

## Jeotermal Güç Destekli Bölgesel Enerji Dönüşüm Sisteminin Termodinamik Analizi

Ahmet Elbir<sup>1\*</sup>, Murat Öztürk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Enerji Sistemleri Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi 32100, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi 32100, Isparta, Türkiye

\*Corresponding author: [ahmetelbir@sdu.edu.tr](mailto:ahmetelbir@sdu.edu.tr)

<sup>+</sup>Speaker: [ahmetelbir@sdu.edu.tr](mailto:ahmetelbir@sdu.edu.tr)

Presentation/Paper Type: Oral / Full Paper

**Özet** - Bu çalışmada, jeotermal güç temelli elektrik, sıcak su, ısıtma ve soğutma üreten bölgesel enerji dönüşüm sisteminin termodinamik analizi incelenmiştir. Jeotermal kaynaktan üretilen enerji çift fazlı organik Rankine çevrimi (ÇF-ORC) ve tek etkili absorpsiyonlu soğutma (TEAS) sisteminin tahriki için kullanılabilir. Entegre sistem analizi Mühendislik Denklem Çözücüsü (EES) yazılım programı kullanılarak ortaya konulmuştur. Entegre sistemin ve iki alt sistemin (ÇF-ORC ve TEAS) enerji ve ekserji verimlilikleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda, farklı çalışma durumlarının entegre sistem ve alt-sistemlerine olan etkileri incelemek için parametrik çalışma verilmiştir. Sonuç olarak tüm sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %38,28 ve %36,39 olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler**- Jeotermal enerji, bölgesel enerji dönüşüm sistemi, termodinamik analiz.

### Thermodynamic Analysis of A Geothermal Energy-Based District Energy Conversion System

**Abstract** - In this study, thermodynamic analysis of a geothermal power-based district energy conversion system which produces electricity, hot water, heating and cooling are investigated. The energy produced from geothermal resource can be utilized to drive a double stage organic Rankine cycle (DS-ORC) and a single effect absorption cooling (SEAC) system. Integrated system analysis is conducted by using the Engineering Equation Solver (EES) software program. The energy and exergy efficiencies of integrated system and its two sub-systems (DS-ORC and SEAC) are calculated. Also, a parametric study is given in order to find out how different operating conditions effect the integrated system and its sub-systems performance. As a result, it is observed that overall energy and exergy efficiencies of whole system are 38.28% and 36.39%, respectively.

**Keywords**- Geothermal energy, district energy conversion system, thermodynamic analysis.

### 1. GİRİŞ

Enerji kısaca iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Nükleer, kimyasal, mekanik, termal, jeotermal, güneş, rüzgar, hidrolik ve elektrik gibi enerji çeşitleri, uygun metotlarla birbirine dönüştürülebilmektedir [1]. Ekonomik anlamda farklı yöntemlerle enerji üretiminde kullanılan kaynaklar, enerji kaynakları olarak adlandırılmaktadır. Kullanışlarına göre enerji kaynakları, uzun bir geleceğe kadar varlığını koruyabilen, kendini yenileyebilen, yenilenebilir enerji kaynakları ve kısa bir gelecekte tükenebileceği öngörülen fosil enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayrılır. Fosil enerji kaynakları petrol, kömür ve doğalgazdır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise güneş, rüzgar, dalga, jeotermal gibi kaynakları içermektedir. Jeotermal kaynaklar güç üretimi ve hacim ısıtma uygulamaları için kullanılan temiz, güvenli ve sürdürülebilir bir kaynak olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir veya daha fazla enerji

kaynağını kullanarak güç, ısıtma, soğutma, hidrojen, sıcak su, temiz su, kurutma ve benzeri ürünlerin eldesin de entegre sistemlerinin kullanımı son yıllarda daha fazla önem kazanmaya başlamıştır.

Kanoğlu ve diğerleri [2] enerji ve ekserji analizlerini kullanarak hidrojen üretimi için tasarlanan dört sistemi incelemişlerdir. Aynı zamanda jeotermal kaynak sıcaklığının hidrojen ve güç üretimi üzerine etkisini incelemişlerdir. Yüksel ve Öztürk [3] yapmış oldukları çalışmada hidrojen ve güç üretimi için yeni bir jeotermal enerji destekli entegre sistemin termodinamik ve termoekonomik analiz sonuçlarını sunmuşlardır. Önerdikleri entegre sistem jeotermal, ORC, PEM elektroliz ve absorpsiyonlu soğutma sisteminden oluşmaktadır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda entegre sistemin enerji verimliliğini %47,04 ve ekserji verimliliğini ise %31,15 olarak hesaplamışlardır.

Dai vd. [4], düşük dereceli atık ısı geri kazanımında organik Rankine çevriminin (ORC)

içlerinde su, amonyak, bütan ve izobütanın da bulunduğu farklı akışkanlar kullanarak karşılaştırmalı bir çalışma ve parametrik optimizasyonunu yapmışlardır. Termodinamik parametrelerin ORÇ performansı üzerindeki etkilerini incelemişler ve her bir çalışma akışkanı için ekserji verimliliği ile optimize etmişlerdir. Çevrime bir dahili ısı değiştirici eklenmesiyle performansın artabileceğini vurgulamışlardır. Gomri [5], soğutma uygulamaları için tek etkili, çift etkili ve üçlü etkili absorpsiyonlu soğutma çevrimlerinin uygulama potansiyelini araştırmıştır. Simülasyon sonuçlarını, çeşitli işletme parametrelerinin performans katsayısı, ekserjik verimi ve üretilen soğutucu akışkanın kütle akış hızının üç sistemin verdiği ısıya oranı arasındaki etkiyi incelemek için kullanmıştır. Sonuç olarak, çift etkili sistemin performansının, tek etkili sistemin performansının yaklaşık iki katı olduğu ve üçlü etki sisteminin performansının tek etkili sistemin performansının üç katından biraz daha düşük olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca sistemlerin ekserjik verimliliklerini incelemiş, üç etkili ve iki etkili sistemin ekserjik verimliliğinin tek etkili sistemden daha fazla olduğunu bildirmiştir.

