

Jeotermal Enerji ve Kalina Çevrim Tabanlı Entegre Sistemde Yeşil Hidrojen ve Amonyak, Tatlı Su ve Sıcak Su Üretiminin İncelenmesi

Sadık Ata*¹ 

*¹KTO Karatay Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, KONYA

(Alınış / Received: 26.01.2025, Kabul / Accepted: 16.03.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler

Yeşil hidrojen,
Yeşil amonyak,
Karbon kazanımı,
Jeotermal enerji,
Kalina çevrimi,
Ekonomik analiz

Öz: Bu çalışmada jeotermal enerji ve Kalina çevrim tabanlı multi-üretim sisteminin enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel performansı analiz edilmiştir. Kalina, sıcak su üretim ünitesi, proton değişim membran elektrolizör, amonyak reaktörü ve ters ozmoz ünitesinden oluşan entegre sistem ele alınmıştır. Jeotermal enerjinin güneş ve rüzgar enerjisine kıyasla hava koşullarından bağımsız kesintisiz bir enerji kaynağı olmasının avantajıyla hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimleri incelenmiştir. Jeotermal kaynak giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı, Kalina türbin giriş basıncı, Kalina soğuk su giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi ve Kalina türbin izantropik veriminin sistem performansı üstündeki etkisi tespit edilmiştir. Ekonomik ve çevresel analizde sırasıyla dinamik geri ödeme süresi, net bugünkü değer, kurtarılan karbon dioksit ve karbon kazanımı incelenmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığının 160 °C'den 180 °C'ye yükselmesiyle saatlik hidrojen, amonyak ve tatlı su üretiminin sırasıyla 3,598 kg, 13,98 kg, 30,9 m³ arttığı ve geri ödeme süresinin buna bağlı olarak %9,38 azaldığı tespit edilmiştir. Fakat sisteme sağlanan ekserji girişindeki artışın daha fazla oranda olması nedeniyle ekserji veriminin %6,79 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Investigation of Green Hydrogen and Ammonia, Fresh Water and Hot Water Production in an Integrated System Based on Geothermal Energy and Kalina Cycle

Keywords

Green hydrogen,
Green ammonia,
Carbon gain,
Geothermal energy,
Kalina cycle,
Economic analysis

Abstract: In this study, the energy, exergy, economic and environmental performance of geothermal energy and Kalina cycle based multi-production system is analysed. The integrated system consisting of Kalina, hot water production unit, proton exchange membrane electrolyser, ammonia reactor and reverse osmosis unit is considered. Hydrogen, ammonia, fresh water and hot water productions were analysed with the advantage of geothermal energy being an uninterrupted energy source independent of weather conditions compared to solar and wind energy. The effects of geothermal source inlet temperature, geothermal source outlet temperature, Kalina turbine inlet pressure, Kalina cold water inlet temperature, geothermal source mass flow rate and Kalina turbine isentropic efficiency on the system performance are determined. Dynamic payback period, net present value, saved carbon dioxide and carbon gain are analysed in economic and environmental analysis respectively. It was determined that the hourly production hydrogen, ammonia and freshwater increased by 3.598 kg, 13.98 kg and 30.9 m³, respectively, and the payback period decreased by 9.38% with the increase in the geothermal source inlet temperature from 160 °C to 180 °C. However, it was determined that the exergy efficiency decreased by 6.79% due to the increase in the exergy input to the system at a higher rate.

*İlgili Yazar, email: sadik.ata@karatay.edu.tr

1. Giriş

Enerji üretimi için fosil yakıtların kullanılması önemli miktarda karbon dioksit (CO₂) emisyonuna ve bununla birlikte iklim değişikliğine ve küresel ısınmaya neden olmaktadır [1]. Sürdürülebilir kalkınma ve net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda fosil yakıt bağımlılığının azaltılması kaçınılmazdır [2]. Fosil yakıtlardan uzaklaşılmasının odaklanıldığı 2023 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansında (COP28) 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji kapasitesinin üç katına çıkarılması ve yenilenebilir enerji üretiminin en az 11.000 GW'a yükselmesi ele alınmıştır [3]. Yenilenebilir enerjilerin arasında güneşe ve rüzgara bağlı olan kesintili kaynakların aksine, jeotermal enerji dış meteorolojik koşullardan bağımsız olmasıyla öne çıkmaktadır [4]. Jeotermal enerjinin 2008 yılında dünyanın birincil enerji arzının sadece %0,1'ini oluşturmalarına rağmen 2050 yılına kadar dünyanın enerji ihtiyacının %3-5'ini karşılaması beklenmektedir [5]. Dünya genelinde birçok bölgede yer altı jeotermal kaynakları olmakla birlikte enerji teknolojisindeki gelişmeler ile düşük sıcaklıkta elektrik üretimine uygun sistemler artmaktadır. Bunun için termodinamik çevrimlerden yararlanılmaktadır [6].

Düşük sıcaklıklı kaynaklardan elektrik üretiminde en yaygın olan yöntemler Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ve Kalina çevrimidir. Kalina çevrimlerinin yüksek başlangıç maliyetlerine karşın ORÇ'ye kıyasla daha düşük işletme ve bakım maliyetlerinin olduğu ve ORÇ'den daha fazla net güç elde edildiği belirtilmiştir ve Kalina çevrimlerinin jeotermal uygulamaları için daha uygun olduğu vurgulanmıştır [7-8]. ORÇ'nin çalışma prensibi, pompanın yüksek basınçlı organik akışkanı evaporatöre göndermesi, evaporatörde sudan daha düşük kaynama noktasına sahip akışkanın buharlaşması, elektrik üretimi için türbinde genişlemesi ve son olarak basıncı ve sıcaklığı azalan akışkanın kondenserde yoğunlaşması şeklinde çalışmaktadır [9]. Kalina çevriminde temel fark çalışma akışkanı olarak amonyak/su karışımı kullanmasıdır. Evaporatörde tamamen buharlaşmayan karışımın sıvı ve buhar fazlarını ayırmak için separatör kullanılır. Ayrıca çevrim verimi reküperatörler kullanılarak iyileştirilir [10]. ORÇ'den farklı olarak Kalina çevriminin çalışma akışkanı olarak amonyak-su karışımını kullanması ve çözelti konsantrasyonunun ısı kaynağına göre ayarlanabilmesiyle daha verimli çalışmakta [11] ve değişen kaynama ve yoğunlaşma sıcaklıklarına sahip olması nedeniyle daha az ekserji yıkımı gerçekleşmektedir [12].

Bu çalışmada bu avantajlarından dolayı jeotermal enerji tabanlı Kalina çevrimi incelenmiştir. Kalina çevriminde üretilen elektriğin farklı üretim hatlarında kullanılması ele alınmıştır. Kalina çevrimiyle proton değişim membran (PDM) elektrolizör ve yeşil amonyak üretim hattının entegre edilmesiyle hidrojen ve amonyak üretimi analiz edilmiştir.

Düşük moleküler ağırlığa sahip olan hidrojen yüksek veriminden dolayı en uygun enerji taşıyıcılarından biridir. Ayrıca metandan yaklaşık sekiz kat daha hafiftir. Piroliz, termoliz, elektroliz ve hidrokarbon reformasyonu gibi yöntemlerle üretilmektedir. Hidrojen üretiminde kaynak olarak yenilenebilir enerjinin kullanıldığı durumlarda üretilen hidrojen yeşil hidrojen adını alır, bu işlem karbon-nötr olduğu için CO₂ emisyonlarının azaltılması noktasında önemlidir [13-15]. PDM, alkali ve katı oksit elektrolizör arasından PDM yüksek voltaj verimliliği, yüksek akım yoğunluğunda çalışabilmesi ve yüksek saflıkta hidrojen üretebilmesi nedeniyle öne çıkmaktadır [16]. Bu çalışmada ayrıca PDM elektrolizörüyle üretilen hidrojenin nitrojen ile birleşmesiyle amonyak üretimi ele alınmıştır.

Gübre, plastik, ilaç ve kimya endüstrileri olmak üzere birçok sektörde önemli rol oynayan amonyağın yılda yaklaşık 150 MT olarak üretildiği belirtilmiştir [17]. Amonyak, dünya çapında yüksek basınç ve sıcaklık altında Haber-Bosch prosesi olarak bilinen yöntem ile üretilmektedir. Bu yöntemde buhar metan reformasyonu ile üretilen hidrojenden kaynaklı olarak ciddi seviyede CO₂ açığa çıkmasına neden olmaktadır. Fakat, amonyak üretiminde kullanılan hidrojen buhar metan reformasyonu ile değil de suyun elektrolizi yöntemiyle yenilenebilir enerji ile üretilirse çevreye olumsuz bir katkısı olmaz ve bu süreç yeşil amonyak üretimi olarak adlandırılmaktadır [18-20].

Bu çalışmada sürdürülebilir bir gelecek noktasında incelenen bir diğer üretim tatlı su üretimidir. İklim değişikliğiyle birlikte yağışların azalması ve hızlı nüfus artışı su kıtlığı noktasında ciddi bir soruna yol açmıştır. Yeryüzündeki suyun yaklaşık %97'sinin ortalama 35.000 ppm tuzluluk oranına sahip okyanuslarda ve denizlerde bulunduğu, 500 ppm'den daha az tuzluluk oranına sahip tatlı su oranının ise %3 olduğu belirtilmiştir. Bu tatlı su sıkıntısında çözüm ise deniz suyunun tuzdan arındırılmasıdır. Bunun için kullanılan uygun yöntemlerden biri ters ozmoz işlemidir [21]. Bu çalışmada da jeotermal enerji kaynaklı Kalina çevriminin ters ozmoz ünitesi ile entegrasyonu ele alınarak tatlı su üretimi incelenmiştir. Tüm bu üretim hatları dikkate alınarak son yıllarda yapılan önemli çalışmalar ve ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Hai vd. [22] jeotermal tabanlı flaş ve Kalina, absorpsiyonlu soğutma, termoelektrik jeneratör, proton değişim membran elektrolizörü ve ters ozmoz entegre sistemini incelemişler ve iki-amaçlı optimizasyon çalışması

yapmışlardır. Maksimum ekserji verimi ve minimum geri ödeme süresi amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. %35,58 ekserji verimi ve 0,418 yıl geri ödeme süresi değerine ulaşmışlardır. Yuksel vd. [23] jeotermal, Organik Rankine Çevrimi, hidrojen ve amonyak üretim tesisi, arıtma, absorpsiyonlu soğutma, kurutma tesisi ve sıcak su üretim sisteminden oluşan entegre sistem üzerinde parametrik çalışma yapmışlardır. Tüm sistem için %54,73 ekserji verime ulaşılmıştır. Sistem performansını en önemli etkileyen parametrelerden birinin jeotermal sıcaklığı olduğu belirtilmiştir. Sun vd. [24] solar-jeotermal enerji tabanlı multi-üretim sisteminde ekserji verimi ve ürünlerin toplam birim maliyet amaç fonksiyonları doğrultusunda optimizasyon çalışması yapmışlardır. Optimum şartlar altında ekserji verimi ve birim maliyet sırasıyla %31,71 ve 1,75 \$/GJ olarak tespit edilmiştir.

