

Parabolik güneş kolektörlü organik rankine çevriminin enerji ve ekserji analizi

Energy and exergy analysis of organic rankine cycle with parabolic solar collectors

Serpil ÇELİK^{1*}, Ahmet KABUL²

^{1,2}Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
serpilcelik@sdu.edu.tr, ahmetkabal@sdu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 29.06.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 26.11.2018

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.70707

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Günümüzde hızlı nüfus artışı ve sanayileşme ile birlikte enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Bu enerji ihtiyacının büyük kısmı petrol ve kömür gibi fosil kaynaklardan karşılanmaktadır. Hem artan enerji ihtiyacını karşılamak hem de fosil kaynakların zararlarını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi gelecek için en önemli alternatif enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Bu çalışmada, Isparta ilinde kurulması düşünülen parabolik güneş kolektörlü Organik Rankine Çevriminin (ORC) modellenmesi ve sistemin termodinamik analizi yapılmıştır. Kojenerasyon sisteminin birinci ve ikinci yasa analizleri yapılarak enerji ve ekserji verimleri hesaplanmıştır. Parabolik güneş kolektörleri yardımıyla toplanan ısı, ORC sisteminde mekanik güce dönüştürülerek evin elektrik ihtiyacı karşılanmıştır. Daha sonra sisteminin kondenser kısmından atılan ısı ise evin ısıtma ihtiyacını karşılamak için kullanılmıştır. Böylece fosil kaynakların çevreye verdiği zarar önlenmiş olacaktır ve yakıt tasarrufu sağlanacaktır.

Anahtar kelimeler: Parabolik kolektör, Organik rankine çevrim, Isıtma, Enerji, Ekserji

Abstract

With today's rapid population growth and industrialization, energy needs are increasing day by day. Much of this energy needs come from fossil sources such as oil and coal. There is increasing interest in renewable energy sources in order to meet both the increasing energy demand and the fossil resources. Solar energy from renewable energy sources is one of the most important alternative energy sources for the future. In this study, the model of Organic Rankine Cycle (ORC) with parabolic solar collector assumed to be established in Isparta province and the thermodynamic analysis of the system are done. First and second law analyzes of the cogeneration system were performed and energy and exergy yields were calculated. The electricity needs of the house were met by converting to ORC with mechanical collecting using parabolic solar collectors. Then the driver includes the heating requirement of the house for the discharge of the condenser from the container. Thus, damage caused by fossil resources will be prevented and fuel saving will be ensured.

Keywords: Parabolic collector, Organic rankine cycle, Heating, Energy, Exergy

1 Giriş

Günümüzde enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Artan bu enerji ihtiyacını karşılamak için yenilenebilir ve fosil enerji kaynakları kullanılmaktadır. Fosil enerji kaynaklarından olan kömür, petrol gibi kaynakların sınırlı olmaları, çevreye zarar vermeleri ve hava kirliliğine neden olmalarından dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bununla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının temiz, sürekli ve düşük maliyetli olması, diplomatik ilişkiler gerektirmemesi kullanımını daha cazip kılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi, gelecek için en önemli enerji kaynaklarının arasında yer almaktadır. Çünkü petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil kaynaklardan yenilenebilir enerji kaynaklarına kadar olan bütün enerji kaynağının temeli güneş enerjisine dayanmaktadır. Güneş enerjisinin kullanımı teknolojinin gelişmesiyle gerek dünyada ve gerekse ülkemizde her geçen gün artış göstermektedir. Güneş enerjisi yaygın olarak ısı üretilmesinde kullanılırken özellikle ülkemizde son yıllarda yapılan teşviklerle ısı üretimi kullanımının yanında güç üretimi de hızla artış göstermektedir [1]. Güneş enerjisinden güç üretimi iki yolla gerçekleşmektedir. Bunlar güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemler ile güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisiyle güç üreten ısı sistemleridir. Güneş

enerjisinden ısı sistemler ile güç üretmek için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan parabolik güneş kolektörlerinde çizgisel yoğunlaştırma yapılarak, güneş enerjisinden yüksek sıcaklık elde edilir.

Güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisinden güç üretiminin yapılabilmesi için Rankine, Organik Rankine gibi çeşitli güç üretim çevrimleri kullanılır. Güç üretim çevrimlerinden biri olan ORC düşük sıcaklık aralıklarında ve düşük basınçta çalışan buharlı güç santralidir. Bu çevrimde dolaşan akışkan düşük kaynama noktasına sahip olduğu için düşük sıcaklıklarda kolaylıkla kullanılmaktadır. Böylece atık ısıdan ve yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmada en etkili güç üretim santralidir.

Caldino-Herrera ve diğ. [2], 2017 yılı çalışmalarında parabolik güneş kolektörlü ORC sistemini dizayn etmişlerdir ve sistemin performans analizini incelemişlerdir. Güneş enerjisini Therminol 55 akışkanında depolayarak ORC'de güç üretimi yapmışlardır. R245fa akışkan türünün dolaştığı ORC sisteminde 10 kW güç üretimi yapmışlardır. ORC sisteminin her bir noktasının basınç, sıcaklık, entalpi, entropi ve kütlele debilerini hesaplamışlardır. Kondenserden atılan 124 kW'lık ısı enerjisini evin ısıtılmasında kullanmışlardır ve sistemin ikinci yasa verimini %57 olarak hesaplamışlardır.

