

Jeotermal enerji destekli çok fonksiyonlu enerji üretim sisteminin termodinamik analizi

Thermodynamic analysis of a multigeneration energy system based geothermal energy

Yunus Emre YÜKSEL¹, Murat ÖZTÜRK^{2*}

¹Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Eğitim Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye.
yeyuksel@aku.edu.tr

²Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
muratozturk@sdu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 10.05.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 14.02.2019

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2019.98411

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Türkiye son yıllarda jeotermal enerjiden elektrik ve ısı enerjisi üretilmesi alanında oldukça hızlı gelişim göstermiştir. Bu çalışmada jeotermal enerji destekli çok fonksiyonlu bir enerji üretim sisteminin termodinamik analizi verilmiştir. Aynı zamanda, jeotermal enerji kullanılarak elektrik, hidrojen, sıcak su, ısıtma ve soğutma üreten bir tesis önerilmiş ve her bir bileşen için kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denklemleri türetilmiştir. Parametrik çalışmalar yapılarak, sistemin en önemli çıktılarından olan elektrik ve hidrojenin üretimine etkileri incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, en fazla ekserji yıkımı Kalina çevriminde gerçekleşmiştir. Ayrıca elektrik ve hidrojen üretimini en fazla etkileyen parametreler olarak da jeotermal kaynak sıcaklığı ve türbin giriş basıncı olduğu bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Jeotermal, Entegre sistem, Termodinamik analiz, Enerji, Ekserji

Abstract

Turkey has shown great potential and development on electricity and heat energy production from geothermal sources. In this study, the detailed thermodynamic analysis of a multigeneration system based geothermal energy is presented. Also, a multigeneration system producing electricity, hydrogen, hot water, heating and cooling is proposed and mass, energy, entropy and exergy balance equations for every components of the system are derived. In addition, parametric analyses have been performed in order to see how and which variables affect the production rates of electricity and hydrogen. According to the analyses results, the largest exergy destruction rate occurs in Kalina cycle. Moreover, the most important variables affecting electricity and hydrogen production rates are found as geothermal source temperature and turbine inlet pressure of Kalina cycle.

Keywords: Geothermal, Integrated system, Thermodynamic analysis, Energy, Exergy

1 Giriş

Hızla artan popülasyon ve yükselen hayat standartları neticesinde dünyanın enerji ihtiyacı da artmaktadır. Mevcut enerji altyapısı incelendiğinde, şu anda enerji ihtiyacımızın %80 gibi büyük kısmını fosil enerji kaynaklarından sağladığımız görülmektedir [1]-[2]. Rezerv sorunları ve daha da önemlisi artan çevresel kaygılardan dolayı fosil kökenli kaynakların kullanılmasının yerini sürdürülebilirlik ve kaynak çeşitliliği açısından alternatif enerjilerin kullanımında her geçen gün bir artış olduğu görülmektedir [3]. Son yıllarda yaşanan küresel iklim değişikliklerine neden olan özellikle CO₂ emisyonlarının artmasının başlıca kaynağı da fosil yakıt tüketimidir. Yakıtların yanması ile ortaya çıkan CO₂ emisyonlarının %80'inden kömür, petrol ve gazyağı sorumlu iken, doğalgaz nispeten daha az emisyon yaymıştır [4]. Bu geçiş sürecinde doğalgazdan faydalanmak emisyonların azalması bakımından etkili olacaktır. Fakat uzun vadede daha kalıcı çözümler üretmek artık zorunlu bir hal almıştır. Jeotermal enerji de bu uzun vadede çözüm olabilecek temiz alternatif kaynaklardan bir tanesidir. İnsanlık jeotermal enerjiden çok eski zamanlardan bu yana sıcak su olarak faydalanmıştır. Günümüzde jeotermal enerji kaynaklarından tıp, turizm, ziraat ve endüstri gibi alanlarda yararlanılmaktadır [5]. Son zamanlarda eğilim ise jeotermal enerjiden elektrik üretmek olmuştur. Kaymakçıoğlu ve Çirkin [6] Türkiye'de 11 adet yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynak olduğunu bildirip bunların

elektrik üretimi için uygun olduklarını vurgulamışlardır. Köse [7] yaptığı çalışmada Kütahya Simav bölgesindeki jeotermal kaynaktan elektrik üretiminin analiz etmiş ve termal verimliliği %12.93 olarak hesaplamıştır. Türkiye'nin jeotermal potansiyeli olarak dünyada 7. sırada bulunduğu da göz önüne alındığında jeotermal kaynakların verimli kullanımı oldukça önemli bir etki yapacaktır [8],[9]. Jeotermal kaynaktan sadece elektrik üretmek termodinamik açıdan düşük verimli ve ekonomik açıdan pahalı olduğu için [10] yan ürünlerle birlikte toplam ürünü artırmak gerekmektedir. Aynı zamanda, Bravi ve Basosi'nin [11] belirttiğine göre bazı durumlarda jeotermal kaynaktan elektrik üretimi fosil yakıtlardan elektrik üretimine göre daha fazla çevreye emisyon yaymaktadır. Bu çalışmada önerilen sistem ise jeotermal kaynaktan sadece elektrik değil, birden fazla faydalı ürün almayı hedefleyen çok fonksiyonlu bir sistemdir.

Çok fonksiyonlu enerji üretim sistemleri bir ya da daha fazla kaynağı kullanarak bu kaynaklardan çeşitli çevrimler sayesinde atık ısının değerlendirilmesi suretiyle birden fazla ürünü toplamda daha verimli bir şekilde üretmektedirler [12]. Bu çalışmada jeotermal enerji destekli çok fonksiyonlu sistemde elektrik üretimi için Kalina ve organik Rankine çevrimi, hidrojen üretimi için PEM elektrolizör, ısıtma ve soğutma sistemi için tek etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi bulunmaktadır. Jeotermal enerjinin hidrojen üretimi açısından avantajlarından biri de PEM elektrolizör için gerekli olan elektrik ve ısı enerjisini sağlayabilmesidir. Hidrojenin kendisi

oldukça temiz bir enerji taşıyıcısı olmasına rağmen, nasıl üretildiği büyük önem arz etmektedir. Çünkü hidrojen fosil kaynaklardan da elde edilebilmekte ve üretim aşamasında oldukça fazla atık oluşmaktadır. Literatürde jeotermal enerji kullanılarak hidrojen üreten çeşitli sistemler bulunmaktadır.

Jeotermal enerjinin doğrudan enerji üretiminde kullanılmasının yanında termik santrallere destek olarak kullanılabilmesi, termik santrallerdeki kazan besleme suyunun düşük sıcaklıklı jeotermal kaynakla ısıtılabilmesi Dağdaş [13] tarafından önerilmiştir. Yaptığı analizde jeotermal kaynağın termik santrale katkı yapmasının toplam verimde %2-4 arası bir artış yaptığını belirtmiştir.

Bu çalışmada jeotermal destekli hidrojen üreten çok fonksiyonlu enerji üretim sistemi sadece enerji verimliliği açısından değil aynı zamanda ekserji verimliliği açısından da incelenmiştir. Enerji verimliliği sistem tasarımlarında sistem hakkında bilgi vermekte fakat verdiği bilgiler sistemin iyileştirilmesi açısından yeterli olmamaktadır. Ekserji verimlilik analizi ise sistemde meydana gelen ekserji yıkımlarının miktarını ve yerini gösterdiğinden dolayı sistemde olası iyileştirmelerin hangi noktalarda yapılacağını işaret etmektedir [14].

Kanoğlu ve diğ. [15] hidrojen üreten dört farklı jeotermal enerji sistemini enerji ve ekserji analizi açısından incelemiştir. Aynı zamanda yaptıkları çalışmada jeotermal kaynağın sıcaklığının hidrojen üretimine etkisini de incelemiştir. Tersinir durumda 200 °C'de 1 kg jeotermal kaynak başına 1.343 g H₂ üretilirken, tersinmez durumda aynı sıcaklıkta 1 kg jeotermal kaynak için 0.382 g H₂ üretmişlerdir.

