğu aylar ise Kasım, Aralık ve Ocak ayları olup sırasıyla 269 MJ/m<sup>2</sup>, 240 MJ/m<sup>2</sup> ve 226 MJ/m<sup>2</sup>'dir. Çevrenin ortalama sıcaklığının en az olduğu aylar Ocak, Şubat ve Aralık olup sırasıyla 9.83 °C, 12.2 °C ve 10.8 °C'dir. Fakat yaz aylarında güneş enerjisinin artmasıyla ortalama çevre sıcaklığı da artmaktadır. Çevrenin ortalama sıcaklığının en fazla olduğu aylar Haziran, Temmuz ve Ağustos olup sırasıyla 26.22 °C, 28.62 °C ve 29.29 °C'dir. Gelen güneş enerjisi ve ortalama çevre sıcaklığı kışın ciddi miktarda düşerken, yaz aylarında ise, oldukça yüksek seviyelere ulaşmıştır. Bu durum sistem üzerinde etkisi olacaktır.



Şekil 2: Adana için aylara göre güneş enerjisi ve ortalama sıcaklık değişimi.

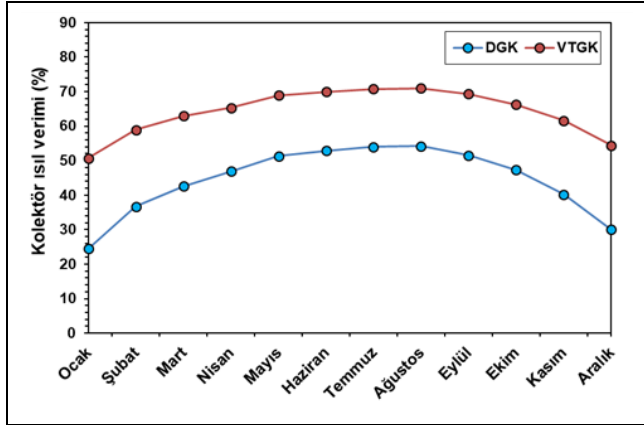
Bu iki sistemin termodinamik analizi her ay için günlük güneşlenme saatine bağlı olarak gelen güneş enerjisine göre yapılmıştır.

Bu yüzden Tablo 2’de her ay için gün sayısı, güneşlenme saati, gelen güneş enerjisi ve güneş kolektörü yüzeyine gelen güneş enerjisi verilmiştir.

Tablo 2: Sisteme gelen ortalama güneş enerjisi.

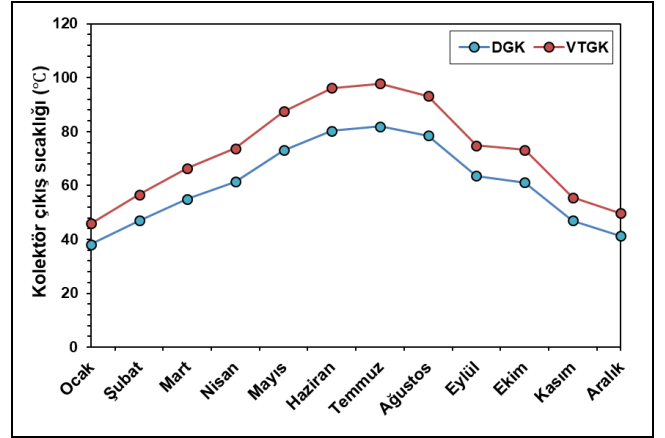
Aylar	Gün Sayısı	Güneşlenme Saati	Ortalama Güneş Enerji (W)	Kolektöre Gelen Güneş Enerji (W)
Ocak	31	11	184	1840
Şubat	28	11	273	2730
Mart	31	12	352	3520
Nisan	30	12	406	4060
Mayıs	31	12	513	5130
Haziran	30	12	583	5830
Temmuz	31	12	591	5910
Ağustos	31	12	549	5490
Eylül	30	12	396	3960
Ekim	31	11	399	3990
Kasım	30	10	249	2490
Aralık	31	10	215	2150