Al-Sulaiman [3], çalışmasında parabolik güneş kolektörlü güç üretim santralinin ekserji analizini yapmıştır. Güç üretim

santrali olan ORC sisteminde R134a, R152a, R290, R407c, R600, R600a ve amonyak gibi yedi farklı akışkanları kullanarak sistemin ekserji verimini, ekserji yıkımını ve tersinmezlik oranını hesaplamıştır. Çalışmasının sonunda güneş ışınım şiddetinin arttıkça ekserji veriminin de arttığını belirtmiştir. Ayrıca R134a akışkanının kullanıldığı sistemde ekserji veriminin en yüksek çıktığını görmüştür.

Al-Sulaiman ve diğ. [4], çalışmalarında katı oksit yakıt hücreli trijenasyon sisteminin, biyomas kaynaklı trijenasyon sisteminin ve parabolik güneş kolektörlü trijenasyon sisteminin ekserji verimlerini karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında en yüksek ekserji verimine katı oksit yakıt hücreli trijenasyon sisteminde ulaşmışlardır (%38). Daha sonra her bir trijenasyon sisteminin termoekonomik analizini incelemişlerdir. Birim ekserji maliyeti katı oksit yakıt hücreli trijenasyon sisteminde 38 \$/GJ, biyomas kaynaklı trijenasyon sisteminde 26 \$/GJ, parabolik güneş kolektörlü trijenasyon sisteminde ise 24 \$/GJ olarak hesaplamışlardır. Parabolik güneş kolektörlü trijenasyon sisteminin ekserji maliyetinin düşük olduğuna ve çevreye CO2 emisyonu salmadığı sonucuna varmışlardır.

Yılmaz ve diğ. [5], çalışmalarında güneş enerjisi destekli ORC sisteminin enerji ve ekserji analizlerini incelemişlerdir. Hesaplamalarında Isparta ilinin güneş enerjisi verilerini kullanmışlardır ve ORC sisteminde R140a akışkanını kullanmışlardır. Çalışmalarında türbin giriş basıncının ve kazan sıcaklığının artırılmasının sistemin ısı verimini arttırdığını belirtmişlerdir.

Kızılkın ve diğ. [6], çalışmalarında güneş enerjisi destekli çok fonksiyonlu bir trijenasyon sisteminin modellemesini ve sistemin termodinamik analizini yapmışlardır. Gaz türbini ve buhar türbini için gerekli olan ısı enerjisini güneş enerjisinden karşılamışlardır. Sisteme absorpsiyonlu soğutma sistemi, buhar üretim prosesi, kurutma prosesi ve kullanım sıcak suyu ısıtma proseslerini entegre etmişlerdir. Analizlerinin sonucunda gaz çevriminin verimini %32 buhar çevriminin verimini %28 soğutma sisteminin performans katsayısını (COP) 0.77 olarak hesaplamışlardır. Sistemin ekserji kayıplarını incelediklerinde en yüksek ekserji kayıplarının 3882 kW ile güneş kulesinde gerçekleştiğini bulmuşlardır.

Bellos ve diğ. [7], güneş enerjili ve atık ısı destekli hibrid ORC sisteminin performans analizini incelemişlerdir. Atık ısı sıcaklığı 150 °C olduğunda sistemin verimini %11.6 elektrik üretimini 497 kW; atık ısı sıcaklığı 300 °C iken sistemin verimini %19.7 elektrik üretimini ise 845 kW olarak hesaplamışlardır.

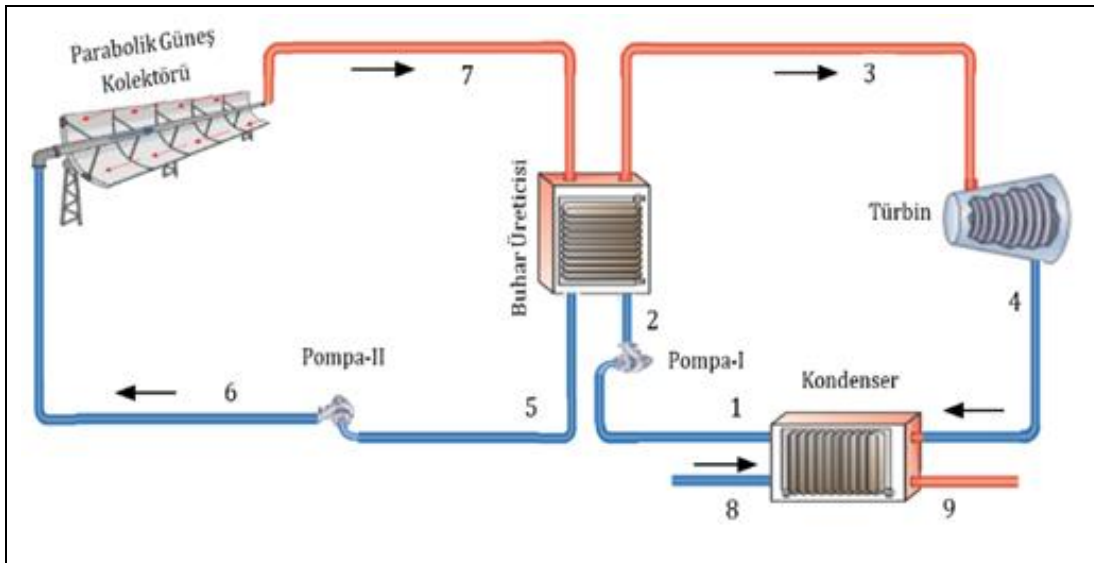
Mahmoudi ve diğ. [8], çalışmalarında atık ısı geri kazanımı için ORC kullanımına ilişkin teorik ve deneysel çalışmaları gözden geçirerek sistemin çalışma koşulları hakkında rapor hazırlamışlardır. Eisavi ve diğ. [9] parabolik güneş kolektörlü trijenasyon sisteminin performans analizini incelemişlerdir. Hesaplamalarının sonucunda ekserji yıkımının en fazla parabolik güneş kolektöründe meydana geldiğini bulmuşlardır.

