



Jeotermal Enerji Kaynaklı Organik Rankine Güç Santralinin Termodinamik Analizi

Thermodynamic Analysis of Geothermal Energy Sourced Organic Rankine Power Plant

İsmail Arpa ^{1*}, Arzu Şencan Şahin ²

^{1*} Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

ÖZET

Sürdürülebilir enerji türü olarak jeotermal kaynaklardan elektrik üretimi ülkemizde gittikçe yaygınlaşmaktadır. İkili (binary) jeotermal enerji santrali, jeotermal akışkan ısısından Organik Rankine Çevrimi (ORC) yardımı ile elektrik üreten sistemlerdir. Çevrimin ve çevrimi oluşturan her bir sistem elemanının enerji ve ekserji analizleri ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Bu analizler için Engineering Equation Solver (EES) yazılımı kullanılmıştır. ORC sisteminde iş akışkanı olarak n-pentan kullanılmıştır. Hesaplamalar sonucunda tüm sistemin enerji verimi %6, ekserji verimi ise %45 olarak bulunmuştur. Sistemin farklı çalışma parametrelerine göre verimlerdeki değişimler grafikler aracılığıyla ortaya konmuştur. Santralde en yüksek ekserji kaybının 6.12 MW (tüm ekserji kaybının %26'sı) ile hava soğutmalı kondenser 2'de olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada son olarak ekserji kayıplarının azaltılması ve sistem verimliliğinin iyileştirilmesi için çeşitli öneriler ve tavsiyelerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerji, Organik rankine çevrimi, Enerji verimliliği, Ekserji analizi.

ABSTRACT

Geothermal energy from geothermal sources is becoming increasingly popular as a sustainable energy source for electricity generation in our country. Binary geothermal power plants are systems that generate electricity with the help of Organic Rankine Cycle (ORC) using geothermal fluid temperature. Energy and exergy analyses of the cycle and each system component that constitutes the cycle are performed in detail. Engineering Equation Solver (EES) software is used for these analyses. N-pentane is used as the working fluid in the ORC system. As a result of the calculations, the overall energy efficiency of the system is found to be 6% and the exergy efficiency is found to be 45%. Changes in efficiencies according to different operating parameters of the system are presented through graphs. It is determined that the highest exergy loss in the power plant is 6.12 MW (26% of the total exergy loss) in air-cooled condenser 2. Finally, various suggestions and recommendations are made in the study to reduce exergy losses and improve system efficiency.

Keywords: Geothermal energy, Organic rankine cycle, Energy efficiency, Exergy analysis.

Başvuru: 05.12.2023 Revizyon Talebi: 05.02.2024 Son Revizyon: 21.02.2024 Kabul: 04.04.2024

Doi: 10.51764/smutgd.1397480

^{1*}Sorumlu yazar: Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye; E-mail: arpa.ismail@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1160-3793

² E-mail: arzusencan@isparta.edu.tr; ORCID: 0000-0001-8519-4788

1. GİRİŞ

Artan sanayileşme ve dünya nüfusunun yükselişi, enerji tüketiminin hızlı bir şekilde artmasına yol açmaktadır. Birincil enerji kaynaklarının sınırlı olması ve artan maliyetler, enerji üretim maliyetlerini ve sıkıntılarını artırmaktadır. Bu sıkıntılar, enerji bağımlılığının enerji güvenliğine risk oluşturması, hava kirliliği ve iklim değişikliği gibi çevresel etkiler, sürdürülebilirlik ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygınlaşmasındaki teknolojik engeller gibi çeşitli alanlarda kendini göstermektedir. Bu nedenle, alternatif enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar ve mevcut kaynakların daha verimli kullanımı için tasarruf tedbirleri alınması hayati bir önem taşımaktadır. Ülkemiz enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğunu dış ülkelere ithal etmektedir (Yılankırkan ve Doğan, 2020). Enerji ithalatının büyük bir çoğunluğunu fosil kökenli-yenilenemeyen enerji kaynakları oluşturmaktadır. Fosil kökenli-yenilenemeyen enerji kaynaklarıyla yapılan faaliyetlerin çevreye olan zararı bilinmektedir. Bu yüzden dünyadaki birçok ülke enerji ihtiyacını temin edebilmek üzere yenilebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir.

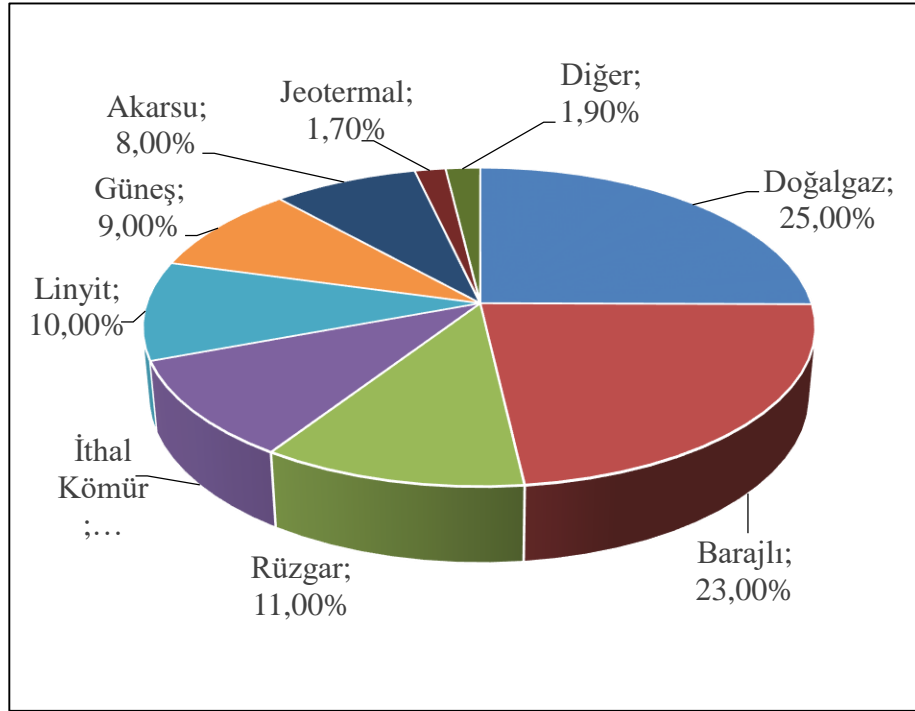
Gelişmiş ülkelerin öncelikli ihtiyaçları arasında elektrik enerjisi önemli bir yer tutmaktadır. Günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, elektronik cihazların kullanımı ve dolayısıyla elektrik tüketimi de sürekli olarak artmaktadır. Çağımızda elektrik üretimi için birçok model ve sistem bulunmaktadır. Bu sistemler içinde en yaygın kullanılanlardan biri termik santrallerdir. Bu santrallerde kömür, doğalgaz vb. yakıtların yakılıp çıkan ısı enerjisinin bir akışkana iletilmesi ve elde edilen buharın türbini hareket ettirmesiyle elektrik üretimi yapılmaktadır. Tablo 1’de ortaya koyulan Global Energy Monitor verilerine bakıldığında elektrik enerjisi üretiminde termik santrallerin üretim güçleri paylaşılmıştır. 2023 senesinde yapılmış bu çalışmada, ülkelere göre termik santrallerin kurulu güç kapasiteleri ve kapatılan santrallere dair veriler yer almaktadır.

