



Makale / Research Paper

**Flaş İkili Jeotermal Güç Üretim Santralinin
Termodinamik Analizi ve Performans Karşılaştırması**

Oğuzhan AKBAY^{1a}, Fatih YILMAZ^{2b*}

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta/Turkey

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Isparta/Turkey
akbayoguzhan@outlook.com

Received/Geliş: 09.10.2020

Accepted/Kabul: 10.12.2020

Öz: Bu çalışmada, jeotermal enerji destekli flaş ikili güç üretim çevriminin termodinamik analizi farklı akışkanlara göre incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, bir direk buhar türbini ve bir adet organik Rankine çevriminden meydana gelmektedir ve organik Rankine çevriminde n-bütan, izobütan ve izopentan soğutucu akışkanları kullanılarak performans karşılaştırılması incelenmiştir. Önerilen sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri ve ayrıca toplam tersinmezlikleri üç farklı akışkan türü için araştırılmıştır. Ayrıca, çevre sıcaklığı, jeotermal su çıkış sıcaklık ve basınç değerleri gibi parametrelerin değişiminin sistem verimlilikleri ve güç üretimi üzerine etkileri parametrik olarak araştırılmış ve sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, toplam güç üretimi n-bütan için 3624 kW, izobütan için 3613 kW ve izopentan için 3495 kW olarak hesaplanmıştır. Dahası, tüm sistem için, en yüksek enerji ve ekserji verimlilikleri n-bütan akışkanında sırasıyla 13.49% ve 51.97% olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal, enerji, ekserji, termodinamik, ORC

**Thermodynamic Analysis and Performance
Comparison of Flash Binary Geothermal Power Generation Plant**

Abstract: In this study, the thermodynamic analysis of the geothermal energy-assisted flash binary power generation cycle has been examined and compared according to different fluids. This study consists of a direct steam turbine and an organic Rankine cycle, and also performance comparison is investigated using n-butane, isobutane, and isopentane working fluids in the organic Rankine cycle. The energy and exergy efficiencies as well as the total irreversibility of the proposed system are investigated for three different fluids. In addition, the effects of changes in parameters such as environmental temperature, geothermal water outlet temperature, and pressure values on system efficiencies and power generation are investigated parametrically and the results are presented graphically. According to the analysis results, the total power generation rates are calculated as 3624 kW for n-butane, 3613 kW for isobutane, and 3495 kW for isopentane. Moreover, for the entire system, the highest energy and exergy efficiencies are calculated at 13.49% and 51.97% for the n-butane fluid, respectively.

Keywords: Geothermal, energy, exergy, thermodynamic, ORC.

1. Giriş

Sanayileşme, insan nüfusu ve teknolojik gelişmelerin eş zamanlı artması sonucunda, günümüzde enerjinin çeşitli şekillerde kullanımı da artmıştır. Enerji ihtiyacının artmasına paralel olarak fosil kökenli yakıtların kullanımı artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın 2019 yılında

Bu makaleye atıf yapmak için

Akbay, O., Yılmaz F., "Flaş İkili Jeotermal Güç Üretim Santralinin Termodinamik Analizi ve Performans Karşılaştırması", El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8(1); 445-461.

How to cite this article

Akbay, O., Yılmaz F., "Thermodynamic Analysis and Performance Comparison of Flash Binary Geothermal Power Generation Plant", El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8(1); 445-461.

ORCID ID: ^a0000-0002-4401-4266, ^b0000-0002-3307-8918

yayınlanmış olduğu rapora göre, 2015 yılında enerji üretimi için fosil kaynakların kullanımı dünya genelinde yaklaşık %80'dir[1]. Fosil kökenli yakıtlar içerisinde yüksek oranda karbon içerdikleri için, yanma sonucunda oluşan CO₂ ve diğer zararlı gazların salınımı ile çevreye vermiş olduğu zarar bilinen bir gerçektir. Bu zararlar, çevresel kirlilik, küresel ısınma, asit yağmurları, ozon tüketimi, iklim değişimi ve sera etkisi, vb., gibi çevresel etkileri de fosil kökenli yakıt kullanımı ile orantılı şekilde artmaktadır. Fosil kökenli yakıtların kullanımının sınırlandırılması ve çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir gelecek için, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaştırılması gerekmektedir. Güneş, rüzgâr, jeotermal, dalga, hidrolik ve biyokütle bilinen en yaygın yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.

Ayrıca, yenilenebilir enerji kullanımı 2020 yılın ilk çeyreğinde, 2019 yılının ilk çeyreğine göre %1.5 arttığı görülmektedir [2]. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde jeotermal enerji, genel olarak yer altı sularına aktarılan yeryüzünün termal enerjisi olarak tanımlanabilir [3]. Bu termal enerji yer altının çeşitli derinliklerinde, kimyasallar içeren gaz, buhar, sıcak su şeklinde hapsolan bir enerji çeşididir. Jeotermal enerji, elektrik üretimi, ısıtma, endüstri kullanımı, kimyasal madde üretimi, termal turizm gibi birçok alanlarda kullanılmaktadır. Yukarıda da bahsedildiği üzere, küresel ısınma gibi çevresel sorunlar ile mücadele edilmesi noktasında, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli bir yere sahip olması bakımından, özellikle, jeotermal enerji destekli elektrik, ısıtma, soğutma, kojenerasyon ve trijenerasyon gibi konularda literatürde sayısız çalışmalar vardır.

Siddiqui ve Dincer [4] tekliden dörtlüye değişen flaşlı jeotermal güç üretim santralının ekserjetik performanslarını karşılaştırmıştır. Onlar önerdikleri çalışmada, tekli, ikili, üçlü ve dört flaşlı jeotermal sistemi termodinamik açıdan incelemiştirler. Önerdikleri tekli, ikili, üçlü ve dörtlü sistemlerin enerji verimlilikleri sırasıyla %28, %25.5, %24.2 ve %23.5 olarak hesaplamışlardır. Analiz sonuçlarına göre, flaş sayısının artması ile hem enerji hem de ekserji verimliliklerinin düştüğünü anlaşılmaktadır. Gnaifaid ve Ozcan [5] ters ozmos ve absorpsiyonlu soğutma sistemi ile birleşik flaş ikili jeotermal güç üretim sistemini geliştirmişler ve optimizasyon çalışmasını yapmışlardır. Önerdikleri bu çalışmada, jeotermal enerji destekli güç, soğutma, ısıtma ve temiz su üretimini amaçlamışlardır. Ters ozmos, absorpsiyonlu soğutma sistemi, ve ORC alt sistemlerinden meydana gelen bu çalışmanın optimum ekserji verimi %58 olarak bulunmuştur.

Altun ve Kilic [6] jeotermal ORC güç üretim santralının termodinamik performans analizini incelemiştirler. Önerdikleri bu çalışmada, AFJET jeotermal güç santralının gerçek verileri üzerinden analizler yapmışlardır. Önerilen çalışmanın termodinamik analizini her bir sistem elemanın ve tüm sistemin enerji ve ekserji verimliliklerinin nasıl değiştiğini incelemek için yapmışlardır. Bu çalışmanın dönüşüm ve ekserji verimini sırasıyla %11.24 ve %39.03 olarak hesaplamışlardır. Jeotermal enerjinin, güç üretiminde ve direk ısıtma uygulamalarında kullanımını Moya vd. [7] detaylı bir şekilde incelenmiştir. Önerdikleri bu çalışmada, jeotermal enerji gelişimi, güç üretimi ve direk ısıtma uygulamalarda kullanımı açılarından, tek-flaşlı, iki-flaşlı, kuru-buhar, ikili ve gelişmiş olmak üzere beş farklı konfigürasyonda incelemiştirler. Elde ettikleri sonuçlara göre, ikili ORC sistemlerinin düşük sıcaklık uygulamalarında önemli rol oynadıklarını ifade etmişlerdir. Ratlamwala vd. [8] yeni jeotermal enerji destekli dört etkili soğutma sistemi ve hidrojen sıvılaştırma sistemleri ile entegre edilen güç üretim sisteminin termodinamik analizini incelemiştirler. Ayrıca, onlar jeotermal, ortam sıcaklığı ve amonyak-su buharı konsantrasyonunun sistem çıktıları ve verimliliklerine etkisini enerji ve ekserji analizleri ile incelenmiştir. Önerilen bu çalışma sonucunda göre, çevre sıcaklığının artması ile sıvılaştırılan hidrojen miktarı 0.2 kg/s 'den 0.05 kg/s'ye azaldığı gözlemlenmiştir. Yüksel vd. [9] hidrojen üretimi için, jeotermal enerji destekli güç üretim sisteminin enerji ve ekserji performanslarını araştırmışlardır. Önerilen çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan jeotermal enerji destekli hidrojen üretimini amaçlamışlardır. Bu çalışmada, kapsamlı bir termodinamik performans analizi yapmışlar ve önerilen sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %39.46 ve %44.27 olarak hesaplamışlardır.

Yılmaz ve Kanoglu [10] jeotermal enerji destekli hidrojen üretim sistemi olan PEM su elektrolizinin termodinamik analizini araştırmışlardır. Onlar önerdikleri çalışmada, ikili jeotermal güç üretim sistemi ile PEM elektroliz ünitesini entegre edere, enerji ve ekserji performansları bakımından incelemişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, tüm sistemin enerji verimi % 6.7 iken ekserji verimi ise %23.8 olarak hesaplanmıştır. Coskun vd. [11] yeni jeotermal enerji destekli çoklu üretim sistemlerinin yedi farklı kombinasyon için enerji ve ekserji analizini incelemişlerdir. Bu sistemler genel olarak, ısıtma ve soğutma dönemleri için iki ayrı ana grupta altında incelenmiş ve her bir sistemin detaylı akış şeması ve tabloları oluşturulmuştur. Önerilen sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri, tekli üretim seçeneği ile kıyaslanması sonucunda, soğutma sezonu için yaklaşık 3.40 ve 1.12 oranlarda artmıştır.