Yapılan çalışmada bölgesel enerji sisteminin tasarımı için önerilen jeotermal enerji destekli entegre sistemin termodinamik analizi sunulmuştur. Sunulan entegre sistem jeotermal sistemi, çift fazlı organik Rankine çevrim sistemi ve tek etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi olmak üzere üç altsistemden oluşmaktadır. Sunulan çalışmanın ana amaçları aşağıda verilmiştir.

- Çevre sıcaklığının entegre sistem ve alt sistemlere olan etkisinin incelenmesi,
- Çevre sıcaklığının soğutma sistemi performans katsayılarına olan etkisinin incelenmesi,
- Jeotermal akışkan sıcaklığının sistem ekserji yıkım miktarı ve ekserji verimliliğine olan etkisinin incelenmesi.
- Türbin girdi basıncının güç üretimi ve organik Rankine çevrimi ekserji verimliliğine olan etkisinin incelenmesidir.

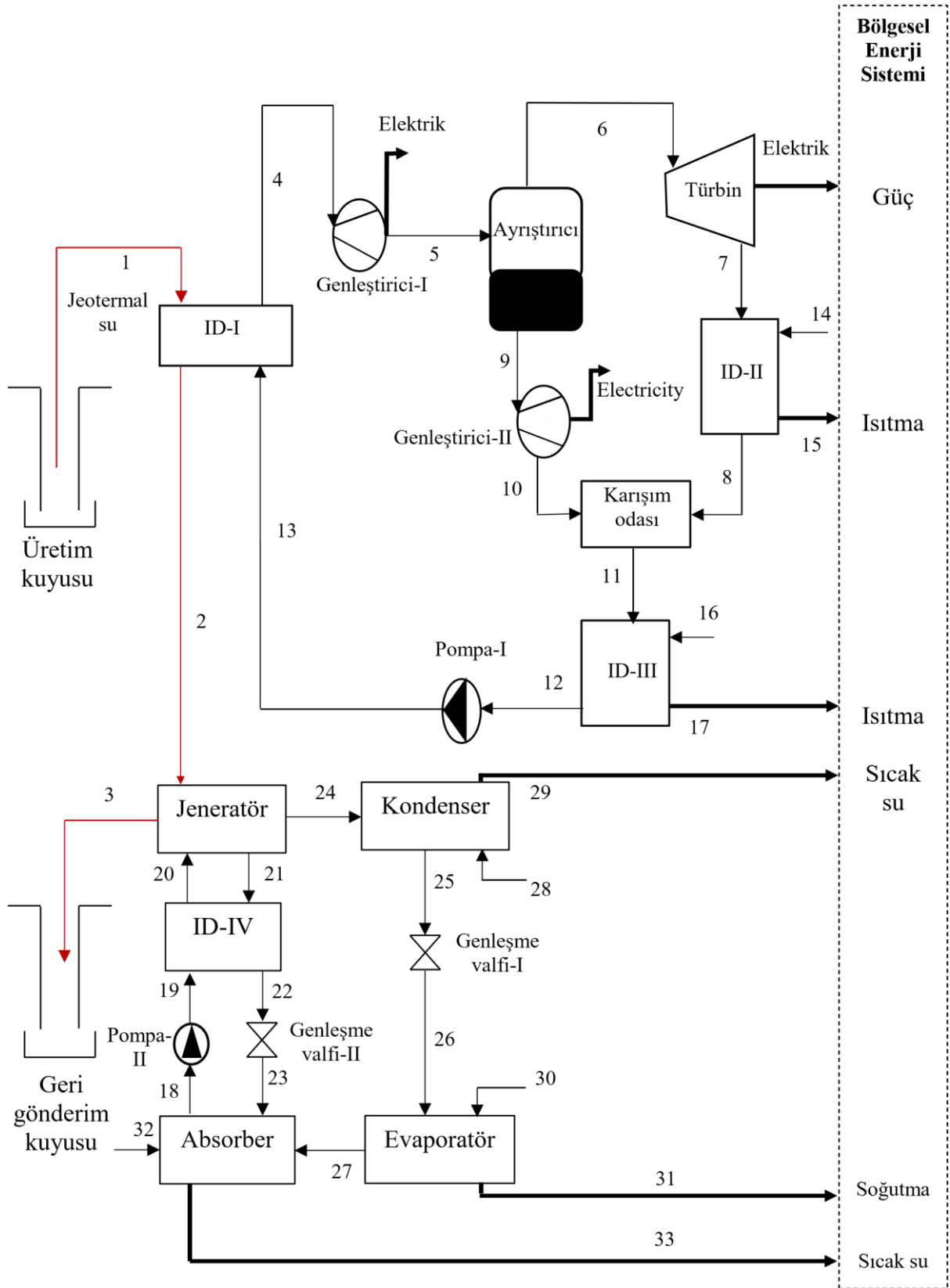
## 2. SİSTEM TASARIMI

Jeotermal enerji destekli bölgesel enerji sistemi için güç, ısıtma, soğutma ve sıcak su üretimi için tasarlanmış entegre sistemin şematik sunumu Şekil 1'de verilmiştir. Bu entegre sistemin birincil güç sağlayıcısı çift fazlı organik Rankine çevrimi (ÇFORC) olarak tasarlanmıştır. ÇF-ORC alt sistemi üç ısı değiştiricisi (ID), iki genişletici, bir ayrıştırıcı, bir ORC türbini, bir karışım odası ve pompadan oluşmaktadır. Jeotermal kaynak sıcaklığında ve basıncındaki jeotermal su ID-I sistem bileşenine 1 noktasından girer ve 2

noktasından çıkar. Basıncı artırılmış ÇF-ORC çalışma akışkanı 13 noktasından ID-I'e girmektedir. Daha sonra ID-I'den çıkan çalışma akışkanı genişletici-I elektrik üretimi için girmektedir. Genişlemenin sonucunda 5 noktasındaki iki fazlı akışkan sıvı ve buhar fazlarına ayrılmak için ayrıştırıcı ünitesine girmektedir. Ayrıştırma prosesinden sonra, elektrik üretimi için hem buhar hem de sıvı fazda ki akışkanlar genişletici-II ve ORC türbinine 9 ve 6 noktalarından girmektedir. 7 noktasında türbinin çıkışında yüksek buhar kalitesinden dolayı, doymuş sıvı fazı elde etmek için çalışma akışkanı ID-II'ye girer. Diğer taraftan genişletici-II'den ayrılan düşük buhar kalitesine sahip olan çalışma akışkanı karışım odasına girer ve karışım akışkanı 11 noktasında çıkar. Aynı zamanda pompa-I çalışma akışkanının basıncı seviyesini yükseltmek için kullanılır.