Tablo1. Ülkeler bazında termik santrallerin kurulu güç kapasiteleri (Global Energy Monitor, 2023)

ÜLKE	2023 AKTİF SANTRAL ÜRETİM GÜCÜ (MW)	2000 - 2023 KAPATILAN SANTRAL ÜRETİM GÜCÜ (MW)
ALMANYA	40515	25181
İNGİLTERE	4140	30623
İTALYA	6166	4194
FRANSA	2507	6619
İSPANYA	2210	10892
HOLLANDA	4152	3665
ÇİN	1092889	119268
HİNDİSTAN	234256	15651
ABD	212042	148514
AVUSTURYA	0	1993
PORTEKİZ	0	2028

Tablo 1’de 2023 yılında bazı Avrupa ülkeleri ile ABD, Çin ve Hindistan’ın aktif santral üretim gücü ve 2000-2023 yılları arasında kapatılan santral üretim gücü ile ilgili veriler görülmektedir. 2023 yılında, aktif santral üretim gücü açısından Çin’in ilk sırada yer aldığı, onu Hindistan ve ABD’nin takip ettiği görülmektedir. Avrupa ülkeleri arasında

da Almanya'nın en yüksek aktif santral üretim gücüne sahip ülke olduğu görülmektedir. 2000-2023 yılları arasında kapatılan santral üretim gücü açısından ABD, Çin ve İngiltere ilk sıralarda yer almaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan geçiş ve karbon salınımı azaltma çabaları, kapatılan geleneksel enerji santral sayısının artmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Fosil kaynakların zamanla tükenmesi göz önüne alındığında, ülkemizin de sürdürülebilir, modern ve temiz kaynakları dikkate alması gerekmektedir. Bu nedenle, elektrik üretimi için yeni modeller ve sistemlere geçen birçok ülke gibi ülkemiz de bu yönde adımlar atmalıdır. Temiz ve sürdürülebilir enerji kaynakları arayışında olduğumuzda, ilk olarak akla yenilenebilir enerji kaynakları gelmektedir. Şekil 1'de enerji kaynaklarına göre ülkemizdeki kurulu güç yüzdeleri görülmektedir. Enerji üretiminin yaklaşık %56'sı fosil yakıtlardan (doğalgaz, linyit, ithal kömür), yaklaşık %44'ü de yenilenebilir kaynaklardan (hidroelektrik, rüzgar, güneş, akarsu, jeotermal) oluşmaktadır. Ülkemizde fosil yakıtlar hala önemli bir rol oynarken yenilenebilir kaynakların payının da zaman içinde artması beklenmektedir. Ülkemiz, birden fazla iklimin bir arada bulunmasından dolayı, güneş ve sürekli rüzgâr alan bölgelerin sayısı oldukça fazladır. Özellikle Alp-Himalaya kuşağı üzerindeki coğrafi konumumuz, yüksek jeotermal enerji potansiyeline sahip olmamızı sağlamaktadır.



Şekil 1. Ülkemizdeki kaynaklara göre kurulu güç yüzdeleri (TEİAŞ Kurulu Güç Raporu, 2022)

Tablo 2 enerji üretim teknolojilerine göre santral emisyon değerlerini göstermektedir (World Nuclear Association Report, 2011). Bu değerler, farklı enerji kaynaklarının çevreye olan etkilerini GWh başına ton CO₂ eşdeğeri üzerinden karşılaştırmaktadır. Bu çerçevede, jeotermal enerji üretimi çevre dostu bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 2. Enerji tiplerine göre santral emisyon değerleri (World Nuclear Association Report, 2011)

Teknoloji	Emisyon (ton CO₂e/GWh)
Linyit	1054
Kömür	888
Benzin	733
Doğal Gaz	499
Güneş (Fotovoltaik)	85
Jeotermal	88
Biokütle	45
Nükleer	29
Hidroelektrik	26
Rüzgâr	26

Günümüzde ORC sistemi ilkelerine uygun şekilde işleyen elektrik üretim santralleri, düşük sıcaklıktaki rezervlerden elektrik üretimi için önemli aşamalar kaydetmiştir. Bu sistemde ısı rezervi olarak jeotermal kaynaklar kullanıldığında, sistem ya da çevrim ikili (binary) ismini almıştır. Ülkemizde ikili çevrim prensibine dayanarak faaliyet gösteren enerji santralleri 2008 senesinden itibaren yaygınlaşmaya başlamıştır.

Bu santrallerin üretime başlamadan önce termodinamik ve termoekonomik analizlerinin yapılabilmesi oldukça önemlidir. Halihazırda faaliyette olan santrallerde ise bu analizlerin gerçekleştirilmesi santralin performansına bu suretle de elde edilen elektriğin miktarına direkt olarak katkı sağlayacaktır. Çağımızda bu tip enerji üretim sistemlerinin etüdü yapılırken kullanılan metodlar sıklıkla enerji ve ekserji analizleridir. Bu analizler sistemin performans, kayıp değerleri ve iyileştirilmesi gereken noktaları açığa çıkartır.

Literatürde jeotermal kaynaklı ORC sistemlerinin analizi ile ilgili bazı çalışmalar mevcuttur. Zhou C. vd. (2013) yaptıkları çalışmada bağımsız jeotermal enerji santrallerinin karşılaştığı bir sorun olan günlük sıcaklık değişiminin hava soğutmalı kondenserler üzerindeki olumsuz etkilerini ele almışlardır. Araştırma, güç çıkışını artırmak ve günlük sıcaklık değişiminin etkisini hafifletmek için hibrid güneş-jeotermal enerji santrallerinin potansiyelini değerlendirmektedir. Hibrid sistemlerin güç çıkışı ve elektrik maliyetleri, bağımsız güneş ve jeotermal santrallerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, hibrid sistemin performansını etkileyen çeşitli parametreler incelenmiştir. Sonuçlar, hibrid santrallerin enerji verimliliğini artırabileceğini ve maliyetleri azaltabileceğini göstermektedir. Bao ve Zhao (2013) çalışmalarında ORC için çalışma akışkanları ve türbin seçimi ile ilgili bir inceleme sunmuşlardır. Çalışma akışkanlarının termodinamik ve fiziksel özelliklerinin ORC performansına etkisi incelenmiştir. Verimli bir ORC sistemi tasarımı için optimum çalışma akışkanı ve uygun türbin seçiminin oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır. Nasruddin vd. (2020), çalışmalarında Ampallas bölgesindeki iki farklı jeotermal ikili çevrim güç santralının optimizasyonunu yapmışlardır. Organik Rankine çevrimi ve Kalina çevrimleriyle çalışan sistemler karşılaştırılmıştır. Optimizasyon için MATLAB ve EES yazılımı kullanılmıştır. Sonuç olarak, ORC sisteminin Ampallas bölgesindeki jeotermal atık ısının geri kazanılması için daha iyi bir seçenek olduğu görülmüştür. Lebbihiat vd. (2021), Cezayir'deki jeotermal enerjinin tarihini, mevcut kullanımını, uygulamalarını ve potansiyelini tartışmıştır. Cezayir'in jeotermal kaynaklarının mevcut durumunu incelemekte ve jeotermal enerji gelişimini artırmaya yönelik bir yol haritası ve önlemler sunmaktadır. Jeotermal enerji kullanımı ve dünya genelindeki en son teknolojiler de özetlenmektedir. Yılmaz (2021) çalışmasında ısıtma, soğutma, güç, sıcak su ve hidrojen üretimi için yeni tasarlanmış jeotermal enerji destekli entegre bir tesis önermiştir. Modellenen sistem, n-pentan ile çalışan ORC-1 ve n-bütan ile çalışan ORC-2 olmak üzere iki organik Rankine çevrimine (ORC) sahiptir. İncelenen sistemin toplam