Gholizadeh vd [12] jeotermal enerji destekli flaş ikili trijenerasyon sistemini güç, soğutma ve tatlı su üretimi için incelemişlerdir. Önerdikleri bu çalışmada jeotermal enerji sıcaklığını 170 oC olarak hesaba katmışlar ve tüm sistemin ekserji verimliliğini %46.36 olarak bulmuşlardır. Ayrıca, bu sistemin topla ekserji yıkım oranını 946.7 kW olarak hesaplamışlardır. Yenilikçi bir çift flaşlı ikili kojenerasyon sisteminin termodinamik analiz ve çok amaçlı optimizasyonu Cao vd [13] tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmada ısı ve güç üretim sistemi tasarlanmış ve ayrıca, termodinamiğin birinci ve ikinci yasa analizleri ile performans değerlendirmesi incelenmiştir. Önerilen çalışmanın, enerji ve ekserji verimlilikleri aynı anda göz önüne alındığında optimize edilerek, üretilen net elektrik ve ekserji verimliliğinin sırasıyla %62.33 ve %57.79 oranında iyileştirilebileceği ifade edilmiştir. Ozturk ve Dincer [14] günlük kullandığı doğalgaza karıştırmak için hidrojen üretimini gerçekleştirmek amacı için jeotermal enerjisi destekli flaş ve ikili entegre güç üretim sisteminin tasarlamışlardır. Önerilen bu çalışmada jeotermal enerji destekli hidrojen üretimi için geliştirilmiştir. Tüm sistemin enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %46.8 ve %77.9 olarak bulunmuştur.

Yapılan literatür incelemesi sonucunda, jeotermal enerji destekli güç üretim sistemleri halen güncel konular arasında olduğundan, önerilen bu çalışmada, flaş ikili jeotermal güç üretim sisteminin termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın temel farkı, güç üretim santrali olan ORC sisteminde farklı n-bütan, izobütan ve izopentan akışkanlarına göre kapsamlı termodinamik performans analizi gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ayrıca, aynı şartlar altında üç farklı akışkanların enerji ve ekserji verimlilikleri ORC alt sistemleri ve tüm sistem için detaylı şekilde incelenerek termodinamik performansları karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmanın öne çıkan ana hedefleri ise aşağıdaki şekilde yazılabilir;

- Yeni flaş ikili jeotermal güç üretim sisteminin tasarlanması ve termodinamik analizi gerçekleştirmek.
- Önerilen sistemin enerji ve ekserji verimliliklerinin incelemek.
- n-bütan, izobütan ve izopentan akışkanları için tasarlanan sistemin performans karşılaştırılmasını yapmak.
- Üç farklı akışkana göre önerilen sistemin ekserji yıkım oranlarını ve güç üretimlerini belirlemek.

2. Sistem Tanımı

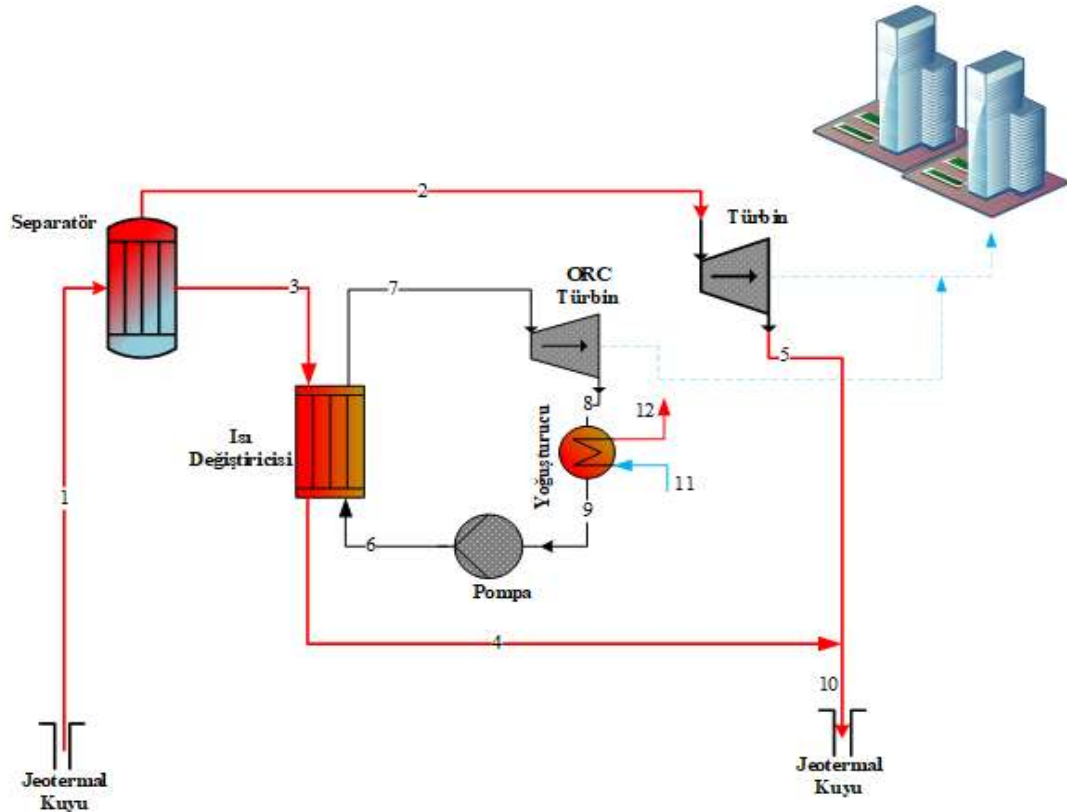
Önerilen bu çalışmada, flaş ikili jeotermal santral, bir buhar türbini ve organik Rankine çevrimi (ORC) olan alt sistemlerden meydana gelmektedir ve Şekil 1’de şematik gösterimi sunulmuştur. ORC çevrimi kısaca, bir türbin, bir pompa, bir yoğunlaştırıcı ve bir ısı değiştiricisinden meydana gelen düşük sıcaklık uygulamalarında elektriksel güç üretimi için yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu önerilen çalışmada, ORC akışkanı olarak n-bütan, izopentan ve izobütan soğutkanları tercih edilmiştir. Bu akışkanların termodinamik ve termofiziksel özellikleri Tablo 1 de gösterilmiştir. Hidrokarbon (HC) grubu olan bu soğutkanlar yanıcı olmasına rağmen, çevresel etki değerleri bakımından çevreci akışkan türü olarak adlandırılabilir.

Şekil 1’de önerilen flaş ikili jeotermal santralde, sıvı buhar faz karışımında 1 noktasından gelen jeotermal akışkan seperatöre girer ve burada akışkan 2 noktasında buhar fazında türbine giderken yüksek sıcaklıkta ki jeotermal akışkan 3 noktasında ısı değiştiricisine (ID) girer. 2 noktasında türbine giren jeotermal akışkan ile güç üretimi gerçekleşir. Devamında, 3 noktasında yüksek sıcaklıktaki jeotermal akışkan, ısısını burada ORC çalışma sıvısı olan soğutkana aktarır ve sonrasında ID çıkışında, yani 7 noktasında, ORC çalışma akışkanı buhar fazında ORC türbinine girer ve burada güç üretimi gerçekleşir.

Tablo 1. ORC sisteminde kullanılan akışkanların özellikleri [15,16]

Parametreler	n-Bütan (R600)	İzobütan (R600a)	İzopentan (R601a)
Kritik Sıcaklık (°C)	152.0	134.7	187.8
Kritik Basınç (kPa)	3800	3640	3390
Kaynama noktası Sıcaklığı (°C)	-0.5	-11.7	27.8
Molar kütle (g/mol)	58.12	58.12	72.15
Ozon Delme Potansiyeli (ODP)	0	0	0
Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	4	3	5

ORC türbin çıkışında 8 noktasındaki akışkan, 11 noktasında çevre şartlarında giren su ile yoğurturucuda ısısını aktarır ve yoğurtur. 9 noktasında ORC akışkanı doymuş sıvı fazında pompaya tekrar girer ve basınçlandırılmış şekilde 6 noktasında ID’ye girer. ID’den çıkan jeotermal akışkan 5 noktasından gelen jeotermal akışkan ile tekrar jeotermal kuyuya gönderilir. Önerilen sistem bu şekilde kısaca, sürekli olarak döngüsünü tamamlar ve sonucunda elektriksel güç üretimi gerçekleşmiş olur.



Şekil 1. Önerilen jeotermal enerji destekli güç üretim sisteminin şematik gösterimi

3. Termodinamik Analiz

Önerilen bu çalışmada, flaş ikili jeotermal bir santral için çeşitli parametrelerin önerilen sistem üzerine etkilerini incelenmek için termodinamik performans analizi yapılmıştır. Termodinamik

performans değerlendirilmesi yaparken enerji ve ekserji analiz metodu, farklı akışkanlar için incelenmiş ve Engineering Equation Solver (EES) adlı paket program kullanılmıştır [17]. Önerilen sistem bileşenlerine ayrı ayrı termodinamik denge denklemleri uygulanarak elde edilen güç üretimi her bir akışkan için hesaplanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada ORC sisteminde iş akışkan olarak n-bütan, izobütan ve izopentan tercih edilmiş ve bu akışkanlar termodinamik açıdan karşılaştırılmıştır. Bu hesaplamaları yapılması için, yapılan bazı kabuller aşağıda sıralanmıştır;

- Tüm sistemin kararlı durumda sürekli akışlı koşullar altında çalıştığı kabul edilmiştir.
- Çevrim boyunca basınç düşüşü ihmal edilmiştir
- Kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir
- Türbin ve pompalar abiyatik koşullar altında çalıştığı kabul edilmiştir
- Jeotermal akışkan saf su olarak kabul edilmiştir.

