



Thermodynamic analysis of geothermal and solar assisted power generation and heating system

Ozan Şen*^{ID}, Ceyhun Yılmaz^{ID}

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, 03200, Turkey

Highlights:

- This geothermal and solar assisted cogenerated system generates a total power of 2420 kW.
- The flow rate of hydrogen generated in the electrolysis unit is 0.0154 kg/s.
- The energy and exergy efficiency of the overall system are 34.5% and 46.0%, respectively.

Keywords:

- Geothermal energy
- Solar energy
- Hydrogen production
- Thermodynamic analysis

Article Info:

Research Article
Received: 12.02.2021
Accepted: 22.10.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.879077

Acknowledgement:

This study is sponsored by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under the project 218M739. This support is greatly appreciated.

Correspondence:

Author: Ozan Şen
e-mail:
ozansen@usr.aku.edu.tr
phone: +90 272 218 2549

Graphical/Tabular Abstract

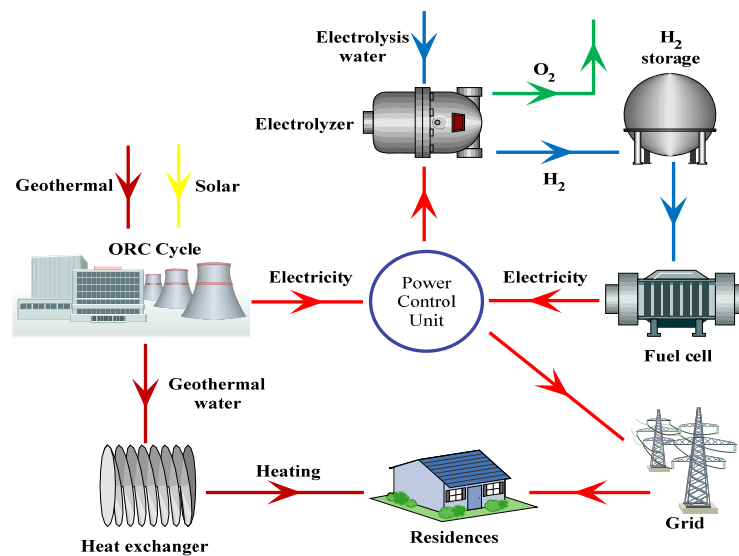


Figure A. Geothermal and solar assisted cogeneration energy system.

Purpose: In this study, thermodynamic modeling and analysis of geothermal and solar assisted cogeneration energy system to supply the electricity and heating requirement of residences is performed.

Theory and Methods:

Electricity is generated in a Organic Rankine Cycle. The generated electricity is supplied to the grid for use in residences. In off-peak periods, excess electricity is used in the water electrolysis unit to produce and store hydrogen fuel. During peak periods when electricity demand is high, the stored hydrogen is converted into electricity in the fuel cell and supplied to the grid. In addition, the heat energy released from the cycle as waste heat in the ORC cycle is used in residential heating. Using the geothermal and solar energy values of Afyonkarahisar province, the thermodynamic analysis of the system is performed in the EES software. Parametric studies are conducted to examine the effects of geothermal source temperature and solar radiation values on the power, electricity and heat generation.

Results:

This energy system generates 2420 kW of power from ORC cycle. If all 2420 kW of electrical power is used to store hydrogen, 0.0154 kg/s of hydrogen can be produced. Then, when needed, 1668 kW of electricity can be generated by using hydrogen in the fuel cell. The heating capacity of geothermal fluid released as waste heat from the ORC cycle is 8933 kW. The overall energy and exergy efficiency of the system are calculated as 34.5% and 46.0%, respectively.

Conclusion:

This study is based on the results obtained by the thermodynamic analysis of the geothermal and solar assisted cogeneration energy system. It has been observed that as the geothermal temperature and solar radiation values of the system increase, the generation of electricity and hydrogen and heating capacity increases.



Jeotermal ve güneş destekli güç üretimi ve ısıtma sisteminin termodinamik analizi

Ozan Sen*^{ID}, Ceyhun Yılmaz^{ID}

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Bu jeotermal ve güneş enerji destekli kojenerer sistem toplam 2420 kW güç üretmektedir
- Elektroliz ünitesinde üretilen hidrojenin debisi 0,0154 kg/s'dir
- Tüm sistemin enerji ve ekserji verimi sırasıyla %34,5 ve %46,0 olarak belirlenmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.02.2021

Kabul: 22.10.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.879077

Anahtar Kelimeler:

Jeotermal enerji,
güneş enerjisi,
hidrojen üretimi,
termodinamik analiz

ÖZ

Bu çalışmada, Afyonkarahisar ilinde konutların elektrik ve ısıtma ihtiyacını karşılamak için jeotermal ve güneş destekli kojenerasyon enerji sisteminin termodinamik modellenmesi ve analizi yapılmıştır. Ele alınan sistemde, jeotermal ve güneş kaynaklarından elde edilen termal enerji ile Organik Rankine Çevriminde (ORC) elektrik üretilmektedir. Üretilen elektrik, enerji ihtiyacına göre şebekeye verilecektir. Şebekede enerji ihtiyacının az olduğu zamanlarda fazla olan elektrik, elektroliz ünitesine gönderilecek ve hidrojen üretilip depolanacaktır. Şebekede tekrardan enerji ihtiyacı olduğu zamanlarda depolanan hidrojen enerjisi yakıt hücresinde elektrik enerjisine dönüştürülecek ve şebekeye verilecektir. Buna ek olarak ORC çevriminde atık ısı olarak çevrimden atılan ısı enerjisi mahal ısıtmasında kullanılacaktır. Sistemin termodinamik performans değerlendirmesi Mühendislik Denklem Çözücü (EES) programında Afyonkarahisar iline ait jeotermal ve güneş enerjisi değerleri kullanılarak yapılmıştır. Farklı jeotermal kaynak sıcaklıkları ve güneş ışınım değerlerinde sistemin parametrik çalışması yapılmıştır. Afyonkarahisar ilinde jeotermal su sıcaklığı 70 ile 130°C, kütleli debi 70 ile 150 kg/s aralığındadır. Ayrıca güneş ışınımı 300 ile 1000 W/m² aralığında değişmektedir. Jeotermal ve güneş enerji destekli ORC çevriminde toplam güç üretimi 2420 kW'dır. Bu güç üretiminin doğrudan elektroliz ünitesinde hidrojen üretilmesi için kullanılması durumunda sistemden 0,0154 kg/s hidrojen üretilmektedir. Sistemin mahal ısıtması için ısıtma kapasitesi 8933 kW'dır. Tüm sistemin enerji ve ekserji verimi sırasıyla %34,5 ve %46,0 olarak hesaplanmıştır.