enerji ve ekserji performansları sırasıyla %63,28 ve %55,99 olarak bulunmuştur. Ayrıca önerilen modeller, enerji üretimini karşılamak için yenilenemeyen enerji bazlı yakıtların kullanılması sonucunda sera gazlarının etkisini tanımlamak için çevresel etki değerlendirmesi yapılmıştır. Nemati vd., (2017) çalışmasında, CGAM kojenerasyon sisteminde atık ısının geri kazanılması için organik Rankine çevrimi ve Kalina çevrimlerinin termodinamik modellemesini ve optimizasyonunu yapmıştır. Birleşik sistemlerin enerji ve ekserji verimliliği ile türbin boyutu üzerindeki etkilerini incelemiştir. ORC'nin daha basit yapılandırması, daha yüksek net güç ve süper ısınmış türbin çıkış akışı gibi avantajları vardır. Kalina çevriminin türbin boyut parametresi, ORC'den daha düşüktür. Ancak, yapılan kapsamlı karşılaştırmada ORC'nin atık ısı geri kazanımı için önemli avantajlara sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Abdolalipouradl vd. (2020) yaptıkları çalışmada Sabalan jeotermal alanında yer alan iki kuyudan güç üretmek için dört yenilikçi konfigürasyonu araştırmıştır. Konfigürasyonlar termodinamik ve eksergo-ekonomi açısından değerlendirilmiştir. ORC konfigürasyonlarında çeşitli çalışma akışkanları kullanılmıştır. DF1-ORC'nin sırasıyla SF-ORC, DF2-ORC ve TF-ORC'den %4.03, %1.32 ve %1.2 daha fazla enerji ürettiği görülmüştür. R123 çalışma akışkanının kullanıldığı SF-ORC'nin maksimum ekonomik performans sağladığı görülmüştür. Drescher ve Brüggemann (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, küçük katı biyokütle enerji tesislerinde ORC'nin kojenerasyon için kullanıldığı belirtilmektedir. Çalışmada biyokütle enerji tesislerinde ORC için termodinamik açıdan uygun akışkanların bulunması için bir yazılım geliştirildiği vurgulanmaktadır. Çalışmada alkilbenzen ailesinin en yüksek verimlilik değerlerine sahip olduğu belirtilmektedir. Tchanche vd. (2011) araştırmalarında, organik çalışma sıvılarının düşük sıcaklıkta su buharından daha uygun olduğunu vurgulamışlardır. Çevrimin performansının seçilen çalışma sıvısına bağlı olduğundan bahsetmişlerdir. Saleh vd. (2007) ORC sistemlerinde kullanılan 31 farklı çalışma akışkanının bir taramasını yapmıştır. Daha yüksek kritik sıcaklığa sahip çalışma akışkanıyla çalışan ideal bir ORC çevriminin termal verimliliğinin genellikle daha iyi olduğunu vurgulamışlardır. Quoilin vd. (2011) çalışmalarında enerji üretimi için düşük maliyetli bir güneş enerjili organik Rankine çevriminin performans ve tasarım optimizasyonu ortaya koymuşlardır. Kanoglu ve Bolatturk (2008) çalışmalarında ikili bir jeotermal enerji santralinin enerji ve ekserji analizini ortaya koymuşlardır. Enerji ve ekserji verimlilikleri, sırasıyla %10,2 ve %33,5 olarak bulunmuştur. Türbin giriş basıncı ve sıcaklığı ile yoğunlaştırıcı basıncının; ekserji ve enerji verimliliğine, net güç çıkışına etkileri incelenmiştir. Cammarata vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, jeotermal kaynaklardan enerji dönüşümü için organik Rankine çevrimleri üzerinde termodinamik bir analiz yapılmıştır. Çalışmada, termodinamik değişkenlerin değerlerini hesaplamak için bir sayısal akış şeması kullanılmıştır. Tesisin farklı bileşenleri, denge denklemleriyle birbirine bağlı bloklar şeklinde açıklanmıştır. İki çalışma akışkanı (izopentan ve izobütan) dikkate alınarak, çeşitli işletme parametreleri için sonuçlar elde edilmiştir. Bu parametreler arasında çalışma akışkanının buharlaşma ve kondensasyon basınçları, jeotermal akışkanın kütle akış hızı ve soğutma suyu sıcaklığı bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, T-S diyagramında termodinamik çevrimler oluşturularak incelenmiş ve araştırılan işlevsel senaryolara ilişkin etkinlik ve enerji faydası nicelendirilmiştir. Yari (2010), çalışmasında farklı jeotermal enerji santrali konseptlerini ekserji analizi temelinde karşılaştırmıştır. Çalışmada, basit ORC, ilave ısı değiştiricili ORC, rejeneratif ORC, ilave ısı değiştiricili rejeneratif ORC, tek basınçlı, çift basınçlı ve ikili-flaş jeotermal enerji santralleri gibi çevrimler ele alınmıştır. Sonuçlar, dahili ısı değiştiricili ORC çevrimin en yüksek birinci yasa verimliliğine sahip olduğunu (%7.65) gösterirken, enerji girişine dayalı olarak hesaplanan birinci yasa verimliliğinde rejeneratif ORC ve dahili ısı değiştiricili ikili çevrimin en yüksek verimliliğe sahip olduğu (%15.35) saptanmıştır. Ayrıca, R123 çalışma akışkanıyla ikili-flaş çevrimin en yüksek birinci yasa verimliliğine sahip olduğu (%11.81) bulunmuştur. Yari'nin çalışması, jeotermal enerji santrali performansını ekserji analiziyle değerlendirmenin önemini vurgulayarak, farklı çevrim konfigürasyonlarının karşılaştırılmasına katkı sağlamaktadır. Hu vd. (2022) çalışmalarında ORC sisteminin matematiksel ve fiziksel modelini oluşturarak beş farklı organik çalışma sıvısı seçmişlerdir. Sistemde maksimum net güç ile performansı etkileyen çeşitli parametreler analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar R245fa'nın en iyi uygun çalışma sıvısı olduğunu göstermiştir. Alghamdi vd. (2023) çalışma akışkanı olarak zeotropik akışkan kullanılan kombine çift flaşlı jeotermal kaynaklı ORC sistemin modellemesini ve termodinamik analizini yapmışlardır. Analiz, termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üç akışkan hekzan, siklohekzan ve izohekzan- kullanılmıştır. Sistemin birinci ve ikinci yasa verimi, üretilen net güç ve ekserji yıkımı miktarı hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Zhao vd. (2024) çalışmalarında organik Rankine çevrimine dayalı bir jeotermal enerji santralinin yaşam döngüsü analizini yapmışlardır. Organik çalışma akışkanının ve reküperatif çevrimin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

Yapılan literatür araştırmalarında görüldüğü gibi, farklı ülkelerde hem teorik hem de gerçek jeotermal enerji kaynaklı ORC santralleriyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak ülkemizdeki gerçek bir jeotermal enerji kaynaklı ORC çevriminin enerji ve ekserji analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir (Arpa, 2023).