Ganjehsarabi ve diğ. [16] Aydın'da bulunan Dora II jeotermal güç tesisinin termodinamik analizini yapmışlar ve sistemdeki ekserji yıkımlarının nerede bulunduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda bu jeotermal tesisin enerji ve ekserji verimliliklerini sırasıyla %10.7 ve %29.6 olarak hesaplamışlardır. Çevresel analiz sonuçlarına göre, jeotermal enerji ile güç üretiminin sera gazı emisyonlarını azalttığını belirtmişlerdir.

Jeotermal kaynaklar tek başına enerji üretiminde kullanılabilirdiği gibi başka enerji üretim sistemlerine entegre edilerek de kullanılabilir. Örneğin güneş veya rüzgâr enerjileri kullanımında kesinti olduğu zamanlarda jeotermal enerji kaynağı bu kaynakları desteklemeye kullanılabilir. Al-Ali ve Diñer [17] yaptıkları çalışmada jeotermal ve güneş enerjisini birlikte kullanan bir sistem tasarlamışlar ve bu sistemden elektrik, ısıtma, soğutma ve sıcak su üretiminin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Sistemin karşılaştırılmalı analizinde tek fonksiyonlu ve çok fonksiyonlu sistem hesaplanmış ve tek fonksiyonlu enerji üretim sisteminin enerji verimi %16.4 çıkarken, çok fonksiyonlu sistemin enerji verimi %78 olarak bulunmuştur.

Evrende en çok bulunan element olan hidrojen, geleceğin enerji taşıyıcısı olarak görülmektedir. Hidrojen en çok bulunan element olmasına rağmen, serbest halde bulunmamaktadır. Bu da hidrojenin elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Hidrojen oksijenle birlikte suda, karbon, oksijen ve azotla birlikte organizmalarda bulunmaktadır. Dolayısıyla, hidrojenin bu bileşiklerden ayrılması için enerji gerekmektedir. Enerji taşınması için verimlilik ve temizlik açısından incelendiğinde hidrojen oldukça iyi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır [18].

Yüksel ve diğ. [19] yapmış oldukları çalışmada hidrojen üretimi ve sıvılaştırma prosesi için entegre jeotermal güç sisteminin

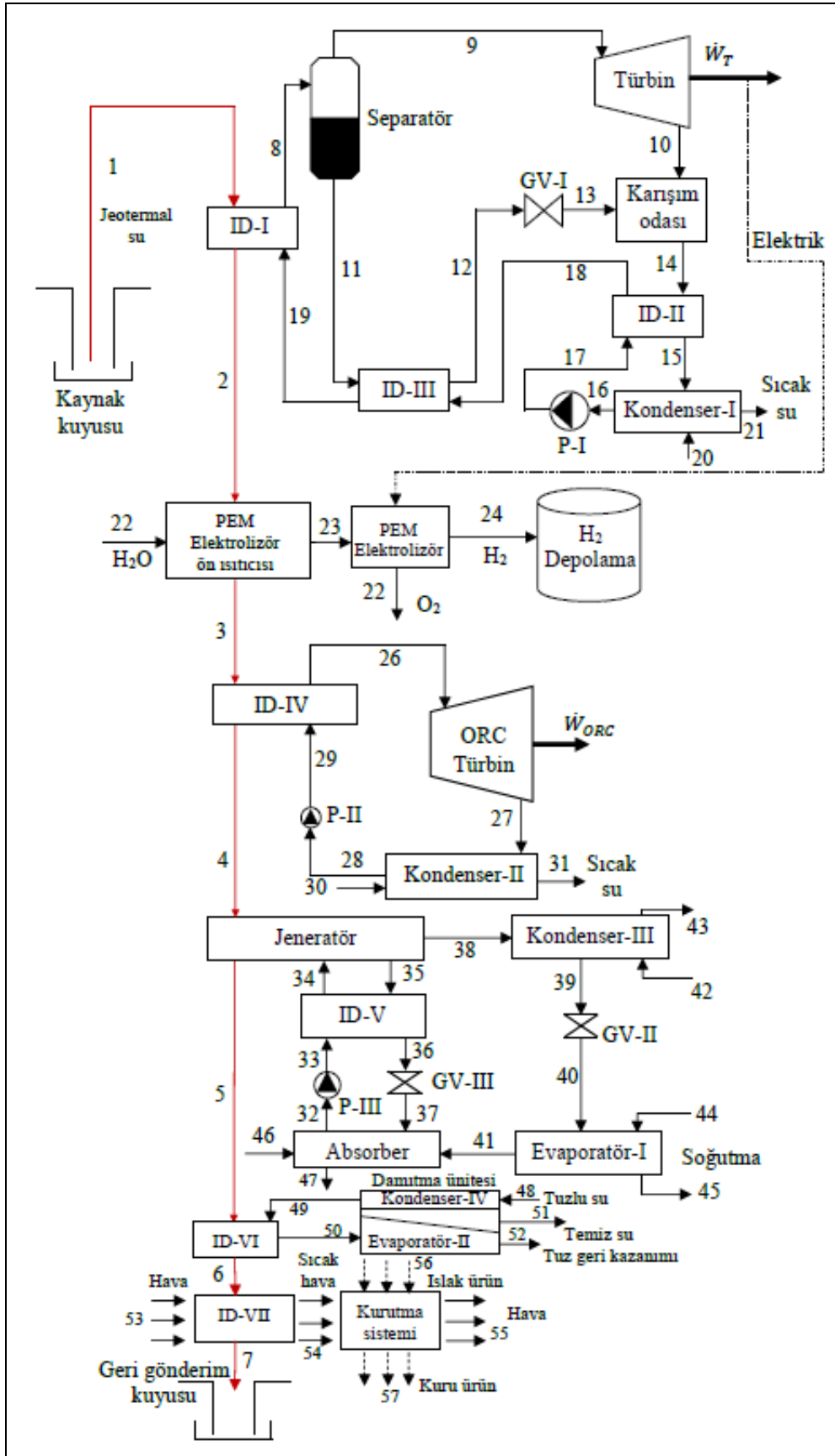
termodinamik analizini ve performans değerlendirmesini sunmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre jeotermal kaynak sıcaklığının entegre sistemin enerji ve ekserji verimliliği üzerine olumlu etkisi vardır. Ayrıca, Biçer ve Diñer [20] yaptıkları çalışmada güneş ve jeotermal kaynağı bir arada kullanan ve hidrojen üreten yeni bir enerji sistemi önermişlerdir. Önerdikleri sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %10.8 ve %46.3 olarak bulunmuştur. Yaptıkları parametrik analiz sonuçları da jeotermal kaynak suyun sıcaklığının sistemin verimine doğrudan etkisi olduğunu ve sistem verimini %60'a kadar artırdığını göstermiştir. Yılmaz [21] jeotermal enerjiyi kullanan hidrojen üreten sistem için termo-ekonomik analiz ve optimizasyon çalışması yapmıştır. Çalışmanın amacı üretilen hidrojen ve elektriğin birim maliyetini en aza indirmektir. Çalışma sonuçlarına göre, elektriğin ve hidrojenin birim maliyeti sırasıyla 0.01066 \$/kWh ve 1.088 \$/kg olarak bulunmuştur. Bu çalışmalara ek olarak, Ramazankhani ve diğ. [22] jeotermal kaynak kullanılarak hidrojen üretilmesi için bir fizibilite çalışması yapmışlardır. Çok kriterli karar mekanizması yöntemi kullandıkları çalışmada inceledikleri bölgeler arasından en uygun yerin Doğu Azerbaycan olduğunu iddia etmişlerdir.