Güneş kolektörlerinin enerji verimleri her ay değişmektedir. Bu değişimin sebebi ise, sistemin içinde bulunduğu çevre sıcaklığı ve yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Şekil 3’te her ay için hem DGK’nın hem de VTGK’nın enerji verimleri verilmektedir. DGK’nın ısı verimi en düşük %24.43 ile Ocak ayı iken ısı verimi en yüksek %53.99 ile Temmuz ayıdır. VTGK’nın ısı verimi en düşük %50.66 ile Ocak ayı iken ısı verimi en yüksek %71.03 ile Ağustos ayıdır. Her iki güneş kolektörünün ısı verimi çevre sıcaklığından ve yüzeyine gelen güneş enerjisinden çok etkilenmiştir. Hem çevre sıcaklığı hem de gelen güneş enerjisi arttıkça kolektörlerin ısı verimi artmıştır. Ters durumda ise kolektörlerin ısı verimi azalmıştır. VTGK’nın ısı verimini DGK’ya göre her ay daha yüksek olduğu bulundu.



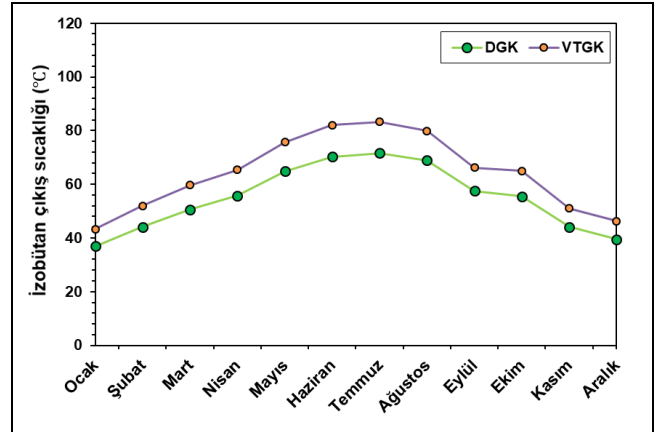
Şekil 3: Kolektörlerin aylara göre ortalama ısı verimi.

Her iki sistemde kolektörlerin çıkış sıcaklığı, kolektörlerin bulunduğu koşullara ve enerji verimlerine göre her ay farklı sıcaklıkta çıkmıştır. Şekil 4’te her ay için hem DGK’nın hem de VTGK’nın çalıştığı sistemde kolektörlerin ortalama çıkış sıcaklığı verilmektedir. DGK’nın olduğu sistemde çıkış sıcaklığı en düşük 38.2 °C ile Ocak ayında iken en yüksek sıcaklığı ise 81.97 °C ile Temmuz ayıdır. VTGK’nın olduğu sistemde çıkış sıcaklığı en düşük 45.93 °C ile Ocak ayında iken en yüksek sıcaklığı ise 97.83 °C ile Temmuz ayıdır. VTGK’nın olduğu sistemin DGK’nın olduğu sisteme göre daha fazla yükseklikte çıkış suyu ürettiği bulundu.



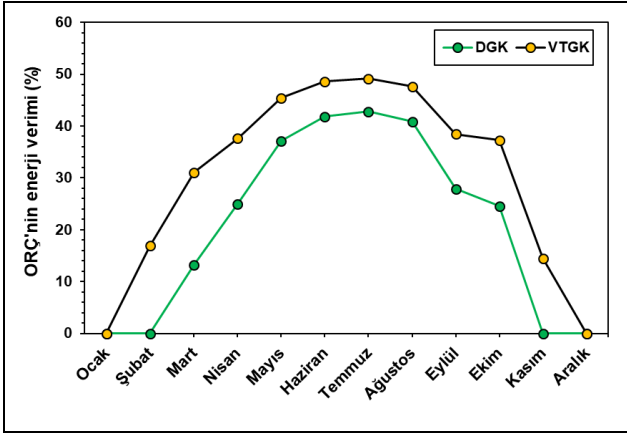
Şekil 4: Kolektörlerin aylara göre ortalama çıkış sıcaklığı.