2. MATERYAL VE METOT

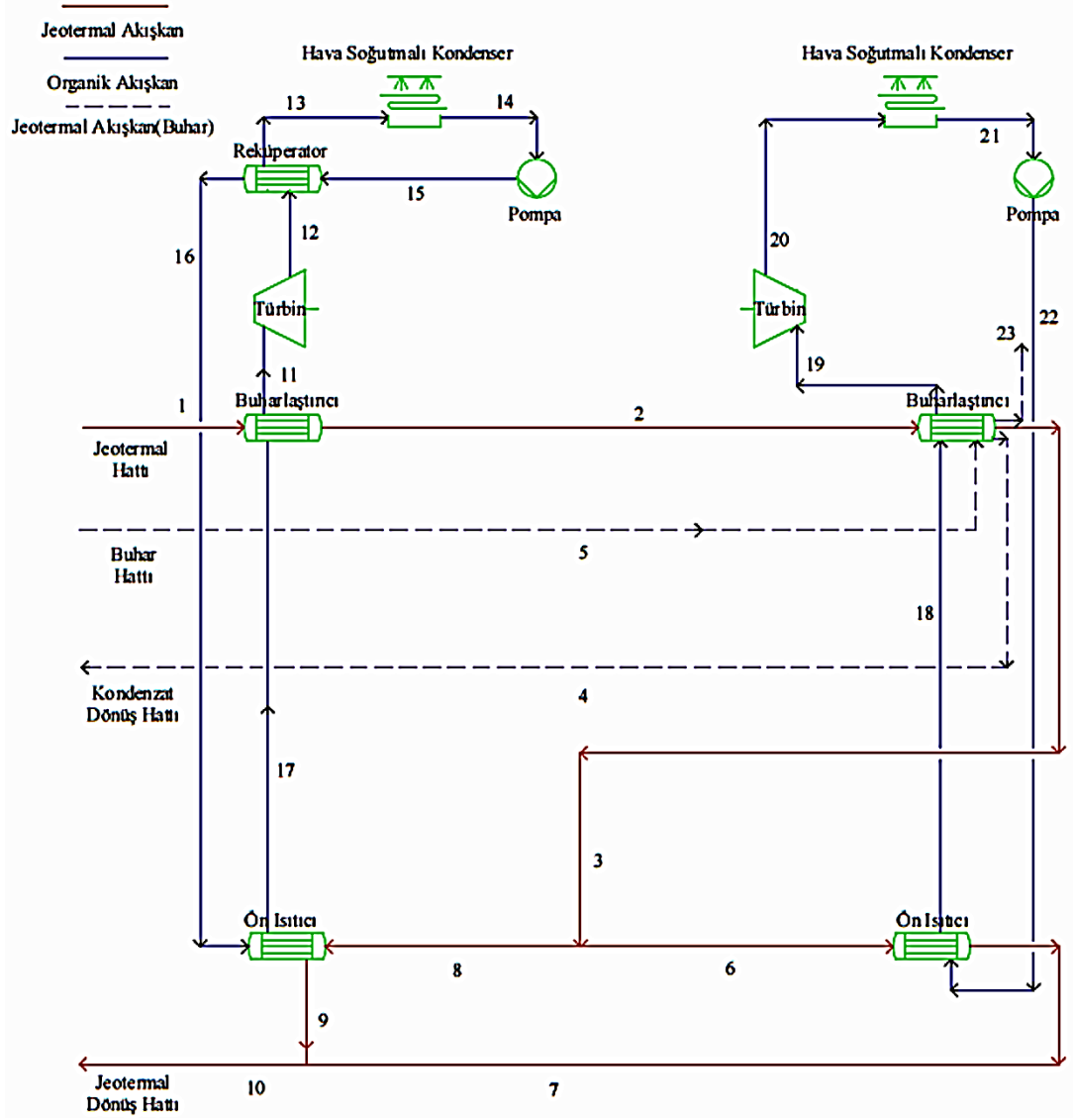
2.1. Sistem Tanımı

Analizi yapılan sistemde çalışma akışkanı olarak kullanılan n-pentan akışkanının termodinamik ve termofiziksel özellikleri Tablo 3'de gösterilmiştir. Hidrokarbon grubu olan bu soğutkanlar yanıcı özellikte olmalarına karşın, çevreye sundukları olumlu etkilerinden dolayı çevreci olarak nitelendirilebilir özelliktedirler. Bu çalışmada, Şekil 2'de şematik olarak verilen ikili çevrim jeotermal güç santralinin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Santrali oluşturan her bir sistem elemanının ayrı ayrı termodinamik analizleri yapılmıştır.

Tablo 3. n-pentan'ın termofiziksel ve termodinamiksel özellikleri

Parametreler	Değerler
Kritik Sıcaklık (°C)	196.6
Kritik Basınç (kPa)	3370
Kaynama Noktası Sıcaklığı (°C)	36.1
Molar Kütle (g/mol)	72.15
Ozon Delme Potansiyeli (ODP)	0

Şekil 2'de gösterilen ikili çevrim jeotermal santralde, rezervuardan sıvı-buhar karışımı olarak çıktıktan sonra seperatörde fazlarına ayrıştırılarak 1 noktasından jeotermal sıvı olarak, 5 noktasından ise kızgın buhar olarak santrale giriş yapar. Burada 1 ve 5 noktasından giriş yapan jeotermal akışkan ve kızgın buhar, n-pentan gazını kızgın buhar fazına erişmesini sağlamak için çevrimde iki adet bulunan buharlaştırıcıda ısılarını aktarırlar. Daha sonrasında tamamen kızgın buhar fazına geçen n-pentan akışkanı türbine vurdurulur ve jeneratör yardımıyla elektrik üretimi gerçekleşir. 12 Noktasından çıkan organik akışkan, 15 noktasından gelen organik akışkana reküperatör aracılığıyla ısını vererek ön ısıtıcıya girmeden ek bir ön ısıtma yapar. Ayrıca bu işlemle, 13 noktasında hava soğutmalı kondensere girmeden önce akışkanın ısı kaybetmesinden dolayı fanlarda harcanacak olan elektrik enerjisinin düşürülmesi nedeniyle verimin arttırılmasına fayda sağlanmaktadır. 14 noktasına gelindiğinde, organik akışkan kayda değer miktarda basınç kaybettiğinden, döngüde istenilen basınçlandırmayı elde etmek için bir pompa aracılığıyla basınçlandırma yapılır. Daha sonrasında ön ısıtıcı yardımıyla ısı transferleri gerçekleşir ve buharlaştırıcıya girerek türbinden önceki son ısıtmayı tamamlar ve sürekli döngüsüne devam eder.