Entegre sistemden soğutma yükü elde etmek için tek etkili absorpsiyonlu soğutma (TEAS) sistemi kullanılmıştır. ID-I'den çıkan jeotermal çalışma akışkanı 3 noktasında jeneratör sistem bileşenine girmektedir. Jeneratöre giren ısı enerjisi, LiBr-H<sub>2</sub>O karışımından H<sub>2</sub>O buharlaşır ve 26 noktasında kondensere gider. Akışkanın ısı enerjisi kondenserde dışarı atılır. Bundan dolayı H<sub>2</sub>O 27 noktasında doymuş akışkan olarak kondenserden ayrılır. Daha sonra H<sub>2</sub>O 28 noktasındaki daha düşük sıcaklık seviyelerine genişleme valfi-I'den geçerek ulaşır. Evaporatör sistem bileşeni evsel uygulamalar için soğutma etkisini oluşturur. Sonra H<sub>2</sub>O evaporatör bileşeninden çıkar ve 29 noktasında absorbere giriş yapar. H<sub>2</sub>O ile LiBr-H<sub>2</sub>O karışımı ile birleştirilir. 20 noktasında absorberden çıkan LiBr-H<sub>2</sub>O karışımı ID-IV'e doğru pompa yardımı ile basıncı yükseltilerek gönderilir. Daha sonra, ID-IV'den çıkan LiBr-H<sub>2</sub>O karışımı 22 noktasında jeneratöre giriş yapar. Yüksek LiBr konsantrasyonlu LiBr-H<sub>2</sub>O karışımı ısı enerjisini vermek için ID-IV'e 23 noktasında giriş yapar.

Sonra, 24 noktasında ID-IV'den çıkan karışım genişleme valfi-II yardımıyla genişletilerek absorbere 25 noktasında giriş yapar.



Şekil 1. Jeotermal enerji destekli bölgesel entegre sistemin şematik sunumu

### 3. TERMODİNAMİK ANALİZ

Herhangi bir entegre sistemin termodinamik yerinin tespit edilmesi, ekserji yıkım miktarlarının analizi, incelenen sistemin enerji ve ekserji hesaplanması ve gerekli düzenlemeler yapılarak sistemin daha verimli çalışır duruma getirilmesi amacıyla yapılır.

Enerji dengesi hesaplanırken termodinamiğin birinci yasasından yararlanır. Bu yasa genel olarak enerjinin var veya yok edilemeyeceğini ifade eder. Enerji analizi sistemin bütünüyle ilgili bilgi verirken sistemdeki enerji kayıplarını göz önünde bulundurmaz. Bu nedenle sistemin ideal duruma yakınlığını net olarak ortaya koyamamaktadır. Ancak gerçek sistemlerde entropi ve sinmelilerken kaynaklanan enerji kayıpları bulunmaktadır [6]. Ekserji analizi termodinamiğin ikinci yasasına dayanmaktadır ve aynı zamanda entropiye benzer şekilde ekserjide korunmaz. Bunun nedeni tersinmezlikler ve ekserjinin bir kısmının sistem sınırlarından çıkmasıdır. Ekserji, enerjinin kullanılabilirliğinin kalitesinin ya da değişim yapma kalitesinin bir ölçüsüdür olarak karşımıza çıkar [7]. Ekserji analizi daha gerçekçi bir yaklaşım sunduğundan çok daha fazla tercih edilen bir metottür.

İncelemesi yapılan sistemin termodinamik analizinin yapılması için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Çevre sıcaklığı ( $T_o$ ) ve basıncı ( $P_o$ ) 25 °C ve 101,3 kPa olarak alınmıştır.
- Kinetik, potansiyel ve kimyasal enerji değişimleri tüm sistem boyunca ihmal edilmiştir.
- Tüm akışlar ve sistem bileşenleri her zaman çalışma sıcaklığı ve basıncında çalışmaktadır. ○ Sistem bileşenlerinden olan ısı kayıpları ihmal edilmiştir.
- Tüm sistemin her zaman kararlı akış ve kararlı hal koşullarında olduğu kabul edilmiştir.

#### 3.1. Kütle Dengesi

Kararlı hal ve akış şartlarında kütle korunum denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (1)$$

Burada  $\dot{m}$  kütle debisidir, alt indisler g ve  $\zeta$  ise kontrol hacmine giren ve çıkanları ifade etmektedir.

#### 3.2. Enerji Dengesi

Kararlı hal ve akış şartlarında, kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilirse enerji denge denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.  $\sum \dot{m}_g h_g + \sum \dot{Q}_g + \sum \dot{W}_g = \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta + \sum \dot{Q}_\zeta + \sum \dot{W}_\zeta$  (2)

Burada  $\dot{Q}$  ve  $\dot{W}$  sırasıyla ısı ve iş transfer hızlarını ve  $h$  özgül entalpiyi göstermektedir.

verimliliğinin hesaplanması, verim kayıplarının

#### 3.3. Entropi dengesi

Termodinamiğin ikinci yasası kullanılarak entropi denge denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sum \dot{m}_g s_g + \sum \frac{\dot{Q}_{kh}}{T_o} + \dot{S}_u = \sum \dot{m}_\zeta s_\zeta \quad (3)$$

Burada  $s$  özgül entropiyi ve  $\dot{S}_u$  entropi üretim hızını göstermektedir. Enerjinin aksine entropi, sistemdeki tersinmezlikler sebebiyle korunmaz. Sistemden çıkan entropi girenden daha büyüktür ve bu fark entropi üretimi olarak isimlendirilir ve entropi denge denkleminde belirtilmelidir.