Thermodynamic analysis of geothermal and solar assisted power generation and heating system

H I G H L I G H T S

- This geothermal and solar assisted cogenerated system generates a total power of 2420 kW
- The flow rate of hydrogen generated in the electrolysis unit is 0.0154 kg/s
- The energy and exergy efficiency of the overall system are 34.5% and 46.0%, respectively

Article Info

Research Article

Received: 12.02.2021

Accepted: 22.10.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.879077

Keywords:

Geothermal energy,
solar energy,
hydrogen production,
thermodynamic analysis

ABSTRACT

In this study, thermodynamic modeling and analysis of geothermal and solar-assisted cogeneration energy systems to supply the electricity and heating requirement of residences in Afyonkarahisar province are performed. In the system considered, electricity is generated in the Organic Rankine Cycle (ORC) with thermal energy obtained from geothermal and solar resources. The generated electricity is given to the network according to the energy requirement. When the grid's energy requirement is low, the excess electricity is sent to the electrolysis unit, and hydrogen is produced and stored. When energy is required again in the grid, the fuel cell's hydrogen energy is converted into electrical energy and given to the grid. The heat energy released from the cycle as waste heat in the ORC cycle is used in residential heating. The thermodynamic performance evaluation of the system has been performed in the Engineering Equation Solver (EES) software using the geothermal and solar energy values of Afyonkarahisar province. The parametric study of the system is carried out at different geothermal source temperatures and solar radiation values. In Afyonkarahisar, the geothermal water temperature is between 70 and 130°C, and the mass flow is between 70 and 150 kg/s. Also, solar radiation varies between 300 and 1000 W/m². Total power generation in geothermal and solar assisted ORC cycle is 2420 kW. If this power generation is used to generate hydrogen directly in the electrolysis unit, 0.0154 kg/h of hydrogen is generated from the system. The heating capacity of the system for residential heating is 8933 kW. The overall system's energy and exergy efficiency has been calculated as 34.5% and 46.0%, respectively.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz dünyasında en iyi bilinen enerji kaynağı fosil yakıtlardır. Fosil yakıtlar kömür, petrol ve doğal gaz gibi hidrokarbonlar içermektedir. Fosil yakıtların oluşması milyonlarca yıl sürmesine rağmen, dünya genelinde hızla tükenmektedir. Aynı zamanda fosil yakıtlar küresel ısınma ve iklim değişikliğine sebep olmakta ve çevreye zararlı sera gazları yaymaktadır. Bu nedenle son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları üzerine, dünya genelinde büyük yatırımlar ve çalışmalar yapılmaktadır. Yenilenebilir enerji güneş, rüzgâr, dalga ve jeotermal enerji gibi doğada geri dönüşürülebilir enerjiyi ifade eder. Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında, yenilenebilir enerjinin iki temel avantajı vardır. Birincisi, yenilenebilir enerji kaynakları bol miktarda bulunur ve tükenmez bir enerji kaynağıdır. İkincisi, yenilenebilir enerji temiz ve yeşil bir enerji kaynağı olduğundan çevre için faydalıdır. Dolayısıyla, yenilenebilir enerji sülfür, karbondioksit ve toz emisyonunu ciddi bir şekilde düşürerek sera etkisini azaltabilir. Ek olarak, yenilenebilir enerji kullanımı fosil yakıtların kullanımını azaltabilir ve ekolojik çevrenin korunması amacına ulaşılabilir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı son yıllarda çok hızlı bir şekilde ilerlemektedir [1].

En iyi bilinen yenilenebilir enerji kaynağı güneştir. Güneş enerjisi dünyanın tüm enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yeterli olmasına rağmen, mevcutta yeryüzünde güneş enerjisi yoğunluğunun düşük olması ve güneş enerjisini kullanmanın nispeten yüksek sermaye maliyeti gerektirmesi nedeniyle fosil yakıtlar kadar yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bir diğer popüler yenilenebilir enerji kaynağı jeotermaldir [2]. Jeotermal enerji elektrik, ısıtma, soğutma veya hidrojen üretimi hedefleri için kullanılabilir. Umut verici alternatif enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Jeotermal kaynağın enerji üretimi, soğutma veya ısıtma uygulamaları için kullanılması esas olarak kaynak sıcaklığına bağlıdır. Tek bir kaynaktan birden fazla çıktı üretmek, yalnızca sistemin verimliliğini artırmakla kalmayacak, aynı zamanda sistemin maliyetini de daha uygun hale getirecektir. Jeotermalin çoklu üretim kapasitesi, son zamanlarda dünya çapında birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir [3].

Fosil enerji kaynaklı elektrik üretimi ve diğer endüstriyel uygulamalarında değerli enerji içeriğine sahip ısı enerjisi çevreye atık ısı olarak atılmaktadır. Günümüzde araştırmacılar fosil kaynakların tüketimini azaltmak amacıyla atık ısının geri kazanılması için çalışmalar yapmaktadır. Enerjinin çevre dostu ve temiz kaynaklardan sağlanması ve bu enerji üretimi sırasında açığa çıkan atık ısının geri kazanılması enerji verimi ve çevre açısından oldukça önemlidir [4]. Atık ısı, sıcaklığına ve enerji miktarına bağlı olarak ısıtma ve güç üretimi gibi farklı amaçlar için kullanılabilir. Bu şekilde sera gazı salınımı büyük oranda azaltılabilir. Ayrıca atık ısının geri kazanılması ile birlikte sistem verimliliği artar ve bunun sonucunda enerji maliyetleri azalır [5].

Kojenerasyon enerji sistemleri elektrik ve ısı enerjisinin birlikte üretildiği sistemlerdir. İki enerji formunun aynı sistem içerisinde üretilmesinden dolayı kojenerasyon enerji sistemleri daha yüksek verime sahiptirler ve daha ekonomik sistemlerdir. Jeotermal veya güneş enerjisi destekli kojenerasyon enerji sistemleri üzerine birçok çalışma mevcuttur. Güneş enerjisinin tek kaynak olarak kullanıldığı sistemlerde, güneş enerjisinin günün her saatinde tam kapasite ile çalışması mümkün olmadığı için ısı enerjisinin depolanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Buradaki amaç depolanan ısı enerjisinden gece vakitlerinde elektrik üretmektir. Ancak güneşin olmadığı günlerde ısı enerjisi elde edilemeyeceğinden dolayı sistem durma noktasına gelecektir. Bundan dolayı bu tip enerji sistemleri tam zamanlı olarak çalışmamaktadır [6-9].

Jeotermal ve güneş enerjisi destekli kojenerasyon sistemlerinde elektrik üretimi yapılmakta ancak elektrik ihtiyacının olmadığı durumlarda fazla olan elektrik depolanmamaktadır. Fazla elektriğin depolanması için hidrojen üretimi önemli bir çözüm yoludur. Geleceğin enerji taşıyıcısı hidrojen, birçok farklı şekilde üretilebilir. Yenilenebilir enerjiden hidrojen üretiminin geliştirilmesi, hidrojenin temiz enerji geçişlerine yardımcı olması açısından kritik öneme sahiptir. Günümüzde hidrojen üretiminin %95'ini doğalgaz ve kömür oluşturmaktadır. Küresel hidrojen üretiminde su elektrolizinin payı ise sadece %5'dir. Fosil kaynakların hidrojen üretiminde yüksek paya sahip olmasının en büyük nedeni, ülkelerin bölgelerinde yer alan fosil kaynak rezervleridir. ABD ve Avrupa'da doğal gaz büyük bir pazar payına sahiptir. Çin bol miktarda ucuz kömür kaynaklarına sahip olması nedeniyle kömüre dayalı yöntemleri tercih etmektedir. Ancak yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişmesiyle, özellikle de güneş ve rüzgâr maliyetlerinin düşmesiyle birlikte, su elektrolizi ile hidrojen üretimine artan bir ilgi vardır [10].