Şekil 3. İkili çevrim jeotermal santralin şematik gösterimi

2.2. Termodinamik Analiz

Termodinamik analiz yapılırken enerji ve ekserji metotları ele alınmış ve yazılım olarak Engineering Equation Solver (EES) programı kullanılmıştır. Sistem bileşenlerini, donanım donanım ayırarak her birine ayrı ayrı termodinamik denge denklemleri uygulanmış ve elde edilen güç üretimleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada organik akışkan olarak n-pentan akışkanı kullanılmıştır. Sistemin yapılan kabuller aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

- Sistem sürekli akışlı açık sistem koşulları altında çalışmaktadır.
- Kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir.
- Jeotermal akışkan olarak saf su ele alınmıştır.
- Pompa verimi %80 olarak kabul edilmiştir.
- Çevre sıcaklığı 20 °C'dir.
- Çevre basıncı 101.325 kPa'dır.

Kütle dengesi (Boles ve Cengel, 2014):

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

Enerji dengesi (Boles ve Cengel, 2014):

$$\sum \dot{m}_g h_g + \sum \dot{W}_g + \sum \dot{Q}_g = \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta + \sum \dot{W}_\zeta + \sum \dot{Q}_\zeta \quad (2)$$

Entropi dengesi (Boles ve Cengel, 2014):

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

Ekserji dengesi (Boles ve Cengel, 2014):

$$\sum \dot{m}_g ex_g + \sum \dot{E}x^w_g + \sum \dot{E}x^Q_g = \sum \dot{m}_\zeta ex_\zeta + \sum \dot{E}x^w_\zeta + \sum \dot{E}x^Q_\zeta + \dot{E}x_{\text{yıkım}} \quad (4)$$

Sunulan denklemlerde kullanılan “g” ve “ç” indisleri giren ve çıkan ifadeleri göstermektedir. \dot{Q} , \dot{W} , h ve s ifadeleri sırasıyla; ısı transfer hızı, güç, özgül entalpi ve özgül entropi değerlerini ifade etmektedir. Denklem (4)’teki $\dot{E}x_{\text{yıkım}}$, $\dot{E}x^Q$ ve $\dot{E}x^W$ ifadeleri ise sırasıyla ekserji yıkımı, ısının ekserjisini ve işin ekserjisini göstermekte olup aşağıdaki gibi yazılabilir (Boles ve Cengel, 2014):

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

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

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

Her bir sistem elemanının kütle, enerji, entropi ve ekserji bağıntıları ile sistemin enerji ve ekserji verimleri kısımlara ayrılmış ve EES yazılımı yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Sistemdeki özgül akış ekserjisi ise aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Boles ve Cengel, 2014):

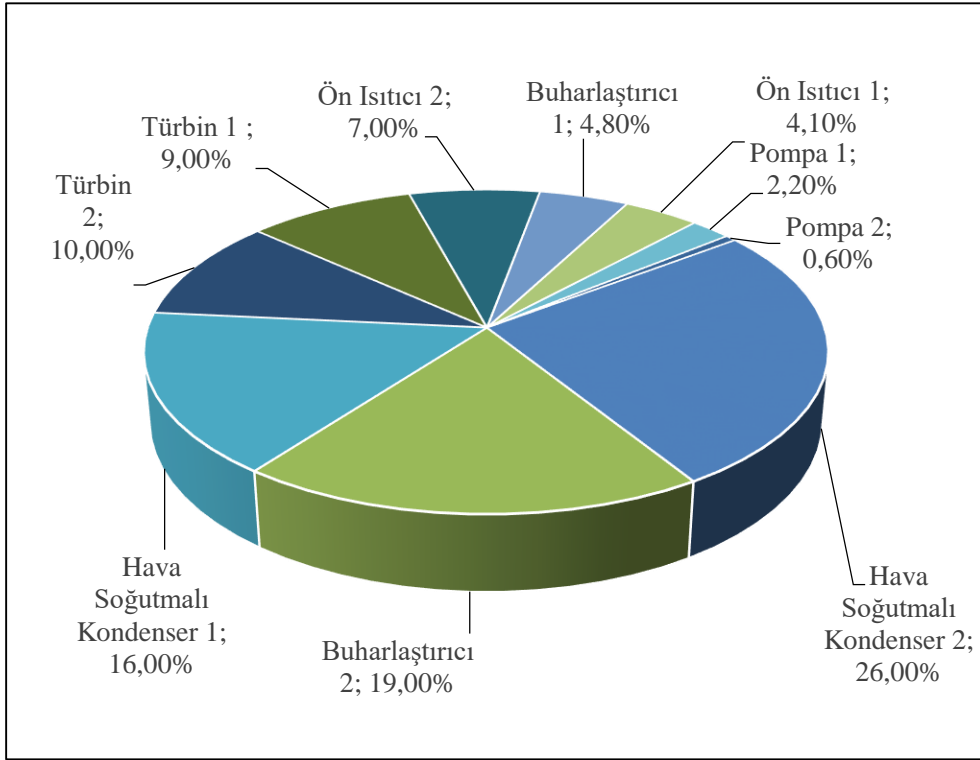
$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (8)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Her bir sistem elemanına ait enerji, ekserji değerleri ile verimleri hesaplanmış ve Tablo 4’te verilmiştir. Ayrıca Şekil 4’te sistem elemanlarının ekserji kayıplarının oranları görülmektedir. En yüksek ekserji kaybı hava soğutmalı kondenser 2’de meydana gelmiştir. Bu yüzden birçok santral veya işletme dizayn aşamasında daha verimli olan su soğutmalı kondenserleri tercih etme amacındadır.

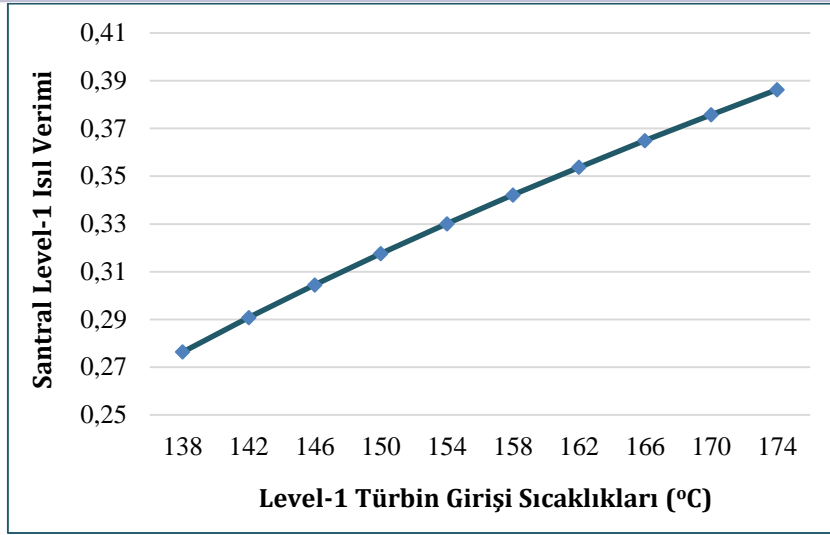
Tablo 4. Ekserji kayıpları, ekserji verimi ve enerji transferi miktarı

Ekipman	Enerji Miktarı (MW)	Ekserji Kayıpları (MW)	Enerji Verimi (%)	Ekserji Verimi (%)
Buharlaştırıcı 1	49.39	1.13	98	92
Buharlaştırıcı 2	56.82	4.46	90	76
Türbin 1	11.32	2.13	87.3	84
Türbin 2	9.73	2.45	86.2	80
Hava Soğutmalı Kondenser 1	60.51	3.78	54.29	57.4
Hava Soğutmalı Kondenser 2	79.15	6.12	70.86	93.1