Malik vd. [25] Kalina, Kalina-termoelektrik jeneratör ve Kalina-termoelektrik jeneratör- proton değişim membran yakıt hücresi sistemlerinin performansını karşılaştırmışlardır. Net güç ve elektrik maliyeti bazlı optimizasyon çalışması yapmışlardır. Termoelektrik jeneratör ve proton değişim membran yakıt hücresi ile olan entegre sistemle net gücün arttığını belirtmişlerdir. Bu durum için ekserji verimi %39,14 olarak tespit edilmiştir. Alirahmi vd. [26] jeotermal tabanlı Organik Rankine Çevrimi-PDM Elektrolizör ve absorpsiyonlu soğutmadan oluşan multi-üretim sistemiyle hidrojen, soğutma ve güç üretimini incelemişlerdir. Jeotermal akışkan sıcaklığı, debisi, türbin giriş sıcaklığı ve türbin veriminin sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çok amaçlı optimizasyon ile %37,85 ekserji verimi ve 15,09 \$/h maliyet oranına ulaşılmıştır. Akkurt [27], çok düşük sıcaklıklı jeotermal enerji tabanlı Organik Rankine Çevriminin termodinamik analizi üzerine çalışma yapmıştır. En yüksek ekserji yıkımının ısı değiştiricilerinde gerçekleştiğini belirtmiştir. Koç ve Yağlı [28], Kalina çevrimi üzerine enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Sistem bileşenleri içinde en düşük ekserji veriminin buharlaştırıcıya ait olduğunu belirtmişlerdir. Kalina sistemi için %26,97 ekserji verimine ulaşmışlardır.

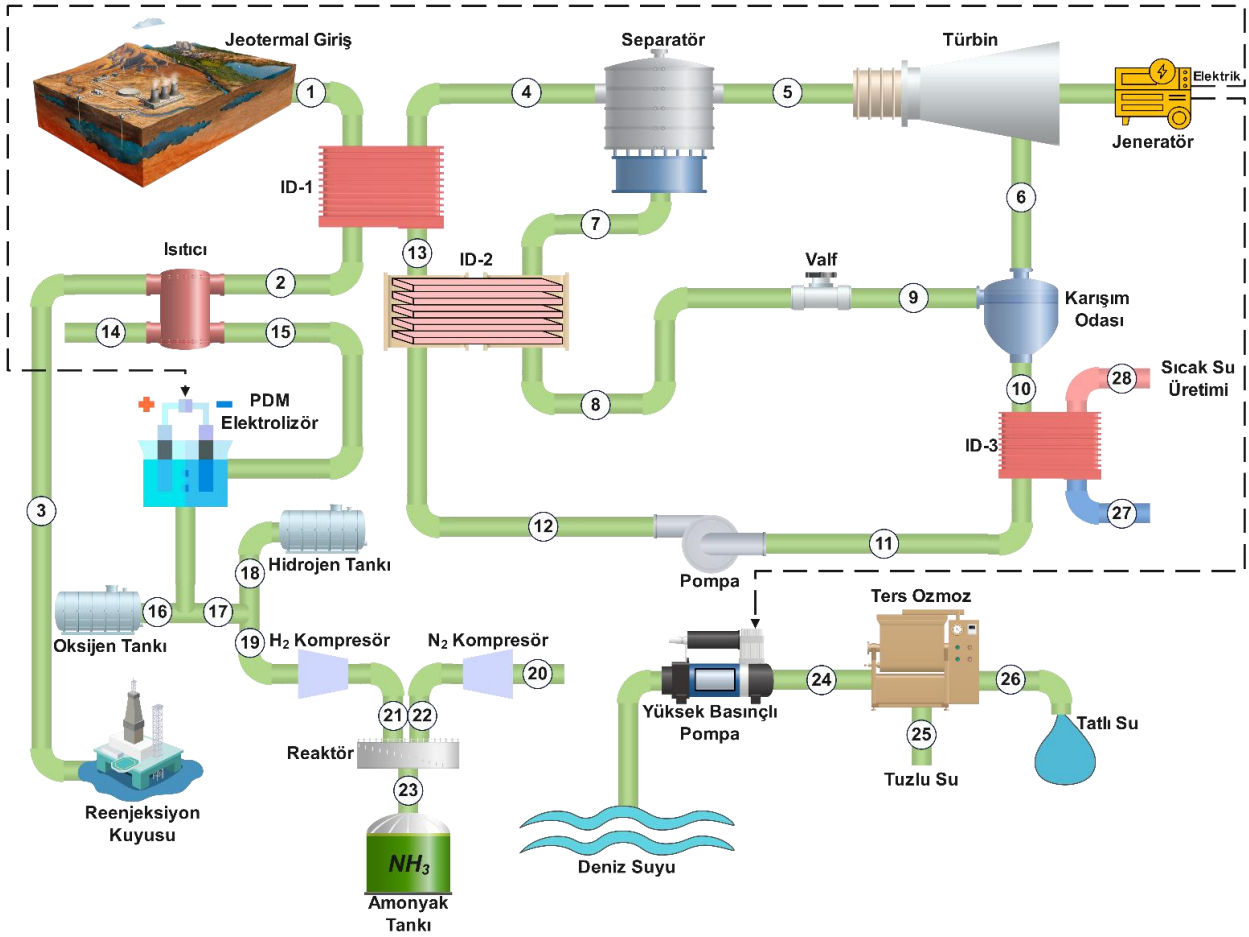
Kara ve Kaşka [29], jeotermal enerji kaynaklı Kalina çevrimi üzerine çalışma yapmışlardır. Türbin giriş basıncı, türbin verimi, kondenser çıkış sıcaklığı ve pompa verim değişiminin Kalina çevriminin termo-ekonomik performansına etkisini incelemişlerdir. Şen ve Yılmaz [30], jeotermal ve güneş enerjisi tabanlı kojenerasyon sisteminin termodinamik analizini yapmışlardır. Jeotermal sıcaklık ve güneş radyasyon değişiminin elektrik ve hidrojen üretimine etkisini belirlemişlerdir. Entegre sistem için %46 ekserji verimine ulaşmışlardır. Gülerüz ve Özen [31], jeotermal kaynaklı Organik Rankine Çevriminin eksergo-ekonomik analizi üzerine çalışma yapmışlardır. En yüksek ekserji yıkımının evaporatörde gerçekleştiğini ve toplam ürün maliyetinin 3,662 \$/GJ olduğunu belirtmişlerdir.

Literatürde bulunan amonyak üretiminin enerji ve ekserji analizinin olduğu çalışmalara ek olarak bu çalışmada ekonomik ve çevresel analiz de yapılmıştır. Jeotermal enerji ve Kalina tabanlı multi-üretim sistemi ele alınmıştır. Burada üretilen gücün proton değişim membran elektrolizörüne ve ters ozmoz ünitesine aktarılmasıyla yeşil hidrojen ve tatlı su üretimi incelenmiştir. Elektrolizörde üretilen hidrojenin bir bölümü depolanırken bir bölümü de amonyak üretim hattında kullanılmıştır. Burada amonyak reaktöründe hidrojen ve nitrojenin birleşmesiyle yeşil amonyak üretimi incelenmiştir. Ayrıca Kalina ünitesinde karışma odası çıkışındaki ısı değiştirici sıcak su üretim amacıyla kullanılmıştır. Böylece hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak su olmak üzere dört farklı çıktısı olan multi-üretim sisteminin enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel performansı analiz edilmiştir. Engineering Equation Solver (EES) ile oluşturulan termodinamik modelin literatürdeki çalışmalar baz alınarak doğrulanmasının ardından jeotermal kaynak giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı, Kalina türbin giriş basıncı, Kalina soğuk su giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi ve Kalina türbin izantropik veriminin etkisi incelenmiştir.

Bu çalışma özellikle geleneksel yöntemlerle üretiminde ciddi seviyede karbon dioksit salınımına sebep olan hidrojen ve amonyakın, yenilenebilir enerjinin entegre sistemde kullanılmasıyla üretilmesi sonucu kurtarılan karbon dioksit ve buna bağlı olarak kazanılan karbon tutarının incelenmesiyle öne çıkmaktadır. Bu işlemin daha anlamlı olması için sistemin dinamik geri ödeme süresi ve net bugünkü değerinin tespit edilmesiyle ekonomik performansı incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada jeotermal enerji ve Kalina çevrimi tabanlı kombine sistemde PDM Elektrolizör, amonyak ve ters ozmoz ünitelerinin eklenmesiyle yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimi incelenmiştir. Multi-üretim sisteminin şematik diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Isı değiştiriciler (ID) ID-1, ID-2, ID-3 olarak belirtilmiştir. H₂, N₂ ve NH₃ sembolleri sırasıyla hidrojen, nitrojen ve amonyakı temsil etmektedir.



Şekil 1. Jeotermal enerji ve Kalina çevrimi tabanlı multi-üretim sistemin çalışma prensibi

Isı kaynağı olarak orta sıcaklıklı jeotermal enerji santrali ele alınmıştır. 160 °C-180 °C arasında sıcaklığı bulunan (Durum-1) jeotermal ısı kaynağının ısı değiştiricisi-1 (ID-1) ile bir kısım enerjisini Kalina çevrimine aktarmasıyla süreç başlamaktadır. Akışkan olarak amonyak-su karışımını kullanan Kalina çevriminde separatorde (Durum-4) buhar ve sıvı fazına ayrılma işlemi gerçekleşir. Separatorde Kalina türbinine giden hatta (Durum-5) türbinde güç üretimi sağlanırken türbin çıkışındaki akışkan (Durum-6) ile separator hattından gelen akışkan (Durum-9) genişleme valfi sonrası karışım odasında (Durum-10) karışır. Daha sonra ısı değiştirici-3 (ID-3) ve pompa hattını takip ederek döngü devam eder. Isı değiştirici-2 (ID-2)'de evaporatördeki (ID-1) ısı yükünü azaltarak verimi iyileştirmede önemli bir katkısı bulunmaktadır.