Her iki sistemde izobütanın buharlaştırıcıdan çıkış sıcaklığı kolektörlerden gelen sıcak suyun sıcaklığına ve bulunduğu çevre koşullarına göre her ay farklı sıcaklıkta çıkmıştır. İzobütan ORÇ’de elektrik üreten akışkan olduğundan onun sıcaklığının bilinmesi sistemi anlamak için önemlidir. Şekil 5’te her ay için hem DGK’nın hem de VTGK’nın çalıştığı sistemde izobütanın buharlaştırıcıdan ortalama çıkış sıcaklığı verilmektedir. DGK’nın olduğu sistemde izobütan çıkış sıcaklığı en düşük 36.9 °C ile Ocak ayında iken, en yüksek sıcaklığı ise 71.59 °C ile Temmuz ayıdır. VTGK’nın olduğu sistemde izobütan çıkış sıcaklığı en düşük 43.29 °C ile Ocak ayında iken en yüksek sıcaklığı ise 83.24 °C ile Temmuz ayıdır. VTGK’nın olduğu sistemin DGK’nın olduğu sisteme göre daha fazla yükseklikte izobütan çıkış sıcaklığı ürettiği bulunmuştur. Bu durum ORÇ’nin daha fazla elektrik üretmesini sağlayacaktır.



Şekil 5: İzobütanın aylara göre buharlaştırıcıdan çıkış sıcaklığı.

Her iki sistemde, ORÇ’nin enerji verimi tıpkı kolektörlerin ısı verimi gibi her ay değişmiştir. Çünkü ORÇ’de pompa aracılığıyla gelen suyun sıcaklığı her ay değişmiştir. Üretilen suyun sıcaklığı da çevre sıcaklığı ve kolektör yüzeyine gelen güneş enerjisine bağlıdır. Şekil 6’da her ay için hem DGK’nın hem de VTGK’nın çalıştığı sistemde ORÇ’nin enerji verimi verilmektedir. DGK’nın olduğu sistemde ORÇ’nin enerji verimi en düşük %0 ile Ocak, Şubat, Kasım ve Aralık aylarında iken enerji verimi en yüksek %42.78 ile Temmuz ayıdır. VTGK’nın olduğu sistemde ORÇ’nin enerji verimi en düşük %0 ile Ocak ve Aralık aylarında iken enerji verimi en yüksek %49.17 ile Temmuz ayıdır.

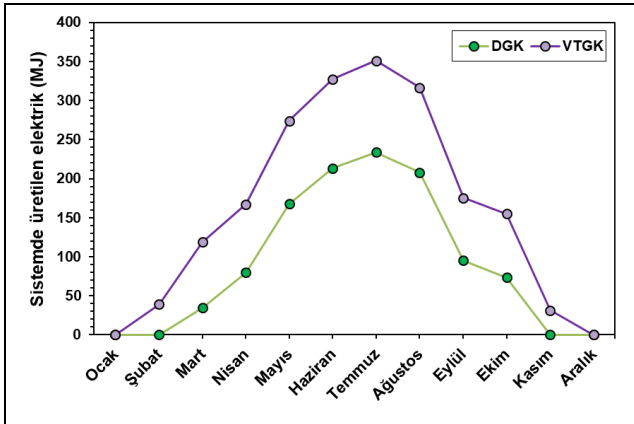


Şekil 6: ORÇ'nin aylara göre enerji verimi.

ORÇ'nin enerji veriminin kış aylarında sıfıra kadar düştüğü ancak yaz aylarında enerji verimi çok daha yüksek değerlere çıkmıştır. VTGK'nın olduğu sistemin DKG'nin olduğu sisteme göre ORÇ'nin performansının daha yüksek olduğu bulundu.

Her iki sistemde üretilen net elektrik her ay için değişen değerlerde elde edildi. Çünkü ORÇ' de pompa aracılığıyla içinde dönen izobütan ve çevre sıcaklığı her ay değişmiştir.