#### 3.4. Ekserji Dengesi

Ekserji, çevresiyle etkileşimde olan bir prostenden elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlanabilir [8]. Sistem içi ısı transferi ve sistemin çevreyle olan ısı transferi, sistem ve çevre arasında önemli miktarda sıcaklık farkını meydana getirir. Bu sıcaklık farkı sistemde tersinmezliklere sebep olur. Kaybedilen ve geri döndürülemeyen bu enerji kaybı sistem performansını azaltır. Sistemdeki enerji kayıplarının belirlenmesi sistem performansını artırmaya yardımcı olur. Genel ekserji denge denklemi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\sum \dot{m}_g ex_g + \sum E x^Q_g + \sum E x^W_g = \sum \dot{m}_\zeta ex_\zeta + \sum E x^Q_\zeta + \sum E x^W_\zeta + E x_y \quad (4)$$

Burada  $E x^Q$  ve  $E x^W$  sırasıyla ısı ve işe ilişkin ekserji transfer hızlarını gösterir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$E x^Q = (1 - T_o) Q \quad (5)$$

$$E x^W = W \quad (6)$$

$E x_g$ ,  $E x_\zeta$  ve  $E x_y$  ise sırasıyla giren ekserji, çıkan ekserji ve sistem tersinmezliklerini tanımlayan ekserji yıkım hızıdır [9].

Bir maddenin akışının ekserjisi, çevresiyle etkileşimde olan bir sistemin kendi özgün durumundan çevresel duruma götürüldüğünde sağlanabilecek maksimum iş miktarı olarak tanımlanabilir. Bir akışla ilgili ekserji dört ana unsurdan oluşur; fiziksel ekserji, kimyasal ekserji, kinetik ekserji ve potansiyel ekserji [10]. Sunulan bu çalışmada kimyasal, kinetik ve potansiyel ekserji terimleri ihmal edildiği için sadece fiziksel ekserji terimi aşağıda verildiği gibi tanımlanmıştır.

$$ex_{fz} = h - h_o - T_o(s - s_o) \quad (7)$$

$$E_{xy} = T_o S_{\dot{u}} \quad (8)$$

Burada  $h$  ve  $h_o$  sırasıyla gerçek durumda ve referans çevre durumunda ki özgül entalpileri,  $s$  ve  $s_o$  ise gerçek durumda ve referans çevre durumunda ki özgül entropileri göstermektedir.

Denklem (4) ile verilen ekserji yıkım ifadesi ( $E_{xy}$ ) doğrudan entropi oluşumuyla ilgilidir ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

Entegre sistem bileşenlerinin hepsi için kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denklemleri yukarıda verilen prosedürler kullanılarak yazılmış ve Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Entegre sistem bileşenlerinin kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denklemleri