Multi-üretim sisteminde ID-3 sıcak su üretim ünitesi işlevini görmektedir. ID-3'e diğer taraftan giren soğuk suyun (Durum-27) ısıtılmasıyla sıcak su üretimi (Durum-28) yapılmıştır. Kalina çevriminde üretilen gücün yarısı PDM elektrolizörü-amonyak ünitesine yarısı ise ters ozmoz ünitesine gönderilmiştir. PDM elektrolizörü için gereken 80 °C'lık su ID-1 çıkışında (Durum-2) bulunan ısıtıcı ile sağlanmıştır. Bu ısıtıcı ile Durum-14'te 25 °C sıcaklıkta bulunan su 80 °C'ye (Durum-15) ısıtılır. Bu su PDM elektrolizörü ünitesinde hidrojen (Durum-17) ve oksijene (Durum-16) ayrılmıştır. Hidrojenin bir bölümü depolanırken (Durum-18) bir bölümü de (Durum-19) amonyak üretiminde kullanılmıştır. İki ayrı kompresörde sıkıştırılan hidrojen (Durum-21) ve nitrojen (Durum-22) amonyak reaktörüne girmekte ve bunun sonucunda yeşil amonyak üretimi (Durum-23) gerçekleşmiştir. Multi-üretim sisteminde ayrıca deniz suyunun tuzdan arındırılması için ters ozmoz ünitesi bulunmaktadır. Yüksek basınç gerektirdiği için enerji tüketimi fazla olan bu ünitenin gücünün Kalina çevriminden sağlanmasıyla tatlı su üretimi (Durum-26) gerçekleşmiştir. Çalışmada ele alınan tasarım parametreleri alt sistemler özelinde Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Jeotermal enerji ve Kalina tabanlı multi-üretim sisteminin tasarım parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Jeotermal Ünitesi [32]		
Jeotermal Kaynak Giriş Sıcaklığı	°C	160-180
Jeotermal Kaynak Çıkış Sıcaklığı	°C	100-120
Jeotermal Kaynak Debisi	kg/s	70-100
Kalina ve Sıcak Su Üretim Ünitesi [33]		
NH ₃ -H ₂ O çözelti konsantrasyonu	-	0,6
Türbin giriş basıncı	bar	25-35
Pompa izantropik verimi	%	90
Türbin izantropik verimi	%	70-90
Isı değiştirici-pinch point sıcaklık farkları	°C	15
Isı Değiştirici-3 Sıcak Su Ünitesi Giriş Sıcaklığı	°C	25-35
Isı Değiştirici-3 Sıcak Su Ünitesi Çıkış Sıcaklığı	°C	60
-PDM Elektrolizör-Amonyak Reaktör Ünitesi [34-35]		
PDM Elektrolizör Su Isıtıcı-Su Giriş Sıcaklığı	°C	25
Elektrolizör sıcaklığı	°C	80
Amonyak reaktör giriş sıcaklığı	°C	250
Amonyak reaktör giriş basıncı	bar	100
Ters Ozmoz Ünitesi [36]		
Besleme Su Sıcaklığı	°C	25
Besleme Su Basıncı	bar	67
Deniz suyu tuzluluğu	ppm	45000
Geri Kazanım Saf Su Oranı	-	0,3
Tuzluluk reddi oranı	-	0,994

Jeotermal enerji ve Kalina tabanlı multi-üretim sisteminin analizi için EES yazılımı kullanılmıştır. Referans sıcaklık ve basıncı sırasıyla 25 °C ve 101,3 kPa olarak alınmıştır. Kararlı şartlar altında, ısı değiştiricilerinde basınç kayıplarının ihmal edildiği, sistem bileşenlerinin adyabatik olduğu ve potansiyel-kinetik enerji değişimlerinin ihmal edildiği kabulleri altında çalışılmıştır. Denklem 1-3'te sırasıyla kütle, enerji ve ekserji denge bağıntısı verilmiştir [37-38].

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

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} * (h_c - h_g) \quad (2)$$

$$\dot{E}_Q + \sum \dot{m}_g \varphi_g = \sum \dot{m}_c \varphi_c + \dot{E}_w + \dot{E}_y \quad (3)$$

Bu denklemde $\dot{E}_Q$ ve $\dot{E}_w$ sırasıyla ısı ve iş ekserjisini, $\dot{E}_y$ ekserji yıkımı, φ_g ve φ_c giren ve çıkan spesifik ekserjiyi temsil etmektedir. Isı ve iş ekserjisi ile spesifik ekserji bağıntıları Denklem 4-6'da belirtilmiştir.

$$\dot{E}_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i \quad (4)$$

$$\dot{E}_w = \dot{W}_i \quad (5)$$

$$\varphi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (6)$$

Tablo 2'de kombine sistemde her bir bileşenin ekserji dengesi ve ekipman satın alma maliyet denklemleri belirtilmiştir.

Tablo 2. Jeotermal enerji ve Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde her bir bileşen için ekserji dengesi ve satın alma maliyeti

Sistem	Ekserji Dengesi	Satın Alma Maliyeti (M)
Kalina ve Sıcak Su Üretim Ünitesi [25,33,39]		
Isı Değiştirici-1 (ID-1)	$\dot{E}_1 + \dot{E}_{13} = \dot{E}_2 + \dot{E}_4 + \dot{E}_{y,ID-1}$	$M_{ID-1} = 2681(A_{ID-1})^{0.59}$
Separatör (sep)	$\dot{E}_4 = \dot{E}_5 + \dot{E}_7 + \dot{E}_{y,sep}$	$M_{sep} = 114,5(\dot{m}_4)^{0.67}$
Türbin (t)	$\dot{E}_5 = \dot{E}_6 + \dot{W}_t + \dot{E}_{y,t}$	$M_t = 4750(\dot{W}_t)^{0.75}$
Karışım Odası (k)	$\dot{E}_6 + \dot{E}_9 = \dot{E}_{10} + \dot{E}_{y,k}$	$M_k = 114,5(\dot{m}_{10})^{0.67}$
Isı Değiştirici-2 (ID-2)	$\dot{E}_{12} + \dot{E}_7 = \dot{E}_{13} + \dot{E}_8 + \dot{E}_{y,ID-2}$	$M_{ID-2} = 2681(A_{ID-2})^{0.59}$
Vana	$\dot{E}_8 = \dot{E}_9 + \dot{E}_{y,vana}$	$M_{vana} = 114,5\dot{m}_{akış}$
Pompa (p)	$\dot{E}_{11} + \dot{W}_{k-p} = \dot{E}_{12} + \dot{E}_{y,p}$	$M_p = 3500(\dot{W}_p)^{0.41}$
Isı Değiştirici-3 (ID-3) Sıcak Su Üretim	$\dot{E}_{10} + \dot{E}_{27} = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{28} + \dot{E}_{y,ID-3}$	$M_{ID-3} = 130\left(\frac{A_{ID-3}}{0,093}\right)^{0.78}$
PDM Elektrolizör - Amonyak Reaktör Ünitesi [40-43]		
PDM Elektrolizör Su Isıtıcı	$\dot{E}_2 + \dot{E}_{14} = \dot{E}_3 + \dot{E}_{15} + \dot{E}_{y,PEME,SI}$	$M_{PEME,SI} = 130\left(\frac{A_{PEME,SI}}{0,093}\right)^{0.78}$
PDM Elektrolizör	$\dot{E}_{15} + \dot{W}_{PEME} = \dot{E}_{16} + \dot{E}_{17} + \dot{E}_{y,PEME}$ $\dot{n}_{H_2} = \frac{W_{PEME}}{2VF}$ v: çalışma voltajı F: Faraday sabiti (96485 C/mol)	$M_{PEME} = 1000\dot{W}_{PEME}$
Hidrojen kompresör (HK)	$\dot{E}_{19} + \dot{W}_{HC} = \dot{E}_{21} + \dot{E}_{d,HC}$	$M_{HK} = 71,1\dot{m}_{H_2} \left(\frac{1}{0,92-\eta_{is,HK}}\right) \left(\frac{P_{21}}{P_{19}}\right) \ln\left(\frac{P_{21}}{P_{19}}\right)$
Nitrojen kompresör (NK)	$\dot{E}_{20} + \dot{W}_{NC} = \dot{E}_{22} + \dot{E}_{d,NC}$	$M_{NK} = 1,33 \times 71,1\dot{m}_{N_2} \left(\frac{1}{0,92-\eta_{is,NK}}\right) \left(\frac{P_{22}}{P_{20}}\right) \ln\left(\frac{P_{22}}{P_{20}}\right)$
Amonyak reaktör (AR)	$\dot{E}_{21} + \dot{E}_{22} = \dot{E}_{23} + \dot{E}_{d,reactor}$	$M_{AR} = 610\dot{W}_{AR}$
Ters Ozmoz (TO) Ünitesi [22]	$\dot{E}_{24} + \dot{W}_{ybp} = \dot{E}_{25} + \dot{E}_{26} + \dot{E}_{y,TO}$ $\dot{W}_{ybp} = \frac{1000 \times \dot{V}_{bs} \times \Delta P}{3600 \times \rho_{bs} \times \eta_{HPP}}$ $Geri Kazanım Oranı = \frac{\dot{V}_{tatlı su}}{\dot{V}_{bs}}$ bs: besleme suyu ybp: yüksek basınçlı pompa	$M_{TO} = 52\dot{V}_{bs}(P_{bs} - P_0) + 996 \times \dot{m}_{bs}^{0.8} + M_k n_e n_v + M_{pv} n_v$ $M_k = 1200 \$; M_{pv} = 7000 \$$

Multi-üretim sisteminde hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak su olmak üzere dört farklı çıktı ele alınmaktadır. Buna göre kombine sistemin ekserji verimi Denklem 7'de belirtilmiştir.

$$\eta_{ekserji} = (\dot{E}_{hidrojen} + \dot{E}_{amonyak} + \dot{E}_{tatlı su} + \dot{E}_{sıcak su}) / \dot{E}_{jeotermal,giren} \quad (7)$$

Sistemin genel verimliliği ve verimsiz noktaların tespiti noktasında enerji analizi yetersiz kalmaktadır. Sistemin ekserji verimi hem verimsiz noktaların belirlenmesi ve maliyet etkinliğinin analizi için hem de farklı sistemlerin performanslarının kıyaslanmasında önemli bir kavramdır [44-46]. Ekserji verimi ayrıca, sistemin net işini (toplam üretim miktarını) sisteme sağlanan ekserjiyle kıyasladığı için performans kıyaslamalarında sıkça kullanılmaktadır. Üretim değerleri artış göstermesine rağmen sisteme sağlanan ekserjinin daha fazla oranda artması nedeniyle ekserji veriminde azalma görülebilir. Bu çalışmada kombine sistem ekserji verimiyle birlikte sistemin fizibilitesinin tespiti açısından kapsamlı bir ekonomik analiz yapılmıştır.