Bu çalışmada, parabolik güneş kolektörlü ORC sisteminin modellemesi ve sistemin enerji ve ekserji analizi incelenmiştir. Kojenerasyon sisteminin her bir noktasındaki basınç, sıcaklık, entropi ve ekserji değerleri bulunarak sistemin birinci ve ikinci yasa verimleri hesaplanmıştır. Sistemde yer alan tüm parçaların ekserji yıkımları hesaplanarak en yüksek ekserji yıkımının olduğu eleman tespit edilmiştir.

2 Sistemin tanımı

Bu çalışmanın amacı, bir evin günlük elektrik ihtiyacını karşılayabilecek parabolik güneş kolektörlü ORC sisteminin modellemesini ve sistemin termodinamik analizini yapmaktır. Nisan ayının referans alındığı bu çalışmada, ilk olarak sistemin çalışma parametreleri belirlenirken evin elektrik ihtiyacının karşılanması amaçlanmıştır. Yiğit [10]'in 2014 yılında yapmış olduğu çalışmada bir evin günlük ortalama elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık 10 kWh olduğu kabul edilmiştir ve bu elektrik ihtiyacına göre kojenerasyon sistemi tasarlanmıştır. İlk olarak güneş enerjisini toplayan parabolik güneş kolektöründen elde edilen faydalı ısıdan, ORC'de elektrik üretimi yapılarak evin günlük 10 kWh olan elektrik ihtiyacı karşılanmıştır. Daha sonra ORC'nin kondenser kısmından atılan ısı, çevreye atılmak yerine kışın evin ısıtma ihtiyacını karşılamak için ısıtma sistemine gönderilir.

Parabolik güneş kolektörlü ORC sisteminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: Güneş enerjisi kaynaklı kojenerasyon sisteminin şematik gösterimi.

Parabolik güneş kolektörü, gelen güneş enerjisini aynalar vasıtasıyla, odak merkezinde yer alan alıcı bir boruya odaklar. Alıcı borunun içinden geçen ısı transfer akışkanı, güneş enerjisini bünyesinde depolayarak buhar üreticisine gönderilir. Burada, ısı ORC'de kullanılan akışkana aktarılır. ORC'de kullanılan akışkanın sıcaklık ve basıncı yükseltilerek türbinde mekanik güç üretilir. Türbinden çıkan akışkanın ısı, kondenserde ısıtma sisteminde kullanılan akışkana aktarılır. Daha sonra akışkan pompa yardımıyla buhar üreticisine gönderilir. Böylece çevrim tamamlanır.

Parabolik güneş kolektöründe Therminol-66, ORC'de R245fa akışkanı kullanılmıştır. ORC için uygun olan çalışma akışkanını seçerken dikkate alınması gereken termodinamik, çevre, emniyet ve proses ile ilgili olan değerlendirme kriterleri göz önüne alınarak çalışma akışkanı olarak R245fa akışkanı seçilmiştir. Düşük sıcaklık çalışma akışkanı olan R245fa, ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) onaylı ve Montreal Protokolü kapsamında kullanımına izin verilen hidroflorokarbon (HFC) soğutucuları ailesinin bir üyesidir.

Sistemin ölü hâl sıcaklığı nisan ayının ortalama çevre sıcaklığı, basıncı ise 101.325 kPa kabul edilmiştir. Bütün bu kabuller doğrultusunda sistemdeki her bir noktanın basınç, sıcaklık, entropi, ekserji ve kütleli debi değerleri hesaplanmıştır. Kabul edilen bu parametreler doğrultusunda nisan ayında evin bir günlük elektrik ihtiyacını karşılamak için 5 adet parabolik kolektör kullanılması gerektiği hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan parabolik kolektör için dizayn parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Parabolik kolektör dizayn parametreleri [9].

AÇIKLAMA	DEĞER-BİRİM
Borunun iç çapı	0.042 m
Borunun dış çapı	0.044 m
Camin çapı	0.102 m
Kolektör boyu	4.29 m
Kolektör genişliği	2.5 m
Camin yayıcılık katsayısı	0.96
Borunun yayıcılık katsayısı	0.96
Borunun ısı iletim katsayısı	15 W/mK
Akışkanın kütleli debisi	0.25 kg/s
Stephan-Boltzman sabiti	5.67x10 ⁻⁸
Havanın yoğunluğu	1.145 kg/m ³
Havanın viskozitesi	0.00001894 kg/m ² s
Havanın ısı iletkenliği	0.027 W/mK
Havanın sıcaklığı	16.27
Havanın basıncı	101.325 kPa
Camin tahmini sıcaklığı	60 °C
Borunun sıcaklığı	175 °C
Akışkanın giriş sıcaklığı	155 °C
Güneşin sıcaklığı	5739 K
Boru içerisindeki ısı taşınım katsayısı	330 W/m ² K
Isı transfer akışkanının özgül ısı	2032 J/kgK
Akışkanın Cp değeri	2265 J/kg.K
Akışkan yoğunluğu	878.1 kg/m ³

3 Matematiksel modelleme ve termodinamik analiz

Bu bölümde parabolik güneş kolektörünün matematiksel hesabı ve ORC'nin termodinamik analizi verilmiştir. Aşağıdaki kabuller dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır:

- Her iki kapalı çevrimde dolaşan akışkan debileri tüm sistem boyunca sabittir,
- Kinetik ve potansiyel enerjiler sabittir,
- Pompalar adyabatik ve izentropik kabul edilmiştir,
- Türbinin izentropik verimi 0.90'dır.