Yenilenebilir enerjiden hidrojen üretimi yeşil hidrojen olarak tanımlanmaktadır ve tamamen sürdürülebilir bir enerji geçişi için en uygun olanıdır. Yeşil hidrojen üretmek için en iyi teknolojik seçenek yenilenebilir enerji destekli suyun elektrolizidir [11]. Su elektrolizi şu anda hidrojen üretimi sorununa çekici bir çözüm sunmaktadır. Su elektrolizinin diğer hidrojen üretimi teknolojilerine göre önemli faydalarından biri güneş, rüzgâr, dalga ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji teknolojileri ile uyumlu olmasıdır. Su elektrolizini kullanmanın bir başka avantajı, yerinde hidrojen sağlayabilmesidir. Su elektrolizi için elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bundan dolayı çevreye duyarlı bir şekilde hidrojen üretmek için emisyon içermeyen yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir [12]. Kurulu elektrolizör kapasiteleri 2010'da 1 MW'ın altında iken, 2019'da 25 MW'ın üzerine çıkarak önemli ölçüde artmıştır. Mart 2020'de Japonya 10 MW'lık bir proje faaliyete geçirmiştir. Kanada'da ise 20 MW'lık bir proje yapım aşamasındadır [13]. Hidrojen politikalarının geliştirilmesi ve teknolojiyle ilgili araştırmalar, enerji sektöründeki en popüler konulardan biri olarak ön plana

çıkılmaktadır. Yeni gelişen birçok ulusal girişim ve strateji mevcuttur. Dünya genelinde 228 hidrojen üretim projesi vardır. Avrupa, 105 hidrojen üretim projesi ile küresel olarak lider konumdadır. AB ülkeleri açıkladıkları strateji ile yeşil hidrojen üretiminde 2024 yılına kadar 6 GW, 2030 yılına kadar 40 GW kurulu elektroliz kapasitesi oluşturmayı hedeflemektedir. Avrupa'yı Avustralya, Japonya, Güney Kore, Çin ve ABD takip etmektedir [14].

Türkiye, daha önce hidrojen üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları yapmıştır. Ancak bu çalışmalar bir süre sonra durma noktasına gelmiştir. 2020'ye kadar hidrojen, Türkiye'nin enerji politikalarında kısıtlı görünürlüğe sahip olmuş fakat 2020 yılında hidrojen çalışmaları tekrar başlatılmıştır. Türkiye yakın gelecekte hidrojeni doğal gaz ile karıştırmayı hedeflemektedir. Son yapılan yanma testlerinde, doğal gaza %5 oranında hidrojen enjeksiyonu başarılı sonuçlar vermiştir. Bu %5'lik karışım yaklaşık 600 milyon USD'a eşdeğer doğal gaz ithalat maliyetini ortadan kaldıracaktır. Yerli kömür kullanılarak hidrojen üretimi yapılması Türkiye için diğer bir alternatiftir ve bu teknolojinin fizibilitesi üzerine araştırmalar devam etmektedir. Türkiye'nin yılda yaklaşık 4,6 MTEP'lük bir yeşil hidrojen potansiyeli olduğu tahmin edilmektedir. Bu potansiyelin 12,1 GW'lık bir elektrolizör kapasitesi ile karşılanabileceği öngörülmektedir. Bugün Türkiye'de yeşil hidrojen üretimi mevcut değildir. Hidrojenin 2030 yılına kadar Türkiye'nin toplam enerji tüketiminde %1'lik bir paya sahip olması beklenmektedir [15].

Acar ve Arslan [16] Simav jeotermal sahası verilerini kullanarak güneş ve jeotermal enerji destekli ORC çevriminin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Jeotermal destekli bir çevrim ile jeotermal-güneş destekli bir çevrimin net güç çıktısını, elektrik ve ekserji verimini hesaplamışlardır. Jeotermal enerji destekli çevrime güneş enerjisinin entegre edilmesiyle verimlerin azaldığını ancak net güç çıkışının artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Song vd. [17] ORC çevrimine dayanan güneş ve jeotermal enerji destekli bir güç santralinin performans analizini yapmışlardır. Sadece jeotermal enerji destekli güç santrali ile güneş-jeotermal destekli güç santralinin termodinamik açıdan performans değerlendirmesini yapmışlardır. Değişen güneş ışınımı ve çevre sıcaklıklarında her iki güç santralinin termal verimlerini ve net güç çıkışlarını hesaplamışlardır. Çalışmaları sonucunda, enerji üretimini arttırmak için jeotermal ve güneş enerjisinin birlikte kullanılmasının yararlı olacağını belirtmişlerdir. Wan vd. [18] ORC çevrimine dayanan güneş ve jeotermal enerji destekli bir hibrid enerji sistemi tasarlamışlar ve termodinamik analizini yapmışlardır. Hibrid sistemin termodinamik analizi sonucunda net güç çıkışını 12,76 MW, enerji ve ekserji verimlerini %10,74 ve %23,9 olarak hesaplamışlardır. Jeotermal enerjiye güneş enerjisinin entegre edilmesiyle birlikte sistemin güç üretim kapasitesinin arttığını ve hibrid sistemin verimli bir şekilde kullanılabileceğini vurgulamışlardır. Ayub vd. [19] güneş ve jeotermal enerji destekli bir hibrid model geliştirmişlerdir. Hibrid sistemi, düşük kaynak sıcaklığına sahip jeotermal

saha ve oluk tip güneş kolektörü kullanan ORC çevriminden oluşturmuşlardır. Hibrid sistemin net güç çıkışını maksimize etmek için optimize etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda güneş ve jeotermal enerji destekli hibrid sistemin, jeotermal enerji destekli sisteme göre net güç çıkışında %6,3 daha iyi bir sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir. Akrami vd. [20] elektrik, ısıtma ve hidrojen üreten üç faydalı çıkışa sahip ORC çevrimli jeotermal enerji destekli bir sistem geliştirmişlerdir. Değişen jeotermal akışkanın kütleli debisi, türbin giriş sıcaklığı ve basınç değerlerinde sistemin enerji ve ekserji verimleri üzerindeki etkileri üzerine parametrik çalışmalar yapmışlardır. Belirledikleri tasarım parametre değerlerinde sistemin net elektrik gücünü 43,47 kW ve ısıtma kapasitesini 149,8 kW hesaplamışlardır. Elektroliz ünitesinde her 10,4 kW elektrik tüketiminde 0,2 kg/saat oranında saf hidrojen üretilebileceğini belirtmişlerdir. Yuksel vd. [21] elektrik, soğutma ve hidrojen üretimi yapan jeotermal enerji destekli ORC çevrimi ile çalışan bir sistem tasarlamışlardır. Farklı çalışma şartlarında, sistemin ekserji veriminde, elektrik ve hidrojen üretiminde meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. ORC çevrimi ile üretilen elektriğin bir kısmını elektroliz ünitesinde hidrojen üretimi için kullanmışlardır. Jeotermal kaynak sıcaklığının 130°C'den 200°C'ye yükselmesiyle sistemin ekserji veriminin %32'den %58'e, elektrik üretiminin 1000 kW'dan, 8000 kW'ya ve hidrojen üretiminin 0,005 kg/s'den 0,055 kg/s'ye yükseldiğini tespit etmişlerdir. Bassetti vd. [22] hibrid jeotermal ve güneş enerjisi destekli bir enerji sistemi modellemişlerdir. Hibrid sistemi, düşük sıcaklığı sahip bir jeotermal akışkan ve parabolik oluk tip güneş kolektörü kullanan ORC çevriminden oluşmaktadır. Güneş enerjisini jeotermal akışkanın sıcaklığını yükseltmek amacıyla ORC çevriminin ısı değiştiricisinde kullanmışlardır. Ayrıca sistemlerinde güneş enerjisi için termal enerji depolama ünitesi kullanmışlardır. Bicer ve Dincer [23] elektrik, ısıtma, soğutma ve sıcak su üretimi yapabilen ORC çevrimi ile çalışan jeotermal ve güneş enerjisi destekli bir sistem tasarlamışlardır. Tasarladıkları sistemin termodinamik analizi sonucunda enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %11 ve %28 olarak hesaplamışlardır. Çeşitli çevresel ve çalışma koşullarında sistemin parametrik çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Calise vd. [24] belli bir bölgenin elektrik, ısıtma ve soğutma ihtiyacını karşılamak amacıyla jeotermal ve güneş enerjisi destekli bir hibrid sistem modellemişlerdir. Sistem orta entalpili jeotermal akışkan ve parabolik oluk tip güneş güneş kolektörü kullanan ORC çevriminden oluşmaktadır. Tasarladıkları sistemin ekserji ve ekserji-ekonomik analizlerini yapmışlardır.