Multi-üretim sisteminin termo-ekonomik analizi için kabul edilen ekonomik parametreler şu şekildedir. Yıllık çalışma saati 7446 saat, ömrü 20 yıl, faiz oranı %15 ve bakım faktörü de 1,06 olarak alınmıştır [42]. Hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak suyun birim fiyatları da sırasıyla 4 \$/kg [47], 1,5 €/kg [48], 1,8 \$/m³ [49] ve 3,6 \$/ton [50] olarak alınmıştır.

Jeotermal enerji-Kalina çevrimi tabanlı multi-üretim sisteminde yıllık net tasarruf ve buna bağlı olarak belirlenen net bugünkü değer ve dinamik geri ödeme süre bağıntıları sırasıyla Denklem 8-10'da verilmiştir [51].

$$Yıllık \text{ net tasarruf } (YNT) = Yıllık \text{ toplam gelir } (YTG) - M_{bakım} \quad (8)$$

$$Net \text{ Bugünkü Değer } (NBD) = \sum_{n=1}^{n=20} \frac{YNT}{(1+i)^n} - M_{toplam} \quad (9)$$

$$Dinamik \text{ Geri Ödeme Süresi} = \frac{\ln \frac{YNT}{YNT - i \cdot M_{toplam}}}{\ln (1+i)} \quad (10)$$

Çevresel performans kapsamında multi-üretim sisteminde üretilen yeşil hidrojen ve yeşil amonyak değerlerinden dolayı kazanılan karbon tutarı incelenmiştir.

- Doğalgaz kaynaklı hidrojen üretim yöntemi olan buhar-metan reformasyonunda 1 kg hidrojen için yaklaşık 10 kg CO₂ [52] açığa çıkardığı bilinmektedir. Sebep olduğu çevresel etki nedeniyle suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretimi ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada PDM Elektrolizör ile üretilen yeşil hidrojenin buhar-metan reformasyonu ile kıyaslanmasıyla kurtarılan CO₂ belirlenmiştir.
- Ayrıca üretilen hidrojenin bir bölümü depolanırken bir bölümü de amonyak üretiminde kullanılmıştır. Geleneksel amonyak üretim yöntemlerinde 1 kg amonyak yaklaşık 2,2 kg CO₂ [53] salınımına sebep olmaktadır. Bu çalışmada ise yeşil hidrojenin amonyak üretiminde kullanılmasıyla çevresel olumsuz etkisi sıfır olan bir süreç incelenmiştir.
- 1 ton CO₂'nin 40 \$'a [54] karşılık geldiği göz önüne alınarak hidrojen ve amonyak tarafından sağlanan toplam karbon kazanımı tespit edilmiştir.

3. Bulgular

Bu bölümde jeotermal enerji ve Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde parametrik analize geçilmeden önce EES ile oluşturulan kombine sistem için doğrulama çalışması yapılmıştır. Tablo 3'te Kalina çevrimi için referans alınan çalışmanın [33] sıcaklık, basınç, entalpi ve amonyak konsantrasyon verileri belirtilmiştir. Tabloda belirtilen durumlar Kalina çevriminin Şekil 1'de belirtilen durumlarını temsil etmektedir. Tablo incelendiğinde hata payının kabul edilebilir seviyede olduğu görülmektedir. Kalina çevrimi dışında jeotermal enerji koşulları için Koc vd. [32], PDM Elektrolizör için Loroi vd. [55], amonyak üretim ünitesinde Siddiqui ve Dinçer [56] ve ters ozmoz ünitesi için Nafey ve Sharaf [36]'ın çalışması model doğrulama aşamasında kullanılmıştır. Alt sistemler için de yeterli uygunluk seviyesine ulaşılmasının ardından tüm sistem için EES modelinin kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

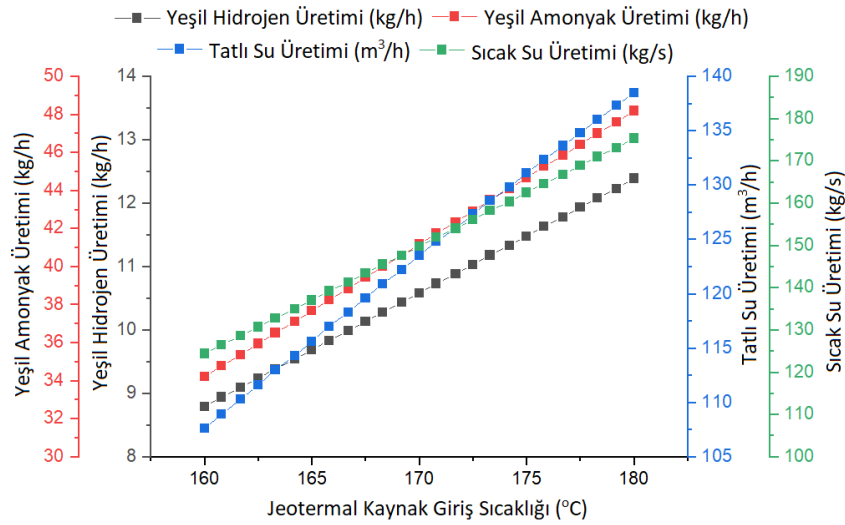
Tablo 3. Model doğrulanması-Kalina çevrimi

Durum (Şekil-1 noktaları)	T (°C)		P (bar)		h (kJ/kg)		X (-)	
	Referans [33]	Bu çalışma	Referans [33]	Bu çalışma	Referans [33]	Bu çalışma	Referans [33]	Bu çalışma
4 (Separatör Girişi)	151,53	151	30	30	1086,36	1082	0,6	0,6
5 (Türbin Girişi)	151,53	151	30	30	1694,17	1690	0,872	0,8743
6 (Türbin Çıkışı)	103,28	101,9	9,26	9,1	1512,74	1506	0,872	0,8743
11 (Pompa girişi)	46,77	46	9,26	9,1	-15,48	-19	0,6	0,6

Model doğrulanmasının ardından jeotermal kaynak giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı, Kalina türbin giriş basıncı, Kalina soğuk su giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi ve Kalina türbin izantropik veriminin sistemin enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Bu parametrelerin değişmesiyle ilk olarak sistemin çıktısı olan dört farklı üretim (hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak su) incelenmiştir. Ardından sistemin fizibilitesi ve çevreye katkısı bakımından dinamik geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımı kombine sistemin ekserji verimiyle karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

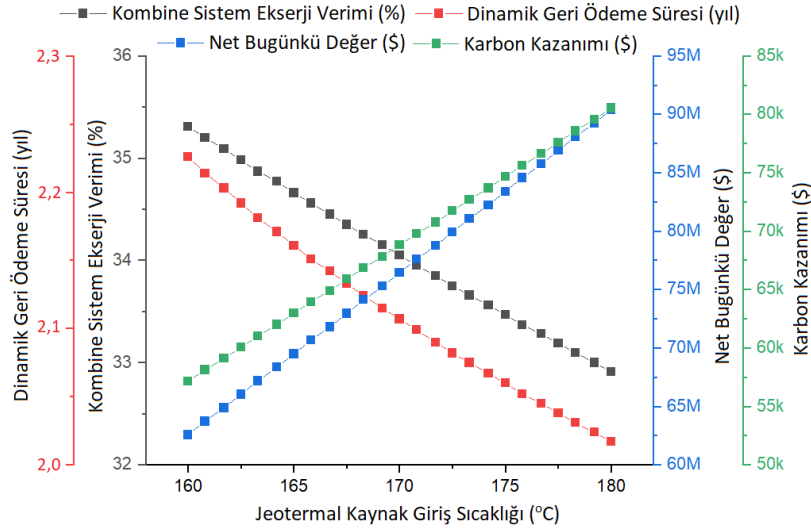
Şekil 2'de jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak giriş sıcaklığı değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Jeotermal kaynak giriş sıcaklığı arttıkça sabit kaynak debisi altında sisteme giren ısının arttığı, buna bağlı olarak sabit Kalina sıcaklık ve basıncı altında Kalina sistem debisinin arttığı tespit edilmiştir. Bundan dolayı Kalina türbininden elde edilen güç artmıştır. Debi artışından dolayı gereken pompa gücü artsa da jeotermal kaynak sıcaklığının 160 °C'den 180 °C'ye yükselmesiyle net gücün %40,92 arttığı belirlenmiştir. PDM Elektrolizör ve RO ünitesi gücünü Kalina'dan aldığı için hidrojen, amonyak ve tatlı su üretiminde artış görülmüştür. Jeotermal sıcaklıktaki 20 °C artış saatlik hidrojen, amonyak ve

tatlı su üretimini sırasıyla 3,598 kg, 13,98 kg, 30,9 m³ artırmıştır. Kalina sistem debisindeki artış Kalina sıcak su üretiminin sabit giriş-çıkış sıcaklıkları altında artmasını sağlamıştır.



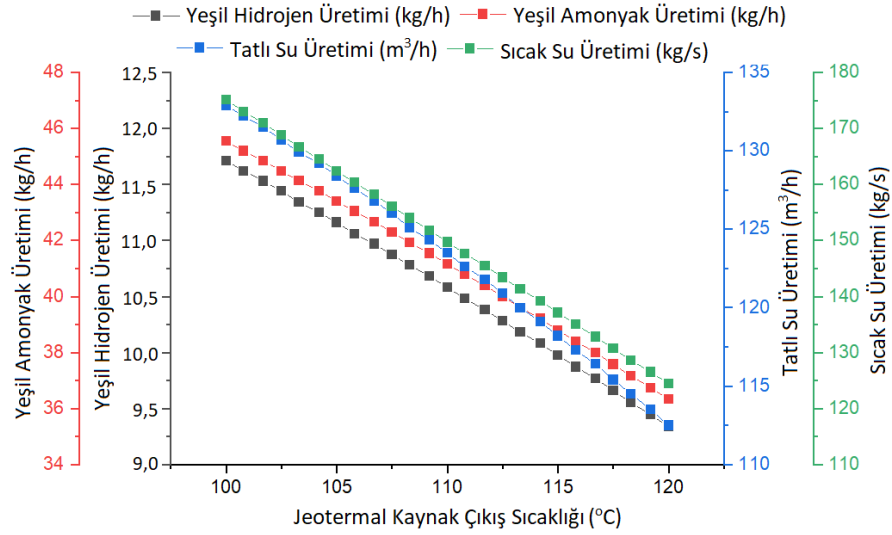
Şekil 2. Jeotermal kaynak giriş sıcaklığının yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 3'te jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak giriş sıcaklığı değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça sabit kaynak debisi altında sisteme sağlanan ekserji girişinde artış gerçekleşmiştir. Kombine sistem çıktısı olan üretim değerlerinde artış gerçekleşse de ekserji girişindeki artış oranı (%49,7) daha fazla olarak tespit edilmiştir. Bundan dolayı kaynak sıcaklığındaki 20 °C'lik artış sonucu sistemin ekserji verimi %6,79 oranında azalmıştır. Jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça toplam maliyet artsa da üretim değerlerindeki artıştan dolayı geri ödeme süresinin azaldığı ve net bugünkü değerinin de arttığı görülmüştür. Yeşil hidrojen ve amonyak üretim değerlerindeki artıştan dolayı karbon kazanımının da 23.367 \$ arttığı tespit edilmiştir.