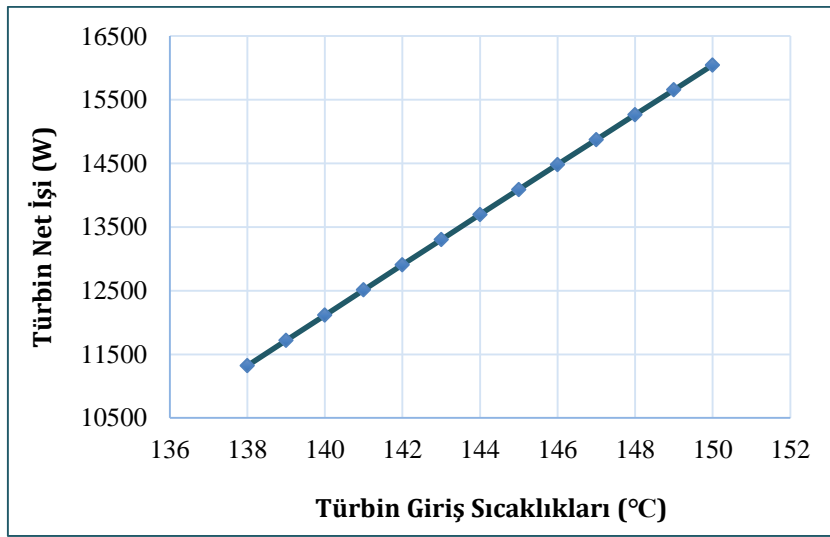
Şekil 4. Sistem elemanlarının ekserji kayıplarının yüzdesel olarak dağılımı

Ayrıca ikili jeotermal enerji santralinde çevre sıcaklığı, jeotermal su sıcaklığı ve türbin giriş sıcaklıkları gibi önemli parametrelere bağlı olarak net güç ve verim değişimleri incelenmiştir. Şekil 5'te Level-1 türbin giriş sıcaklık değişimlerine göre santral level-1'in ısı verim değişimleri görülmektedir. Türbine giren akışkan sıcaklığının artmasıyla santralin veriminin de aynı oranda arttığı görülmektedir. Her 4 °C sıcaklık artışında ortalama %1.22'lik bir verim artışı olduğu gözlemlenmektedir. Daha yüksek türbin giriş sıcaklığının, daha yüksek enerji dönüşüm verimine ve daha fazla elektrik üretimine olanak sağladığı gözlemlenmiştir.



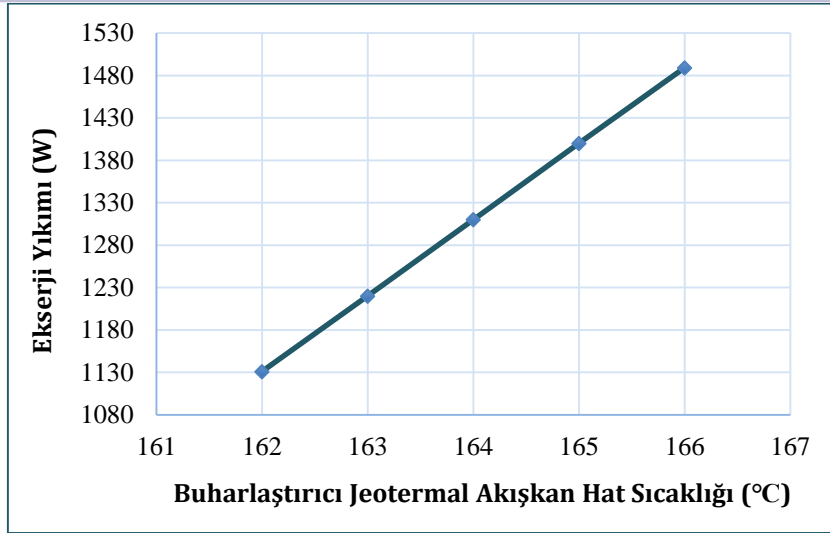
Şekil 5. Level-1 türbin girişi sıcaklık değişimine göre santral level-1 ısıl verimi değişimi

Şekil 6'da sunulan grafik, türbine giren organik akışkanın sıcaklık değişimi ile türbin net işi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Organik akışkanın türbine giriş sıcaklığının artmasıyla elde edilen net türbin işinin de aynı oranda arttığı görülmektedir. Her 4 °C sıcaklık artışında ortalama %3.93'lük net iş artışı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, sistemdeki enerji dönüşümünün sıcaklık değişimleriyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Türbine giren organik akışkanın sıcaklığının yükselmesi, enerji taşıyan akışkanın içerdiği termal enerji miktarının artması anlamına gelir. Dolayısıyla, daha yüksek sıcaklıklarda türbine giren organik akışkan, türbin rotoruna daha fazla enerji aktaracak ve sonuç olarak elde edilen net türbin işi miktarı artacaktır.



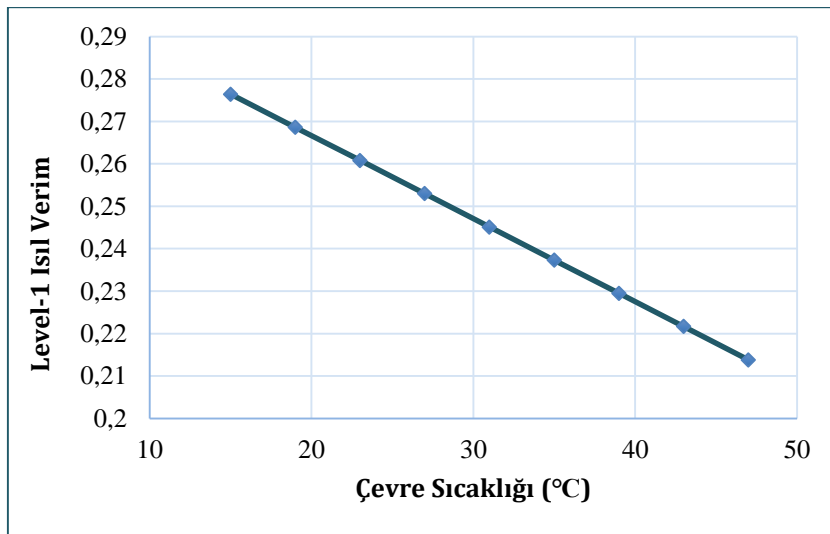
Şekil 6. Türbin giriş sıcaklıklarına göre türbin net işi değişimi

Şekil 7'deki grafikte buharlaştırıcı-1 elemanına giren jeotermal akışkanın hat sıcaklığındaki değişimine bağlı olarak ekserji yıkımının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Sistemdeki temel giriş sıcaklığı 162 °C olarak belirlenmiştir. Bu donanımın ürettiği ekserji yıkımının, sıcaklık değeri ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Jeotermal rezervlerden gelen sıcaklığın ne kadar yüksek olursa, çevrim verimindeki artışın da buna bağlı olarak gerçekleşeceği bilinse de, büyük ekserji yıkımı değerleri dikkate alındığında, ikili çevrim teknolojisindeki buharlaştırıcı bileşenlerinin hala gelişime ihtiyaç duyduğu görülmektedir.