Literatürde birçok kombine sistem üzerine çalışmalar mevcuttur. Kaynak genellikle elektrik üretmek ve ısıtma-soğutma yapmak için kullanılmıştır. Bu çalışmada ise jeotermal ve güneş enerjisi kullanılarak elektrik üretimi yapılmış, ihtiyaç fazlası enerjiden hidrojen üretilerek enerjinin depolanması sağlanmıştır. Yenilenebilir enerji santrallerinde üretilen enerjinin, daha sonra kullanılmak üzere uygun şekilde depolanmaması günümüzde büyük bir problemdir. Aküler çok sınırlı kapasiteleri ve ömürleri nedeniyle günümüz teknolojisinde uygun bir seçenek

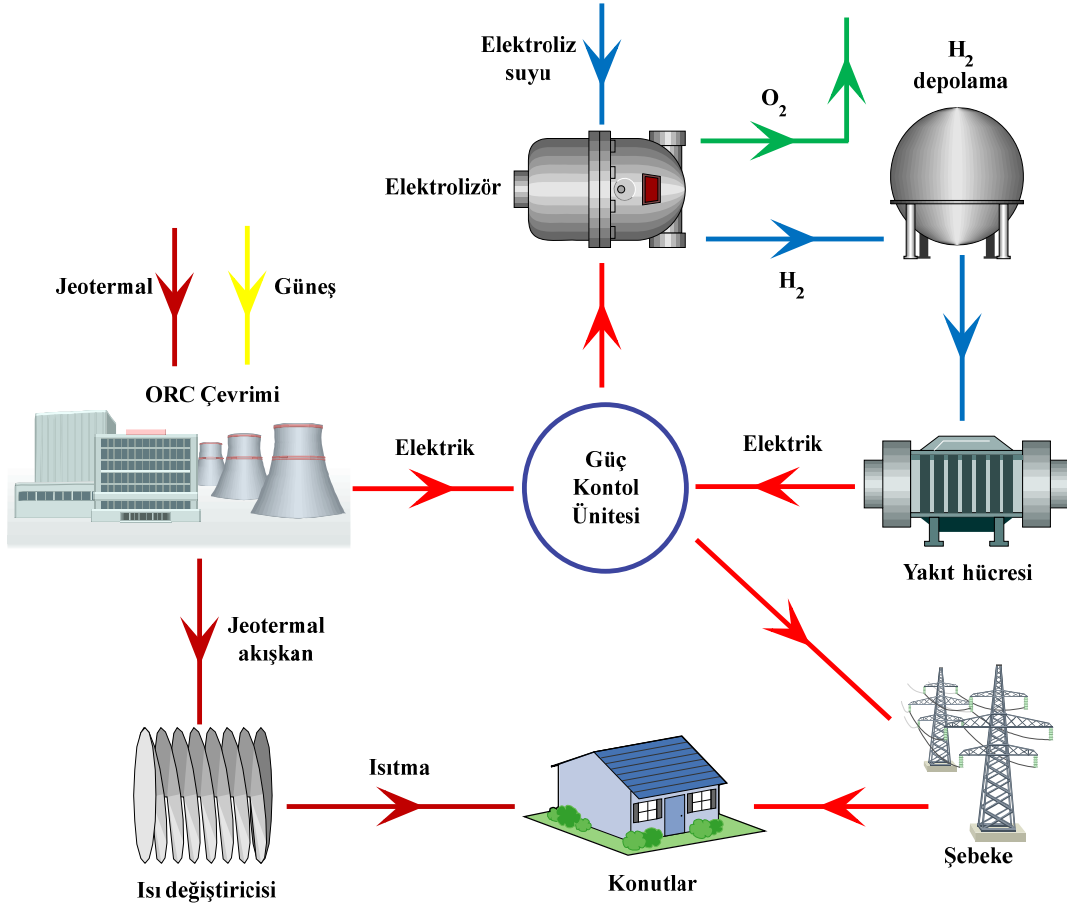
değildir. Bu soruna olası bir çözüm, suyun elektrolizi yöntemi ile yenilenebilir elektrik enerjisinden hidrojen üretimidir. Hidrojen üretildikten sonra her an depolanabildiği ve kullanılabilirdiği için sistemin enerji sürekliliği sağlanmış olacaktır. Böylece olası bir elektrik kesintisi durumunda şebekeye kesintisiz güç sağlanacaktır.

Bu çalışmada, yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen üretilmesi hedefi, Türkiye'nin gelecek hidrojen hedefine farklı bir alternatif sunacaktır. Ayrıca çalışmada, konutların elektrik ve ısıtma ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla jeotermal ve güneş destekli bir kojenerasyon enerji sistemi dikkate alınmıştır. Sistemin termodinamik analizi, Afyon Jeotermal Enerji Santrali'ne (AFJES) ait jeotermal değerler ve Afyonkarahisar iline ait güneş ışınım değerleri kullanılarak Mühendislik Denklem Çözücü (EES) programında simülasyonlar üretilerek yapılmıştır. Sistemin parametrik çalışması, farklı jeotermal kaynak sıcaklıkları ve güneş ışınım değerleri dikkate alınarak yapılmıştır. Bu sonuçlara göre sistemin elektrik üretimi ve ısıtma kapasitesinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Farklı enerji formları (elektrik ve ısı gibi) ihtiyacını karşılamak ve kullanıma hazır hale getirmek üzere optimum çalışma koşulları araştırılmıştır.