Önerilen bu sistemin termodinamik analizini gerçekleştirirken sistem için önerilen bazı kabuller Tablo 2’de verilmiştir. Bu kabuller eşliğinde, önerilen sistemin termodinamik analizini gerçekleştirmek için, genel kütle, enerji, entropi, ve ekserji denge bağıntıları göz önüne alınması gerekmekte ve bu bağıntılar aşağıda verilmiştir [18–20].

Tablo 2. Önerilen sistem için yapılan kabuller

Sistem parametreleri	Değer
Jeotermal çıkış basıncı (kPa)	300-1000
Jeotermal çıkış sıcaklığı (°C)	130-180
Jeotermal kütleli debi (kg/s)	50
Türbin izantropik verimi (%)	86
Pompa izantropik verimi (%)	85
Isı değiştiricisi Pich noktası sıcaklığı (°C)	5-20
ORC akışkanları	N-bütan/İzobütan/ İzopentan
Çevre sıcaklığı (°C)	20
Çevre basıncı (kPa)	101.325

Kütle dengesi;

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

Enerji dengesi;

$$\sum \dot{m}_g h_g + \sum \dot{W}_g + \sum \dot{Q}_g = \sum \dot{m}_ç h_ç + \sum \dot{W}_ç + \sum \dot{Q}_ç \quad (2)$$

Entropi dengesi;

$$\sum \dot{m}_g s_g + \sum \left(\frac{\dot{Q}}{T} \right)_g + \dot{S}_{\text{üretim}} = \sum \dot{m}_ç s_ç + \sum \left(\frac{\dot{Q}}{T} \right)_ç \quad (3)$$

Ekserji dengesi;

$$\sum \dot{m}_g ex_g + \sum \dot{E}x_g^W + \sum \dot{E}x_g^Q = \sum \dot{m}_ç ex_ç + \sum \dot{E}x_ç^W + \sum \dot{E}x_ç^Q + \dot{E}x_{\text{yıkım}} \quad (4)$$

Yukarıdaki sunulan denklemlerdeki “g” ve “ç” ile gösterilen alt indisler sistem elemanlarına giren ve çıkan ifadeleri tanımlar. Ayrıca, \dot{Q} , \dot{W} , h ve s ise ısı transfer oranı, iş oranı, spesifik entalpi ve spesifik entropi kavramlarıdır. Denklem (4)’de bahsedilen $\dot{E}x_{\text{yıkım}}$, $\dot{E}x^Q$ ve $\dot{E}x^W$ kavramları ise sırasıyla ekserji yıkım oranını, ısının ekserjisini ve işin ekserjisini ifade etmektedir ve aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

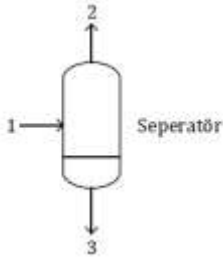
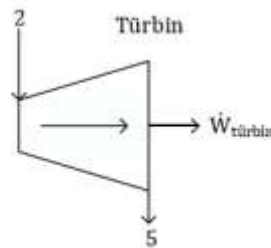
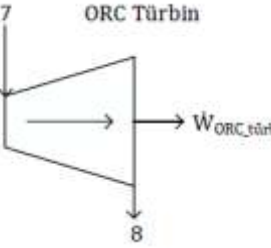
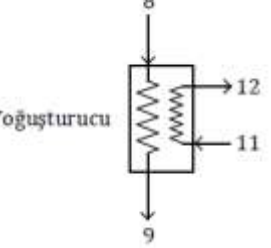
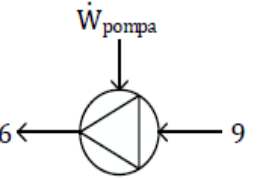
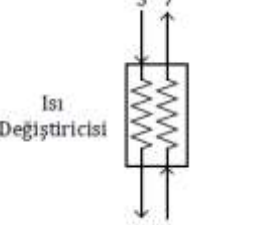
$$\dot{E}x_{\text{yıkım}} = \dot{S}_{\text{üretim}} T_0 \quad (5)$$

$$\dot{E}x^Q = \dot{Q} \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \quad (6)$$

$$\dot{E}x^W = \dot{W} \quad (7)$$

Önerilen sistemin alt elemanlarının kütle, enerji, entropi ve ekserji denge bağıntıları Tablo 3'de verilmiştir. Bu yöntem her bir sistem elemanı için ayrı ayrı EES paket programında uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Önerilen sistem alt elemanlarının termodinamik denge denklemleri

	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$ $\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3$ $\dot{m}_1 s_1 + \dot{S}_{\text{üretim,Sep}} = \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_3 s_3$ $\dot{m}_1 ex_1 = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_3 ex_3 + \dot{E}x_{\text{yıkım,Sep}}$
	$\dot{m}_2 = \dot{m}_5$ $\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_{\text{türbin}}$ $\dot{m}_2 s_2 + \dot{S}_{\text{üretim,türbin}} = \dot{m}_5 s_5$ $\dot{m}_2 ex_2 = \dot{m}_5 ex_5 + \dot{W}_{\text{türbin}} + \dot{E}x_{\text{yıkım,türbin}}$
	$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$ $\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{W}_{\text{ORC_türbin}}$ $\dot{m}_7 s_7 + \dot{S}_{\text{üretim,ORC_türbin}} = \dot{m}_8 s_8$ $\dot{m}_7 ex_7 = \dot{m}_8 ex_8 + \dot{W}_{\text{ORC_türbin}} + \dot{E}x_{\text{yıkım,ORC_türbin}}$
	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 ; \quad \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$ $\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{12} h_{12}$ $\dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_{11} s_{11} + \dot{S}_{\text{üretim,yoğuşturucu}} = \dot{m}_9 s_9 + \dot{m}_{12} s_{12}$ $\dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_{11} ex_{11} = \dot{m}_9 ex_9 + \dot{m}_{12} ex_{12} + \dot{E}x_{\text{yıkım,yoğuşturucu}}$
	$\dot{m}_9 = \dot{m}_6$ $\dot{m}_9 h_9 + \dot{W}_{\text{pompa}} = \dot{m}_6 h_6$ $\dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{\text{üretim,pompa}} = \dot{m}_6 s_6$ $\dot{m}_9 ex_9 + \dot{W}_{\text{pompa}} = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{E}x_{\text{yıkım,pompa}}$
	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 ; \quad \dot{m}_6 = \dot{m}_7$ $\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_4 h_4$ $\dot{m}_6 s_6 + \dot{m}_3 s_3 + \dot{S}_{\text{üretim,ısı değ.}} = \dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_4 s_4$ $\dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_3 ex_3 = \dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{\text{yıkım,ısı değ.}}$

Spesifik akış ekserjisi aşağıda denklem 8'deki gibi hesaplanabilir;

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (8)$$

Önerilen sistemden elde edilen net iş üretimi ve aynı zamanda enerji ve ekserji verimlilikleri aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{t\ddot{u}rbin} + \dot{W}_{ORC_t\ddot{u}rbin} - \dot{W}_{pompa} \quad (9)$$

$$\eta_{sistem} = \frac{\text{sistemden elde edilen enerji}}{\text{sisteme sağlanan enerji}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{10} h_{10}} \quad (10)$$

$$\psi_{sistem} = \frac{\text{sistemden elde edilen ekserji}}{\text{sisteme sağlanan ekserji}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_1 ex_1 - \dot{m}_{10} ex_{10}} \quad (11)$$

burada, η_{sistem} ve ψ_{sistem} önerilen tüm sistemin enerji ve ekserji verimlerini ifade eder.