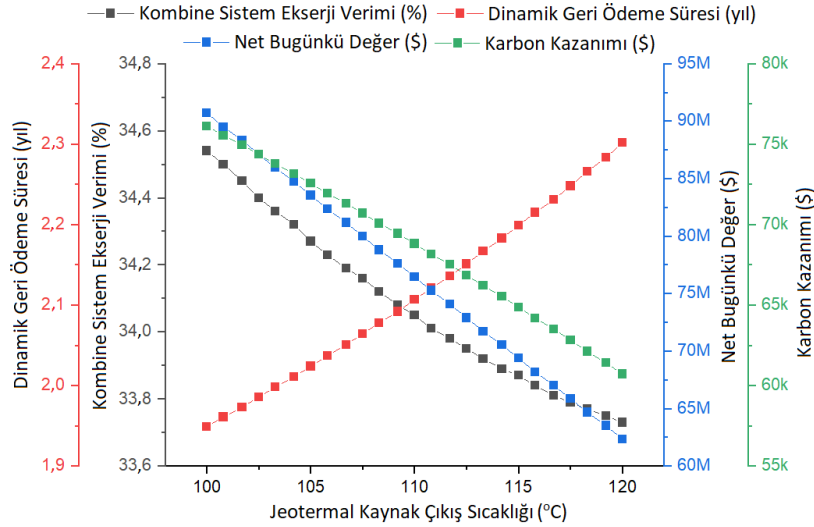
Şekil 3. Jeotermal kaynak giriş sıcaklığının ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

Şekil 4'te jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Jeotermal kaynak çıkış sıcaklığının 100 °C'den 120 °C'ye artışı sabit debi ve kaynak giriş sıcaklığı altında sisteme sağlanan ısı girdisinin 6758 kW kadar azalmasına sebep olmuştur. Bundan dolayı Kalina debisinin azaldığı, tüm üretim değerlerinin azaldığı görülmektedir. Kaynak çıkış sıcaklığındaki 20 °C'lik artışın yeşil hidrojen ve amonyak üretimini %20, tatlı su ve sıcak su üretimini sırasıyla %15,3 ve %28,9 oranında azalttığı tespit edilmiştir.



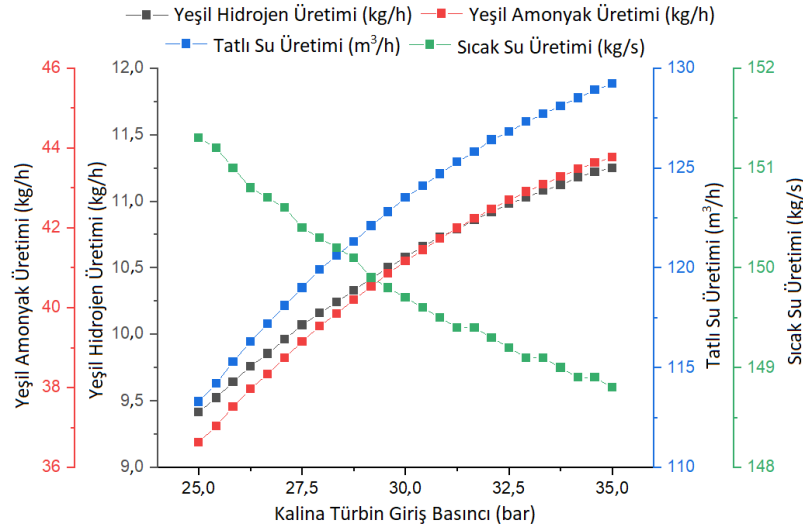
Şekil 4. Jeotermal kaynak çıkış sıcaklığının yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 5'te jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Kaynak çıkış sıcaklığı arttıkça üretim değerlerindeki azalış oranının sisteme sağlanan ekserjinin azalış oranından daha yüksek olması sebebiyle ekserji verimi azalmıştır. Sabit kaynak giriş sıcaklığı ve debisi altında kaynak çıkış sıcaklığının 100 °C'den 120 °C'ye artmasıyla ekserji verimi %2,34 oranında azalmıştır. Üretim değerlerindeki azalmadan dolayı sistemin toplam maliyeti azalmıştır. Fakat buna rağmen sistemin geri ödeme süresinde artış tespit edilmiştir. Bunun nedeni üretim değerlerindeki ciddi oranda azalmadan dolayı elde edilen yıllık gelirin %27,3 oranında azalmasıdır. Bunun sonucunda dinamik geri ödeme süresinde %18,32 oranında artış ve net bugünkü değerde %31,2 azalış tespit edilmiştir. Hidrojen ve amonyak üretimindeki düşüşten dolayı karbon kazanımı 15,4 k\$ kadar azalmıştır.



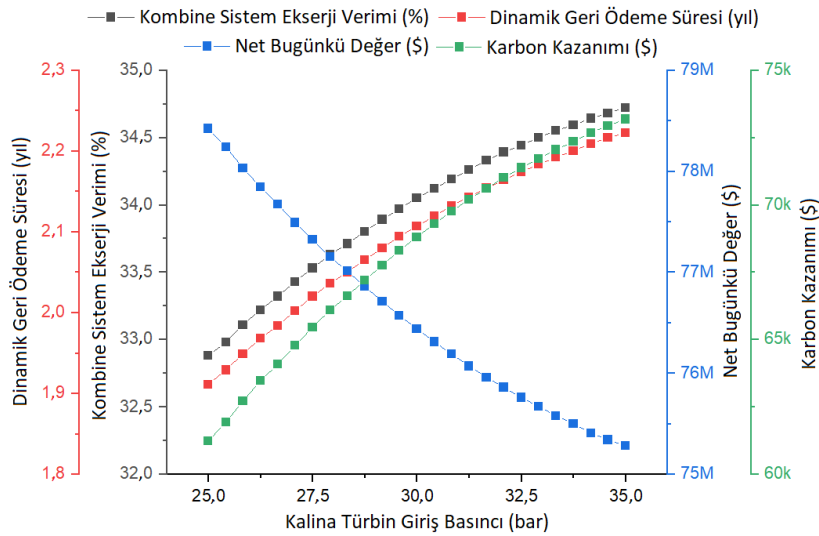
Şekil 5. Jeotermal kaynak çıkış sıcaklığının ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

Şekil 6'da jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina türbin giriş basıncı değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Kalina türbin giriş basıncının artmasıyla türbin girişi entalpinin değeri azalmış, fakat türbinde oluşan entalpi farkı artış göstermiştir. Ayrıca sabit jeotermal giriş-çıkış koşulları altında separator girişindeki basıncın da artmasıyla Kalina ısı değiştiricisi-1'deki entalpi farkının azalmış ve bunun sonucunda Kalina debisi artmıştır. Kalina türbin giriş basıncının 25'ten 35 bar'a yükselmesiyle güç üretimi artmış, üretilen gücün PDM Elektrolizör ve RO ünitesine aktarılmasıyla saatlik hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimlerinde sırasıyla 1,833 kg, 7,14 kg ve 15,9 m³ artış tespit edilmiştir. Fakat Kalina türbin çıkışı entalpinin azalması ısı değiştirici-3 giriş-çıkışında entalpi farkının azalmasına neden olmuştur. Bundan dolayı Kalina debisinin artmasına rağmen ısı değiştirici-3 yükünün azaldığı tespit edilmiştir. Bunun sonucunda sabit su giriş-çıkış sıcaklıkları altında sıcak su üretimini azalmıştır.



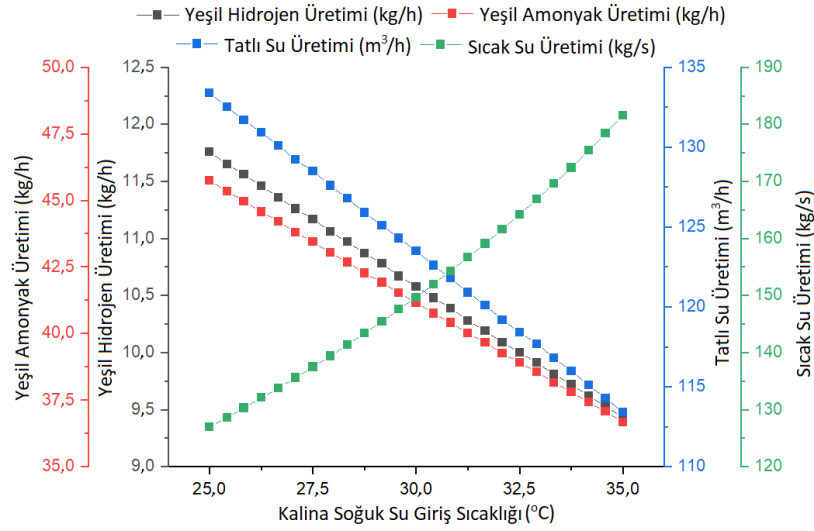
Şekil 6. Kalina türbin giriş basıncının yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 7’de jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina türbin giriş basıncı değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Sisteme sağlanan ekserjinin sabit olması ve sıcak su üretimi hariç diğer üretim değerlerindeki artıştan dolayı 10 barlık basınç artışı sonucu ekserji veriminin %5,59 arttığı tespit edilmiştir. Üretimin artmasıyla yıllık gelir artmış, fakat toplam maliyetin yıllık gelirden daha fazla oranda artmasından dolayı geri ödeme süresi %16,27 oranında artmıştır. Net bugünkü değer de buna bağlı olarak 3,95 M\$ azalmıştır. Hidrojen ve amonyak üretim değerlerindeki artış karbon kazanımının %19,4 oranında artmasını sağlamıştır.