2. SİSTEMİN MODELLENMESİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ (SYSTEM MODELING AND WORKING PRINCIPLE)

Jeotermal ve güneş destekli kojenerasyon enerji sisteminin genel görünümü Şekil 1'de gösterilmiştir. Bölgenin kaynak özellikleri dikkate alınarak elektrik üretimi için organik rankine çevrimi (ORC) seçilmiştir. Çevrimde R134a çalışma akışkanı olarak seçilmiştir. R134a organik bir akışkandır ve binary çevrimi kapalı bir çevrimde çalışır. Rankine çevriminde su yerine organik bir akışkan dolaşırsa, bu çevrime organik rankine çevrimi denir. ORC, buhar türbini çevrimlerine göre bazı avantajlara sahiptir. Jeotermal akışkan ORC türbini ile temas halinde olmadığından jeotermal akışkanlarda bulunan kirleticiler türbine zarar vermez. ORC çevriminin çalıştırılması buhar çevrimlerinden daha kolaydır ve personele ihtiyaç duyulmadan uzaktan kontrol edilebilir ve çalıştırılabilir. Bu, işletim maliyetini düşürür. ORC çevrimi daha düşük sıcaklıklarda ve basınçlarda çalıştığı için, mekanik gerilme ve gerilme seviyeleri daha düşüktür. Bu daha uzun ömür anlamına gelmektedir [25].

Yüksek çalışma sıcaklığı ve güç çıkışı, depolama kapasitesi ve hibrit sistemlerle uyumu gibi avantajlarından dolayı, ORC



Şekil 1. Jeotermal ve güneş enerjisi destekli kojenerasyon enerji sisteminin görünümü.
(View of geothermal and solar assisted cogeneration energy system.)

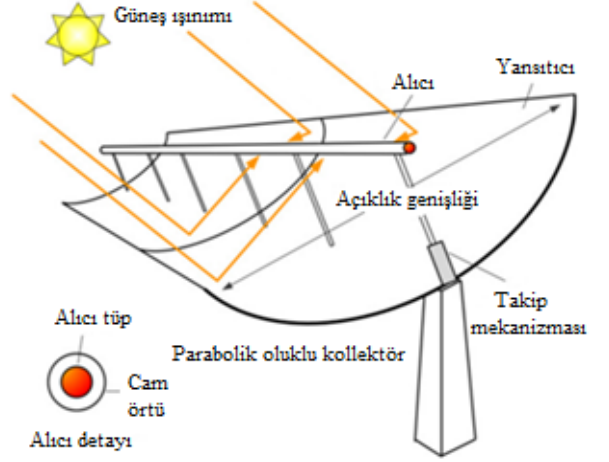
çevriminin diğer enerji kaynağı olan güneşten gelen ısı enerjisini kullanmak için parabolik oluklu kollektör (PTC) düşünülmüştür. PTC'ler çizgisel odaklama yapabilen ve yüksek sıcaklık grubunda yer alan yoğunlaştırıcı sistemlerdir [26]. PTC'de çalışma akışkanı olarak Therminol VP-1 akışkanı kullanılmıştır. PTC'de, güneş ışınımı yansıtıcının odak noktasına yerleştirilmiş bir alıcıda toplanır. Alıcı, yansıtıcıların odak noktaları doğrultusunda uzanan ve içinde çalışma akışkanının bulunduğu bir tüpten oluşur. Yansıtıcı, takip mekanizmaları ile gün boyunca güneşi takip eder. Çalışma akışkanı, alıcı içinde ilerletilirken 150 – 350°C sıcaklık aralıklarında ısınır. Isınan çalışma akışkanı, enerji kaynağı olarak ORC çevrimine gönderilir [27].

Şekil 2, parabolik oluklu kollektörün temel konfigürasyonunu göstermektedir. Bu kollektörler, elektrik üretimi veya proses ısısı uygulamaları için 400°C'ye kadar sıcaklıklarda ısı üreten en olgun güneş teknolojileridir. Güneş sisteminde yüksek verimlilik ve yüksek sıcaklık için yüksek performanslı bir güneş kollektörü gereklidir. Parabolik oluklu güneş kollektörleri, güneş ışığını sentetik yağın dolaştığı bir alıcı boruya odaklar.

Günümüzde çalışma akışkanı olarak en yaygın kullanılan sentetik yağ Therminol VP-1'dir. Güneş alanının birincil bileşeni, güneş kollektörlerin montajıdır. Böyle bir montaj, alıcı tüpler ve desteklerle birlikte parabolik yansıtıcıların monte edildiği metal destek yapısından yapılır. İzleme sistemi sürücüyü, sensörleri ve kontrolörü içerir [28].

Jeotermal ve güneş enerjisi destekli ORC çevriminden, güç kontrol ünitesine gönderilen elektrik enerjisi şebekeye verilmektedir. Daha az elektrik ihtiyacının olduğu yoğun olmayan dönemlerde fazla elektrik elektroliz ünitesine gönderilir. Bu ünite su, oksijen ve hidrojene ayrılır. Üretilen hidrojen gaz halinde olup depolanmak üzere yüksek basınçlı tanklere gönderilir. Maksimum elektrik ihtiyacının olduğu yoğun dönemlerde depolanan hidrojen bir yakıt hücresi sistemine gönderilir ve hidrojenin kimyasal enerjisi elektriğe dönüştürülür. Yakıt hücresinde hidrojen elektrokimyasal bir reaksiyon (ters elektroliz) ile yanma olmadan oksijen ile birleşir ve doğru akım (DC) elektriği üretilir. Üretilen elektrik enerjisi, güç kontrol ünitesine gönderilir ve ardından şebekeye verilir. Ayrıca ORC çevriminden atık ısı olarak atılan jeotermal akışkan, ısı

değiştiricisine gönderilerek konutların ısıtılmasında kullanılır. Böylece atık ısı, faydalı ısıya dönüştürülmüş olur. Sistemin termodinamik modellenmesinde yapılan kabuller ve işletme parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 2. Parabolik oluklu kollektör (Parabolic trough collector)[27].

3. SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ (THERMODYNAMIC ANALYSIS OF SYSTEM)

Sistemin termodinamik analizi için belirli varsayımlar yapılmıştır. Sistemin her bir bileşeni kontrol hacmi kabul edilmiştir. Sabit rejim ve akışlı termodinamik sistem elemanları için bu yaklaşım kullanılmakta analiz için kolaylık sağlamaktadır. Elektroliz işleminde hidrojen ve oksijen için ideal gaz kabulü yapılmıştır. Kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir. Ölü hal için sıcaklık ve basıncı değerleri, standart çevre kabulleri olan 25°C ve 100 kPa alınmıştır. Verimlilik hesaplamalarında, elektroliz işleminde gaz halinde hidrojen üretildiği ve bu gaz halindeki hidrojenin, güç üretmek için yakıt hücresinde kullanıldığı için hidrojenin alt ısı değeri kullanılmıştır.

Jeotermal ve güneş enerji destekli ORC çevriminin net güç çıkışı Eş. 1'den hesaplanabilir [29].

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_T - \dot{W}_P \quad (1)$$

Tablo 1. Termodinamik kabuller ve işletme parametreleri. (Thermodynamic assumptions and operating parameters)

Çevre sıcaklığı (°C)	25
Çevre basıncı (kPa)	100
Jeotermal akışkanın kaynak sıcaklığı (°C)	130
Jeotermal akışkanı yer altına basma sıcaklığı (°C)	54,8
Jeotermal akışkanın kütleli debisi (kg/s)	85
ORC çalışma akışkanı	R134a
ORC basınç aralığı (kPa)	500-2800
Pompa ve türbinin izentropik verimi	0,85
Ortalama güneş ışınımı (W/m ²)	600
PTC çalışma akışkanı	Therminol VP-1
PTC'de dolaşan akışkanın kütleli debisi (kg/s)	0,2

Burada \dot{W}_T türbin işi, \dot{W}_P pompa işidir.