Parabolik güneş kolektöründen elde edilen yararlı ısı denklem (1) ile bulunur [11].

$$Q_u = F_R [G A_{a\check{c}} - A_r U_L (T_{giren,kol} - T_a)] \quad (1)$$

Burada, F_R ısı taşıma faktörü, G ışınım şiddeti, $A_{a\check{c}}$ açıklık yüzey alanı, A_r borunun yüzey alanı, U_L kolektörden çevreye olan toplam ısı kayıp katsayısı, T_a hava sıcaklığı ve $T_{giren,kol}$ kolektöre giren akışkanın sıcaklığıdır. Parabolik güneş kolektöründen elde edilen faydalı ısı kolektörde kullanılan akışkanın giriş ve çıkış özelliklerine göre şöyle hesaplanır.

$$Q_u = \dot{m}_{kol} c_{p,kol} (T_{giren,kol} - T_{çıkan,kol}) \quad (2)$$

Burada, \dot{m}_{kol} kolektörde dolaşan akışkanın kütleli debisini, $c_{p,kol}$ akışkanın özgül ısını ve $T_{çıkan,kol}$ kolektörden çıkan akışkanın çıkış sıcaklığını ifade etmektedir.

Isı taşıma faktörü olan F_R aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$F_R = \frac{\dot{m}_{kol} c_{p,kol}}{A_r U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{U_L F' A_r}{\dot{m}_{kol} c_{p,kol}} \right) \right] \quad (3)$$

Burada, F' kolektör etkinlik faktörüdür ve şu şekilde bulunur:

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_0}{h_{fi} D_i} + \left(\frac{D_0}{2k_r} \ln \frac{D_0}{D_i} \right)} \quad (4)$$

Burada, D_0 boru dış çapını, D_i boru iç çapını, k_r alıcı borunun ısı iletim katsayısını ve h_{fi} ise boru içindeki akışkanın ısı transfer katsayısını ifade etmektedir.

Kolektörden çevreye olan toplam ısı kayıp katsayısı şu şekilde bulunur.

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_{t,c-a} + h_{r,c-a}) A_c} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (5)$$

Burada, A_c camın yüzey alanı, $h_{t,c-a}$ hava ile cam arasındaki taşınım ile olan ısı transfer katsayısı, $h_{r,c-a}$ hava ile cam arasındaki ışımla olan ısı transfer katsayısı, $h_{r,r-c}$ cam ile boru arasındaki ışımla olan ısı transfer katsayısıdır.

Hava ile cam arasındaki taşınım ile olan ısı transfer katsayısı (6) No'lu denklem ile bulunur [11].

$$h_{t,c-a} = \frac{Nu k_a}{D_c} \quad \begin{array}{ll} 0.1 < Re < 1000 & Nu = 0.4 + 0.54 Re^{0.52} \\ 1000 < Re < 50000 & Nu = 0.3 Re^{0.6} \end{array} \quad (6)$$

Burada, k_a havanın ısı iletkenliği, D_c ise camın çapıdır.

Cam ile hava arasındaki ışımla olan ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$h_{r,c-a} = \epsilon_{y,c} \sigma (T_c - T_a) (T_c^2 + T_a^2) \quad (7)$$

Burada, $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ değeri Stefan-Boltzmann sabitini, $\epsilon_{y,c}$ camın yayıcılık katsayısını, T_c ise cam sıcaklığını ifade etmektedir.

Cam ile boru arasındaki ışınlama olan ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$h_{r,r-c} = \frac{\sigma(T_r^2 + T_c^2)(T_r + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_{y,r}} + \frac{A_r}{A_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_{y,c}} - 1 \right)} \quad (8)$$

Burada, $\varepsilon_{y,r}$ alıcı boru yayıcılık katsayısını ifade etmektedir.

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacmi içindeki toplam kütle zamanla değişmez. Birçok giriş ve çıkışı olan genel bir sürekli akışlı açık sistem için kütle korunumu ilkesi aşağıdaki gibi yazılır;

$$\sum \dot{m}_{giren} = \sum \dot{m}_{çikan} \quad (9)$$

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacminin toplam enerjisi sabit olduğundan, bu sistemlerde kontrol hacmine ısı, iş veya kütle akışı ile giren enerji, çıkan enerjiye eşit olmak zorundadır. Sürekli akışlı açık sistem için termodinamiğin birinci yasası veya enerjinin korunumu ilkesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma(\dot{m}\theta)_{çikan} - \Sigma(\dot{m}\theta)_{giren} \quad (10)$$

Burada \dot{Q} ısısal enerjiyi, \dot{W} işi ve θ akışkanın birim kütesinin toplam enerjisini ifade etmektedir. $\theta = h + ke + pe$ olarak denklem (10) tekrar düzenlenirse sürekli akışlı açık bir sistem için termodinamiğin I. Yasası aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned} \dot{Q} - \dot{W} = \Sigma \dot{m}_{çikan} \left(h_{çikan} + \frac{V_{çikan}^2}{2} + gz_{çikan} \right) \\ - \Sigma \dot{m}_{giren} \left(h_{giren} + \frac{V_{giren}^2}{2} + gz_{giren} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Denklem (11)'de kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma(\dot{m}h)_{çikan} - \Sigma(\dot{m}h)_{giren} \quad (12)$$