4. Bulgular ve Tartışma

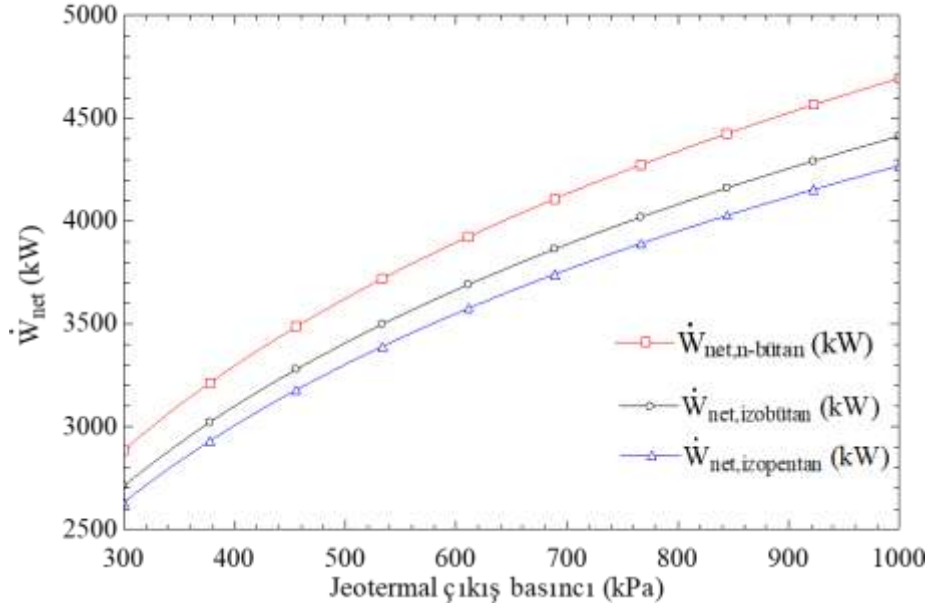
Önerilen bu çalışmada, jeotermal enerji destekli flaş ikili kombine güç çevriminin farklı akışkanlar için termodinamik performans analizi gerçekleştirilmiş, enerji ve ekserji verimlilikleri açısından karşılaştırılmıştır. Bu sistemde alt çevrim olan ORC çevriminde, n-bütan, izobütan ve izopentan akışkanları çalışma sıvısı olarak tercih edilmiş ve Engineering Equation Solver (EES) yazılım programı ile analizleri yapılmıştır[17]. Ayrıca, jeotermal çıkış basıncı ve sıcaklığı, çevre sıcaklığı, türbin izantropik verim değişimi gibi parametrelerin önerilen sistem verimliliklerine etkisi kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Tablo 2'de sunulan kabuller eşliğinde, önerilen sistemin üç farklı akışkana göre net güç üretimi, enerji ve ekserji verimlilikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar ve Tablo 4'de sunulmuştur. Termodinamik analiz sonuçlarına göre, önerilen sistemden elde edilen net güç üretimi sırasıyla izobütan için 3613 kW, izopentan için 3495 kW ve n-bütan için 3624 kW olarak hesaplanmıştır. Aynı soğutucu akışkanlar için tüm sistemin ekserji verimi ise aynı sıralama için 51.87%, 50.06% ve 51.97% olarak hesaplanmıştır. Önerilen sistem içerisinde en yüksek enerji verimi ise n-bütan soğutucu akışkanında görülmüştür. N-bütan ve izobütan akışkanlarının termodinamik özellikleri birbirlerine oldukça yakın olmasından dolayı, önerilen bu güç üretim sisteminde performans değerleri birbirlerine yakın çıktığı sonucuna varılabilir. Bu akışkanların en önemli özellikleri ise ODP ve GWP değerleri olan çevresel etkilerinin daha düşük olmasıdır. Bu üç akışkan içerisinde performans bakımından n-bütan akışkanın öne çıktığı sonucuna varılabilir.

Tablo 4. Önerilen sistem ve alt sistemlerin termodinamik analiz sonuçları farklı akışkanlar

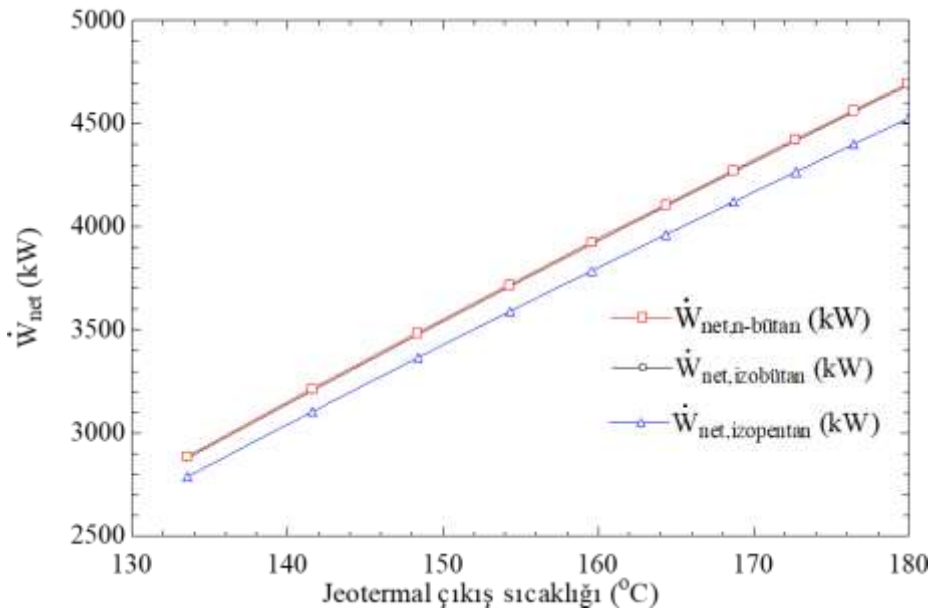
Akışkanlar	Net Güç Üretimi (kW)	ORC		Toplam		
		Enerji Verimi	Ekserji Verimi	Enerji Verimi	Ekserji Verimi	Ekserji Yıkımı (kW)
İzobütan	3613	10.79	47.98	13.48	51.87	1945
İzopentan	3495	9.98	44.65	12.98	50.06	1882
n-bütan	3624	10.79	48.12	13.49	51.97	1875

Jeotermal çıkış basıncı ve jeotermal çıkış sıcaklığı önerilen sistemden elde edilen güç üretimine etkisi, üç farklı soğutucu akışkan için, incelenmiş ve Şekil 2 ve Şekil 3'de sunulmuştur. Şekil 2'de jeotermal çıkış basıncı ile sistemden elde edilen güç üretim oranlarının değişimi verilmiştir. Sunulan Şekil 'den açıkça anlaşıldığı gibi, jeotermal çıkış basıncının artması ile tasarlanan sistemden elde edilen güç üretimi lineer bir şekilde artmıştır. Bu grafiğe benzer bir olay, yine Şekil 3 de jeotermal çıkış sıcaklığı ile önerilen sistemden elde edilen güç üretimindeki artıştır. Üretim kuyusundan çıkan jeotermal akışkanın basıncın artması ile sıcaklığının artmakta ve buna bağlı

olarak önerilen sistemlerin türbinlerine daha yüksek sıcaklıkta, yani yüksek entalpide, akışkan girdiği için güç üretimi artmakta olduğu açıkça ifade edilebilir. En yüksek güç üretimi ise n-bütan akışkanının kullanılması sonucunda elde edildiği görülmektedir. Jeotermal çıkış basıncı ve sıcaklık artışının sistemden elde edilen güç üretimi üzerinde pozitif etkiye sahip olduğu açıkça ifade edilebilir.



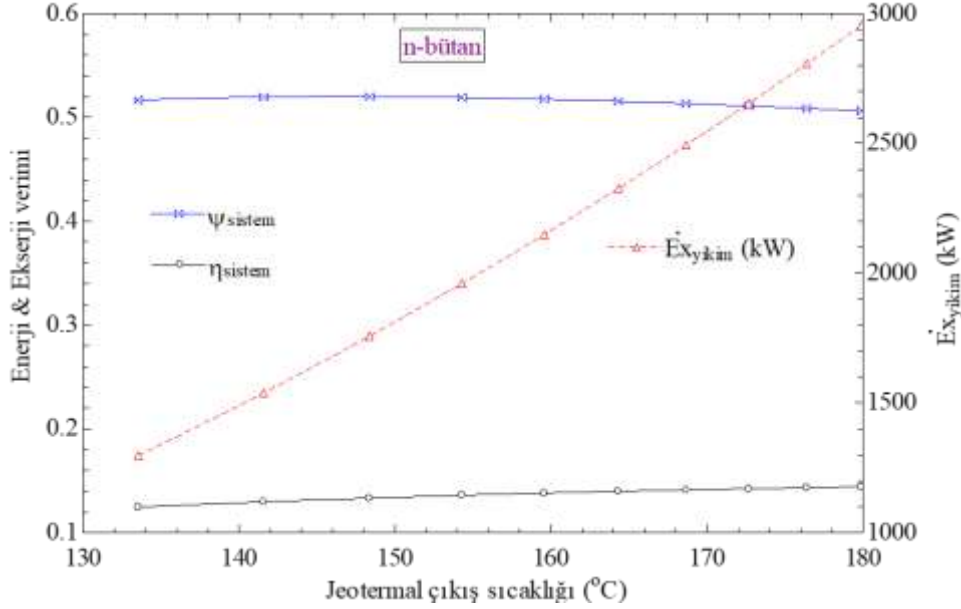
Şekil 2. Jeotermal akışkan çıkış basıncına göre sistem güç üretimi



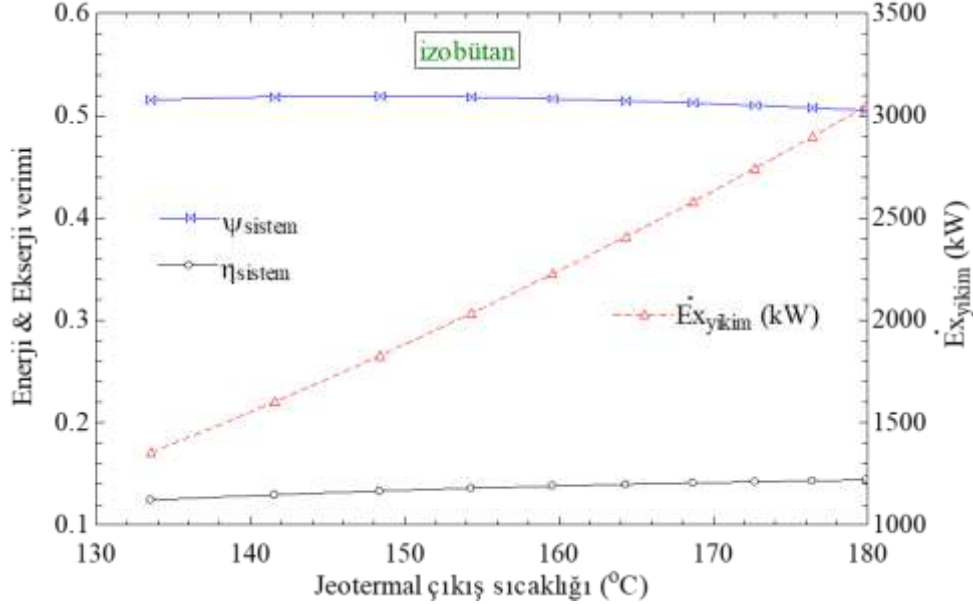
Şekil 3. Jeotermal akışkan çıkış sıcaklığına göre sistem güç üretimi