ORC çevriminin enerji ve ekserji verimi, sırasıyla net güç çıkışının ısı girişine ve ekserji girişine oranlanması ile bulunabilir.

$$\eta_{ORC} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ORC} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}x_{in}} \quad (3)$$

Parabolik oluklu kollektörden gelen faydalı ısı, kollektörde kullanılan akışkanın giriş ve çıkış özellikleri Eş. 4 kullanılarak hesaplanabilir [30].

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_r c_p (T_{r,in} - T_{r,out}) \quad (4)$$

Burada \dot{m}_r alıcıda dolaşan akışkanın kütleli debisi, c_p akışkanın özgül ısı, $T_{r,in}$ ve $T_{r,out}$ akışkanın alıcıya giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır.

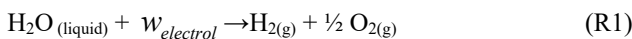
Parabolik kollektöre, güneş enerjisi tarafından sağlanan ekserji girişi Eş. 5'den hesaplanır [31].

$$\dot{E}x_{sol,in} = GA_{ap} \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sol}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sol}} \right) \right) \quad (5)$$

Burada A_{ap} yansıtıcı alanı, G güneş ışınım şiddeti, T_0 çevre sıcaklığı ve $T_{sol} = 5800$ K olup güneş yüzeyinin sıcaklığıdır.

Bir yüzeyde meydana gelen güneş ışınımı miktarı yüzeyin yönüne, enlemine, konumun yüksekliğine, havanın nemine, gökyüzünün açıklığına ve günün saatine bağlıdır. Afyonkarahisar ilinin aylık ortalama güneş ışınım oranı $377,82$ W/m² olarak ölçülmekte olup, en yüksek ortalama maksimum günlük güneş ışınım oranı 1040 W/m²'dir. Bu ışınım değerleri aralığı, santralin parametrik çalışmasında dikkate alınacaktır [32].

Hidrojen, jeotermal ve güneş enerji destekli ORC çevriminden gelen fazla elektrik enerjisi kullanılarak su elektroliz işlemi ile üretilmektedir. Elektroliz, elektrik enerjisi kullanılarak suyun hidrojen ve oksijene dönüştürülmesidir. Elektroliz işlemi endotermik termokimyasal bir işlemdir. Bu işlemin termodinamik analizi yapılırken moleküler entalpi ve entropi özellikleri kullanılır. Suyun elektroliz yoluyla hidrojen ve oksijene ayrışması, elektrotlar ile yüksek iyonik iletkenliğe sahip elektrolit solüsyon sıvısı arasındaki akım geçişi ile sağlanır. Su elektroliz reaksiyonu Reaksiyon 1'de verilmiştir [33].

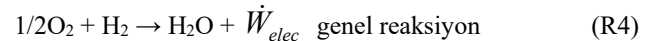
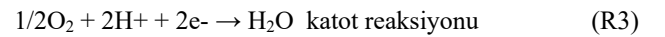
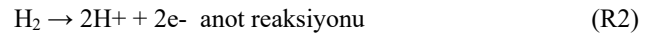


Bu reaksiyon, 1 kmol su kullanıldığında 1 kmol hidrojen ve 0,5 kmol oksijen üretir. Suyun Gibbs fonksiyonu, reaksiyona giren her kmol sıvı su için 237,180 kJ'ye eşit olan 25°C'de bu endotermik reaksiyon için gereken minimum işi verir. Bu, reaksiyon tarafından üretilen hidrojen kg başına 117,650 kJ'ye (veya 32,68 kWh) eşdeğerdir. Gerçek bir elektrolizör tersinmezlik içerir ve gerçek elektrik tüketimi bu minimum değerden daha büyük olacaktır. Elektroliz ünitelerinin dönüşüm verimliliği %40 ile 80 arasında değişmektedir. Bu analizde elektroliz ünitesinin dönüşüm verimliliği %75 olarak alınmıştır [34]. Sistemden üretilen hidrojenin miktarını Eş. 6'dan hesaplayabiliriz.

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{\dot{W}_{net}}{w_{elec}} MW_{H_2} \quad (6)$$

Burada w_{elec} (kJ/kmol) birim kilogram hidrojenin üretilmesi için gerekli olan gerçek iş miktarını ve MW_{H_2} kg/kmol cinsinden hidrojenin moleküler ağırlığıdır.

Yakıt hücreleri, en uygulanabilir hidrojen teknolojilerinden biridir. Bir yakıt hücresinde hidrojen, bir elektrokimyasal reaksiyonda (ters elektroliz) yanmadan oksijen ile birleşir ve doğru akım (DC) elektriği üretir. Proton geçişim membranlı (PEM) yakıt hücreleri yüksek güç yoğunluğuna sahip olması, çalışma sıcaklığının düşük olması (60-80°C), düşük hacim ve düşük ağırlığa sahip oluşu gibi özelliklerinden dolayı endüstriyel güç üretimi uygulamasında en yaygın kullanılan yakıt hücresi türüdür [35]. Tipik bir yakıt hücresi, her iki tarafta anot reaksiyonu ve katot reaksiyonu ile temas halinde olan elektrolitten oluşur. PEM yakıt hücresinin genel elektrokimyasal reaksiyonu Reaksiyon 2, 3 ve 4 kimyasal reaksiyonları kullanılarak ifade edilir [36].



Yukarıdaki elektrokimyasal reaksiyonun geri dönüşüm (tersinir) potansiyeli, standart koşullarda (25°C 100 kPa) 1,229 V'dur ve Gibbs serbest enerjisine karşılık gelir. Çevresindekine eşit sabit sıcaklıkta meydana gelen tersine çevrilebilir bir reaksiyon düşünüldüğünde, yakıt hücresinin iş çıktısı Eş. 7'den hesaplanabilir [36].

$$w_{elec} = -\left(\sum n_e g_e - \sum n_i g_i \right) = -\Delta G \quad (7)$$

Burada, ΔG genel kimyasal reaksiyon için Gibbs fonksiyonundaki değişikliklerdir.

Tüm sistemin enerji verimi, yakıt hücresinde üretilen elektrik miktarının ve ısı değiştiricisinin ısı kapasitesinin, sisteme giren toplam ısı enerjisine oranlanması ile hesaplanabilir (Eş. 8).

$$\eta_{overall} = \frac{\dot{W}_{net,fc} + \dot{Q}_{hex}}{\dot{Q}_{sol,in} + \dot{Q}_{geo,in}} \quad (8)$$

Tüm sistemin geneli için ekserji verimi Eş. 9 kullanılarak yazılabilir.

$$\varepsilon_{overall} = \frac{\dot{W}_{net,fc} + \dot{Q}_{hex}(1 - (T_0 - T_E))}{\dot{E}x_{geo,in} + \dot{E}x_{sol,in}} \quad (9)$$

Sistemin termodinamik analizinde Afyon Jeotermal Enerji Santrali'nin mevcut işletme değerleri ve Afyonkarahisar ilinin Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan güneş enerjisi değerleri kullanılmıştır. Sistem bileşenlerindeki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Türbin ve pompanın izantropik verimi %85 olarak alınmıştır. Termodinamik analiz, yerleşik termofiziksel özelliklere sahip denklem çözücü olan EES programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [37].