Bu çalışmada jeotermal enerji kullanarak elektrik, hidrojen, sıcak su, ısıtma, soğutma temiz su üretimi ve ürün kurutma sağlanması için çok fonksiyonlu enerji sisteminin Engineering Equation Solver (EES) adlı mühendislik yazılım programı kullanılarak termodinamik analizi yapılmıştır. Çalışmanın başlıca amacı termodinamik analiz sayesinde sistemin enerji ve ekserji verimini değerlendirmek ve olası iyileştirmeleri işaret etmektir. Ayrıca, çevre sıcaklığı, jeotermal kaynak sıcaklığı, türbin giriş basıncı ve jeotermal kaynağın kütle akış debisi gibi bazı değişkenlerin sistem performansını nasıl etkilediğini görmek için parametrik analiz yapılmıştır. Çalışmanın diğer amaçları şu şekilde listelenebilir:

- Jeotermal kaynağı etkili olarak kullanan çok fonksiyonlu bir enerji sistemi tasarlamak,
- Sistemdeki her bir bileşen için denge denklemleri yazılıp, sistemdeki verimsizlikleri belirlemek,
- Sistem performansını etkileyen parametrelerin etkisini belirlemek,
- Jeotermal kaynaktan hidrojen üretilmesini sağlamak ve hidrojen üretimini etkileyen faktörleri belirlemektir.

2 Sistem tasarımı

Jeotermal enerji kaynağını kullanarak elektrik, hidrojen, sıcak su, ısıtma ve soğutma çıktılarını üreten çok fonksiyonlu enerji sisteminin şematik sunumu Şekil 1'de gösterilmiştir. Çok fonksiyonlu enerji sistemi için 175 °C'lik yüksek sıcaklıklı bir jeotermal kaynak seçilmiştir. 1 No.lu akış ile kaynaktan gelen 1500 kPa ve 175 °C'deki akışkan 1 No.lu ısı değiştiricisine (ID-I) girmektedir. Isı değiştiricisinde ısı enerjisinin bir kısmını 8 No.lu akış ile Kalina çevriminin separatörüne aktarır. Kalina çevriminde akışkan olarak amonyak-su (NH₃-H₂O) karışımı tercih edilmiştir. Buradan 9 No.lu yoldan Kalina çevriminin türbinine 145 °C'de akışkan girer ve bu sayede Kalina çevriminde elektrik üretimi sağlanır. Türbinden çıkan yoğunlaşmış akışkan 10 No.lu yoldan karışım odasına gönderilir. Separatörün 11 No.lu akışı ile gelen akışkan ID-III'ü geçerek 12 No.lu yoldan genişleme valfi-I'ne girerek karışım odasında türbinden gelen akışkan ile karışır. Karışım odasından çıkan akışkanın ısı enerjisi kondenserde sıcak su üretilmesini sağlarken, akışkan 16 No.lu yoldan pompa ile tekrar çevrime katılır.



Şekil 1: Jeotermal enerji destekli çok fonksiyonlu enerji üretim sisteminin şematik sunumu.

ID-I'den gelen 2 No.lu jeotermal akışkan PEM elektrolizör ön ısıtıcısına gelerek buradaki suyu 80 °C'ye kadar ısıtır. Burada ısınan su elektrolizöre girerek oksijen ve hidrojene ayrıştırılır. 25 No.lu yoldan hidrojen, hidrojen depolama ünitesine gönderilir.

3 No.lu akış PEM elektrolizör ön ısıtıcısından çıktıktan sonra organik Rankine çevriminin (ORC) 4 No.lu ısı değiştiricisine girer. ORC için çalışma akışkanı olarak izobütan seçilmiştir. Buradan 26 No.lu akışta yüksek sıcaklık ve basıncıta izobütan ORC türbininde elektrik üretilmesini sağlar. Türbinden çıkan izobütan kondenser-II'ye girerek buraya gelen suyu ısıtır. Daha sonra 28 No.lu yoldan pompa ile tekrar ID-IV'e aktarılır.

ID-IV'den çıkan 4 No.lu jeotermal akışkan son olarak absorpsiyonlu soğutma sisteminin jeneratörüne girer. Absorpsiyonlu soğutma sisteminde de farklı kaynama noktaları elde edilmesini sağladığından dolayı amonyak-su karışımı tercih edilmiştir. 38 No.lu akıştan zengin çözelti kondenser-III'e girerek suyu ısıtır. Oradan çıktıktan sonra genişleme valfi üzerinden evaporatöre girerek soğutma sağlar. Daha sonra absorbere giren akışkan tekrar ID-V üzerinden jeneratöre dönerek çevrimi tamamlar. Jeneratörden çıkan 5 No.lu jeotermal su geri gönderim kuyusuna gönderilir.

Tuzlu sudan veya deniz suyundan temiz su üretimi için membranlı damıtma ünitesi kullanılmıştır. Son olarak jeotermal kaynak geri gönderim kuyusuna gönderilmeden önce kurutma havasını ısıtmak için ısı değiştirici-VII girmektedir. 54 No.lu'dan çıkan sıcak ve kuru hava ve 56 No.lu ıslak ürün kurutma sistemine girmektedir. Kurutulmuş ürün ise 57 No.lu'dan dışarıya çıkmaktadır. Sistemin termodinamik modellenmesi için kullanılan veriler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Entegre sistemin termodinamik modellenmesi için girdi verileri.

Dış ortam Koşulları	
Dış ortam sıcaklığı (T_o)	20 °C
Dış ortam basıncı (P_o)	101.3 kPa
Jeotermal Sistem	
Jeotermal kaynak sıcaklığı (T_1)	175 °C
Jeotermal kaynak basıncı (P_1)	1500 kPa
Jeotermal akışkan kütle debisi (\dot{m}_1)	152 kg/s
Geri gönderim kuyu sıcaklığı (T_7)	45.67 °C
Isı değiştiricilerin verimi (η_{ID})	0.80
Kalina Çevrimi	
Çalışma akışkanı	$NH_3 - H_2O$
Kalina türbini izentropik verimliliği ($\eta_{iz,Kalina,t}$)	0.85
Kalina pompası izentropik verimliliği ($\eta_{iz,Kalina,p}$)	0.85
Kalina kondensör etkinliği	0.9
Kalina türbini girdi sıcaklığı (T_9)	145 °C
Kalina türbini çıkış basıncı (P_{10})	709.9 kPa
Pompa_I girdi sıcaklığı (T_{16})	28 °C
Pompa_I çıktı basıncı (P_{17})	1015.7 kPa
PEM Elektrolizör	
Voltaj	11.32 V
Akım	3.8 A
Hidrojen standart kimyasal ekserjisi	118,298.61 kJ/kg
Hidrojen alt ısı değeri	120,000 kJ/kg
Hidrojen üst ısı değeri	141,800 kJ/kg
Üretilen hidrojenin debisi (\dot{m}_{25})	0.00048 kg/s

Tablo 1'in devamı.

ORC Çevrimi	
Çalışma akışkanı	Izobütan
ORC türbini izentropik verimliliği ($\eta_{iz,ORC,t}$)	0.85
ORC pompası izentropik verimliliği ($\eta_{iz,ORC,p}$)	0.85
ORC kondensör etkinliği	0.9
ORC türbini girdi sıcaklığı (T_{26})	118 °C
ORC türbini çıkış basıncı (P_{27})	400 kPa
Pompa_II girdi sıcaklığı (T_{28})	26.4 °C
Pompa_II çıktı basıncı (P_{29})	3260
Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi	
Çalışma akışkanı	$NH_3 - H_2O$
Jeneratör giriş sıcaklığı (T_{34})	83.95 °C
Zayıf çözelti jeneratör çıkış sıcaklığı (T_{35})	98.95 °C
Zengin çözelti jeneratör çıkış sıcaklığı (T_{38})	113.95 °C
35 noktasındaki zayıf çözelti konsantrasyonu	0.4 (kg/kg)
38 noktasındaki zengin çözelti konsantrasyonu	0.999 (kg/kg)

3 Termodinamik analiz

Bu çalışmada jeotermal enerji destekli çok fonksiyonlu enerji üretim sisteminin termodinamik analizi yapılmıştır. Sistemde bulunan tüm bileşenler için kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denklemleri yazılmıştır [23]-[24]. Daha sonra bu denklemler EES yazılımı ile analiz edilmiştir. EES yazılımının tercih edilme sebebi, EES yazılımının içinde akışkanların entalpi, entropi gibi termodinamik özellikleri içinde barındırmasıdır. Jeotermal kaynak için sıcaklık ve basınç değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Genel olarak kütle denge denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

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

Burada, \dot{m} kütle akış oranını, alt indisler g ve ζ ise giren ve çıkan nicelikleri ifade etmektedir. Enerji denge denklemi ise şu şekilde ifade edilmektedir:

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

Burada, h spesifik entalpi, \dot{Q} ısı transfer oranı ve \dot{W} güç miktarıdır. Entropi denge denklemi şu şekilde yazılmaktadır:

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

Burada, s ve $\dot{S}_{\text{ürt}}$ sırasıyla spesifik entropi ve entropi üretimini göstermektedir. Ekserji denge denklemi şu şekildedir:

$$\sum \dot{m}_g ex_g + \sum \dot{E}x_g^Q + \sum \dot{E}x_g^W = \sum \dot{m}_\zeta ex_\zeta + \sum \dot{E}x_\zeta^Q + \sum \dot{E}x_\zeta^W + \dot{E}x_Y \quad (4)$$

Burada, ex spesifik ekserji, $\dot{E}x^Q$ ısı enerjisi transferinin ekserjisini, $\dot{E}x^W$ shaft işine ilişkin ekserjiyi ve $\dot{E}x_Y$ ekserji yıkımını göstermektedir. Sistemde bulunan tüm bileşenlere ait

kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denklemleri Tablo 2’de (EK A) verilmiştir.

Absorbsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji performansını değerlendirmek için sırasıyla enerji performans katsayısı (COP_{en}) ve ekserji performans katsayısı (COP_{ex}) kullanılmaktadır. COP_{en} soğutma enerjisi çıktısının enerji girdisine oranı ile hesaplanmaktadır:

$$COP_{en} = \frac{\dot{Q}_{eva} + \dot{Q}_{kon}}{\dot{W}_{jeo} + \dot{Q}_{ID-IV}} \quad (5)$$

COP_{ex} benzer şekilde soğutma ekserjisi çıktısının sisteme giren ekserjiye oranı ile hesaplanmaktadır:

$$COP_{ex} = \frac{\dot{E}x_{eva} + \dot{E}x_{kon}}{\dot{W}_{jeo} + \dot{E}x_{ID-IV}} \quad (6)$$

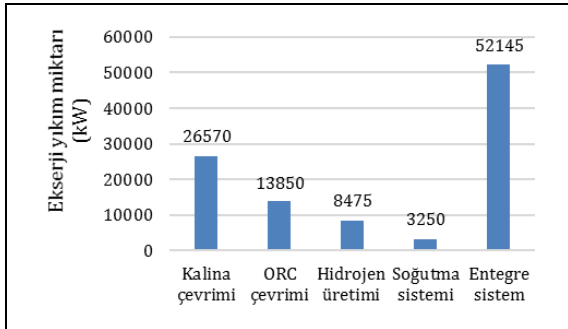
Sistemin toplam ekserji verimi ise sisteme giren ekserjinin sistemden çıkan ekserjiye oranı ile hesaplanmaktadır:

$$\psi = \frac{\text{Çıktı ürünlerinin toplam ekserjisi}}{\text{Sisteme giren toplam ekserji}} \quad (7)$$

4 Araştırma bulguları

Bu çalışmada jeotermal enerjiyi kaynak olarak kullanan elektrik, hidrojen, sıcak su, ısıtma ve soğutma çıktıları sağlayan çok fonksiyonlu enerji üretim sisteminin termodinamik analizi yapılmıştır.

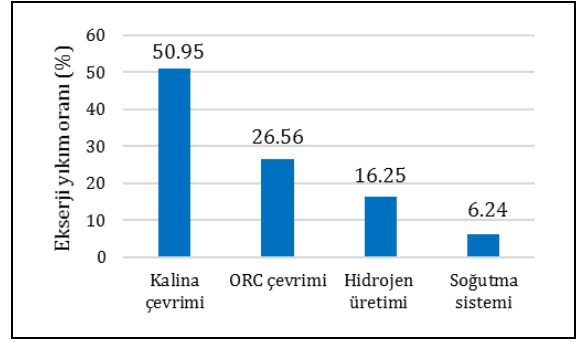
Şekil 2’de sistem bileşenleri ve tüm sistemde meydana gelen ekserji yıkım miktarı verilmiştir. Sonuçlara göre, sistemin çevrim bileşenlerinden en yüksek ekserji yıkım miktarları Kalina ve organik Rankine çevrimlerinde sırasıyla 26750 kW ve 13850 kW olarak ortaya çıkmıştır.



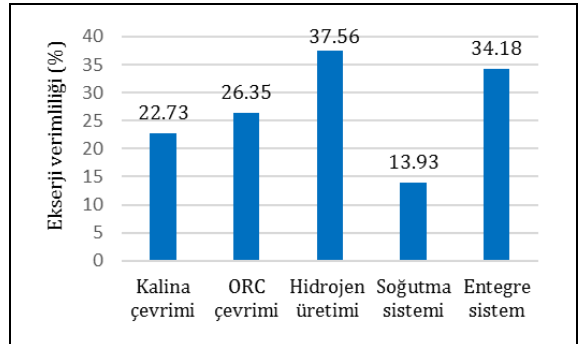
Şekil 2: Sistem bileşenlerinin ve tüm sistemin ekserji yıkım miktarı.

Şekil 3’te ise aynı alt bileşenlere ait ekserji yıkım oranları verilmiştir. Şekil 3’e göre sistemde oluşan ekserji yıkımının %50.95’i Kalina çevriminde ve %26.56’sı ORC çevriminde gerçekleşmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere Kalina çevrimi ve ORC alt sistemlerinde yapılacak iyileştirmeler entegre sistemin de verimini artıracaktır.

Şekil 4 sistem bileşenlerinin ve tüm sistemin ekserji verimliliğini göstermektedir. Şekle göre, entegre sistemin tamamının ekserji verimliliği %34.18 olarak hesaplanmıştır. Hidrojen üretim sisteminde PEM elektrolize ısı girdisi Kalina çevriminden çıkan atık ısı kullanılarak sağlandığı için hidrojen üretim çevrimi diğer sistemlere kıyasla ekserji verimliliği açısından daha iyidir. Absorbsiyonlu soğutma sisteminin ekserji verimliliği ise %13.93 olarak bulunmuştur.

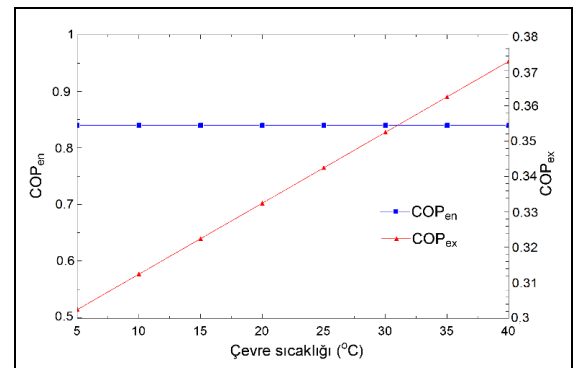


Şekil 3: Sistem bileşenlerinin ve tüm sistemin ekserji yıkım oranları.



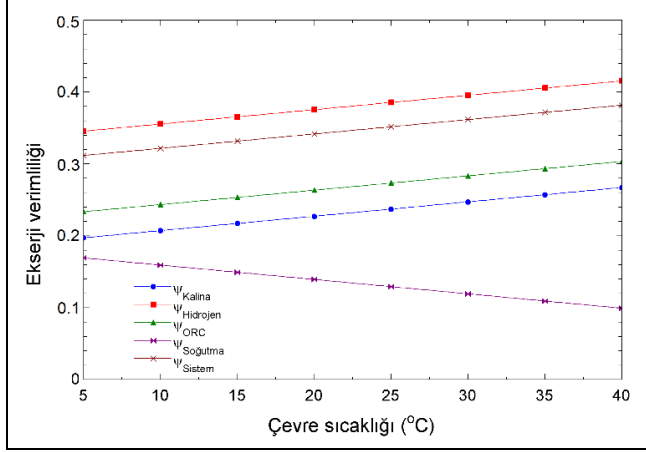
Şekil 4: Sistem bileşenlerinin ve entegre sistemin ekserji verimliliği.