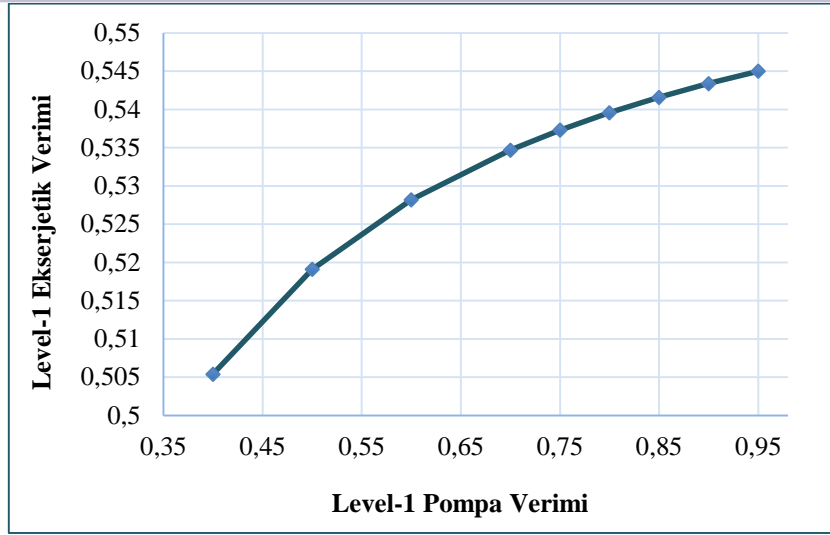
Şekil 7. Jeotermal akışkanın hat sıcaklığının değişimine göre buharlaştırıcıdaki ekserji yıkımı değişimi

Şekil 8'deki grafik, çevre sıcaklığının santral verimi ile ilgili olan ilişkisini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda hava soğutmalı kondenserlerin çevre havayı kullanarak soğutma yaptığı göz önünde bulundurulduğunda çevre sıcaklığının etkisi gözle görülür şekilde büyük olmaktadır. Hava sıcaklığı arttıkça santral veriminde düşüş olduğu açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Her 4 °C sıcaklık artışında ortalama %1 verim düşüşü olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, jeotermal enerji santrallerinin tasarım ve işletme stratejilerinde önemli bir faktör olarak çevre sıcaklığının göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamaktadır. Sıcak iklim bölgelerinde hava soğutmalı kondenserlerin kullanılması, enerji üretimini etkileyen faktörler arasında dikkate alınmalı ve enerji verimliliğini artırmak için alternatif soğutma yöntemleri araştırılmalıdır.



Şekil 8. Çevre sıcaklığının değişimine göre santral level-1 ısı verimi değişimi

Şekil 9'da, pompa veriminin jeotermal enerji santralinin ekserjetik verimine etkisi görülmektedir. Pompa veriminin artmasıyla ekserjetik verimin arttığı görülmektedir. Her % 10 pompa verim artışı için yaklaşık %0,6'lık bir verim artışı olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar şunu ortaya koymaktadır ki jeotermal enerji santralleri için doğru pompa seçimi, optimal hız kontrolü, boru hatları ve vanalar gibi sistem dirençlerini minimize etmek, verimli motor kullanımı, optimal işletme noktasını belirleme, pompa ve motor bakımı, doğru boru boyutlandırması, eğitim ve personel bilinci bu doğrultuda altın niteliğinde konulardır.



Şekil 9. Level-1 pompa verimine göre level-1 ekserjetik verim değişimi

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırma kapsamında, mevcut bir jeotermal ORC santralinin enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Enerji analizi sonuçlarına göre santral donanımlarından buharlaştırıcı 1 ve 2 'de jeotermal akışkandan organik akışkana sırasıyla 49.39 ve 56.82 MW enerji transferi, %92 ve %76 verim ile yapılmıştır. Organik türbin 1 ve 2'de üretilen güç miktarları sırasıyla 11.32 MW ve 9.73 MW'dır. Türbin 1 ve türbin 2 için enerji verimleri %84 ve %80 olarak hesaplanmıştır. Santralde en düşük enerji verimliliğine sahip donanımlar ise hava soğutmalı kondenser 1 ve 2 (%54.29 ve %70.86) olarak ortaya koyulmuştur. Ekserji analizi sonuçlarına göre; santralde en yüksek ekserji kaybı, 6.12 MW (tüm ekserji kaybının %26'sı olarak) ile hava soğutmalı kondenser 2'de tespit edilmiştir. Ardından 4.46 MW (%19) ile buharlaştırıcı 2, 3.78 MW (%16) ile hava soğutmalı kondenser 1 ve 2.45 MW (%11) ile organik türbin 2'de meydana gelmiştir. Hava soğutmalı kondenserler, en yüksek ekserji kayıplarına sebep olan bileşenlerdir. Bu kayıpların ana sebepleri, kondenserlerin eski teknolojiyle üretilmiş olması ve sıcak ortamlarda çalıştırılmasıdır. Sıcak hava, kondenserlerin ısıyı dışarı atmasını zorlaştırmakta ve bu da kayıpları arttırmaktadır. Buharlaştırıcı donanımlarında ekserjetik kaybın nedeni, ekipmana giren enerjinin büyüklüğü ve yoğunlaştırulamayan gazlardan kaynaklanmaktadır.
- Sistemin önemli bileşenlerinden olan ön ısıtıcı ve reküperatörde nispeten daha düşük ekserji kayıpları bulunmuştur (0.95 MW ve 1.2 MW). Bu bileşenlerin, sistemin verimliliğine olumlu katkı sağladığı ve sistemin kullanılabilirliğini arttırdığı sonucuna varılmıştır.
- Yapılan değerlendirmeler sonucunda, santralin enerji ve ekserji verimleri referans sıcaklık olan 20 °C baz alınarak hesaplanmıştır. Buna göre, enerji verimi %6 ve ekserji verimi %45 olarak tespit edilmiştir.
- Santralin performansını etkileyen iki önemli parametre olan çevre sıcaklığı ve organik akışkanın sıcaklığının verim üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde, çevre sıcaklığında her 4 °C'lik artışla veriminin ortalama %1 düştüğü gözlemlenmiştir. Türbine giren organik akışkan sıcaklığının her 4 °C artışıyla ortalama %1.22'lik bir verim artışı olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmadan elde edilen bu sonuçlara göre santralde yapılabilecek iyileştirmeler için aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Santraldeki en büyük enerji kaybı hava soğutmalı kondenserlerin sahip olduğu fanlar tarafından oluşturulmaktadır. Bu ekipmanın sahip olduğu fanlar, organik akışkanı soğutmak için toplamda yaklaşık 550 kW fan gücü tüketmektedir. Sistem tarafından üretilen elektrikten sağlanan bu güç hem kondenserin hem de sistem genelindeki kayıpların artmasına neden olmaktadır. Bu durumda hem

kondenserin hem de sistemin verimliliği düşmektedir. Bu nedenle çevre sıcaklığının çok düştüğü günlerde çalışan fanlardan birkaçı kapatılarak tasarruf sağlanabilir.