Şekil 4,5 ve 6'da jeotermal çıkış sıcaklığının önerilen sistemin ekserji yıkım oranı ve performans değişimi üzerine etkileri, sırasıyla n-bütan, izobütan ve izopentan akışkanları için, araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek ekserji verimi sırasıyla n-bütan (Şekil 4), izobütan (Şekil 5) ve izopentan (Şekil 6) akışkanlarında görülmüştür. Önerilen bu şekillerde her üç akışkan için, jeotermal su çıkış sıcaklığının artması sonucunda ekserji veriminde ufak bir azalma olurken, ekserji yıkım oranları beklenen şekilde artmıştır. Jeotermal su sıcaklığı 130 °C den 180 °C ye artması ile, Şekil 5'de izobütan için, ekserji yıkım oranı lineer bir şekilde yaklaşık 1500 kW artmıştır. Yine

Şekil 6'da ise izopentan akışkanı için benzer bir trend görülmektedir. Önerilen bu grafiklerden, jeotermal su sıcaklığının artması ile sistemlerden elde edilen güç üretimi artmakta ve buna bağlı olarak enerji verimliliği arttığı görülmektedir. Fakat, yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça sisteme giren entalpi değeri arttığı için ekserji yıkım oranı artmış ve ekserji verimliliği düşük bir oranda da olsa azalmaktadır.



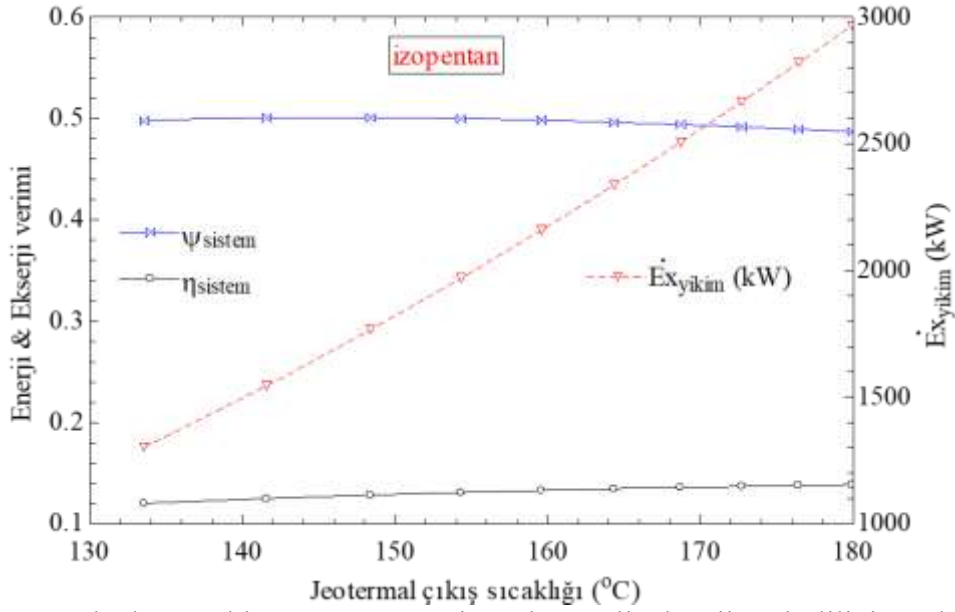
Şekil 4. Jeotermal çıkış sıcaklığına göre tüm sistemin enerji, ekserji verimliliği ve ekserji yıkım oranının n-bütan için değişimi



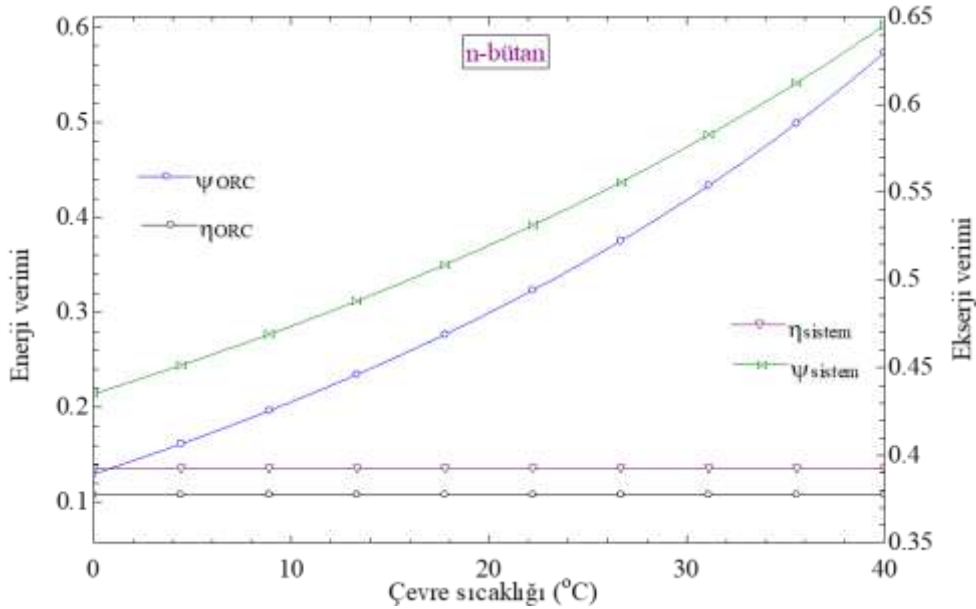
Şekil 5. Jeotermal çıkış sıcaklığına göre tüm sistemin enerji, ekserji verimliliği ve ekserji yıkım oranının izobütan için değişimi

Çevre sıcaklığının değişimi termal sistem tasarımı için oldukça önemli parametrelerden birisidir. Şekil 7'de, n-bütan akışkanı için, çevre sıcaklığının 0 °C den 40 °C ye artması ile hem ORC hem de tüm sistemin enerji ve ekserji verimliliklerinin değişimi incelenmiş ve sunulmuştur. ORC ve tüm sistemin enerji verimliliğinde ciddi bir değişim görülmez iken ekserji verimliliklerinde ise lineer bir artış görülmüştür.

Çevre sıcaklığının bu artış aralığında, tüm sistemin ekserji verimliliği yaklaşık 0.45'den yaklaşık 0.62'ye arttığı açıkça görülmektedir. Bu artışın temel sebebi ise, sistem ile çevre arasında daha düşük sıcaklık farkı meydana gelmesi ve sistemde meydana gelen tersinmezliklerin azalması olarak ifade edilebilir. Şekil 8'de, izobütan akışkanı için, çevre sıcaklığının 0 °C den 40 °C ye artması ile hem ORC hem de tüm sistemin enerji ve ekserji verimliliklerinin değişimi incelenmiştir. ORC ve tüm sistemin enerji verimliliğinde ciddi bir değişim görülmez iken, ekserji verimliliklerinde ise lineer bir artış görülmüştür.



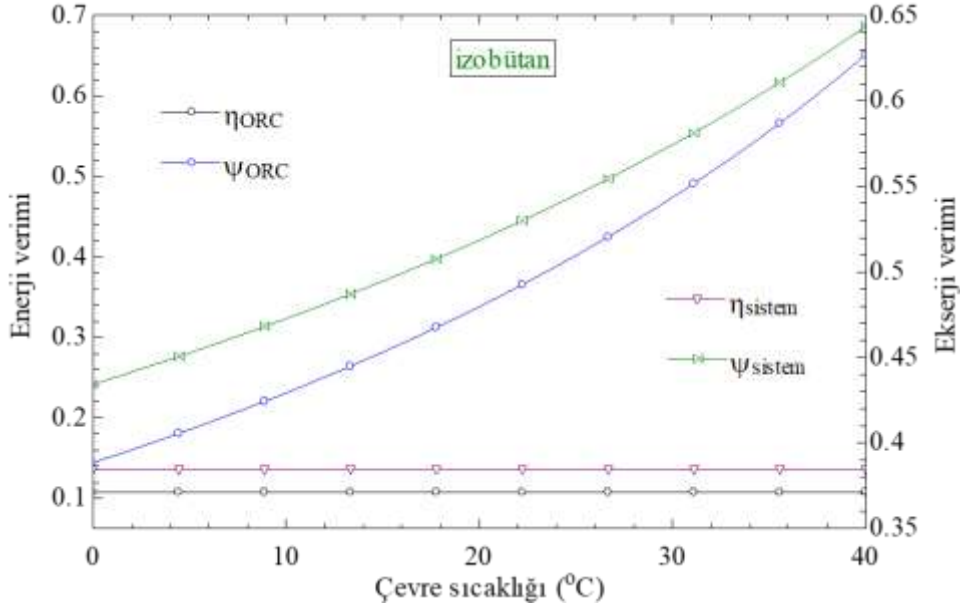
Şekil 6. Jeotermal çıkış sıcaklığına göre tüm sistemin enerji, ekserji verimliliği ve ekserji yıkım oranının izopentan için değişimi



Şekil 7. Çevre sıcaklığına göre ORC ve tüm sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri (n-bütan)