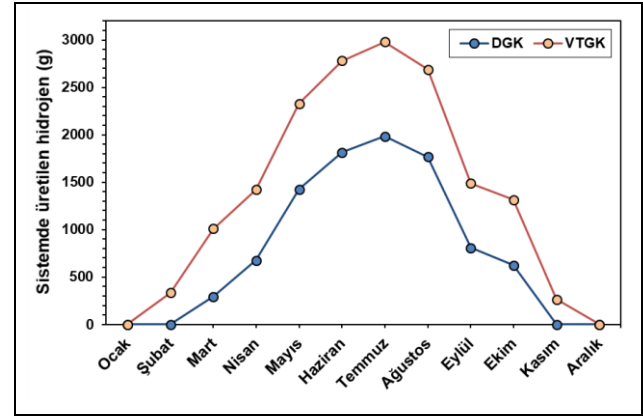
Şekil 7'de her ay için hem DKG'nın hem de VTGK'nın çalıştığı sistemde ORÇ'nin ürettiği toplam aylık net elektrik verilmektedir. DKG'nın olduğu sistemde üretilen toplam elektrik enerjisi en düşük 0 MJ ile Ocak, Şubat, Kasım ve Aralık aylarında iken üretilen toplam net elektrik enerjisi en yüksek 233.6 MJ ile Temmuz ayıdır. VTGK'nın olduğu sistemde üretilen elektrik enerjisi en düşük 0 MJ ile Ocak ve Aralık aylarında iken üretilen elektrik enerjisi en yüksek 350.8 MJ ile Temmuz ayıdır. Her iki sistemin kış aylarında elektrik üretimi sıfıra kadar düştüğü ancak yaz aylarında üretilen elektrik çok daha yüksek seviyelere ulaştığı görüldü. VTGK'nın olduğu sistemin DKG'nın olduğu sisteme göre çok daha iyi elektrik ürettiği bulundu. Bu durum sistemde daha fazla hidrojen üretimini sağlayacaktır.



Şekil 7: Sistemde aylara göre üretilen elektrik.

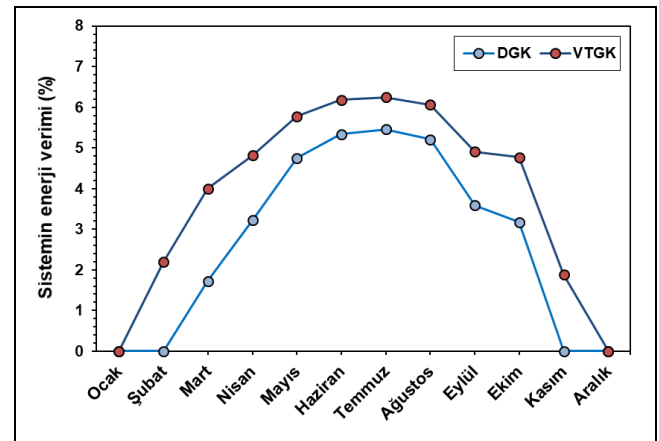
Hidrojen her iki sistemin ürettiği elektrik enerjisinin depolanmasında kullanılan son üründür. Her iki sistemde üretilen hidrojen her ay için değişen değerlerde elde edilmiştir. Çünkü ORÇ'den elektroliz sisteme aktarılan elektrik enerjisi hemen hemen her ay farklı değerlerde üretilmiştir. Şekil 8'de her ay için hem DKG'nın hem de VTGK'nın çalıştığı sistemde elektroliz sistemin ürettiği toplam hidrojen gram (g) olarak verilmektedir. DKG'nın olduğu sistemde üretilen toplam hidrojen en düşük 0 g ile Ocak, Şubat, Kasım ve Aralık aylarında

iken üretilen toplam hidrojen en yüksek 1985 g ile Temmuz ayıdır. Üretilen bu hidrojen 233.63 MJ ısı enerjiye denk gelmektedir. VTGK'nın olduğu sistemde üretilen toplam hidrojen en düşük 0 gram ile Ocak ve Aralık aylarında iken üretilen toplam hidrojen en yüksek 2980 g ile Temmuz ayıdır. Burada üretilen hidrojen ise 350.74 MJ ısı enerjiye denk gelmektedir. Elde edilen bu hidrojen günümüzde yakıt pili olarak kullanılabilir [22]. Böylece herhangi bir arabanın yakıtının bu sistemden karşılanması sağlanabilir. Görüldüğü gibi her iki sisteminin hidrojen üretiminin kış aylarında ciddi miktarda düşerek sıfır gramı bulduğu görülmüştür. Ancak yaz aylarında üretilen toplam hidrojen çok daha yüksek değerlere ulaştığı bulunmuştur. VTGK'nın olduğu sistemin, DKG'nın bulunduğu sisteme göre çok daha iyi hidrojen üretilebileceği belirlenmiştir. Sistemin toplam enerji verimi, sistem hakkında termodinamik açıdan genel bir değerlendirme fikri verir. Eğer bu sistemleri kapalı bir sistem olarak düşünürsek, çıkış enerjisi olan net elektriğin kolektöre giren güneş enerjisine oranından enerji verimi hesaplanabilir.