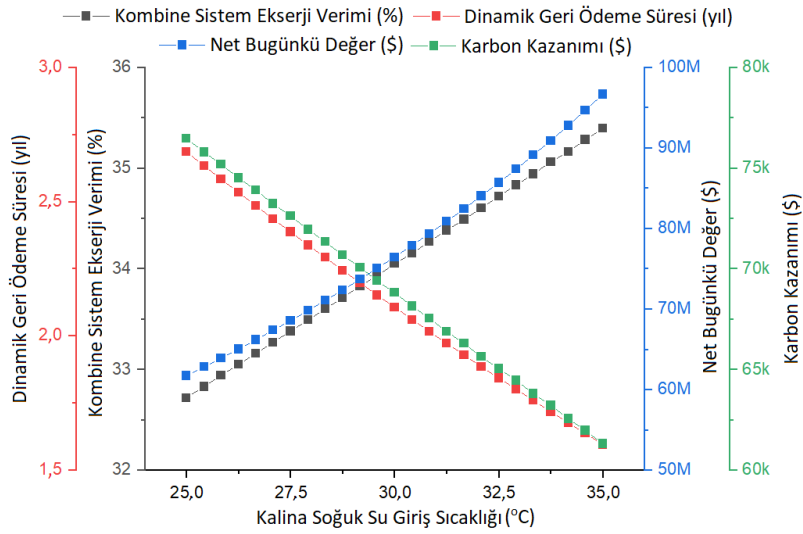
Şekil 7. Kalina türbin giriş basıncının ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

Şekil 8’de jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina soğuk su giriş sıcaklığı değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Kalina su giriş sıcaklığı arttıkça sabit pinch point sıcaklığı altında pompa giriş sıcaklığı artmış, bu da pompa giriş entalpisinin artmasını sağlamıştır. Isı değiştirici-3 Kalina hattının giriş-çıkışında entalpi farkının artması sonucu ısı yükü artmıştır. Bunun sonucunda sabit su çıkış sıcaklığı altında soğuk suyun giriş sıcaklığının artmasıyla sıcak su üretimi artmıştır. Soğuk suyun 25 °C’den 35 °C’ye yükselmesiyle sıcak su üretimi %42,9 oranında artmıştır. Pompa giriş sıcaklığındaki artışla sistemin minimum basıncında artış görülmüş, buna bağlı olarak türbin çıkışı entalpi artmış, sabit türbin giriş koşulları ve Kalina debisi altında türbinde üretilen güç azalmıştır. Bu da PDM Elektrolizör ve RO ünitelerindeki üretimi etkilemiştir. Buna bağlı olarak saatlik hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimlerinde sırasıyla 2,33 kg, 9,1 kg ve 20 m³ azalışı tespit edilmiştir.



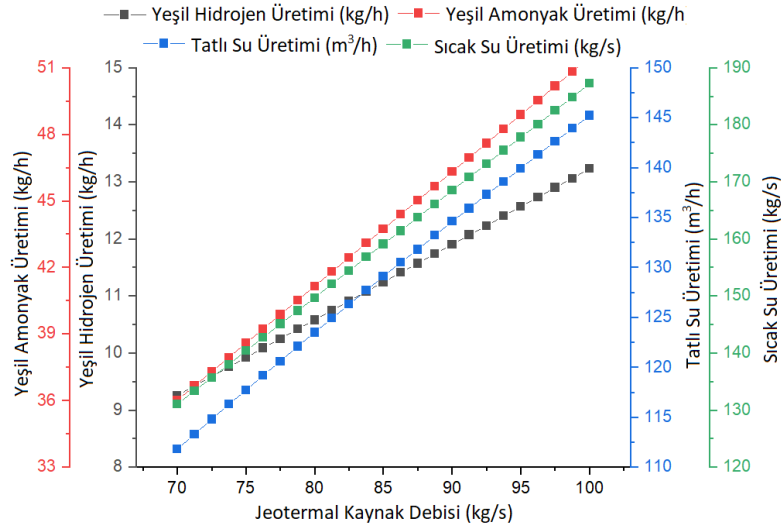
Şekil 8. Kalina soğuk su giriş sıcaklığının yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 9'da jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina soğuk su giriş sıcaklığı değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimi azalmasına rağmen sıcak su üretimindeki ciddi oranda artıştan dolayı kombine sistemin ekserji veriminde ve yıllık gelirde artış tespit edilmiştir. Soğuk suyun 25 °C'den 35 °C'ye yükselmesiyle ekserji verimi %8,16 artmıştır. Üretimdeki düşüşten dolayı toplam maliyetin de azalmasıyla dinamik geri ödeme süresi %40,5 azalmış, net bugünkü değer de %56,5 oranında artmıştır. Hidrojen ve amonyak üretimindeki düşüşten dolayı karbon kazanımı yaklaşık 15k\$ kadar azalmıştır.



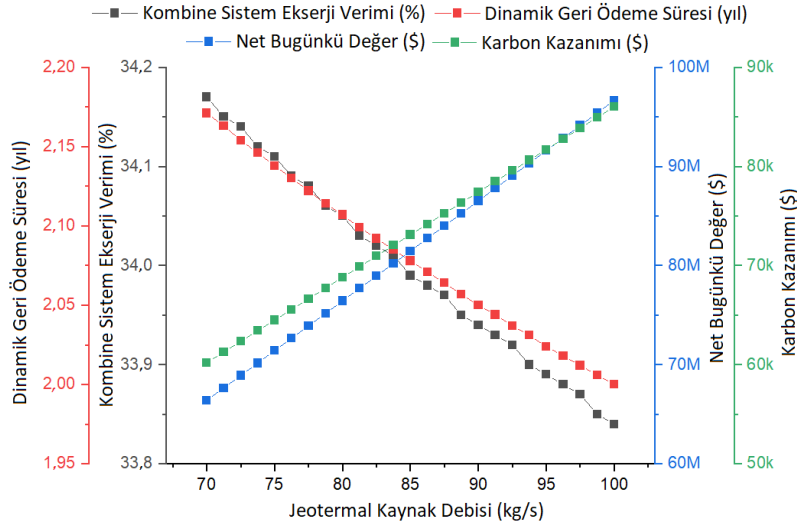
Şekil 9. Kalina soğuk su giriş sıcaklığının ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

Şekil 10'da jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak debisi değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Kaynak debisinin artmasıyla sisteme giren ısı artmış, sabit Kalina giriş-çıkış sıcaklık ve basıncı altında Kalina debisinin artmasını sağlamıştır. Kalina debisinin 70 kg/s'den 100 kg/s değerine yükselmesiyle Kalina debisi 8,36 kg/s kadar artmıştır. Bunun sonucunda Kalina türbin ve pompa gücü sırasıyla 692 ve 25 kW artış göstermiştir. Kalina net gücündeki artıştan dolayı saatlik hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimi sırasıyla 3,97 kg, 15,43 kg ve 33,4 m³ artmıştır. Isı değiştirici-3 yükünün artmasından dolayı sıcak su üretimi de %42,9 oranında artmıştır.



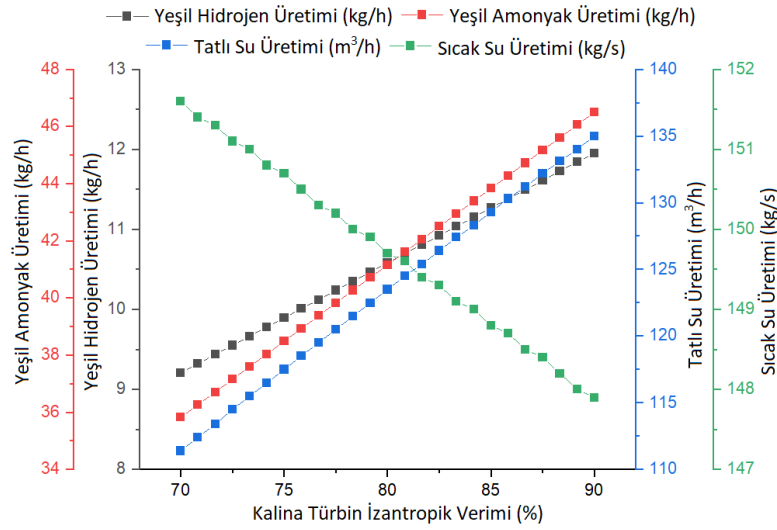
Şekil 10. Jeotermal kaynak debisinin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 11'de jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak debisi değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Kaynak debisi arttıkça tüm üretim değerleri artmasına rağmen kombine sistemin ekserji veriminde küçük bir oranda azalma tespit edilmiştir. Bu sisteme sağlanan ekserjinin artışının üretim artışını geçmesinden kaynaklanmıştır. Üretim değerlerindeki artışla yıllık gelir ve toplam maliyet artmıştır, yıllık gelir artış oranı (%42,17) toplam maliyet artış oranından (%31,9) daha fazla olması nedeniyle dinamik geri ödeme süresi azalmış, net bugünkü değer de artmıştır. Kaynak debisinin 70 kg/s'den 100 kg/s değerine artmasıyla geri ödeme süresi %7,87 oranında azalırken net bugünkü değer de %45,6 oranında artmıştır. Çevresel açıdan ise hidrojen ve amonyak üretimindeki artıştan dolayı karbon kazanımının da arttığı görülmektedir.



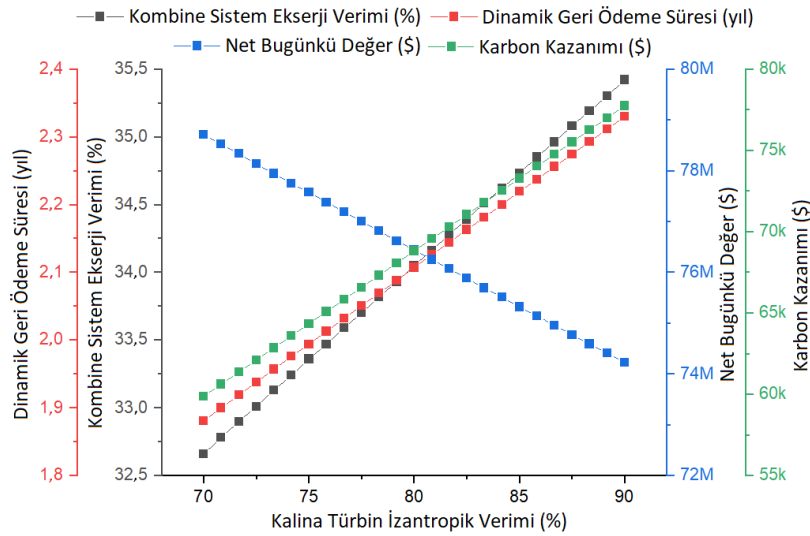
Şekil 11. Jeotermal kaynak debisinin ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

Şekil 12'de jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina türbin izantropik verim değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Sabit jeotermal debisi ve giriş-çıkış koşulları ile sabit Kalina türbin giriş koşulları altında türbin izantropik veriminin artması türbin çıkışı entalpi değerinin azaltır. Bu da türbindeki entalpi düşüşünün artmasını sağlar. Sabit Kalina debisi altında türbinden daha fazla güç elde edilmesini sağlar. Bundan dolayı PDM Elektrolizör ve RO ünitelerine daha fazla güç transfer edilerek hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimi artmıştır. Kalina türbin veriminin %70'ten %90'a artmasıyla saatlik hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimi sırasıyla 2,74 kg, 10,68 kg ve 23,6 m³ artmıştır. Fakat bununla birlikte türbin çıkışı entalpinin azalması ısı değiştirici-3 girişinde de entalpinin azalmasına neden olmuş, bundan dolayı ısı değiştirici yükü azalmıştır. Bunun sonucunda ısı değiştirici-3'te sıcak su üretiminin %2,44 oranında azalmıştır.