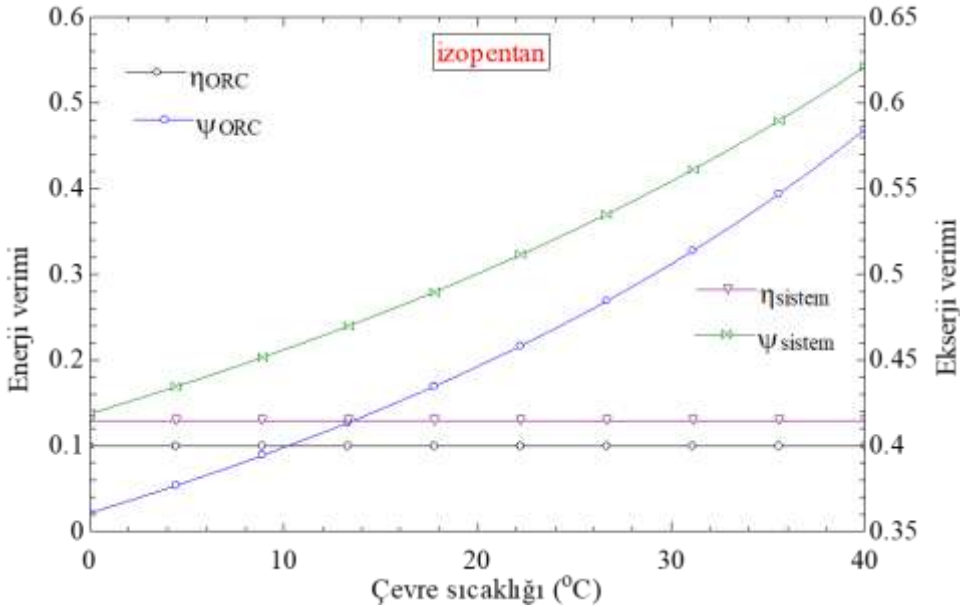
Çevre sıcaklığının bu artış aralığında, Şekil 7'ye benzer şekilde, tüm sistemin ekserji verimliliği yaklaşık 0.44'den yaklaşık 0.62'ye arttığı açıkça görülmektedir. Bu artışın temel sebebi ise, yine Şekil 7'deki gibi, çevre sıcaklığının artması ile sistemde meydana gelen tersinmezliklerin azalmasıdır.

Çevre sıcaklığının 0 °C den 40 °C ye artması ile önerilen ORC ve tüm sistemin performans değişimi, izopentan akışkanı için, Şekil 9 'da gösterilmiştir. Bu önerilen çalışmada, ORC sisteminde kullanılan aracı akışkan olan izopentan için, çevre sıcaklığının değişimi ile sistem performans değişimi diğer iki akışkanda olduğu gibi (Şekil 7 ve 8), aynı trende sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 8. Çevre sıcaklığına göre ORC ve tüm sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri (izobütan)

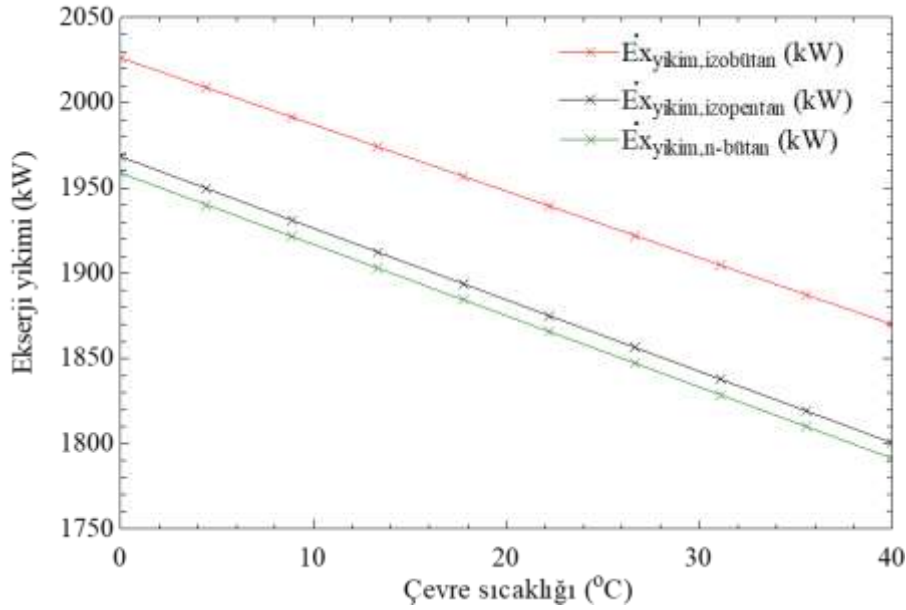
Çevre sıcaklığının artması ile ekserji verimliliği arttığı açıkça görülmektedir. Kısaca, çevre sıcaklığının artması önerilen bu sistem üzerinde, her üç akışkan için, pozitif bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 9. Çevre sıcaklığına göre ORC ve tüm sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri (izopentan)

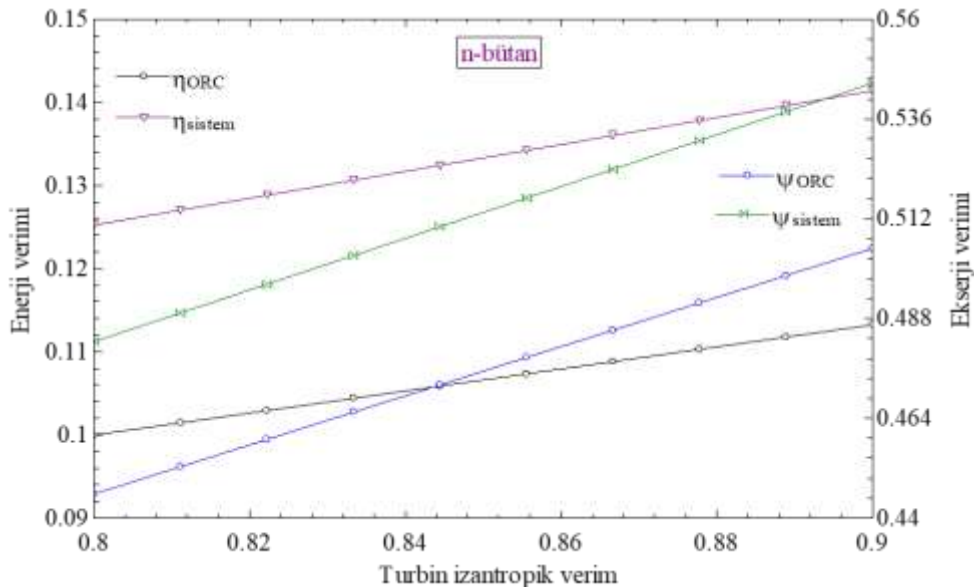
Çevre sıcaklığı değişiminin sistem üzerindeki etkilerinin incelendiği son grafik ise Şekil 10'dur. Çevre sıcaklığının 0 °C den 40 °C ye artması ile önerilen sistemin ekserji yıkım oranlarının değişimi, üç farklı akışkana göre, Şekil 10'da gösterilmektedir. Buradan anlaşıldığı üzere, çevre sıcaklığının artması ile ekserji yıkım oranlarının net bir şekilde düştüğü açıktır. En yüksek ekserji

yıkımı yine izobütan akışkanında görülürken, en düşük ekserji yıkımı ise n-bütan akışkanında görülmektedir.



Şekil 10. Çevre sıcaklık değişimine göre önerilen sistemin toplam ekserji yıkım oranı

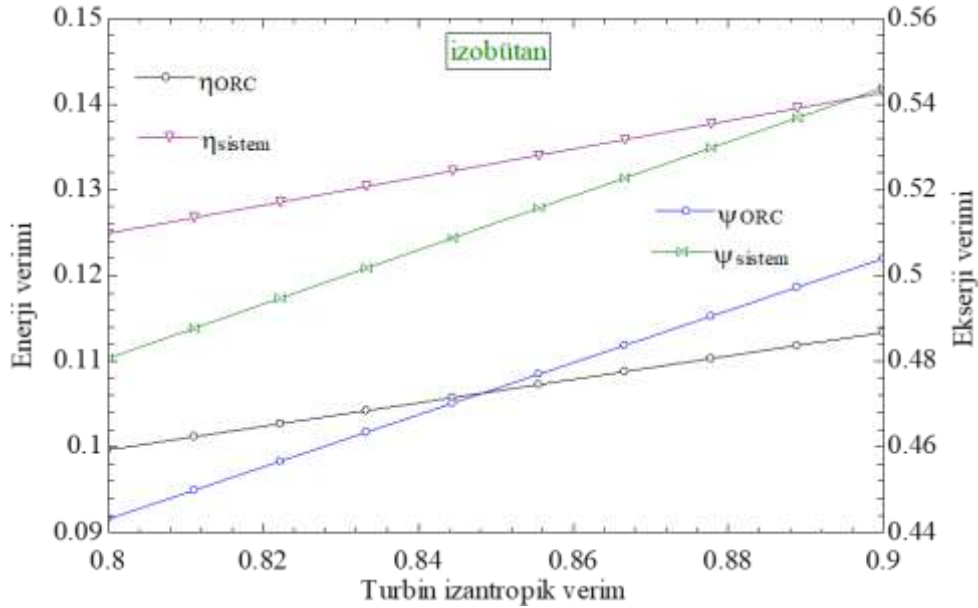
Bu çalışmada, seperatörden buhar fazında ayrılan akışkanın gittiği buhar türbini ve ORC sistemindeki türbin olmak üzere iki adet türbin vardır ve güç üretimi burada elde edilmektedir. Bu yüzden, türbinin izantropik verim değişimi ORC alt sistem ve tüm sistemin performansı üzerine etkisi her üç akışkan için incelenmiştir. Şekil 11'de türbin izantropik veriminin %80 den %90'a artması ile ORC ve tüm sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri n-bütan akışkanı için artmaktadır. Bu artışın sebebi, türbin izantropik verimin artması ile türbinde meydana gelen iş üretimi artmakta ve buna bağlı olarak önerilen sistemin enerji ve ekserji verimliliği artar.