Enerji ve ekserji analizi, termodinamiğin birinci ve ikinci yasasını birlikte ele alan ve enerjinin maksimum kullanılabilirliğini ifade eden bir analiz şeklidir. Özellikle birinci yasa enerji analizi yapmakta kullanılırken, ikinci yasa tersinir ve tersinmezliği belirlediği için ekserji analizini yapmamızı sağlar [12]. Enerji analizi, ısı ve iş arasındaki farkı önemsemeden tüketilen enerji miktarını hesaplayan bir analiz olup mühendislik sistemlerinin dizayn ve analizlerinde yeterli değildir [13]. Bu nedenle, ikinci yasa olarak bilinen ekserji analizi ile termodinamikte önemli bir yeri olan tersinmezliklerden kaynaklanan ekserji kayıpları hesaplanabilmektedir [14]. Bu nedenle termodinamik sistemlerin analizinde ve termik sistemlerin optimizasyonunda termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları birlikte değerlendirilerek analizlerin yapılması gerekir. Bir sistemin ekserjisi şu şekilde yazılır:

$$\dot{E}x_Q - \dot{E}x_W = \sum (\dot{m}\varepsilon)_{çikan} - \sum (\dot{m}\varepsilon)_{giren} + \dot{E}x_{des} \quad (13)$$

Burada, $\dot{E}x_Q$ ısının ekserjisini, $\dot{E}x_W$ işin ekserjisini, ε termomekanik ekserji olarak da ifade edilen akış ekserjisini, $\dot{E}x_{des}$ ise yok olan ekserjiyi ifade etmektedir.

Isı geçişi yoluyla ekserji geçişi,

$$\dot{E}x_Q = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (14)$$

İş geçişi yoluyla ekserji geçişi,

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (15)$$

Kütle geçişi yoluyla ekserji geçişi,

$$\dot{E}x_K = \dot{m}\varepsilon \quad (16)$$

Şeklinde yazılır. Burada, T_0 ölü hâl sıcaklığını, akışkanın sıcaklığını, \dot{m} akışkanın kütsel debisini ifade etmektedir.

Yok olan ekserji aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\dot{E}x_{yokolan} = T_0 \dot{S}_{üretim} \quad (17)$$

Termodinamiğin ikinci yasası, sistemin moleküler düzensizliğini ölçen, entropi adı verilen yeni bir özelliğin tanımına yol açar. Entropi, enerji kaynağının kalitesini değerlendirmek için kullanılabilir. Entropi üretilebilir ancak yok edilemez.

$$\sum \dot{S}_{giren} - \sum \dot{S}_{çikan} + \dot{S}_{üretim} = \Delta \dot{S}_{sistem}/dt \quad (18)$$

Burada; \dot{S}_{giren} sisteme giren entropiyi, $\dot{S}_{çikan}$ sistemden çıkan entropiyi temsil etmektedir.

Birinci yasa verimi elde edilmek istenen değerlerin harcanan değere oranıdır.

Parabolik güneş kolektörünün verimi aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır [11].

$$\eta_{kol} = F_R \left[\eta_0 - U_L \left(\frac{T_{giren,kol} - T_a}{G C} \right) \right] \quad (19)$$

$$C = A_{a\check{c}}/A_r \quad (20)$$

Burada, η_0 optik verimini, C ise konsantrasyon oranını ifade etmektedir.

ORC sisteminin verimi aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\eta_{ORC} = \frac{W_{net}}{Q_{giren}} \quad (21)$$

Burada, W_{net} sistemden üretilen net işi, Q_{giren} ise sisteme giren ısıyı ifade etmektedir.

İkinci yasa verimi ise, gerçek ısı veriminin, aynı koşullarda olabilecek en yüksek (tersinir) ısı verime oranıdır. Ekserji verimini tanımlamadaki amaç incelediğimiz sistemin tersinir hâl değişimine ne ölçüde yaklaştığını belirlemektir [15].

ORC sisteminin II. Yasa verimi aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\eta_{ORC} = \frac{\eta_{ORC}}{\eta_{ORC,Carnot}} \quad (22)$$

Sistemde yer alan her bir eleman için kütle, enerji, ekserji denge denklemleri ve ekserji verimleri Tablo 2'de verilmiştir.

4 Araştırma bulguları

İsparta şartlarında yer alan bir evin elektrik ihtiyacını karşılamak için tasarlanan güneş enerjisi kaynaklı kojenerasyon sisteminin modellenmesi ve sistemin

termodinamik incelenmiştir. Parabolik güneş kolektörü aracılığıyla toplanan ısı ile ORC'de iş üretildikten sonra sistemden atılan ısı ise konutun ısıtılmasında kullanılmıştır.

Tasarlanan kojenerasyon sisteminin temel çalışma parametreleri belirlenirken nisan ayına ait ışınım şiddeti, güneşlenme süresi, ortalama çevre sıcaklığı ve ortalama rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. Nisan ayına ait ışınım şiddeti 525.93 W/m², güneşlenme süresi 7.77 sa./gün, ortalama çevre sıcaklığı 10.7 °C, ortalama rüzgâr hızı 2.8 m/s kabul edilmiştir.

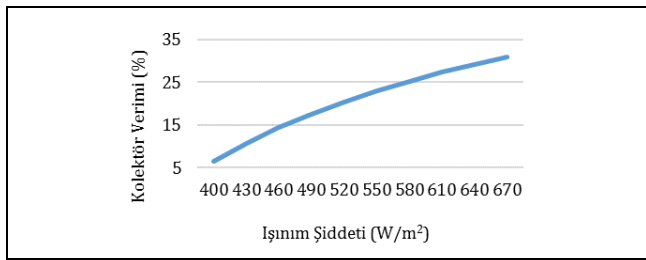
Kabul edilen çalışma şartları altında elde edilen bu değerler kullanılarak, sistemin her bir noktası için hesaplanan termodinamiksel değerler Tablo 3'te verilmiştir.