Bileşen	Kütle dengesi	Enerji dengesi	Entropi dengesi	Ekserji dengesi
Isı değiştiricisi-I (ID-I)	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $\dot{m}_3 = \dot{m}_{14}$	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{14} h_{14}$ $= \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3$	$\dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_{14} s_{14}$ $+ \dot{S}_{\dot{u},rt,ID-I}$ $= \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_3 s_3$	$\dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_{14} ex_{14}$ $= \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_3 ex_3$ $+ \dot{E}_{XY,ID-I}$
Genleştirici-I (Gen-I)	$\dot{m}_4 = \dot{m}_5$	$\dot{m}_4 h_4$ $= \dot{m}_5 h_5 + W_{gen,I}$	$\dot{m}_4 s_4 + \dot{S}_{\dot{u},rt,gen,I}$ $= \dot{m}_5 s_5$	$\dot{m}_4 ex_4$ $= \dot{m}_5 ex_5 + W_{gen,I}$ $+ \dot{E}_{XY,gen,I}$
Ayrıştırıcı (Ay)	$\dot{m}_5$ $= \dot{m}_6$ $+ \dot{m}_9$	$\dot{m}_5 h_5$ $= \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_9 h_9$	$\dot{m}_5 s_5 + \dot{S}_{\dot{u},rt,ay}$ $= \dot{m}_6 s_6 + \dot{m}_9 s_9$	$\dot{m}_5 ex_5 = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_9 ex_9$ $+ \dot{E}_{XY,ay}$
Türbin (Tür)	$\dot{m}_6 = \dot{m}_7$	$\dot{m}_6 h_6$ $= \dot{m}_7 h_7 + W_{Tür}$	$\dot{m}_6 s_6 + \dot{S}_{\dot{u},rt,Tür} = \dot{m}_7 s_7$	$\dot{m}_6 ex_6$ $= \dot{m}_7 ex_7 + W_{Tür}$ $+ \dot{E}_{XD,Tür}$
Isı değiştiricisiII (ID-II)	$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$ $\dot{m}_{14}$ $= \dot{m}_{15}$	$\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{14} h_{14}$ $= \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{15} h_{15}$	$\dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_{14} s_{14}$ $+ \dot{S}_{\dot{u},rt,ID-II}$ $= \dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_{15} s_{15}$	$\dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_{14} ex_{14}$ $= \dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_{15} ex_{15}$ $+ \dot{E}_{XY,ID-II}$
Genleştirici-II (Gen-II)	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	$\dot{m}_9 h_9$ $= \dot{m}_{10} h_{10} + W_{gen,II}$	$\dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{\dot{u},rt,gen,II}$ $= \dot{m}_{10} s_{10}$	$\dot{m}_9 ex_9$ $= \dot{m}_{10} ex_{10} + W_{gen,II}$ $+ \dot{E}_{XY,gen,II}$
Karışım odası (Ko)	$\dot{m}_8 + \dot{m}_{10}$ $= \dot{m}_{11}$	$\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{10} h_{10}$ $= \dot{m}_{11} h_{11}$	$\dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_{10} s_{10} + \dot{S}_{\dot{u},rt,Ko}$ $= \dot{m}_{11} s_{11}$	$\dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_{10} ex_{10}$ $= \dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{E}_{XY,Ko}$
Isı değiştiricisiIII (ID-III)	$\dot{m}_{11}$ $= \dot{m}_{12}$ $\dot{m}_{16}$ $= \dot{m}_{17}$	$\dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{16} h_{16}$ $= \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{17} h_{17}$	$\dot{m}_{11} s_{11} + \dot{m}_{16} s_{16}$ $+ \dot{S}_{\dot{u},rt,ID-III}$ $= \dot{m}_{12} s_{12} + \dot{m}_{17} s_{17}$	$\dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{m}_{16} ex_{16}$ $= \dot{m}_{12} ex_{12} + \dot{m}_{17} ex_{17}$ $+ \dot{E}_{XY,ID-III}$
Pompa-I (P-I)	$\dot{m}_{12}$ $= \dot{m}_{13}$	$\dot{m}_{12} h_{12} + W_{P-I}$ $= \dot{m}_{13} h_{13}$	$\dot{m}_{12} s_{12} + \dot{S}_{\dot{u},rt,P-I}$ $= \dot{m}_{13} s_{13}$	$\dot{m}_{12} ex_{12} + W_{P-I}$ $= \dot{m}_{13} ex_{13} + \dot{E}_{XD,P-I}$
Jeneratör (Jen)	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ $\dot{m}_{20}$ $= \dot{m}_{21}$ $+ \dot{m}_{24}$	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{20} h_{20}$ $= \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{21} h_{21}$ $+ \dot{m}_{24} h_{24}$	$\dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_{20} s_{20}$ $+ \dot{S}_{\dot{u},rt,Jen}$ $= \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_{21} s_{21}$ $+ \dot{m}_{24} s_{24}$	$\dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_{20} ex_{20}$ $= \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_{21} ex_{21}$ $+ \dot{m}_{24} ex_{24} + \dot{E}_{XY,Jen}$
Kondenser (Kon)	$\dot{m}_{25}$ $= \dot{m}_{26}$ $\dot{m}_{28}$	$\dot{m}_{25} h_{25} + \dot{m}_{28} h_{28}$ $= \dot{m}_{26} h_{26} + \dot{m}_{29} h_{29}$	$\dot{m}_{25} s_{25} + \dot{m}_{28} s_{28}$ $+ \dot{S}_{\dot{u},rt,Kon}$ $= \dot{m}_{26} s_{26} + \dot{m}_{29} s_{29}$	$\dot{m}_{25} ex_{25} + \dot{m}_{28} ex_{28}$ $= \dot{m}_{26} ex_{26} + \dot{m}_{29} ex_{29}$ $+ \dot{E}_{XY,Kon}$

	$=\dot{m}_{29}$			
Genleşme valfi I (Gv-I)	$\dot{m}_{25} = \dot{m}_{26}$	$\dot{m}_{25}h_{25} = \dot{m}_{26}h_{26}$	$\dot{m}_{25}S_{25} + \dot{S}_{\dot{u}_{rt,Gv_I}}$ $=\dot{m}_{26}S_{26}$	$\dot{m}_{25}ex_{25}$ $=\dot{m}_{26}ex_{26} + Ex_{Y,Gv_I}$
Evaporatör (Eva)	$\dot{m}_{26}$ $=\dot{m}_{27}$ $\dot{m}_{30}$ $=\dot{m}_{31}$	$\dot{m}_{26}h_{26} + \dot{m}_{30}h_{30}$ $=\dot{m}_{27}h_{27} + \dot{m}_{31}h_{31}$	$\dot{m}_{26}S_{26} + \dot{m}_{30}S_{30}$ $+ \dot{S}_{\dot{u}_{rt,Eva}}$ $=\dot{m}_{27}S_{27} + \dot{m}_{31}S_{31}$	$\dot{m}_{26}ex_{26} + \dot{m}_{30}ex_{30}$ $=\dot{m}_{27}ex_{27} + \dot{m}_{31}ex_{31}$ $+ Ex_{Y,Eva}$
Absorber (Ab)	$\dot{m}_{23}$ $+ \dot{m}_{27}$ $=\dot{m}_{18}$ $\dot{m}_{32}$ $=\dot{m}_{33}$	$\dot{m}_{23}h_{23} + \dot{m}_{27}h_{27}$ $+ \dot{m}_{32}h_{32}$ $=\dot{m}_{18}h_{18} + \dot{m}_{33}h_{33}$	$\dot{m}_{23}S_{23} + \dot{m}_{27}S_{27}$ $+ \dot{m}_{32}S_{32} + \dot{S}_{\dot{u}_{rt,Ab}}$ $=\dot{m}_{18}S_{18} + \dot{m}_{33}S_{33}$	$\dot{m}_{23}ex_{23} + \dot{m}_{27}ex_{27}$ $+ \dot{m}_{32}ex_{32}$ $=\dot{m}_{18}ex_{18} + \dot{m}_{33}ex_{33}$ $+ Ex_{Y,Ab}$
Pompa-II (P-II)	$\dot{m}_{18}$ $=\dot{m}_{19}$	$\dot{m}_{18}h_{18} + W_{P-II}$ $=\dot{m}_{19}h_{19}$	$\dot{m}_{18}S_{18} + \dot{S}_{\dot{u}_{rt,P-II}}$ $=\dot{m}_{19}S_{19}$	$\dot{m}_{18}ex_{18} + W_{P-II}$ $=\dot{m}_{19}ex_{19} + Ex_{D,P-II}$
Genleşme valfi II (Gv-II)	$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{23}$	$\dot{m}_{22}h_{22} = \dot{m}_{23}h_{23}$	$\dot{m}_{22}S_{22} + \dot{S}_{\dot{u}_{rt,Gv_{II}}}$ $=\dot{m}_{23}S_{23}$	$\dot{m}_{22}ex_{22}$ $=\dot{m}_{23}ex_{23} + Ex_{Y,Gv_{II}}$
Isı değiştiricisi IV (ID-IV)	$\dot{m}_{19}$ $=\dot{m}_{20}$ $\dot{m}_{21}$ $=\dot{m}_{22}$	$\dot{m}_{19}h_{19} + \dot{m}_{21}h_{21}$ $=\dot{m}_{20}h_{20} + \dot{m}_{22}h_{22}$	$\dot{m}_{19}S_{19} + \dot{m}_{21}S_{21}$ $+ \dot{S}_{\dot{u}_{rt,ID-IV}}$ $=\dot{m}_{20}S_{20} + \dot{m}_{22}S_{22}$	$\dot{m}_{19}ex_{19} + \dot{m}_{21}ex_{21}$ $=\dot{m}_{20}ex_{20} + \dot{m}_{22}ex_{22}$ $+ \dot{Ex}_{Y,ID-IV}$