Şekil 12. Kalina türbin izantropik veriminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 13'te jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina türbin izantropik verim değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Sıcak su üretimindeki azalmaya rağmen diğer üretim değerlerindeki artıştan dolayı kombine sistemin ekserji verimi artmıştır. Kalina türbin veriminin %70'ten %90'a artmasıyla ekserji verimi %8,45 oranında artmıştır. Sıcak su üretimi hariç üretim değerlerindeki artışla birlikte yıllık gelir de artmış fakat toplam maliyet daha yüksek oranda arttığı için sistemin geri ödeme süresi %23,87 artmış, net bugünkü değer de %5,71 oranında azalmıştır. Türbin izantropik verim artışı çevresel açıdan karbon kazanımının hidrojen ve amonyak üretimine bağlı olarak 17,8 k\$ kadar artmıştır.



Şekil 13. Kalina türbin izantropik veriminin ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada jeotermal enerji ve Kalina çevrim tabanlı multi-üretim sistemi incelenmiştir. Kalina çevrimi, sıcak su üretim ünitesi, proton değişim membran elektrolizör, amonyak reaktörü, ters ozmoz ünitesinin termodinamik modeli oluşturulmuştur. Kalina çevriminde üretilen gücün elektrolizör ve ters ozmoz hattına bağlanmasıyla hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimi analiz edilmiştir. Jeotermal enerjinin güneş ve rüzgar enerjisine kıyasla hava koşullarından bağımsız kesintisiz bir enerji kaynağı olmasının avantajı kullanılmıştır. Jeotermal kaynak giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı, Kalina türbin giriş basıncı, Kalina soğuk su giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi ve Kalina türbin izantropik veriminin multi-üretim sistemi üzerindeki etkisi enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel yönden analiz edilmiştir. Sistemin fizibilitesinin görülmesi amacıyla dinamik geri ödeme süresi ve net bugünkü değeri incelenmiştir. Çalışmada öne çıkan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Jeotermal kaynak giriş sıcaklığındaki artış hem üretim miktarlarını artırırken hem de dinamik geri ödeme süresini azaltmıştır. Toplam maliyetin de artmasına rağmen yıllık net tasarrufun artması geri ödeme

süresinin azalmasını sağlamıştır. Fakat giriş sıcaklığındaki artışla sisteme sağlanan ekserji girişinin üretimden daha fazla artması kombine sistemin ekserji veriminin azalmasına neden olmuştur.

- Jeotermal kaynak giriş sıcaklığının 160 °C'den 180 °C'ye artması sonucu geri ödeme süresi %9,38 azalırken aynı zamanda ekserji veriminin de %6,79 azaldığı tespit edilmiştir.
- Jeotermal kaynak çıkış sıcaklığının artması üretimi olumsuz etkilerken geri ödeme süresini de artmasına neden olmuştur. Toplam maliyetin de ciddi oranda düşmesine rağmen üretim hatlarındaki azalmadan dolayı sistemin geri ödeme süresi artmıştır.
- Jeotermal kaynak çıkış sıcaklığının 100 °C'den 120 °C'ye artması ile yeşil hidrojen ve amonyak üretiminin sırasıyla saatte 2,374 kg ve 9,22 kg azaldığı, buna bağlı olarak da kazanılan karbon tutarının %20,2 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
- Kalina türbin giriş basıncının artması sıcak su üretimi hariç diğer üretim değerlerinin artmasını sağlamıştır. Kalina türbin çıkışı entalpinin azalması sonucu Kalina ısı değiştirici-3-sıcak su üretim hattının ısı yükünün az bir oranda azalmasına neden olmuştur. Kalina türbin giriş basıncının artması ekserji verimini artırırken toplam maliyet artışından dolayı sistemin ekonomik performansını azalttığı görülmüştür.
- Kalina türbin giriş basıncının 25 bar'dan 35 bar'a artması ekserji verimini %5,59 artırırken geri ödeme süresinin de %16,27 oranında artmasına neden olmuştur.
- Kalina soğuk su giriş sıcaklığındaki artış sabit pinch point sıcaklığı altında pompa giriş sıcaklığını artırmış, bunun sonucunda sistemin minimum basıncında artış görülmüştür. Bu da sabit türbin giriş koşulları altında türbinde üretilen gücün azalmasına neden olmuştur. Elektrolizör ve ters ozmoz ünitelerine aktarılan gücün azalması bu üretim hatlarını olumsuz etkilemiştir. Fakat öte yandan Kalina ısı değiştirici-3-sıcak su üretim hattının yükünün artması sıcak su üretiminin önemli oranda artmasını sağlamıştır.
- Kalina soğuk su giriş sıcaklığının 25 °C'den 35 °C'ye yükselmesiyle diğer üretim hatlarındaki azalmaya rağmen sıcak su üretimindeki artışla birlikte sistemin ekserji verimi %8,16 artmış, geri ödeme süresi de %40,5 azalmıştır.
- Jeotermal kaynak debisindeki artış üretim değerlerini artırırken aynı zamanda toplam maliyetin de artmasına neden olur. Fakat, yıllık net tasarruf miktarının daha fazla olması geri ödeme süresinin azalmasını sağlamıştır. Bunun birlikte kombine sistemin ekserji verimindeki küçük azalma sisteme sağlanan ekserji miktarının üretimi geçmesinden kaynaklanmıştır.
- Kalina türbin izantropik veriminin artması Kalina türbininde daha fazla gücün elde edilmesi, bununla birlikte elektroliz-amonyak reaktör ve ters ozmoz ünitelerinde daha fazla üretimin yapılmasını sağlamıştır. Ancak, türbin çıkışı entalpinin azalması ısı değiştirici-3 sıcak su üretim hattının ısı yükünün azalmasına neden olmuştur. Tüm üretim hatları ele alınıp toplam maliyetle kıyaslandığında yıllık net tasarruf miktarında istenilen artışın elde edilememesi sonucu Kalina türbin izantropik veriminin artması ile sistemin geri ödeme süresi artmıştır.
- Kalina türbin izantropik veriminin %70'ten %90'a artması sistemin ekserji verimi %8,45 artırırken aynı zamanda geri ödeme süresinin de 0,445 yıl uzamasına neden olduğu tespit edilmiştir.

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde multi-üretim sistemlerinin performanslarıyla ilgili çıkarım yapılması noktasında enerji ve ekserji analizinin yanı sıra ekonomik ve çevresel analizlerinin yapılması gerektiği görülmektedir. Ekonomik analizde paranın zaman değerini dikkate almayan basit geri ödeme süresi yerine dinamik geri ödeme süresinin kullanılmasıyla daha anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu değer net bugünkü değerle birlikte yorumlanmasıyla kombine sistemin ekonomik performansı ortaya konmuştur. Ayrıca net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda tamamen yenilebilir enerjiden üretilen yeşil hidrojen ve yeşil amonyakın geleneksel yöntemlerle üretilmelerine kıyasla kurtardığı CO₂ ve buna bağlı olarak kazanılan karbon tutarı incelenmiştir.

Kaynakça

- [1] Bergougui, B. 2024. Moving toward environmental mitigation in Algeria: Asymmetric impact of fossil fuel energy, renewable energy and technological innovation on CO₂ emissions. *Energy Strategy Reviews*, 51, 101281.
- [2] Bashir, M.F., Shahbaz, M., Ma, B., Alam, K. 2024. Evaluating the roles of energy innovation, fossil fuel costs and environmental compliance towards energy transition in advanced industrial economies. *J Environ Manage*, 351, 119709.