Parabolik güneş kolektörünün veriminin ışınım şiddetine göre değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Işınım şiddeti arttıkça parabolik güneş kolektör veriminin arttığı görülmüştür.

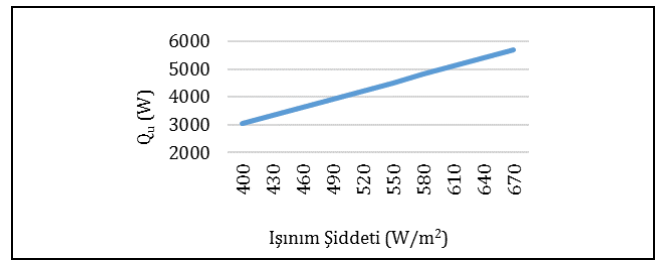
Parabolik güneş kolektöründen elde edilen yararlı ısının ışınım şiddetine göre değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Işınım şiddetinin değeri arttıkça kolektörden elde edilen faydalı ısının arttığı görülmüştür.

Farklı ışınım şiddetine göre sistem elemanlarının kapasitelerindeki değişim Şekil 4'te verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi ışınım şiddeti arttıkça elemanların kapasitelerinin arttığı görülmüştür.

Sistem elemanlarının kapasite, ekserji yok oluşu ve entropi üretimi değerleri her eleman için hesap edilmiş ve Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 2: Kolektör veriminin ışınım şiddetine göre değişimi.



Şekil 3: Yararlı ısının ışınım şiddetine göre değişimi.

Tablo 2: Sistem elemanlarının termodinamiksel denge denklemleri.

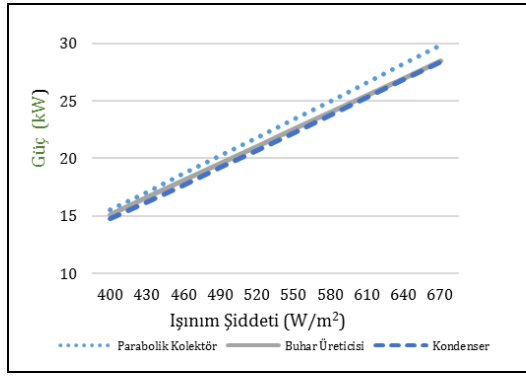
Sistem Elemanları	Kütlenin Korunumu	Enerjinin Korunumu	Ekserji Dengesi	Ekserji Verimi
Pompa I	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_{\text{Pompa I}} = \dot{m}_2 h_2$	$\dot{E}x_1 + \dot{W}_{\text{Pompa I}} = \dot{E}x_2 + \dot{E}x_{\text{des,Pompa I}}$	$\eta_{\text{Pompa I}} = (\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1) / \dot{W}_{\text{Pompa I}}$
Buhar Üreticisi	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ $\dot{m}_5 = \dot{m}_7$	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5$	$\dot{E}x_2 + \dot{E}x_7 = \dot{E}x_3 + \dot{E}x_5 + \dot{E}x_{\text{des,Buh.Üre.}}$	$\eta_{\text{Buh.Üre.}} = (\dot{E}x_3 - \dot{E}x_2) / (\dot{E}x_7 - \dot{E}x_5)$
Türbin	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$	$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{W}_{\text{Türbin}}$	$\dot{E}x_3 = \dot{E}x_4 + \dot{W}_{\text{Türbin}} + \dot{E}x_{\text{des,Türbin}}$	$\eta_{\text{Türbin}} = \dot{W}_{\text{Türbin}} / (\dot{E}x_3 - \dot{E}x_4)$
Kondenser	$\dot{m}_4 = \dot{m}_1$	$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_9 h_9$	$\dot{E}x_4 + \dot{E}x_8 = \dot{E}x_1 + \dot{E}x_9 + \dot{E}x_{\text{des,Kon}}$	$\eta_{\text{Kon}} = (\dot{E}x_9 - \dot{E}x_8) / (\dot{E}x_4 - \dot{E}x_1)$
Pompa II	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$	$\dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_{\text{Pompa II}} = \dot{m}_6 h_6$	$\dot{E}x_5 + \dot{W}_{\text{Pompa II}} = \dot{E}x_6 + \dot{E}x_{\text{des,Pompa II}}$	$\eta_{\text{Pompa II}} = (\dot{E}x_6 - \dot{E}x_5) / \dot{W}_{\text{Pompa II}}$
Parabolik Kolektör	$\dot{m}_6 = \dot{m}_7$	$\dot{m}_6 h_6 + \dot{Q}_{\text{Güneş.}} = \dot{m}_7 h_7$	$\dot{E}x_6 + \dot{E}x_{\text{Güneş.}} = \dot{E}x_7 + \dot{E}x_{\text{des,kol}}$	$\eta_{\text{kol}} = (\dot{E}x_7 - \dot{E}x_6) / \dot{E}x_{\text{Güneş.}}$

Tablo 3: Sistemin her bir noktası için termodinamiksel değer.