- Ülkemizde kurulan birçok jeotermal enerji sistemlerinin kuyu uygulamaları ne yazık ki eksik, hatalı veya gecikmeli yapılmaktadır. Bunlardan biri kuyu ve kuyubaşı birleşim borularının, kuyubaşı flanşlarının ve yatay üretim hatlarının yalıtımsız bırakılmasıdır. Sonuçlar kısmında açıkça gösterilmiştir ki jeotermal akışkanın sıcaklığı, verim değerlerine doğrudan etki etmektedir. Yüzey sıcaklığı 60°C'nin üzerinde olan tüm yüzeyler, vana, flanş, boru tutucu ve destek elemanları dahil olmak üzere yalıtılmalıdır. Benzer şekilde, 50°C'nin üzerinde sıcaklığı olan yüzeylerin çoğu da aynı şekilde yalıtılmalıdır.
- Jeotermal santralde yüksek sıcaklıkta (84.5°C) ve yüksek debide (432 kg/s) jeotermal su, re-enjekte edilmek üzere hiçbir yerde kullanılmadan enjeksiyon kuyusuna gönderilmektedir. Ancak bu suyun yeniden kullanılması, köyde kurulacak olan bir sağlık merkezi veya turizm tesisi gibi amaçlar için büyük bir fırsat sunmaktadır. Bu şekilde, mevcut kaynak daha etkili bir şekilde kullanılabilir.
- Santrallerde önemli enerji harcayan donanımlardan bir tanesi de jeotermal akışkanı transfer eden pompalardır. Jeotermal enerji santrallerinde pompa veriminin artırılması, sistem performansını etkileyen bir dizi kritik faktöre odaklanmayı gerektirir. Bu bağlamda, doğru pompa seçimi, optimal hız kontrolü, sistem dirençlerinin minimize edilmesi, verimli motor kullanımı, işletme noktasının belirlenmesi, düzenli bakım uygulamaları, doğru boru boyutlandırması ve personel eğitimi, santralin etkin ve verimli bir şekilde işletilmesi için hayati öneme sahiptir. Optimal hız kontrolü, enerji tasarrufunu maksimize ederek pompa verimliliğini artırabilir. Sistem dirençlerinin minimize edilmesi, boru hatları ve vanalar gibi unsurları düzenleyerek enerji kayıplarını en aza indirir. Verimli motor kullanımı, enerji etiketlerini kontrol ederek seçilen motorun performansını artırır. İşletme noktasının belirlenmesi, pompa sistemini en verimli çalışma noktasına ayarlamak anlamına gelir. Pompa ve motor bakımı, sistemdeki aksamaları en aza indirir ve uzun vadeli verimliliği destekler. Doğru boru boyutlandırması, enerji kayıplarını minimize eder ve sistem verimliliğini artırır. Eğitim ve personel bilinci, operatörlerin ve bakım personelinin en iyi uygulamalara hâkim olmasını sağlar, böylece sistem optimal performans sergiler.
- Bu tür sistemlerin ülkemizde yaygınlaştırılması, düşük sıcaklıklı kaynakların daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır. Bu sayede enerji açısından dışa bağımlılık azaltılacak ve yerli kaynakların kullanımı arttırılacaktır. Bu gelişme, ülkemiz için önemli bir adım olacak ve sürdürülebilir bir enerji politikasına katkı sağlayacaktır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı Beyanı

Yazar-1: Fikir, Orijinal Taslak Oluşturma, Yazım, Revize, Metot Oluşturma, Verilerin Düzenlenmesi, Sonuç ve Tartışma

Yazar-2: Revize, Verilerin Düzenlenmesi, Sonuç ve Tartışma

KAYNAKLAR

Abdolalipouradl, M., Mohammadkhani, F., & Khalilarya, S. (2020). A comparative analysis of novel combined flash-binary cycles for Sabalan geothermal wells: Thermodynamic and exergoeconomic viewpoints. *Energy*, 209, 118235.

Alghamdi, M., Al-Kharsan, I., Shahab, S., Albaker, A., Alayi, R., Kumar, L., & El Haj Assad, M. (2023). Investigation of Energy and Exergy of Geothermal Organic Rankine Cycle. *Energies*, 16(5), 2222.

Arpa, İ. (2023). Jeotermal enerji kaynaklı organik rankine güç santralinin termodinamik analizi, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.

Bao, J., & Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. *Renewable and sustainable energy reviews*, 24, 325-342.

Boles, M., & Cengel, Y. (2014). An Engineering Approach. *New York: McGraw-Hill Education*.

Cammarata, G., Cammarata, L., & Petrone, G. (2014). Thermodynamic analysis of ORC for energy production from geothermal resources. *Energy Procedia*, 45, 1337-1343.

Drescher, U., & Brüggemann, D. (2007). Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants. *Applied thermal engineering*, 27(1), 223-228.

Global Energy Monitor, (2023). <https://globalenergymonitor.org/>

Hu, B., Guo, J., Yang, Y., & Shao, Y. (2022). Selection of working fluid for organic Rankine cycle used in low temperature geothermal power plant. *Energy Reports*, 8, 179-186.

Kanoglu, M., & Bolatturk, A. (2008). Performance and parametric investigation of a binary geothermal power plant by exergy. *Renewable Energy*, 33(11), 2366-2374.

Lebbihiat, N., Atia, A., Arıcı, M., & Meneceur, N. (2021). Geothermal energy use in Algeria: A review on the current status compared to the worldwide, utilization opportunities and countermeasures. *Journal of Cleaner Production*, 302, 126950.

Nasruddin, N., Saputra, I. D., Mentari, T., Bardow, A., Marcelina, O., & Berlin, S. (2020). Exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental optimization of the geothermal binary cycle power plant at Ampallas, West Sulawesi, Indonesia. *Thermal Science and Engineering Progress*, 19, 100625.

Nemati, A., Nami, H., Ranjbar, F., & Yari, M. (2017). A comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: A case study for CGAM cogeneration system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 9, 1-13.

Quoilin, S., Orosz, M., Hemond, H., & Lemort, V. (2011). Performance and design optimization of a low-cost solar organic Rankine cycle for remote power generation. *Solar energy*, 85(5), 955-966.

Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., & Fischer, J. (2007). Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. *Energy*, 32(7), 1210-1221.

Tchance, B. F., Lambrinos, G., Frangoudakis, A., & Papadakis, G. (2011). Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles—A review of various applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3963-3979.

TEİAŞ Kurulu Güç Raporu, (2022). <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari>

World Nuclear Association Report, (2011). Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources, https://www.world-nuclear.org/uploadedfiles/org/wna/publications/working_group_reports/comparison_of_lifecycle.pdf

Yılankırkan, N., & Doğan, H. (2020). Türkiye'nin enerji görünümü ve 2023 yılı birincil enerji arz projeksiyonu. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 10(2), 77-92.

Yılmaz, F. (2021). Performance and environmental impact assessment of a geothermal-assisted combined plant for multi-generation products. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101291.

Zhao, Y., Shi, L., Zhang, X., Gao, J., Luo, G., Ye, C., & Tang, Y. (2024). Life cycle CO2 emission assessment of an organic Rankine cycle based geothermal power plant. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 149-156.

Zhou, C., Doroodchi, E., & Moghtaderi, B. (2013). An in-depth assessment of hybrid solar-geothermal power generation. *Energy conversion and management*, 74, 88-101.