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

EES programında gerçekleştirilen termodinamik analiz sonucunda, jeotermal akışkan ve parabolik kollektörde dolaşan Therminol VP-1 akışkanından jeotermal ve güneş destekli kojenerasyon enerji sistemine 30,713 kW enerji ve 5679 kW ekserji girişi olmuştur. ORC çevriminde üretilen net güç 2420 kW olarak hesaplanmıştır. ORC çevriminin enerji verimi %11,2 ve ekserji verimi %44,8 olarak hesaplanmıştır. ORC çevriminden atık ısı olarak atılan jeotermal akışkan ile yapılan mahal ısıtma için kullanılan ısı değiştiricisinin ısı kapasitesi 8933 kW'dır.

Sistemin toplam net güç üretimi, jeotermal ve güneş enerjisi destekli ORC çevriminin net işi olan 2420 kW'dır. Bu güç üretimi, elektroliz ünitesinde güç girişi olarak kullanılır. Elektrolizör verimliliği, 1 kg hidrojen üretmek için minimum iş tüketiminin gerçek iş tüketimine bölümü olarak tanımlanır. Bu, ekserji verimliliği ile aynı tanımdır. %75 verimlilik değeri kullanılarak gerçek iş tüketimi 117,650 kJ/kg H₂ olarak belirlenmiştir. Bu iş tüketimine karşılık gelen hidrojen üretimi 0,0154 kg/s olarak hesaplanmıştır.

Jeotermal ve güneş enerjisi destekli ORC çevriminden elde edilen 2420 kW'lık enerji, elektrolizörde tüketilmektedir.

Elektrolizörden net ekserji çıkışı 1815 kW ve ekserji kaybı 605 kW olarak hesaplanmıştır. Yakıt hücresinde üretilebilecek maksimum iş, kg hidrojen başına 116,672 kJ'dir. Yakıt hücresinde 0,0154 kg/s hidrojen tüketildiğinde 1668 kW güç üretilmektedir.

Sistemin genel enerji ve ekserji verimleri Tablo 2'de verilmiştir. Sistemin genel enerji ve ekserji verimi hesaplanırken, elektrolizör ve yakıt hücresinin sistem içerisindeki etkisini daha iyi bir şekilde görebilmek adına iki ayrı enerji ve ekserji verimi hesaplanmıştır. Jeotermal ve güneş enerjisi destekli ORC çevriminden elde edilen net güç doğrudan şebekeye verildiğinde, sistemin enerji verimi %37 ve ekserji verimi %59,2 olarak hesaplanmıştır. Sistemde enerjinin hidrojen olarak depolanıp daha sonra elektrik enerjisine dönüştürüldüğü durum için ise, sistemin enerji verimi %34,5 ve ekserji verimi %46 olarak hesaplanmıştır. Hidrojen depolamanın olduğu sistemin enerji ve ekserji veriminin daha düşük olmasının sebebi, elektrolizör ve yakıt hücresinde meydana gelen kayıplardır.

Tablo 2. Jeotermal ve güneş enerjisi destekli kojenerasyon enerji sisteminin enerji ve ekserji verimleri.

(Energy and exergy efficiencies of geothermal and solar assisted cogenerated energy system)

Sistem	η_{enerji} (%)	$\varepsilon_{ekserji}$ (%)
ORC çevrimi	11,2	44,8
Direkt elektrik üretimi	37,0	59,2
Hidrojen dönüşüm sistemi	34,5	46,0

Tablo 3'de sistemin tüm alt bileşenlerinin ısı, iş ve ekserji değeri her bir bileşen için verilmiştir. Ayrıca sistem alt bileşenlerinin her birinin ekserji kaybı ve ekserji verimi hesaplanmıştır.

4.1. Parametrik Çalışma (Parametric Study)

Aşağıda kojenerasyon sisteminin performans ve parametrik incelemesine ait bazı grafikler verilmiştir. İlk parametrik çalışmada (Şekil 3-4) 600 W/m²'lik sabit bir güneş ışınım değerinde, jeotermal kaynak sıcaklığı 90 ile 150°C arasında değişmektedir. İkinci parametrik çalışmada (Şekil 5-6) ise 130°C'lik sabit bir jeotermal kaynak sıcaklığında, güneş ışınımı 300 ile 1000 W/m² arasında değişmektedir.

Şekil 3'de jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak, sistemin net güç üretiminde ve ısı girişinde meydana gelen

Tablo 3. Sistem alt bileşenlerinin enerji ve ekserji özellikleri (Energy and exergy properties of system subcomponents)

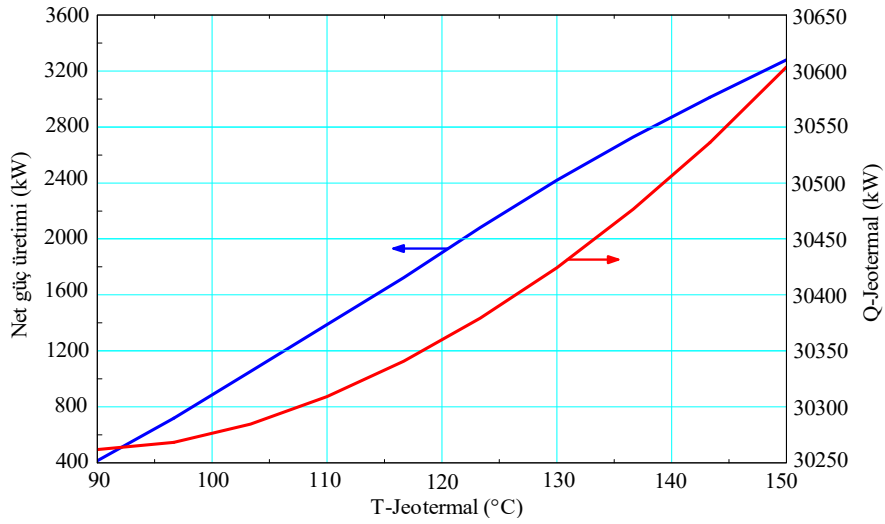
Bileşenler	\dot{Q} (kW)	\dot{W} (kW)	$\dot{E}x_{in}$ (kW)	$\dot{E}x_{out}$ (kW)	$\dot{E}x_{dest}$ (kW)	ε (%)
ORC-Türbin	-	2936	3401	2936	465	86,3
ORC-Pompa	-	247	247	209,5	37,5	84,8
ORC-Isı değiştiricisi	2168	-	4355	3476	879	79,8
ORC- Kondenser	1899	-	284,3	250,5	33,8	88
Isı değiştiricisi-2	8933	-	878,2	623	255,2	71
Parabolik kollektör	219,5	-	272,7	107,2	165,5	19,8
Elektroliz ünitesi	-	2420	2420	1815	605	75

değişimler gösterilmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığının artmasıyla birlikte sistemin net güç üretimi ve ısı girişi artmaktadır. Jeotermal kaynak sıcaklığının 90°C olduğu durumda sistemin net güç üretimi 415,9 kW ve ısı girişi 30,260 kW'dır. Jeotermal kaynak sıcaklığının 150°C olduğu durumda ise sistemin net güç üretimi 3279 kW ve ısı girişi 30,600 kW olmaktadır.