Bu kısımda sistemin çalışmasını etkileyen parametrelerin sistem bileşenlerinin verimlerini nasıl etkilediği tartışılmıştır. Absorbsiyonlu soğutma sistemlerinin verimliliği incelenirken performans katsayısı (COP) kullanılmaktadır. Bu çalışmada absorpsiyonlu soğutma sistemi için hem enerji (COP_{en}) hem de ekserji (COP_{ex}) yönünden performans katsayıları incelenmiştir. Şekil 5 absorpsiyonlu soğutma sisteminin COP_{en} ve COP_{ex} değerlerinin çevre sıcaklığına göre değişimini göstermektedir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere, COP_{en} değeri çevre sıcaklığının değişmesi ile değişmemektedir. Bu aynı zamanda termodinamiğin birinci yasasına göre enerjinin çevre sıcaklığından bağımsız olduğunu desteklemektedir. Ekserji ise, sistemin çevre sıcaklığından farkı ile alakalı olduğu için, COP_{ex} değeri artan çevre sıcaklığı ile birlikte artmaktadır. Çünkü çevre sıcaklığının artması sistem ile çevre arasındaki sıcaklık farkını azaltmakta bu da verimliliği artırmaktadır. Çevre sıcaklığı 5 °C’den 40 °C’ye kadar arttıkça, COP_{ex} değeri yaklaşık %30’dan %37’ye kadar artmaktadır.



Şekil 5: Absorbsiyonlu soğutma sisteminin performans katsayılarının çevre sıcaklığına göre değişimi.

Çevre sıcaklığı enerji sistemlerinde önemli bir değişken olduğu için, sistem bileşenlerinin ekserji verimliliklerinin çevre sıcaklığına göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Çevre sıcaklığının artması ile absorpsiyonlu soğutma sisteminin yükü arttığı için, soğutma sisteminin ekserji verimliliği düşmektedir. Diğer tüm sistemlerde ise ekserji yıkım miktarları azalacağı için çevre sıcaklığının artması ile birlikte ekserji verimliliği artmaktadır.

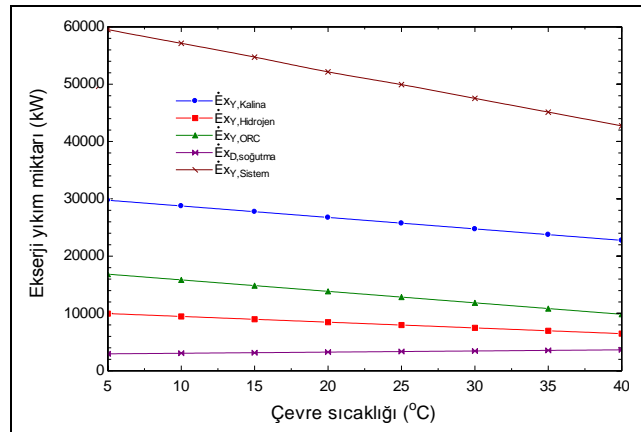


Şekil 6: Sistem bileşenlerinin ekserji verimliliklerinin çevre sıcaklığına göre değişimi.

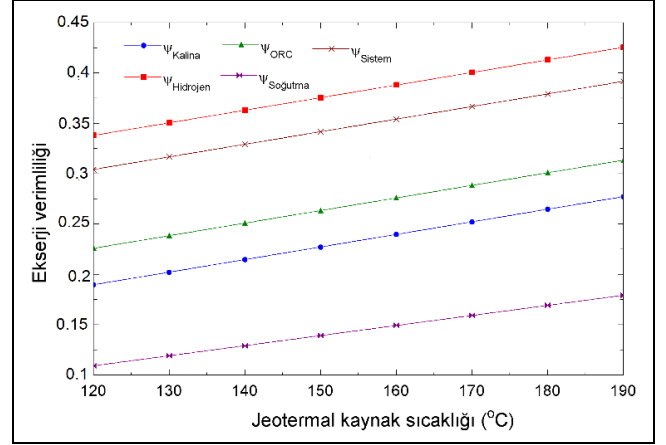
Ekserji verimliliğine bahsedildiği gibi çevre sıcaklığının artması sistemlerde meydana gelen ekserji yıkım miktarlarını azaltmaktadır. Şekil 7 çevre sıcaklığının 5 °C'den 40 °C'ye artması durumunda, sistemin toplam ekserji yıkım miktarını 60 MW'tan yaklaşık 44 MW seviyelerine kadar azaldığını göstermektedir.

Sistemin tek enerji kaynağı jeotermal enerji olduğu için, en önemli değişkenlerden biri de jeotermal kaynak suyun sıcaklığıdır. Şekil 8'de görüldüğü üzere, jeotermal kaynak suyun sıcaklığı 120 °C'den 190 °C'ye kadar arttıkça, entegre sistemin ve tüm alt bileşenlerin de ekserji verimliliği artmaktadır. Bunun nedeni akışkanın taşıdığı enerji miktarının daha yüksek seviyede olmasıdır.

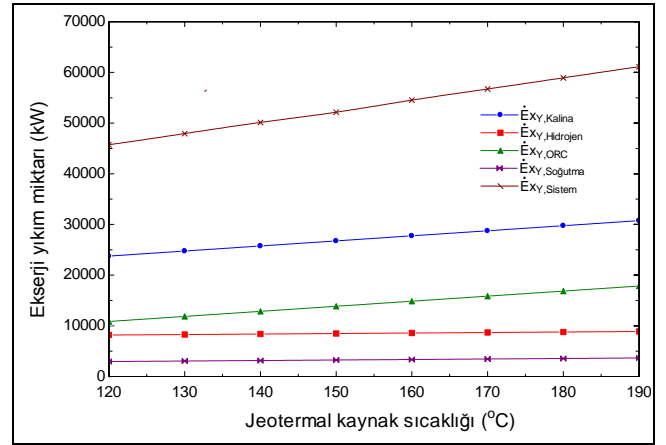
Şekil 9 jeotermal kaynak sıcaklığının ekserji yıkım miktarlarına etkisini göstermektedir. Jeotermal kaynak suyunun sıcaklığı arttıkça, sistemde meydana gelen ekserji yıkım miktarları da artmaktadır. Fakat yine de ekserji yıkım miktarları artsa da sistemin toplam ekserji verimliliği artmaktadır.



Şekil 7: Çevre sıcaklığının alt sistemler ve entegre sistemin ekserji yıkım miktarına etkisi.

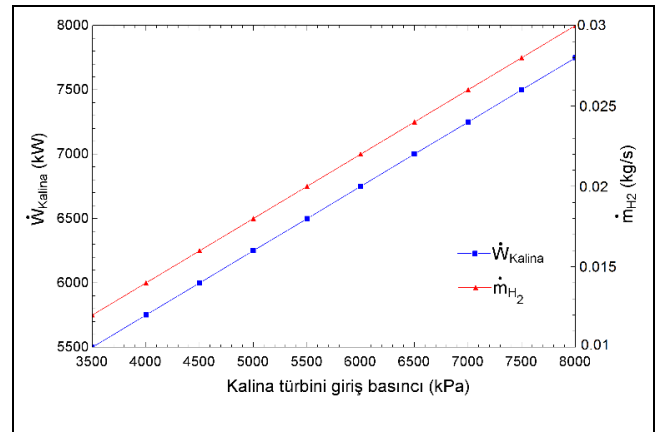


Şekil 8: Jeotermal kaynak sıcaklığının alt bileşenler ve tüm sistemin ekserji verimliliğine etkisi.



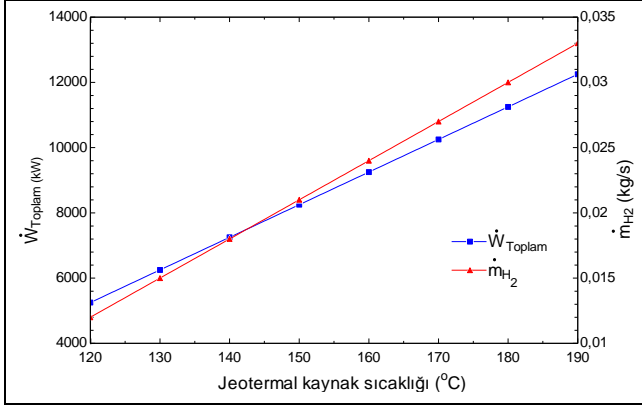
Şekil 9: Jeotermal kaynak sıcaklığının ekserji yıkım miktarlarına etkisi.