### 3.5 Enerji Verimlilik Analizi

Bir sistemin performans ölçüsü olarak enerji verimliliği ( $\eta$ ), faydalı enerji çıkışıyla giren enerji arasındaki enerji oranı olarak tanımlanabilir [11].

$$\eta = \frac{\Sigma \text{ faydalı enerji çıkışı}}{\Sigma \text{ giren enerji}} \quad (9)$$

ÇF-ORC, TEAS ve tüm sistemin enerji verimlilik denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\eta_{\text{ÇF-ORC}} = \frac{W_{net}}{\dot{m}_4(h_{13}-h_4) + W_{P,I}} \quad (10)$$

$$\eta_{TEAS} = \frac{\dot{Q}_{soğutma} + \dot{Q}_{sıcak su}}{2(h_2-h_3) + W_{P,II}} \quad (11)$$

$$\eta_{\text{Sistem}} = \frac{W_{net} + \dot{Q}_{soğutma} + \dot{Q}_{ısıtma} + \dot{Q}_{sıcak su}}{\dot{m}_1(h_1-h_3) + W_{P,I} + W_{P,II}} \quad (12)$$

Burada  $W_{net}$  sistemden üretilen toplam güç

olarak tanımlanır ve aşağıda ki gibi hesaplanabilir.

$$W_{net} = W_{Gen,I} + W_{Gen,II} + W_{Tür} \quad (13)$$

### 3.7 Ekserji Verimlilik Analizi

Ekserji verimliliği, tersinmezlikleri kayıplardan ayırdığı ve kayıpları azalttığı için sistem hakkında daha fazla bilgi sunar. Ekserji verimliliği analizi, enerji verimliliği analizine kıyasla sistemin daha iyi anlaşılmasını sağlar ve bu nedenle son zamanlarda daha sık kullanılan bir metottur [12].

$$\psi = \frac{\text{çıkan ekserji}}{\text{giren ekserji}} \quad (14)$$

ÇF-ORC, TEAS ve tüm sistemin ekserji verimlilik denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\psi_{\text{ÇF-ORC}} = \frac{W_{net}}{\dot{m}_4(ex_{13}-ex_4) + W_{P,I}} \quad (15)$$

$$E_{xQsoğutma} + E_{xQsıcak su}$$

$$\psi_{TEAS} = \frac{m}{2(ex_2 - ex_3) + W_{P,I}} \quad (16)$$

$$W_{net} + E_{xQsoğutma} + E_{xQısıtma} + E_{xQsıcak su}$$

$$\psi_{Sistem} = \frac{m}{m_1(ex_1 - ex_3) + W_{P,I} + W_{P,II}} \quad (17)$$

**3.8. Performans katsayısı** Tek etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminin verimlilik değerlendirme analizinde önemli bir yer tutan enerji performans katsayısı ( $COP_{en}$ ) ve ekserji performans katsayısı ( $\psi_{COP_{en}}$ ) aşağıdaki ifadeden hesaplanabilir.

Tablo 2. Bölgesel enerji sistemin ve alt sistemlerinin termodinamik analiz sonuçları

Alt sistemler	Ekserji yıkımı (kW)	Ekserji yıkım oranı (%)	Enerji verimliliği (%)	Ekserji verimliliği (%)
Jeotermal sistem	2840	21,55	42,27	48,34
ÇF-ORC sistemi	6475	49,14	18,82	23,17
TEAS sistemi	3862	29,31	16,24	14,37
Tüm sistem	13.177	100	38,28	36,39

$$(18) COP_{en} = \frac{Q_{Eva}}{Q_{jen} + W_{P,I}}$$

Soğutma sistemlerinin değerlendirilmesinde performans katsayılarının incelenmesi genellikle tercih edilen bir yoldur. Performans katsayıları hem enerji ve hem de ekserji analizine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Şekil 2'den görüldüğü üzere çevre sıcaklığı 5 °C'den 40 °C'ye yükseldiğinde, enerjetik COP sabit kalırken aynı sıcaklık değişiminden ekserjetik COP 0,3175'den 0,3875 değerine yükseldiği görülmektedir.

absorpsiyonlu soğutma sisteminin  $COP_{en}$  ve  $COP_{ex}$  değişimleri

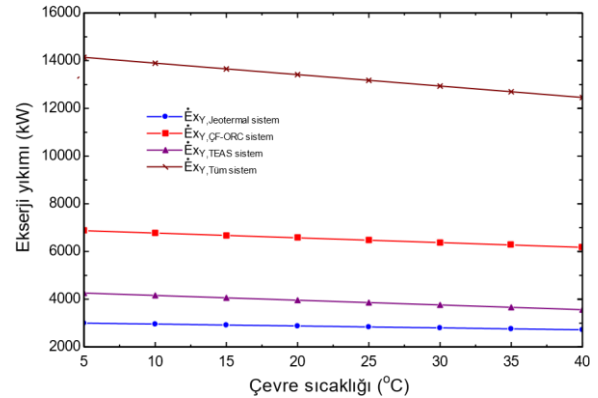
Çevre sıcaklığının entegre sistem ve alt sistemlerinin ekserji yıkım miktarlarına olan etkisi Şekil 3'de gösterilmiştir. İlgili şekilden görüleceği üzere çevre sıcaklığı 5 °C'den 40 °C'ye artığında jeotermal enerji destekli entegre sistem ve alt sistemlerinin ekserji yıkım miktarları azalmaktadır. Bunun nedeni tüm sistem ile alt sistemlerinin çevre ile olan sıcaklık farkının azalması neticesinde ısı kayıp transfer hızının azalmasıdır. Tüm sistemin ekserji yıkım miktarının belirtilen dış ortam sıcaklık değişimine bağlı olarak 14.136 kW değerinden 12.457 kW değerine azaldığı belirlenmiştir.