Şekil 8: Sistemde aylara göre üretilen toplam hidrojen.

Şekil 9'da her ay için hem DKG'nın hem de VTGK'nın çalıştığı sistemde, sistemin ısı verimi verilmiştir. DKG'nın olduğu sistemde ısı verimi en düşük %0 ile Ocak, Şubat, Kasım ve Aralık aylarında iken en yüksek ısı verimi %5.46 ile Temmuz ayıdır. VTGK'nın olduğu sistemde ısı verimi en düşük %0 ile Ocak ve Aralık aylarında iken, en yüksek ısı verimi %6.25 ile Temmuz ayıdır. Her iki sisteminin ısı verimi kış aylarında ciddi miktarda düşmüştür. Ancak yaz aylarında sistemlerin ısı verimi daha yüksek değerlere ulaştığı bulunmuştur. VTGK'nın olduğu sistemin ısı veriminin DKG'nın olduğu sisteme göre, çok daha iyi ısı verimine sahip olduğu bulunmuştur.



Şekil 9: Sistemin aylara göre enerji verimi.

## 5 Sonuçlar

Bu çalışmada, 10 m<sup>2</sup> kolektör yüzey alanına sahip vakum tüplü ve düzlemsel güneş kolektörleri, Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ve elektroliz sistemi ile birbirine bütünleşmiş bir sisteminin modeli başarılı bir şekilde analiz edilmiştir. Sistemin analizi için EES benzetim programı başarılı bir şekilde çalıştırılmıştır. Her iki sistem bir yıl boyunca Adana çevre koşullarına göre incelenmiştir. Güneş kolektörlerinin yüzeylerine gelen güneş enerjisi, içlerinde bulunan suya aktararak ısıya dönüştürülmüştür. Kolektörde üretilen ısı enerjisi pompa yardımıyla ORÇ'ye gönderilerek sistemin elektrik üretilmesi yapıldı. VTGK'ların maksimum ısıl verimi Temmuz ayında %6.25 ve DGK'lar için ise %5.46 olarak bulunmuştur.

DGK'nın içinde bulunduğu sistemde 4 ay elektrik üretimi yapılmazken, VTGK'nın içinde bulunduğu sistemde ise, 2 ay elektrik üretimi yapılmamıştır. Sistemde, güneşin azaldığı aylarda elektrik üretimi sıfır olarak ölçülmüştür. Fakat güneşin ve çevre sıcaklığının arttığı aylarda her iki sistemin ciddi miktarda elektrik üretimi gerçekleştirdiği görülmüştür. Bu sistemlerin elektrik üretimi yapmadığı aylarda ürettiği sıcak su binaların sıcak su ve ısıtmasında verimli olarak kullanılabilir. Eğer tüm sistemin bütün yıl boyunca elektrik üretilmesi isteniyorsa kolektör alanı daha fazla büyütülerek elektrik üretilir. Sonuç olarak, elektriğin üretildiği her ayda elektroliz sistemine aktararak hidrojen üretilmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Vakum tüplü güneş kolektörlerinin bulunduğu sistemin incelenen tüm performanslarda düzlemsel güneş kolektörlerine göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Her iki sistemde bir yıl boyunca ciddi miktarda hem elektrik hem de hidrojen üretiltiği görülmüştür. Ayrıca iki sistemin değişen çevre koşullarında başarılı bir üretim performansının analizi yapılmıştır. Güneş enerjisi ile çalışan düşük sıcaklıkta termal enerji üreten bu sistemler sayesinde, güneş enerjisi ile hidrojen üretilerek başarılı bir şekilde depolanabilir bir enerji hidrojen kaynağına dönüştürülebilir. Benzer şekilde hidrojen yakıt pili ile yeniden elektriğe, ısı ve ışığa rahatlıkla dönüştürülebilir. Böylece, böyle sistemler yenilenebilir enerji kaynağı ile çalıştığından, zararlı atık üretmezler, çevreye zarar vermezler ve doğa için faydalı sistemlerdir. Bu sistemlerin verimleri artırılıp çoğaltıldıkça dünyanın daha uzun süre yaşanabilir bir yer olması sağlanacaktır. Bu tarz çalışmalar artırılarak geleceğin enerjilerinden biri olan hidrojen üretiminin çeşitlendirilmesi daha fazla yapılması sağlanacaktır.