Sistemde üretilen elektriğin önemli bir kısmı Kalina çevriminden sağlanmaktadır. Dolayısı ile türbin giriş basıncı türbinde üretilen elektrik için önemli bir veridir. Şekil 10'dan görüldüğü gibi, Kalina türbin giriş basıncı, 3500 kPa'dan 8000 kPa'a kadar artırıldıkça, üretilen elektrik miktarı 5500 kW'tan 7750 kW değerine ve üretilen hidrojen miktarı da 0.012 kg/s'den 0.030 kg/s'e kadar artmaktadır.



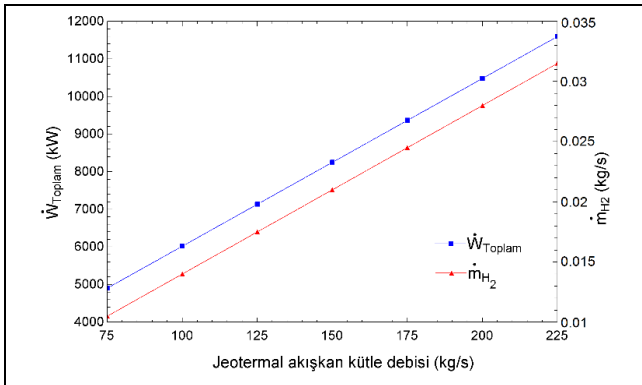
Şekil 10: Kalina türbin giriş basıncının üretilen elektrik ve hidrojen miktarlarına etkisi.

Şekil 11 jeotermal kaynak sıcaklığının üretilen elektrik ve hidrojen miktarına etkisini göstermektedir. Kaynak sıcaklığının artması akışkanın entalpisini artırdığından daha fazla iş yapılmakta böylece üretilen elektrik ve hidrojen miktarı artmaktadır.



Şekil 11: Jeotermal kaynak sıcaklığının üretilen elektrik ve hidrojen miktarına etkisi.

Elektrik ve hidrojen miktarını etkileyen bir başka parametre de jeotermal akışkanın kütle debisidir. Doğal olarak kütle debisinin artması türbinlerde yapılan işi artırmaktadır. Şekil 12 jeotermal akışkanın kütle debisinin 75 kg/s'den 225 kg/s değerine arttıkça, üretilen elektrik miktarının 5 MW'dan 11.5 MW'a kadar arttığını benzer şekilde üretilen hidrojen miktarının da 0.01 kg/s'den 0.03 kg/s'ye değerine kadar yükseldiğini göstermektedir.



Şekil 12: Jeotermal akışkanın kütle debisinin üretilen elektrik ve hidrojen miktarına etkisi.

5 Sonuçlar

Sunulan bu çalışmada, Jeotermal enerji destekli çok fonksiyonlu enerji sistemi termodinamik analiz ve parametrik çalışmalar sayesinde incelenmiştir. Genel olarak çok fonksiyonlu enerji üretim sistemleri atık ısıyı kullandıkları için tek ve çift fonksiyonlu enerji üretim sistemlerine göre daha verimli oldukları sonucu görülmüştür. Tablo 1'de verilen entegre sistemin çalışma şartları baz alınarak verimlilikler hesaplandığında, Kalina çevriminin ekserji verimi %22.73 ORC çevriminin ekserji verimliliği %26.35 hidrojen üretim sisteminin ekserji verimliliği %37.56 soğutma sisteminin ekserji verimliliği %13.93 ve entegre sistemin ekserji verimliliği ise %34.18 olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, yapılan analizler sonucunda sistemin en önemli iki çıktısı olan elektrik ve hidrojen miktarını en çok etkileyen faktörlerin jeotermal kaynağın sıcaklığı ve debisi olduğu belirtilmiştir.

6 Kaynaklar

- [1] Yüksel YE, Öztürk M, Dincer I. "Thermodynamic analysis and assessment of a novel integrated geothermal energy-based system for hydrogen production and storage". *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 4233-4243, 2018.
- [2] Office of Energy Analysis. "US-EIA International Energy Outlook". Washington DC, USA, 2013.
- [3] Öztürk M, Yüksel YE. "Energy structure of Turkey for sustainable development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1259-1272, 2016.
- [4] International Energy Agency. "Technical Report 2012 Key World Energy Statistics". <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>. (05.09.2015).
- [5] Külekçi ÖC. "Yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal enerjinin yeri ve Türkiye açısından önemi". *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 1(2), 83-91, 2009.
- [6] Kaymakçoğlu F, Çirkin T. "Jeotermal Enerjinin Değerlendirilmesi ve Elektrik Üretimi". III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin, Türkiye 19-21 Ekim 2005.
- [7] Kose R. "Research on the generation of electricity from the geothermal resources in Simav region, Turkey". *Renewable Energy*, 30(1), 67-79, 2005.
- [8] Arslan S, Mustafa D, Çetin K. "Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli". *Jeotermal Enerji Semineri*, Ankara, Türkiye, 21-28 Ekim 2001.
- [9] Yılmaz M. "Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi". *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54, 2012.
- [10] Murphy, Hugh, and Hiroaki Niitsuma. "Strategies for compensating for higher costs of geothermal electricity with environmental benefits". *Geothermics*, 28(6), 693-711, 1999.
- [11] Bravi, Mirko, and Riccardo Basosi. "Environmental impact of electricity from selected geothermal power plants in Italy". *Journal of Cleaner Production*, 66, 301-308, 2014.
- [12] Kızılkınan Ö, Akbaş Ç. "Güneş enerjisi destekli çok fonksiyonlu trijenerasyon sisteminin termodinamik analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1), 71-77, 2016.
- [13] Dağdaş A. "Termik santrallarda jeotermal enerjiden yararlanmanın yakıt tasarrufuna ve santral performansına etkileri". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 271-277, 2006.
- [14] Dincer I, Rosen MA. *Exergy Energy, Environment and Sustainable Development*, 1st ed. Oxford, UK, Elsevier, 2007.
- [15] Kanoglu M, Bolattürk A, Yılmaz C. "Thermodynamic analysis of models used in hydrogen production by geothermal energy". *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(16), 8783-8791, 2010.
- [16] Ganjehsarabi H, Gungor A, Dincer I. "Exergetic performance analysis of Dora II geothermal power plant in Turkey". *Energy*, 46(1), 101-108, 2012.
- [17] Al-Ali M, Dincer I. "Energetic and exergetic studies of a multigenerational solar-geothermal system". *Applied Thermal Engineering*, 71(1), 16-23, 2014.

- [18] Yuksel YE, Ozturk M, Dincer İ. "Energetic and exergetic performance evaluations of a geothermal power plant based integrated system for hydrogen production". *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(1), 78-90, 2018.
- [19] Yuksel YE, Ozturk M, Dincer I. "Analysis and performance assessment of a combined geothermal power-based hydrogen production and liquefaction system" *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(22), 10268-10280, 2018.
- [20] Bicer Y, Dincer I. "Development of a new solar and geothermal based combined system for hydrogen production". *Solar Energy*, 127, 269-284, 2016.
- [21] Yilmaz C. "Thermoeconomic modeling and optimization of a hydrogen production system using geothermal energy". *Geothermics*, 65, 32-43, 2017
- [22] Ramazankhani ME, Mostafaeipour A, Hosseininasab H, Fakhrzad MB. "Feasibility of geothermal power assisted hydrogen production in Iran". *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(41), 18351-18369, 2016.
- [23] Kotas Tj. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. London, Great Britain, Butterworth-Heinemann, 2013.
- [24] Moran MJ, Shapiro H, Boettner DD, Bailey MB. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. New York, USA, John Wiley and Sons, 2011.

Ek A

Ek Tablo 2: Jeotermal enerji destekli entegre sistemin kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denklemleri.