$$COP_{ex} = \frac{E_{xQsoğutma} + E_{xQısıtma} + E_{xQsıcak su}}{W_{P,I} + W_{P,II}} \quad (19)$$

#### 4. Sonuçlar ve tartışma

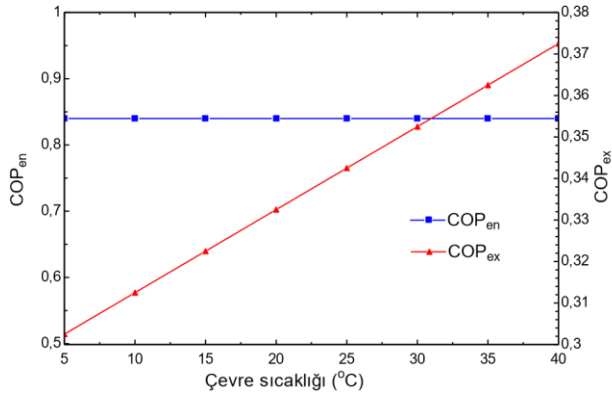
Bölgesel enerji sisteminin ve alt sistemlerinin ekserji yıkımları, ekserji yıkım oranları, enerji verimlilikleri ve ekserji verimlilikleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu tablodan görüleceği üzere en fazla ekserji yıkımı ve ekserji yıkım oranı çift fazlı organik Rankine çevriminde olmaktadır. Bu sonuçlara göre en fazla entegre sistem iyileştirmesinin burada yapılmasının gerekli olduğu görülmektedir. Jeotermal enerji dönüşüm alt sistemi en yüksek enerji ve ekserji verimlilik değerlerine sahiptir.

Bunun nedeni ise bölgesel enerji dönüşüm sistemine gerekli olan ısı gücü sağlıyor olmasıdır.



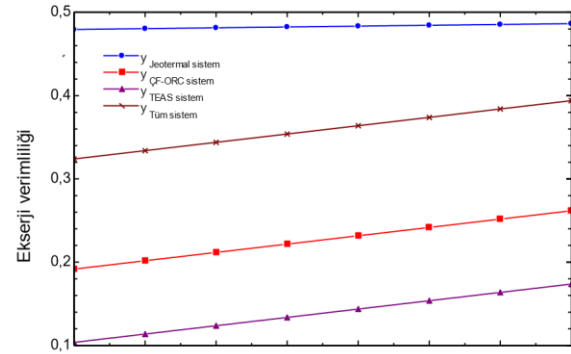
Şekil 3. Çevre sıcaklığının tüm sistem ve alt sistemlerin ekserji yıkım miktarları üzerine olan etkisi

Şekil 4'de çevre sıcaklığının tüm sistem ve alt sistemlerinin ekserji verimliliği üzerine olan etkisi gösterilmiştir. Çevre sıcaklığı 5 °C'den 40 °C'ye artığında jeotermal enerji alt sisteminin ekserji verimliliğinin en az değiştiği yani %47,92'den %48,64'e yükseldiği, ÇF-ORC alt sisteminin ekserji verimliliği %19,16'dan %26,17'ye arttığı,



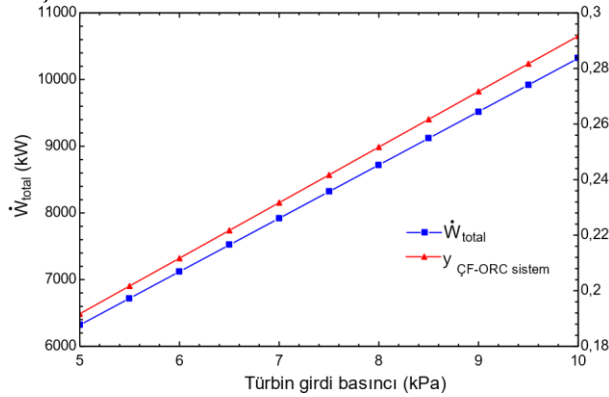
Şekil 2. Çevre sıcaklığına bağlı olarak TEAS alt sisteminin ekserji verimliliği %10,35'den %17,38'e yükseldiği ve son olarak tüm alt sistemin ekserji verimliliği %32,38'den %39,36 değerine arttığı belirlenmiştir.

ekserji verimliliğinin ise %32,38'den %39,36 değerine arttığı belirlenmiştir.



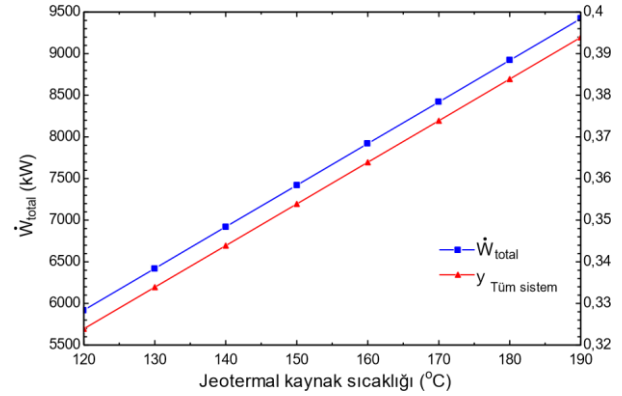
belirtilen değişimine bağlı olarak ÇFORC alt sisteminden sağlanan toplam güç üretiminin 5.915 kW değerinden 9.424 kW değerine yükseldiği belirlenmiştir. Aynı zamanda belirtilen miktardaki jeotermal akışkan sıcaklığının artması durumunda tüm sisteminin ekserji verimlilik değerinin %32,31'den %39,38'e kadar arttığı görülmüştür. Bunun nedeni artan jeotermal akışkan sıcaklığı ile daha fazla ısı girdisinin alt sistemlere aktarılıyor olmasıdır.