Şekil 11. Türbin izantropik verim değişimine göre tüm sistem ve alt sistemlerin enerji ve ekserji verimliliği

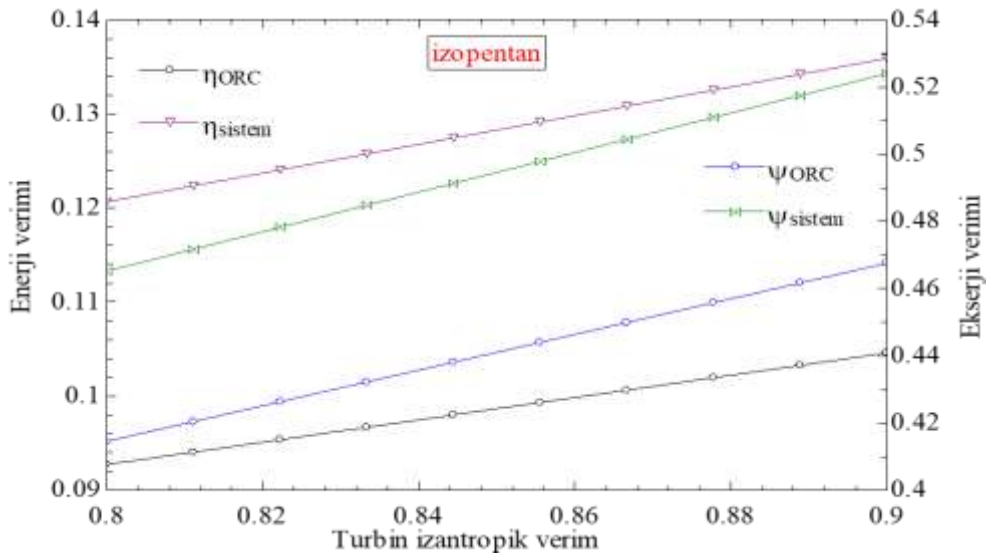
Şekil 12'de türbin izantropik veriminin %80 den %90'a artması ile ORC ve tüm sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri, izobütan akışkanı için, artmaktadır. Türbin izantropik verimliliğindeki bu artış aralığında, tüm sistemin enerji verimi yaklaşık 0.12'den 0.14'e artarken ekserji verimliliği de

yaklaşık 0.48'den 0.54'e artmaktadır. Bu artışın sebebi, türbin izantropik verimin artması ile türbinde meydana gelen iş üretimi artmakta ve buna bağlı olarak önerilen sistemin enerji ve ekserji verimliliği artar.



Şekil 12. Türbin izantropik verim değişimine göre tüm sistem ve alt sistemlerin enerji ve ekserji verimliliği

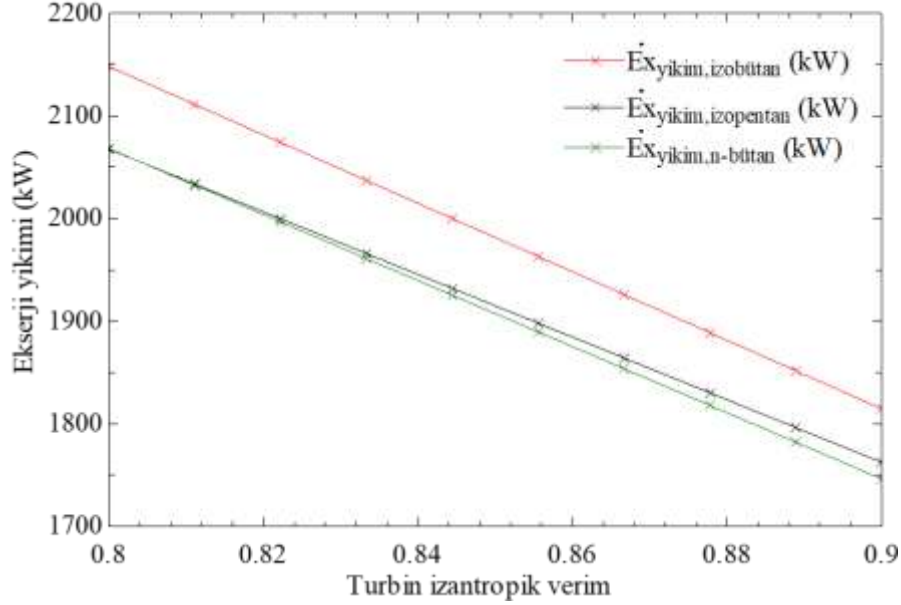
Yine, Şekil 13'de türbin izantropik veriminin %80 den %90'a artması ile ORC ve tüm sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri, izopentan akışkanı için, lineer bir şekilde artmaktadır. Türbin izantropik veriminin artması ile, tüm sistemin enerji verimi yaklaşık 0.12'den 0.135'e artarken, ekserji verimliliği de yaklaşık 0.48'den 0.52'e artmaktadır. Yukarıda izobütan akışkanındaki artışa göre, önerilen bu sistemde izopentan kullanılması sonucunda bu artış daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bu artışın sebebi, türbin izantropik verimin artması ile türbinde meydana gelen iş üretimi artmakta ve buna bağlı olarak önerilen sistemin enerji ve ekserji verimliliği artar.



Şekil 13. Türbin izantropik verim değişimine göre tüm sistem ve alt sistemlerin enerji ve ekserji verimliliği

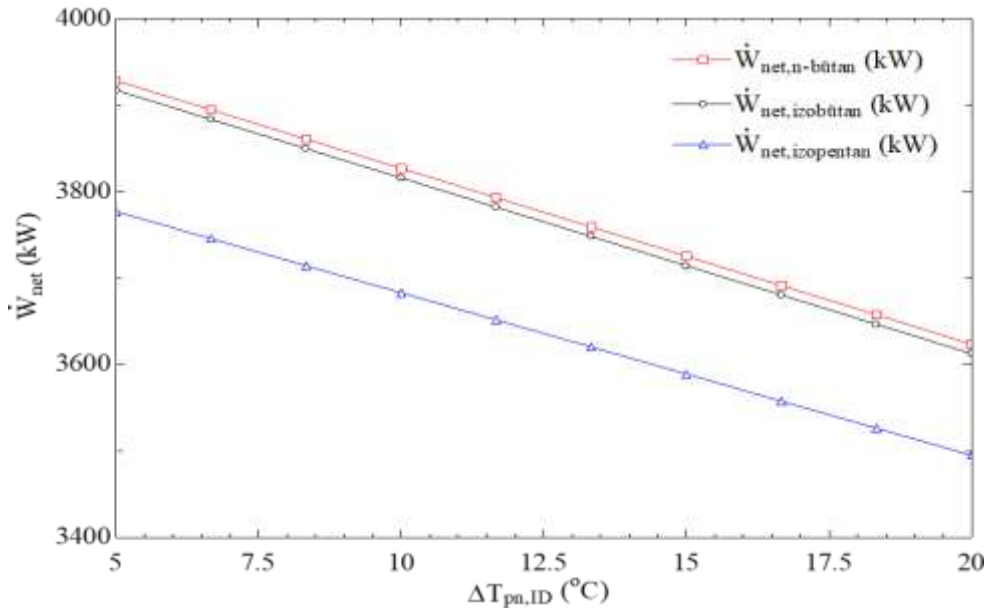
Önerilen bu çalışmada, ayrıca, türbin izantropik verim artışının önerilen sistemin toplam ekserji yıkım oranlarına etkisi, üç farklı akışkan için, incelenmiş ve Şekil 14'de sunulmuştur. Bu şekilden

açıkça görüldüğü gibi, izantropik verimin %10 artması ile her üç akışkan içinde tüm sistemin ekserji yıkım oranları lineer şekilde azalma eğilimindedir. Sistemde üretilen toplam tersinmezlikler, izantropik türbin veriminin artması ile azaltılması mümkün olacağı sonucunda varılabilir. Elde edilen sonuçlara göre, açıkça yüksek verimli türbinlerin tercih edilmesi ile hem daha fazla elektriksel güç üretiminin gerçekleşmesi hem de sistemlerin performanslarının artırılmasının mümkün olabileceği açıkça ifade edilebilir.