Sistem Bileşenleri	Kütle Denge Denklemi	Enerji Denge Denklemi	Entropi Denge Denklemi	Ekserji Denge Denklemi
ID-I	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $\dot{m}_8 = \dot{m}_{19}$	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{19} h_{19}$ $= \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_8 h_8$	$\dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_{19} s_{19}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt,ID-I}}$ $= \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_8 s_8$	$\dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_{19} ex_{19} = \dot{m}_2 ex_2$ $+ \dot{m}_8 ex_8$ $+ \dot{E}x_{Y,ID-I}$
Separatör	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 + \dot{m}_{11}$	$\dot{m}_8 h_8$ $= \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{11} h_{11}$	$\dot{m}_8 s_8 + \dot{S}_{\text{ürt,Sep}}$ $= \dot{m}_9 s_9 + \dot{m}_{11} s_{11}$	$\dot{m}_8 ex_8 = \dot{m}_9 ex_9 + \dot{m}_{11} ex_{11}$ $+ \dot{E}x_{Y,Sep}$
Türbin	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	$\dot{m}_9 h_9$ $= \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{W}_{Tür}$	$\dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{\text{ürt,Tür}}$ $= \dot{m}_{10} s_{10}$	$\dot{m}_9 ex_9 = \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{W}_{Tür}$ $+ \dot{E}x_{Y,Tür}$
Karışım odası	$\dot{m}_{10} + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{14}$	$\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{13} h_{13}$ $= \dot{m}_{14} h_{14}$	$\dot{m}_{10} s_{10} + \dot{m}_{13} s_{13}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt,Ko}} = \dot{m}_{14} s_{14}$	$\dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{m}_{13} ex_{13}$ $= \dot{m}_{14} ex_{14}$ $+ \dot{E}x_{Y,Ko}$
ID-II	$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{15}$ $\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18}$	$\dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{17} h_{17}$ $= \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{18} h_{18}$	$\dot{m}_{14} s_{14} + \dot{m}_{17} s_{17}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt,ID-II}}$ $= \dot{m}_{15} s_{15} + \dot{m}_{18} s_{18}$	$\dot{m}_{14} ex_{14} + \dot{m}_{17} ex_{17}$ $= \dot{m}_{15} ex_{15}$ $+ \dot{m}_{18} ex_{18}$ $+ \dot{E}x_{Y,ID-II}$
Kondenser-I	$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16}$ $\dot{m}_{20} = \dot{m}_{21}$	$\dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{20} h_{20}$ $= \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_{21} h_{21}$	$\dot{m}_{15} s_{15} + \dot{m}_{20} s_{20}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt,Kon-I}}$ $= \dot{m}_{16} s_{16} + \dot{m}_{21} s_{21}$	$\dot{m}_{15} ex_{15} + \dot{m}_{20} ex_{20}$ $= \dot{m}_{16} ex_{16}$ $+ \dot{m}_{21} ex_{21}$ $+ \dot{E}x_{Y,Kon-I}$
Pompa-I	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17}$	$\dot{m}_{16} h_{16} + \dot{W}_{P-I}$ $= \dot{m}_{17} h_{17}$	$\dot{m}_{16} s_{16} + \dot{S}_{\text{ürt,P-I}}$ $= \dot{m}_{17} s_{17}$	$\dot{m}_{16} ex_{16} + \dot{W}_{P-I} = \dot{m}_{17} ex_{17}$ $+ \dot{E}x_{Y,P-I}$
Genleşme valfi-I	$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13}$	$\dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_{13} h_{13}$	$\dot{m}_{12} s_{12} + \dot{S}_{\text{ürt,GV-I}}$ $= \dot{m}_{13} s_{13}$	$\dot{m}_{12} ex_{12} = \dot{m}_{13} ex_{13} + \dot{E}x_{Y,GV-I}$
ID-III	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$ $\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19}$	$\dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{18} h_{18}$ $= \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{19} h_{19}$	$\dot{m}_{11} s_{11} + \dot{m}_{18} s_{18}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt,ID-III}}$ $= \dot{m}_{12} s_{12} + \dot{m}_{19} s_{19}$	$\dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{m}_{18} ex_{18}$ $= \dot{m}_{12} ex_{12}$ $+ \dot{m}_{19} ex_{19}$ $+ \dot{E}x_{Y,ID-III}$
PEM elektrolizör ön ısıtıcısı	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ $\dot{m}_{22} = \dot{m}_{23}$	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{22} h_{22}$ $= \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{23} h_{23}$	$\dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_{22} s_{22}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt,PEM_ele}}$ $= \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_{23} s_{23}$	$\dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_{22} ex_{22} = \dot{m}_3 ex_3$ $+ \dot{m}_{23} ex_{23}$ $+ \dot{E}x_{Y,PEM_ele}$
PEM elektrolizör	$\dot{m}_{23} = \dot{m}_{24} + \dot{m}_{25}$	$\dot{m}_{23} h_{23} + \dot{W}_{PEM}$ $= \dot{m}_{24} h_{24} + \dot{m}_{25} h_{25}$	$\dot{m}_{23} s_{23} + \dot{S}_{\text{ürt,PEM}}$ $= \dot{m}_{24} s_{24} + \dot{m}_{25} s_{25}$	$\dot{m}_{23} ex_{23} + \dot{W}_{PEM} = \dot{m}_{24} ex_{24}$ $+ \dot{m}_{25} ex_{25}$ $+ \dot{E}x_{Y,PEM}$
ID-IV	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$ $\dot{m}_{26} = \dot{m}_{29}$	$\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{29} h_{29}$ $= \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{26} h_{26}$	$\dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_{29} s_{29}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt,ID-IV}}$ $= \dot{m}_4 s_4 + \dot{m}_{26} s_{26}$	$\dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_{29} ex_{29} = \dot{m}_4 ex_4$ $+ \dot{m}_{26} ex_{26}$ $+ \dot{E}x_{Y,ID-IV}$
ORC türbin	$\dot{m}_{26} = \dot{m}_{27}$	$\dot{m}_{26} h_{26}$ $= \dot{m}_{27} h_{27}$ $+ \dot{W}_{ORC,Tür}$	$\dot{m}_{26} s_{26} + \dot{S}_{\text{ürt,ORC,Tür}}$ $= \dot{m}_{27} s_{27}$	$\dot{m}_{26} ex_{26} = \dot{m}_{27} ex_{27} + \dot{W}_{ORC,Tür}$ $+ \dot{E}x_{Y,ORC,Tür}$
Kondenser-II	$\dot{m}_{27} = \dot{m}_{28}$ $\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31}$	$\dot{m}_{27} h_{27} + \dot{m}_{30} h_{30}$ $= \dot{m}_{28} h_{28} + \dot{m}_{31} h_{31}$	$\dot{m}_{27} s_{27} + \dot{m}_{30} s_{30}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt,Kon-II}}$ $= \dot{m}_{28} s_{28} + \dot{m}_{31} s_{31}$	$\dot{m}_{27} ex_{27} + \dot{m}_{30} ex_{30}$ $= \dot{m}_{28} ex_{28}$ $+ \dot{m}_{31} ex_{31}$ $+ \dot{E}x_{Y,Kon-II}$

Ek Tablo 2'nin devamı.