Şekil 4. Çevre sıcaklığının tüm sistem ve alt sistemlerin ekserji verimliliği üzerine olan etkisi Entegre sistemin en önemli tasarım parametresi olan türbin girdi basıncının toplam güç üretimi ve ÇF-ORC alt sistemin ekserji verimliliğine olan etkisi Şekil 5'de sunulmuştur. Sistemin çalışma basıncının 7 kPa olduğu göz önüne alındığında, şekilden görüldüğü üzere türbin girdi basıncının 5 kPa'dan 10 kPa değerine yükseldiğinde ÇF-ORC alt sisteminden toplam güç üretimi 6.310 kW değerinden 10.235 kW değerine yükselmektedir. Aynı zamanda belirtilen miktardaki türbin girdi basıncının artması durumu ÇF-ORC sisteminin ekserji verimlilik değerini %19,16'dan %29,18'e kadar değiştiği görülmüştür. Bunun nedeni ÇFORC alt sistemine ait olan türbinin girdi akışkanının entropi içeriğinin artan çalışma akışkan basıncı ile artmasıdır.



Şekil 5. Türbin girdi basıncının toplam güç üretimi ve ÇF-ORC alt sistemin ekserji verimliliğine olan etkisi

120 °C'den 190 °C'ye artan jeotermal kaynak sıcaklığının toplam güç üretimi ve tüm sistemin ekserji verimliliğine olan etkisi Şekil 6'da gösterilmiştir. Jeotermal akışkan sıcaklığının 150 °C olduğu kabul edildiği göz önüne alınırsa, şekilden görüldüğü üzere jeotermal akışkan sıcaklığının



Şekil 6. Jeotermal kaynak sıcaklığının toplam güç üretimi ve tüm sistemin ekserji verimliliğine olan etkisi

## 5. Değerlendirme

Bu çalışmada, jeotermal enerji destekli bölgesel enerji sistemi ihtiyaç duyulan elektrik, ısıtma, soğutma ve sıcak su üretimi için entegre sistemin tasarımı ve termodinamik analizi verilmiştir. Jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerjiye dayanan entegre sistem, fosil yakıt kullanan sistemlerden farklı olarak çıktı ürünlerinin arzında çevreyi kirletmediğinden insanlık için çok önemlidir. Jeotermal enerjiye dayalı entegre sistem tasarımının geliştirilmesi için termodinamik analize dayalı daha fazla araştırmaların yapılması gereklidir. Termodinamik değerlendirme çalışmaları, EES mühendislik yazılım programı ile



gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen çıktılar aşağıda verilmiştir.

- ÇF-ORC alt sisteminin ekserji yıkım miktarı diğer alt sistemlerden daha yüksektir.
- En yüksek ekserji verimliliğine jeotermal alt sistemi ulaşmaktadır.
- Çevre sıcaklığı entegre sistemin ve tüm alt sistemlerinin ekserji yıkım miktarlarını azaltırken ekserji verimliliklerini arttırmaktadır.
- Artan türbin girdi basıncı total güç üretimini ve ÇF-ORC sistem verimliliğini arttırmaktadır.
- Artan jeotermal kaynak sıcaklığı total güç üretimi ve entegre sistem ekserji verimliliği üzerine pozitif etkiye sahiptir.

#### KAYNAKLAR

1. Ozturk, M., Yuksel, Y.E. Energy Structure of Turkey for Sustainable Development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1259–1272, 2016.
2. Kanoglu, M., Bolatturk, A., Yilmaz, C. Thermodynamic analysis of models used in hydrogen production by geothermal energy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 35, 87838791, 2010.
3. Yuksel, Y.E., Ozturk, M. " Thermodynamic and thermoeconomic analyses of a geothermal energy based integrated system for hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), pp. 2530–2546, 2017.
4. Dai, Y., Wang, J., Gao, L., 2009. Parametric Optimization And Comparative Study of Organic Rankine Cycle (ORC) For Low Grade Waste Heat Recovery. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 576-582.
5. Gomri, R., 2010. Investigation of the Potential Application of Single Effect and Multiple Effect Absorption Cooling Systems. *Energy Conversion and Management*, 51(8), 1629-1636.
6. Rahim, M. A., Gündüz, D., 2013. Gaz Türbinli Bir Isıl-Güç (Kojenerasyon) Çevrim Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi: Ankara Şartlarında Uygulama. *Tübvav Bilim Dergisi*, 6(2), 19-27.
7. Dinçer İ., Rosen, M., 2013. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. Second edition . Waltham, USA: Elsevier.
8. Öztürk, M., Dinçer, İ., 2013. Thermodynamic Analysis of A Solar-Based Multi-Generation System with Hydrogen Production. *Applied Thermal Engineering*, 51 (1-2), 1235-1244
9. Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. Thermal design and optimization. Wiley-Interscience, 1995.
10. Moran, M.J., Shapiro, H., Boettner, D.D., Bailey, M.B. "Fundamentals of Engineering Thermodynamics" John Wiley and Sons: New York, 2011.
11. Öztürk, M., Dinçer, İ., 2013. Thermodynamic Assessment of An Integrated Solar Power Tower and Coal Gasification System for Multi-Generation Purposes. *Energy Conversion and Management*, 76, 1061-1072.
12. Dincer, I., Rosen, M.A., "Exergy Analysis of Heating, Refrigerating, and Air: Conditioning Methods and Applications" Elsevier, New York, 2015.