Akışkan Türü	P (kPa)	T (°C)	\dot{m} (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	e (kJ/kg)	Ex (kW)	
1	R245fa	343.2	50.00	0.0762	26.73	1.049	3.539	0.250
2	R245fa	790.8	50.26	0.0762	266.7	0.096	3.903	0.297
3	R245fa	790.8	166.1	0.0762	560.0	1.222	68.25	5.200
4	R245fa	343.2	146.3	0.0762	542.1	2.036	48.21	3.673
5	Therminol-66	101.3	154.6	0.2500	282.5	0.819	50.96	12.74
6	Therminol-66	101.3	155.0	0.2500	283.3	0.820	51.23	12.81
7	Therminol-66	101.3	197.0	0.2500	371.9	1.018	83.68	20.92
8	Su	202.7	30.00	0.0719	125.9	0.437	2.727	0.196
9	Su	202.7	99.76	0.0719	418.2	1.304	48.74	3.504

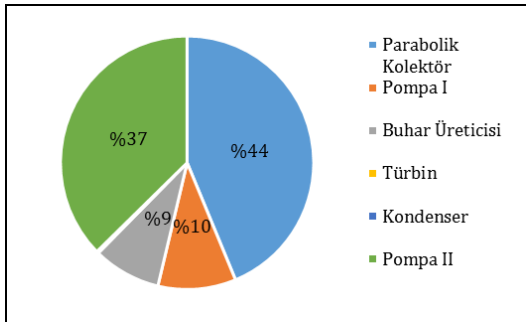
Tablo 4: Sistemin her bir elemanı için termodinamik denge denklemleri.

Sistem Elemanları	Kapasite (kW)	Ekserji Yok oluşu (kW/K)	Entropi Üretimi (kW)
Parabolik Kolektör	22.14	17.16	0.06063
Pompa I	0.034	0.006	0.00002
Buhar Üreticisi	21.35	3.279	0.01165
Türbin	1.363	0.163	0.00058
Kondenser	21.02	0.095	0.00034
Pompa II	0.204	0.135	0.00047
Toplam		20.892	0.0737



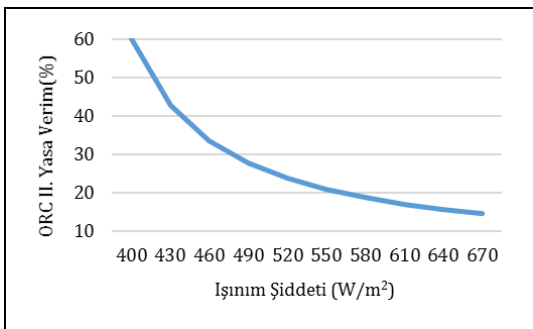
Şekil 4: Işınım şiddetine göre sistem elemanları kapasitesindeki değişim.

Şekil 5'te sistemde meydana gelen toplam ekserji yok oluşu, her sistem elemanı için grafik halinde gösterilmiştir. Burada amaç en yüksek ekserji yok oluşunun hangi sistem elemanında gerçekleştiğini tespit etmektir. Grafikten de görüldüğü üzere %44 oranla parabolik güneş kolektörü toplam ekserji yok oluşunda en fazla paya sahiptir. İkinci en fazla paya sahip olan sistem elemanı ise %37 oranla buhar üreticisidir. Bu sonuç, iyileştirme çalışmalarının özellikle parabolik güneş kolektörü ve ısı değiştirici üzerinde yoğunlaşması gerektiği anlamına gelmektedir. Yutuculuğu ve ısıl geçirgenliği yüksek olan alıcı boru, geçirgenliği yüksek, yansıtıcılığı ise düşük olan cam örtü kullanılarak parabolik güneş kolektöründeki ekserji yıkımı azaltılabilir.



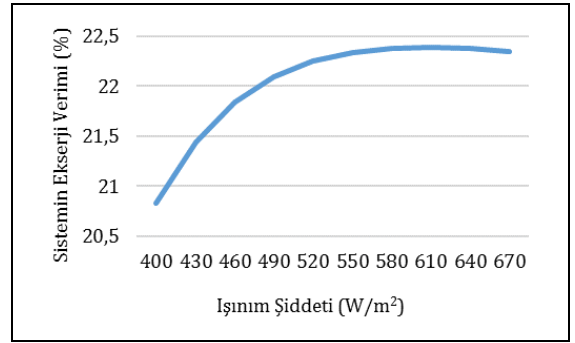
Şekil 5: Sistemin toplam ekserji yok oluşu.

ORC sisteminin II. Yasa verimi Şekil 6'da verilmiştir. Işınım şiddetinin artmasıyla ORC sisteminin II. Yasa veriminin düştüğü görülmektedir.



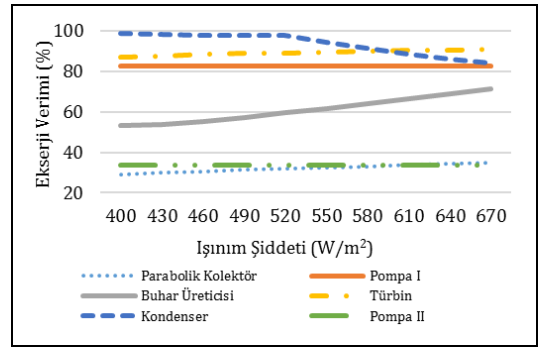
Şekil 6: ORC II. Yasa veriminin ışınım şiddetine göre değişimi.

Işınım şiddetine göre sistemin ekserji verimindeki değişim Şekil 7'de gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi ışınım şiddeti arttıkça sistemin elektriksel verimi artmaktadır.