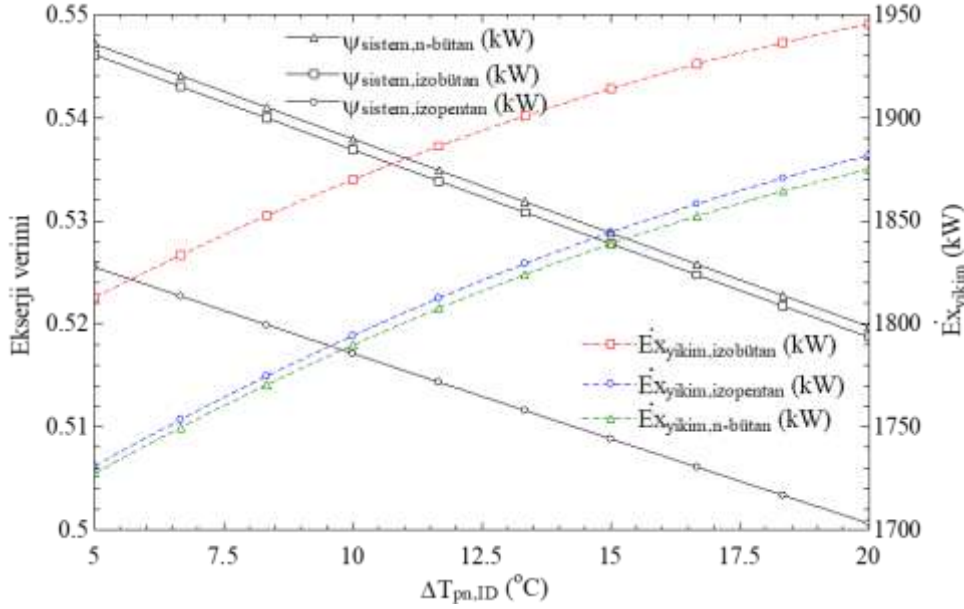
Şekil 14. Türbin izantropik verim değişimine göre önerilen sistemin toplam ekserji yıkım oranı

Önerilen bu çalışmada, ele alınan parametrelerden bir diğeri ise ısı değiştiricisinin pinch noktası sıcaklığının değişimidir. Şekil 15’de ID’nin pinch noktası sıcaklığının 5 °C den 20 °C ye artması ile önerilen sistemden elde edilen güç üretiminin değişimi incelenmiştir. ID’nin pinch noktası sıcaklığının artması ile 7 noktasından ORC türbinine giden akışkanın sıcaklığı ile jeotermal akışkan arasındaki sıcaklık farkı artmakta ve buna bağlı olarak güç üretimi düşmektedir. Her üç akışkan içinde elde edilen güç üretimini azaldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 15. Isı değiştirici Pich noktası sıcaklık farkına göre tüm sistemi güç üretimi

Ele alınan bu çalışmanın son grafiği olan Şekil 16'da ID'nin pinch noktası sıcaklığı ile önerilen sistemin ekserji verimi ve toplam tersinmezlik oranları değişimi, üç akışkan için, araştırılmıştır. Pinch noktası sıcaklığının artması ile önerilen sistemin ekserji verimliliği azalmaktadır ve ayrıca ekserji yıkım oranı ise artmaktadır. N-bütan akışkanı için, pinch noktası sıcaklığındaki 20 °C'lik artış, sistemin ekserji veriminde yaklaşık %3 lük bir düşüşe sebep olmuştur. ID termodinamik hesaplamalarında pinch noktası sıcaklığının değişiminin önemli parametrelerden birisidir ve bu değerin artması ile sistem performansını düştüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 16. Isı değiştirici Pich noktası sıcaklık farkına göre tüm sistemin ekserji verimi ve ekserji yıkım oranları

5. Sonuçlar

Önerilen bu çalışmada, jeotermal enerji destekli flaş ikili güç üretim çevriminin termodinamik performans analizi gerçekleştirilmiş ve n-bütan, izobütan ve izopentan akışkanlarına göre enerji ve ekserji verimlilikleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı, temiz ve sürdürülebilir bir metot olan jeotermal enerji ile güç üretiminin termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarına göre araştırılmasıdır. Temel olarak iki alt sistem oluşan bu çevrim, bir buhar türbini ve bir ORC alt sistemlerinden meydana gelmektedir. ORC alt sisteminde, ODP değerleri sıfır olan soğutucu akışkanların güç üretimi incelenmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. Önerilen sistemin jeotermal su çıkış basıncı ve sıcaklığı, çevre sıcaklığı ve türbin izantropik verimliliği gibi bazı önemli parametrelerinin, sistem performansı üzerine etkileri incelenmiştir.

Elde edilen termodinamik analiz sonuçlarına göre, önerilen bu sistemin toplam ekserji yıkım oranı n-bütan, izobütan ve izopentan akışkanları için sırasıyla 1875 kW, 1945 kW ve 1882 kW'dır. Ayrıca, bu akışkanlar için, aynı sıralamada, tüm sistemin enerji verimliliği 13.49%, 13.48% ve 12.98% olarak hesaplanmıştır. Bu üç akışkan içerisinde en yüksek enerji verimliliği n-bütan akışkanında olduğu görülmüştür. Önerilen sistemden elde edilen güç üretimi n-bütan için 3624 kW, izobütan için 3613 kW ve izopentan için 3495 kW olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, ORC alt sisteminin ekserji verimliliği ise n-bütan için %48.12%, izobütan için %47.98 ve izopentan için %44.65 olarak hesaplanmıştır. Bu üç akışkan içerisinde n-bütan akışkanının öne çıktığı sonucuna varılabilir.

Ayrıca, jeotermal çıkış basıncı ve sıcaklığının artması ile önerilen sistemden elde edilen güç üretimi de artmıştır. Türbin izantropik veriminin artması ile tüm sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri

arttığı görülmektedir. Sonuç olarak, önerilen bu çalışmada n-bütan akışkanının hem güç üretimi hem de performans bakımından en ideal akışkan olduğu sonucuna varılabilir. Diğer akışkanlar içerisinde n-bütan akışkanı en yüksek güç üretimi ve verimlilik değerine sahiptir. ODP değerinin sıfır olması, GWP değerinin de dört olması, bu akışkanın ve ORC sisteminde tercih edilen diğer akışkanların çevreci bir akışkan olduğu sonucuna varılabilir.

Küresel ısınma, ozon tüketimi ve asit yağmurları gibi çevresel sorunlar, günümüzde, insanlık nüfusunun artması ve sanayileşme gibi birçok etkene bağlı olarak artış halinde olduğu bilinen bir gerçektir. Bunların engellenebilmesi ve insanlığın daha temiz ve sürdürülebilir bir geleceğe kavuşması için jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklı sistemlere yönelmesi kaçınılmazdır. Bu sistemlerde de iş akışkanı seçiminde, yalnızca termodinamik performansına değil aynı zamanda çevresel etkilerine bakılması gerekmektedir.

Kaynaklar

- [1]. World Banka Data. International Energy Agency, (IEA) Fossil fuel energy consumption (% of total) | Data n.d. <https://data.worldbank.org/indicator/eg.use.comm.fo.zs> (accessed September 28, 2019).
- [2]. Renewables – Global Energy Review 2020 – Analysis - IEA n.d. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/renewables> (accessed September 10, 2020).
- [3]. Yılmaz, C, Koyuncu I. Thermoeconomic modeling and artificial neural network optimization of Afyon geothermal power plant,. *Renew Energy* 2020;135577. doi:10.1016/j.renene.2020.09.024.
- [4]. Siddiqui O, Dincer I. Exergetic Performance Investigation of Varying Flashing From Single to Quadruple for Geothermal Power Plants. *Artic J Energy Resour Technol* 2019. doi:10.1115/1.4043748.
- [5]. Gnaifaid H, Ozcan H. Development and multiobjective optimization of an integrated flash-binary geothermal power plant with reverse osmosis desalination and absorption refrigeration for multi-generation. *Geothermics* 2021;89:101949. doi:10.1016/j.geothermics.2020.101949.
- [6]. Altun AF, Kilic M. Thermodynamic performance evaluation of a geothermal ORC power plant. *Renew Energy* 2020;148:261–74. doi:10.1016/j.renene.2019.12.034.
- [7]. Moya D, Aldás C, Kaparaju P. Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications 2018. doi:10.1016/j.rser.2018.06.047.
- [8]. Ratlamwala TAH, Dincer I, Gadalla MA. Thermodynamic analysis of a novel integrated geothermal based power generation-quadruple effect absorption cooling-hydrogen liquefaction system. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37:5840–9. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.12.119.
- [9]. Yuksel YE, Ozturk M, Dincer I. Energetic and exergetic performance evaluations of a geothermal power plant based integrated system for hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy* 2018;43:78–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.002>.
- [10]. Yılmaz C, Kanoglu M. Thermodynamic evaluation of geothermal energy powered hydrogen production by PEM water electrolysis. *Energy* 2014;69:592–602. doi:10.1016/j.energy.2014.03.054.
- [11]. Coskun C, Oktay Z, Dincer I. Thermodynamic analyses and case studies of geothermal based multi-generation systems 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.004>.
- [12]. Gholizadeh T, Vajdi M, Rostamzadeh H. A new trigeneration system for power, cooling, and freshwater production driven by a flash-binary geothermal heat source. *Renew Energy* 2020;148:31–43. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.154>.
- [13]. Cao Y, Mihardjo LW, Dahari M, Ghaebi H, Parikhani T, Mohamed AM. An innovative double-flash binary cogeneration cooling and power (CCP) system: Thermodynamic evaluation and multi-objective optimization. *Energy* 2021; 214 : 118864.

- doi:10.1016/j.energy.2020.118864.
- [14]. Ozturk M, Dincer I. Development of a combined flash and binary geothermal system integrated with hydrogen production for blending into natural gas in daily applications. *Energy Convers Manag* 2021;227:113501. doi:10.1016/j.enconman.2020.113501.
- [15]. Gschrey B, Zeiger B. Information for technicians and users of refrigeration , air conditioning and heat pump equipment containing fluorinated greenhouse gases 2015.
- [16]. Calm JM, Hourahan GC. Refrigerant Data Summary. *Eng Syst* 2001;18.
- [17]. Klein S. Engineering equation solver (EES), AcademicCommercial, V10.644. 2018. Madison, USA, F-chart software 2019.
- [18]. Çengel YA, Boles MA. *Thermodynamics : an engineering approach*. 8th ed. Mc. New York: McGraw-Hil;2015; 2015.
- [19]. Kotas TJ. *The exergy method of thermal plant analysis*. 1st ed. London: Butterworth-Heinemann; 1985.
- [20]. Dincer I, Rosen M. *EXERGY : Energy, Environment and Sustainable Development*. 2nd Ed. Oxford, UK: Elsevier Science; 2013.