## 6 Kaynaklar

- [1] Yavuz A, Başol D, Ertay MM, Yücedağ İ. "An education set for solar cell models". *Journal of Advanced Technology Sciences*, 2(2), 14-21, 2013.
- [2] Kalogirou SA. "Solar thermal collectors and applications". *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231-295, 2004.)Bahadır M, Özdemir M, Yatarkalkmaz M, Dağlı G. "Farklı soğurucu yüzey tiplerine sahip düzlemsel kolektörlerin deneysel analizi". *Politeknik Dergisi*, 20(2), 441-449, 2017.
- [3] Jafarkazemi F, Ahmadifard E. "Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors". *Renewable Energy*, 56, 55-63, 2013.
- [4] Ziyadanogullari NB, Yuçel HL, Yıldız C. "Thermal performance enhancement of flat-plate solar collectors by means of three different nanofluids". *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, 55-65, 2018.
- [5] Chow TT, Dong Z, Chan LS, Fong KF, Bai Y. "Performance evaluation of evacuated tube solar domestic hot water systems in Hong Kong". *Energy and Buildings*, 43(12), 3467-3474, 2011.
- [6] Martínez-Rodríguez G, Fuentes-Silva AL, Picon-Núñez M. "Solar thermal networks operating with evacuated-tube collectors". *Energy*, 146, 26-33, 2018.
- [7] Kroll JA, Ziegler F. "The use of ground heat storages and evacuated tube solar collectors for meeting the annual heating demand of family-sized houses". *Solar Energy*, 85(11), 2611-2621, 2011.
- [8] Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, Fischer J. "Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles". *Energy*, 32(7), 1210-1221, 2007.
- [9] Erden M, Karakilcik M, Dincer I. "Performance investigation of hydrogen production by the flat-plate collectors assisted by a solar pond". *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2522-2529, 2017.
- [10] Atiz A, Karakilcik H, Erden M, Karakilcik M. "Assessment of electricity and hydrogen production performance of evacuated tube solar collectors". *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(27), 14137-14144, 2018.
- [11] Yüksel YE, Öztürk M. "Evsel uygulamalar için birleşik rüzgar-güneş-hidrojen sisteminin termodinamik analizi". *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(3), 401-416, 2016.
- [12] Yüksel YE, Öztürk M. "Thermodynamic analysis of an integrated solar-based chemical reactor system for hydrogen production". *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 2(2), 19-27, 2015.
- [13] Karakilcik H, Erden M, Karakilcik M. "Investigation of hydrogen production performance of chlor-alkali cell integrated into a power generation system based on geothermal resources". *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(27), 14145-14150, 2018.
- [14] Duffie JA, Beckman WA. *Solar Engineering of Thermal Process*. 2<sup>nd</sup> Ed. New York, USA, Wiley Interscience, 1991.
- [15] Ucar A, Inalli M. "Thermal and economic comparisons of solar heating systems with seasonal storage used in building heating". *Renewable Energy*, 33(12), 2532-2539, 2008.
- [16] Budihardjo I, Morrison GL. "Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters". *Solar Energy*, 83(1), 49-56, 2009.
- [17] Quoilin S, Broek MVD, Declaye S, Dewallef P, Lemort V. "Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 168-186, 2013.
- [18] Wang J, Yan Z, Wang M, Ma S, Dai Y. "Thermodynamic analysis and optimization of an (organic Rankine cycle) ORC using low grade heat source". *Energy*, 49, 356-365, 2013.
- [19] Long R, Bao YJ, Huang XM, Liu W. "Exergy analysis and working fluid selection of organic Rankine cycle for low grade waste heat recovery". *Energy*, 73, 475-483, 2014.
- [20] Kızılkınan Ö, Akbaş Ç. "Güneş enerjisi destekli çok fonksiyonlu trijenerasyon sisteminin termodinamik analizi". *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 22(1), 71-77, 2016.
- [21] Şenaktaş B. Hidrojen Enerjisi Üretimi ve Uygulamaları. Pamukkale Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, Türkiye, 2005.