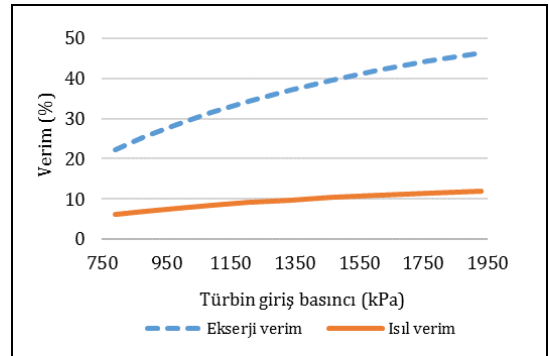
Şekil 7: Sistemin ekserji veriminin ışınım şiddetine göre değişimi.

Sistemde bulunan her bir elemanın ışınım şiddetine göre ekserji verimi Şekil 8'de verilmiştir. Kondenser hariç diğer elemanların ekserji verimlerinin ışınım şiddeti ile arttığı görülmüştür.



Şekil 8: Sistem elemanlarının ekserji veriminin ışınım şiddetine göre değişimi.

Türbin giriş basıncına göre kojenerasyon sisteminin enerji ve ekserji verimi Şekil 9'da verilmiştir. Türbin giriş basıncı 750 kPa'dan 1950 kPa çıktığında enerji verimi %6'dan %12'ye çıkarken, ekserji verimi ise %22'den %46'ya çıkmıştır.



Şekil 9: Türbin giriş basıncına göre sistemin enerji ve ekserji verimi.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, güneş enerjisi kaynaklı kojenerasyon sisteminin modellenmesi ve sistemin enerji ve ekserji analizi incelenmiştir. İncelenen sistemde kolektör verimi %21, ORC sisteminin ısıl verimi %6 olarak tespit edilmiştir. Ekserji kayıpları incelendiğinde en yüksek ekserji kaybının %44 ile parabolik güneş kolektöründe meydana geldiği görülmüştür. Bu sonuç, sistemin iyileştirme çabalarının parabolik güneş kolektörü

üzerinde yoğunlaşılması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca ışıının şiddetine göre sistem elemanlarının kapasitelerinin ve ekserji verimlerinin değişimleri incelenmiştir. Kojenerasyon sistemin ekserji verimi %22 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, kaynak olarak tükenmeyen, temiz ve dışa bağımlılık gerektirmeyen güneş enerjisi kullanılarak daha küçük ölçekli kurulabilecek kojenerasyon sisteminin analizine ve uygulanabilirliğine yer verilmiştir. Ayrıca elektrik ihtiyacının tüketildiği yerde kurulan kojenerasyon sistem ile evin elektrik ve ısıtma ihtiyacı karşılanarak enerji iletim dağıtım hatlarındaki kayıplar azaltılmış olacaktır. Sistemde tek bir enerji kaynağı kullanıldığı için yüksek verimliliğin elde edilebileceği gösterilmiştir.

6 Kaynaklar

- [1] Bulut H, Buyukalaca O. "Simple model for the generation of daily global solar-radiation data in Turkey". *Applied Energy*, 84(5), 477-491, 2007.
- [2] Caldino-Herrera, U, Castro, L, Jaramillo OA, Garcia JC, Urquiza G, Flores F. "Small organic rankine cycle coupled to parabolic trough solar concentrator". *Energy Procedia*, 129, 700-707, 2017.
- [3] Al-Sulaiman FA. "Energy and sizing analyses of parabolic trough solar collector integrated with steam and binary vapor cycles". *Energy*, 58, 561-570, 2013.
- [4] Al-Sulaiman FA, Dincer İ, Hamdullahpur F. "Thermoeconomic optimization of three trigeneration systems using organic rankine cycle:part II-applications". *Energy Conversion and Management*, 69, 209-216, 2013.
- [5] Yılmaz F, Selbaş R, Balta MT. "Güneş enerjisi destekli rankine çevriminin ekserji analizi". *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12(4), 39-50, 2015.
- [6] Kızılkın Ö, Akbaş Ç. "Güneş enerjisi destekli çok fonksiyonlu trijenerasyon sisteminin termodinamik analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 22(1), 71-77, 2016.
- [7] Bellos E, Tzivanidis C. "Investigation of a hybrid ORC driven by waste heat and solar energy". *Energy Conversion and Management*, 156, 427-439, 2018.
- [8] Mahmoudi A, Fazli M, Morad MR. "A recent review of waste heats recovery by organic rankine cycle". *Applied Thermal Engineering*, 43, 660-675, 2018.
- [9] Eisavi B, Khalilarya S, Chitsaz A, Rosen MA. "Thermodynamic analysis of a novel combined cooling, heating and power system driven by solar energy". *Applied Thermal Engineering*, 129, 1219-1229, 2018.
- [10] Yiğit F, Kabul A. "İsparta yöresinde bir evin elektrik ihtiyacının rüzgâr enerjisi ile karşılanmasının ekonomik analizi". *Teknolojik Araştırmalar, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 11(2), 1-9, 2014.
- [11] Kalogirou SA. "Solar thermal collectors and applications". *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231-295, 2009.
- [12] Çamdalı Ü, Erişen A, Çelen F. "Energy and exergy analyses in a rotary burner with pre-calcinations in cement production". *Energy Conversion and Management*, 45, 3017-3031, 2004.
- [13] Talbi MM, Agnew B. "Exergy analysis: an absorption refrigerator using lithium bromide and water as the working fluids". *Applied Thermal Engineering*, 20, 619-630, 2000.
- [14] Sözen A. "Effect of irreversibilities on performance of an absorption heat transformer used to increase solar pond's temperature". *Renewable Energy*, 29, 501-515, 2003.
- [15] Çengel YA, Boles MA. *Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla*. 5 Baskı. İzmir, Türkiye, İzmir Güven Kitap Evi, 2008.