- [3] Rahman, A., Murad, S.M.W., Mohsin, A.K.M., Wang, X. 2024. Does renewable energy proactively contribute to mitigating carbon emissions in major fossil fuels consuming countries? *J Clean Prod*, 452, 142113.
- [4] Idroes, G.M., Afjal, M., Khan, M., Haseeb, M., Hardi, I., Noviandy, T.R., et al. 2024. Exploring the role of geothermal energy consumption in achieving carbon neutrality and environmental sustainability. *Heliyon*, 10, e40709.
- [5] Goswami, S., Rai, A.K. 2024. An assessment of prospects of geothermal energy in India for energy sustainability. *Renew Energy*, 233, 121118.
- [6] Guler, O.F., Sen, O., Yilmaz, C., Kanoglu, M. 2022. Performance evaluation of a geothermal and solar-based multigeneration system and comparison with alternative case studies: Energy, exergy, and exergoeconomic aspects. *Renew Energy*, 200, 1517–32.
- [7] Ebrahimi, A., Ghorbani, B., Ziabasharhagh, M. 2022. Exergy and economic analyses of an innovative integrated system for cogeneration of treated biogas and liquid carbon dioxide using absorption–compression refrigeration system and ORC/Kalina power cycles through geothermal energy. *Process Safety and Environmental Protection*, 158, 257–81.
- [8] Akimoto, R., Yamaki, T., Nakaiwa, M., Matsuda, K. 2021. Applicability study of micro Kalina cycle for regional low grade geothermal heat in Japan. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101506.
- [9] Kolasinski, P. 2019. Application of the multi-vane expanders in orc systems - A review on the experimental and modeling research activities. *Energies (Basel)*, 12, 2975.
- [10] Chew, J.M., Reddy, C.C.S., Rangaiah, G.P. 2014. Improving energy efficiency of dividing-wall columns using heat pumps, Organic Rankine Cycle and Kalina Cycle. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 76, 45–59.
- [11] Wang, Z., Zhou, H., Yuan, Q., Wang, Q., Shao, H., Dai, Z., et al. 2023. Optimization design and analysis of a novel total flow and Kalina cycle coupled system driven on low-medium temperature geothermal source with two-phase mixture. *Appl Therm Eng*, 221, 119807.
- [12] Yari, M., Mehr, A.S., Zare, V., Mahmoudi, S.M.S., Rosen, M.A. 2015. Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source. *Energy*, 83, 712–22.
- [13] Dong, Z.Y., Yang, J., Yu, L., Daiyan, R., Amal, R. 2022. A green hydrogen credit framework for international green hydrogen trading towards a carbon neutral future. *Int J Hydrogen Energy*, 47, 728–34.
- [14] Mahmoud, M., Ramadan, M., Naher, S., Pullen, K., Ali Abdelkareem, M., Olabi, A.G. 2021. A review of geothermal energy-driven hydrogen production systems. *Thermal Science and Engineering Progress*, 22, 100854.
- [15] Shah, M., Prajapati, M., Yadav, K., Sircar, A. 2022. A review of the geothermal integrated hydrogen production system as a sustainable way of solving potential fuel shortages. *J Clean Prod*, 380, 135001.
- [16] Mohebbi Nejad, M., Ahmadi, P., Houshfar, E. 2023. Comparative optimization study of three novel integrated hydrogen production systems with SOEC, PEM, and alkaline electrolyzer. *Fuel*, 336, 126835.
- [17] Juangsa, F.B., Irhamna, A.R., Aziz, M. 2021. Production of ammonia as potential hydrogen carrier: Review on thermochemical and electrochemical processes. *Int J Hydrogen Energy*, 46, 14455–77.
- [18] Cha, J., Park, Y., Brigljević, B., Lee, B., Lim, D., Lee, T., et al. 2021. An efficient process for sustainable and scalable hydrogen production from green ammonia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111562.
- [19] Ozturk, M., Dincer, I. 2021. An integrated system for ammonia production from renewable hydrogen: A case study. *Int J Hydrogen Energy*, 46, 5918–25.
- [20] Kojima, Y., Yamaguchi, M. 2022. Ammonia as a hydrogen energy carrier. *Int J Hydrogen Energy*, 47, 22832–9.
- [21] Ramazanian, S., Aliehyaei, M., Salimi, M., Najafzadeh, M.M. 2023. Theoretical and experimental investigation of reverse osmosis (RO) desalination solar system using the solar panel, battery, and water turbine for high-pressure recovery of output brine. *Solar Energy*, 262, 111852.

- [22] Hai, T., El-Shafay, A.S., Alizadeh, A., Singh Chauhan, B., Fahad Almojil, S., Ibrahim Almohana, A., et al. 2023. Combination of a geothermal-driven double-flash cycle and a Kalina cycle to devise a polygeneration system: Environmental assessment and optimization. *Appl Therm Eng*, 228, 120437.
- [23] Yuksel, Y.E, Ozturk, M., Dincer, I. 2021. Evaluation of a new geothermal based multigenerational plant with primary outputs of hydrogen and ammonia. *Int J Hydrogen Energy*, 46, 16344–59.
- [24] Sun, W., Feng, L., Abed, A.M., Sharma, A., Arsalanloo, A. 2022. Thermoeconomic assessment of a renewable hybrid RO/PEM electrolyzer integrated with Kalina cycle and solar dryer unit using response surface methodology (RSM). *Energy*, 260, 124947.
- [25] Malik, M.Z., Musharavati, F., Khanmohammadi, S., Pakseresht, A.H., Khanmohammadi, S., Nguyen, D.D. 2020. Design and comparative exergy and exergo-economic analyses of a novel integrated Kalina cycle improved with fuel cell and thermoelectric module. *Energy Convers Manag*, 220, 113081.
- [26] Alirahmi, S.M., Assareh, E., Pourghassab, N.N., Delpisheh, M., Barelli, L., Baldinelli, A. 2022. Green hydrogen & electricity production via geothermal-driven multi-generation system: Thermodynamic modeling and optimization. *Fuel*, 308, 122049.
- [27] Akkurt, F. 2020. Düşük Sıcaklıkta Jeotermal Enerji Kaynaklı Organik Rankine Çevrimi Sisteminin Enerji Ve Ekserji Analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(2), 729-742.
- [28] Koç, Y., Yağlı, H. 2020. Isı-Güç Kombine Sistemlerinde Kullanılan Kalina Çevriminin Enerji ve Ekserji Analizi. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 181-188.
- [29] Kara, O., Kaşka, Ö. 2023. Bir Kalina Çevriminin Termodinamik ve Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 1153-1168.
- [30] Sen, O., Yılmaz, C. 2022. Jeotermal ve güneş destekli güç üretimi ve ısıtma sisteminin termodinamik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(3), 1625-1638.
- [31] Hançer Güleriyüz, E., Özen, D. N. 2024. Jeotermal Temelli bir Organik Rankine Çevriminin Eksergo-ekonomik Analizi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 312-335.
- [32] Koc, M., Yuksel, Y.E., Ozturk, M. 2022. Thermodynamic and exergo-economic assessments of a new geothermally driven multigeneration plant. *Int J Hydrogen Energy*, 47, 19463–80.
- [33] Ebrahimi-Moghadam, A., Farzaneh-Gord, M., Jabari Moghadam, A., Abu-Hamdeh, N.H., Lasemi, M.A., Arabkoohsar, A., et al. 2021. Design and multi-criteria optimisation of a trigeneration district energy system based on gas turbine, Kalina, and ejector cycles: Exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation. *Energy Convers Manag*, 227, 113581.
- [34] Yuksel, Y.E., Ozturk, M., Dincer, I. 2021. Development and assessment of a novel geothermal power-based multigenerational system with hydrogen and ammonia production options. *Energy Convers Manag*, 243, 114365.
- [35] Salari, A., Hakkaki-Fard, A. 2022. Thermodynamic analysis of a photovoltaic thermal system coupled with an organic Rankine cycle and a proton exchange membrane electrolysis cell. *Int J Hydrogen Energy*, 47:17894–913.
- [36] Nafey, A.S., Sharaf, M.A. 2010. Combined solar organic Rankine cycle with reverse osmosis desalination process: Energy, exergy, and cost evaluations. *Renew Energy*, 35, 2571–80.
- [37] Çengel, Y.A., Boles, M.A. 2008. *Thermodynamics: An engineering approach 6th Editon (SI Units)*. New York.: The McGraw-Hill Companies Inc.
- [38] Dinçer, I., Rosen, M.A. 2007. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Amsterdam, Netherland: Elsevier.
- [39] Fallah, M., Mahmoudi, S.M.S., Yari, M., Akbarpour Ghiasi, R. 2016. Advanced exergy analysis of the Kalina cycle applied for low temperature enhanced geothermal system. *Energy Convers Manag*, 108, 190–201.
- [40] Yılmaz, F., Ozturk, M. 2022. Thermodynamic and economic investigation of an innovative multigeneration plant integrated with the solar collector and combustion chamber. *Int J Hydrogen Energy*, 47, 31786–805.

- [41] Yuksel, Y.E., Ozturk, M., Dincer, I. 2021. Development of a novel combined energy plant for multigeneration with hydrogen and ammonia production. *Int J Hydrogen Energy*, 46, 28980–94.
- [42] Hai, T., Chaturvedi, R., Almujiab, H., Marjan, R.K., Van Thuong, T., Soliman, N., et al. 2024. Integrating geothermal energy and desalination unit into a poly-generation configuration: Comprehensive study and optimization. *Desalination*, 586, 117873.
- [43] Gao, J., Wang, Z., Li, X., Zhou, X. 2024. Investigation of a novel scheme utilizing solar and geothermal energies, generating power and ammonia: Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses and cuckoo search optimization. *Energy*, 298, 131344.
- [44] Tsatsaronis, G. 1999. Strengths and limitations of exergy analysis. In: Bejan, A., Mamut, E. (Eds.), *Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems*. Springer Netherlands, Dordrecht, 93–100.
- [45] Gilbert, A., Mesmer, B. 2016. Uses of Exergy in Systems Engineering, in: *Proc. 2016 Conference on Systems Engineering Research*.
- [46] Dippippo R, Marcille DF. 1984. Exergy analysis of geothermal power plants. *Geothermal Resources Council Trans.* 8, 47–52.
- [47] Shakibi, H., Faal, M.Y., Assareh, E., Agarwal, N., Yari, M., Latifi, S.A., et al. 2023. Design and multi-objective optimization of a multi-generation system based on PEM electrolyzer, RO unit, absorption cooling system, and ORC utilizing machine learning approaches; a case study of Australia. *Energy*, 278, 127796.
- [48] González-Arias, J., Nawaz, M.A., Vidal-Barrero, F., Reina, T.R. 2024. A profitability study for catalytic ammonia production from renewable landfill biogas: Charting a route for the next generation of green ammonia. *Fuel*, 360, 130584.
- [49] Javaherian, A., Ghasemzadeh, N., Javanshir, N., Yari, M., Vajdi, M., Nami, H. 2023. Techno-environmental assessment and machine learning-based optimization of a novel dual-source multi-generation energy system. *Process Safety and Environmental Protection*, 176, 537–59.
- [50] Zhu, Y., Li, W., Li, J., Li, H., Wang, Y., Li, S. 2020. Thermodynamic analysis and economic assessment of biomass-fired organic Rankine cycle combined heat and power system integrated with CO₂ capture. *Energy Convers Manag*, 204, 112310.
- [51] Zhu, Y., Zhang, C., Yan, M., Liu, Z., Li, W., Li, H., et al. 2024. Biomass-fired combined heat, cool and power system incorporating organic Rankine cycle and single-effect lithium bromide absorption refrigeration integrated with CO₂ capture: Thermo-economic analysis. *Energy*, 304, 132096.
- [52] Al Ghafri, S.Z., Revell, C., Di Lorenzo, M., Xiao, G., Buckley, C.E., May, E.F, et al. 2023. Techno-economic and environmental assessment of LNG export for hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy*, 48, 8343–69.
- [53] Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, I.A.G., Styring, P. 2021. Sustainable Ammonia Production Processes. *Front Energy Res*, 9, 580808.
- [54] Nasser, M., Hassan, H. 2023. Techno-enviro-economic analysis of hydrogen production via low and high temperature electrolyzers powered by PV/Wind turbines/Waste heat. *Energy Convers Manag*, 278, 116693.
- [55] Ioroi, T., Yasuda, K., Siroma, Z., Fujiwara, N., Miyazaki, Y. 2002. Thin film electrocatalyst layer for unitized regenerative polymer electrolyte fuel cells. *J Power Sources*, 112 (2):583–7.
- [56] Siddiqui, O., Dincer, I. 2019. Design and analysis of a novel solar-wind based integrated energy system utilizing ammonia for energy storage. *Energy Convers Manag*, 195, 866–84.