Sistem Bileşenleri	Kütle Denge Denklemi	Enerji Denge Denklemi	Entropi Denge Denklemi	Ekserji Denge Denklemi
Pompa-II	$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29}$	$\dot{m}_{28}h_{28} + \dot{W}_{P,II}$ $= \dot{m}_{29}h_{29}$	$\dot{m}_{28}s_{28} + \dot{S}_{\text{ürt},P,II}$ $= \dot{m}_{29}s_{29}$	$\dot{m}_{28}ex_{28} + \dot{W}_{P,II} = \dot{m}_{29}ex_{29}$ $+ \dot{E}x_{Y,P,II}$
Jeneratör	$\dot{m}_4 + \dot{m}_{34}$ $= \dot{m}_5 + \dot{m}_{35} + \dot{m}_{38}$	$\dot{m}_4h_4 + \dot{m}_{34}h_{34}$ $= \dot{m}_5h_5 + \dot{m}_{35}h_{35}$ $+ \dot{m}_{38}h_{38}$	$\dot{m}_4s_4 + \dot{m}_{34}s_{34}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt},Jen}$ $= \dot{m}_5s_5 + \dot{m}_{35}s_{35}$ $+ \dot{m}_{38}s_{38}$	$\dot{m}_4ex_4 + \dot{m}_{34}ex_{34} = \dot{m}_5h_5$ $+ \dot{m}_{35}ex_{35}$ $+ \dot{m}_{38}ex_{38}$ $+ \dot{E}x_{Y,Jen}$
Kondenser-III	$\dot{m}_{38} = \dot{m}_{39}$ $\dot{m}_{42} = \dot{m}_{43}$	$\dot{m}_{38}h_{38} + \dot{m}_{42}h_{42}$ $= \dot{m}_{39}h_{39} + \dot{m}_{43}h_{43}$	$\dot{m}_{38}s_{38} + \dot{m}_{42}s_{42}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt},Kon,III}$ $= \dot{m}_{39}s_{39} + \dot{m}_{43}s_{43}$	$\dot{m}_{38}ex_{38} + \dot{m}_{42}ex_{42}$ $= \dot{m}_{39}ex_{39}$ $+ \dot{m}_{43}ex_{43}$ $+ \dot{E}x_{Y,Kon,III}$
Genleşme valfi-II	$\dot{m}_{39} = \dot{m}_{40}$	$\dot{m}_{39}h_{39} = \dot{m}_{40}h_{40}$	$\dot{m}_{39}s_{39} + \dot{S}_{\text{ürt},GV,II}$ $= \dot{m}_{40}s_{40}$	$\dot{m}_{39}ex_{39} = \dot{m}_{40}ex_{40} + \dot{E}x_{Y,GV,II}$
Evaporatör-I	$\dot{m}_{40} = \dot{m}_{41}$ $\dot{m}_{44} = \dot{m}_{45}$	$\dot{m}_{40}h_{40} + \dot{m}_{44}h_{44}$ $= \dot{m}_{41}h_{41} + \dot{m}_{45}h_{45}$	$\dot{m}_{40}s_{40} + \dot{m}_{44}s_{44}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt},Eva,I}$ $= \dot{m}_{41}s_{41} + \dot{m}_{45}s_{45}$	$\dot{m}_{40}ex_{40} + \dot{m}_{44}ex_{44}$ $= \dot{m}_{41}ex_{41}$ $+ \dot{m}_{45}ex_{45}$ $+ \dot{E}x_{Y,Eva,I}$
Absorber	$\dot{m}_{46} = \dot{m}_{47}$ $\dot{m}_{37} + \dot{m}_{41} = \dot{m}_{32}$	$\dot{m}_{37}h_{37} + \dot{m}_{41}h_{41}$ $+ \dot{m}_{46}h_{46}$ $= \dot{m}_{32}h_{32} + \dot{m}_{47}h_{47}$	$\dot{m}_{37}s_{37} + \dot{m}_{41}s_{41}$ $+ \dot{m}_{46}s_{46} + \dot{S}_{\text{ürt},Abs}$ $= \dot{m}_{32}s_{32} + \dot{m}_{47}s_{47}$	$\dot{m}_{37}ex_{37} + \dot{m}_{41}ex_{41} + \dot{m}_{46}ex_{46}$ $= \dot{m}_{32}ex_{32}$ $+ \dot{m}_{47}ex_{47}$ $+ \dot{E}x_{Y,Abs}$
Pompa-III	$\dot{m}_{32} = \dot{m}_{33}$	$\dot{m}_{32}h_{32} + \dot{W}_{P,III}$ $= \dot{m}_{33}h_{33}$	$\dot{m}_{32}s_{32} + \dot{S}_{\text{ürt},P,III}$ $= \dot{m}_{33}s_{33}$	$\dot{m}_{32}ex_{32} + \dot{W}_{P,III} = \dot{m}_{33}ex_{33}$ $+ \dot{E}x_{Y,P,III}$
Genleşme valfi-III	$\dot{m}_{36} = \dot{m}_{37}$	$\dot{m}_{36}h_{36} = \dot{m}_{37}h_{37}$	$\dot{m}_{36}s_{36} + \dot{S}_{\text{ürt},GV,III}$ $= \dot{m}_{37}s_{37}$	$\dot{m}_{36}ex_{36} = \dot{m}_{37}ex_{37} + \dot{E}x_{Y,GV,III}$
ID-V	$\dot{m}_{33} = \dot{m}_{34}$ $\dot{m}_{35} = \dot{m}_{36}$	$\dot{m}_{33}h_{33} + \dot{m}_{35}h_{35}$ $= \dot{m}_{34}h_{34} + \dot{m}_{36}h_{36}$	$\dot{m}_{33}s_{33} + \dot{m}_{35}s_{35}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt},ID,V}$ $= \dot{m}_{34}s_{34} + \dot{m}_{36}s_{36}$	$\dot{m}_{33}ex_{33} + \dot{m}_{35}ex_{35}$ $= \dot{m}_{34}ex_{34}$ $+ \dot{m}_{36}ex_{36}$ $+ \dot{E}x_{Y,ID,V}$
ID-VI	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$ $\dot{m}_{49} = \dot{m}_{50}$	$\dot{m}_5h_5 + \dot{m}_{49}h_{49}$ $= \dot{m}_6h_6 + \dot{m}_{50}h_{50}$	$\dot{m}_5s_5 + \dot{m}_{49}s_{49}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt},ID,VI}$ $= \dot{m}_6s_6 + \dot{m}_{50}s_{50}$	$\dot{m}_5ex_5 + \dot{m}_{49}ex_{49} = \dot{m}_6ex_6$ $+ \dot{m}_{50}ex_{50}$ $+ \dot{E}x_{Y,ID,VI}$
Damıtma ünitesi	$\dot{m}_{48} + \dot{m}_{50}$ $= \dot{m}_{49} + \dot{m}_{51} + \dot{m}_{52}$	$\dot{m}_{48}h_{48} + \dot{m}_{50}h_{50}$ $= \dot{m}_{49}h_{49} + \dot{m}_{51}h_{51}$ $+ \dot{m}_{52}h_{52}$	$\dot{m}_{48}s_{48} + \dot{m}_{50}s_{50}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt},dü}$ $= \dot{m}_{49}s_{49} + \dot{m}_{51}s_{51}$ $+ \dot{m}_{52}s_{52}$	$\dot{m}_{48}ex_{48} + \dot{m}_{50}ex_{50}$ $= \dot{m}_{49}ex_{49}$ $+ \dot{m}_{51}ex_{51}$ $+ \dot{m}_{52}ex_{52}$ $+ \dot{E}x_{Y,dü}$
ID-VII	$\dot{m}_6 = \dot{m}_7$ $\dot{m}_{53} = \dot{m}_{54}$	$\dot{m}_6h_6 + \dot{m}_{53}h_{53}$ $= \dot{m}_7h_7 + \dot{m}_{54}h_{54}$	$\dot{m}_6s_6 + \dot{m}_{53}s_{53}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt},ID,VII}$ $= \dot{m}_7s_7 + \dot{m}_{54}s_{54}$	$\dot{m}_6ex_6 + \dot{m}_{53}ex_{53} = \dot{m}_7ex_7$ $+ \dot{m}_{54}ex_{54}$ $+ \dot{E}x_{Y,ID,VII}$
Kurutma sistemi	$\dot{m}_{54} = \dot{m}_{55}$ $\dot{m}_{56} = \dot{m}_{57}$	$\dot{m}_{54}h_{54} + \dot{m}_{56}h_{56}$ $= \dot{m}_{55}h_{55} + \dot{m}_{57}h_{57}$	$\dot{m}_{54}s_{54} + \dot{m}_{56}s_{56}$ $+ \dot{S}_{\text{ürt},ks}$ $= \dot{m}_{55}s_{55} + \dot{m}_{57}s_{57}$	$\dot{m}_{54}ex_{54} + \dot{m}_{56}ex_{56}$ $= \dot{m}_{55}ex_{55}$ $+ \dot{m}_{57}ex_{57}$ $+ \dot{E}x_{Y,ks}$