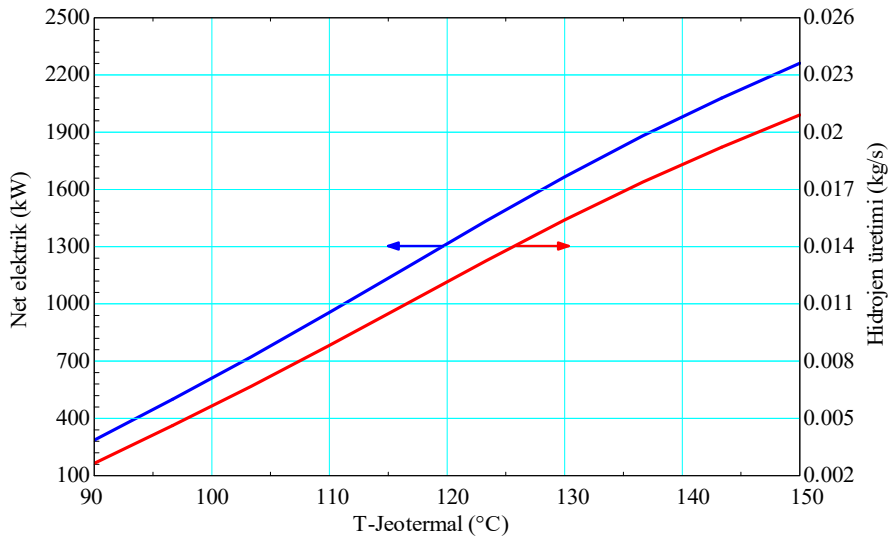
Şekil 4'de jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak, sistemin elektrik ve hidrojen üretiminde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça, sistemin net elektrik ve hidrojen üretiminde lineer bir şekilde artış meydana gelmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığının 90°C ile minimum olduğu durumda, net elektrik üretimi 286 kW ve hidrojen üretimi 0,0026 kg/s olmuştur. Jeotermal kaynak sıcaklığının 150°C ile maksimum olduğu durumda net elektrik üretiminin 2262

kW, hidrojen üretiminin ise 0,0209 kg/s olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, jeotermal kaynak sıcaklığının önemini göstermektedir ve jeotermal enerji üretiminin neden düşük kaynak sıcaklıklarında uygulanabilir olmadığını açıklamaktadır.

Şekil 5'de güneş ışınımına bağlı olarak, sistemin net güç üretiminde ve ısı girişinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, güneş ışınımının azalması ile net güç üretiminin ve ısı girişinin azaldığı, güneş ışınımının artması ile doğru orantılı bir şekilde net güç üretiminin ve ısı girişinin arttığı görülmektedir. Güneş ışınımının 300 W/m² ile minimum olduğu durumda, net güç üretimi 2406 kW, ısı girişi 146,4 kW olmaktadır. Güneş ışınımının 1000 W/m² ile maksimum olduğu durumda net güç üretiminin 2439 kW, ısı girişinin ise 487,9 kW olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak net güç üretimi ve ısı girişi. (Net power generation and heat input depending on the geothermal source temperature.)



Şekil 4. Jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak elektrik ve hidrojen üretimi. (Electricity and hydrogen generation depending on the geothermal source temperature.)

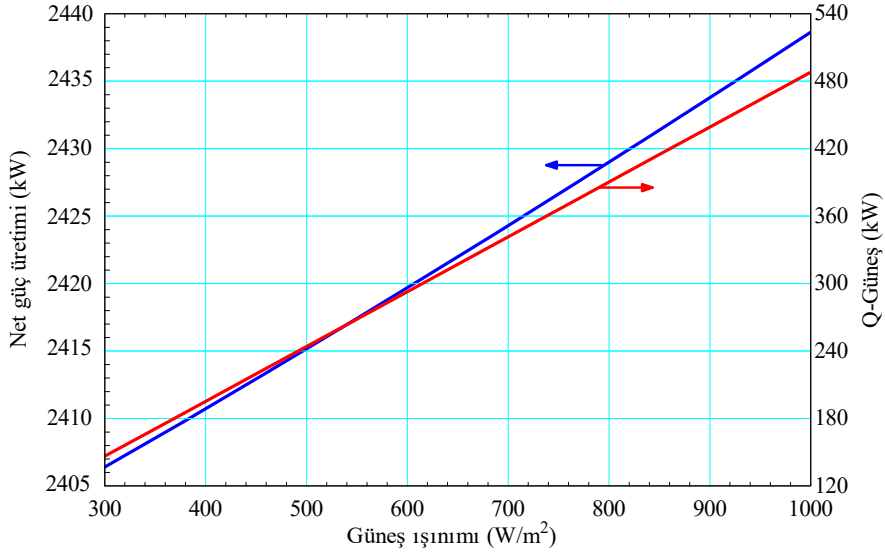
Şekil 6'da güneş ışınının değişimine bağlı olarak, sistemden elde edilen elektrik ve hidrojen üretiminin değişimi gösterilmiştir. Güneş ışınının yükselmesi ile birlikte, hidrojen ve elektrik üretiminde artış meydana gelmiştir. Güneş ışınının elektrik ve hidrojen üretimi üzerindeki etkisinin, jeotermal kaynak sıcaklığının etkisi kadar önemli olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni jeotermal kaynağın güç üretimine olan etkisine kıyasla, güneş ışınının güç üretimine olan etkisinin daha düşük olmasıdır.

4.2. Önerilen Sistemin Doğrulanması ve Karşılaştırılması (Proposed System Validation and Comparison)

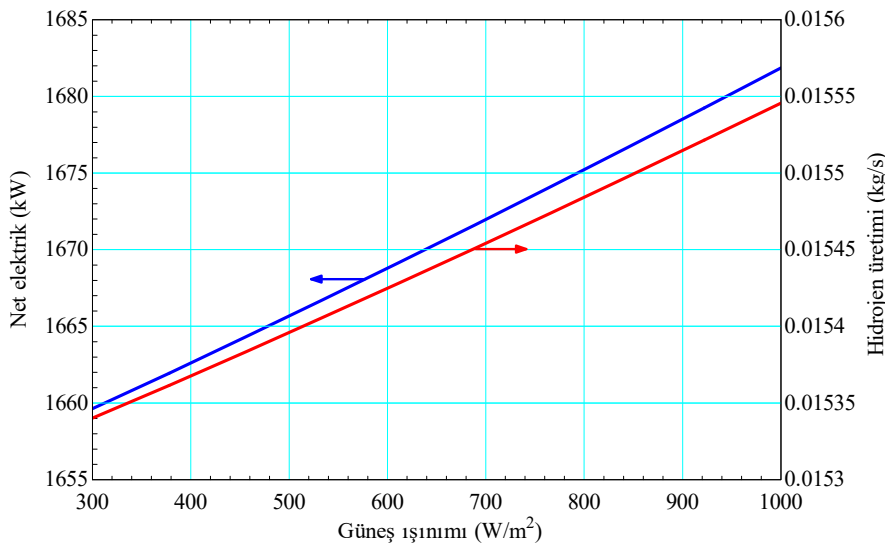
Yapılan termodinamik analiz sonucunda, jeotermal ve güneş destekli kojenerasyon enerji sisteminde üretilen net güç 2420 kW'dır. Bu güç üretimi, hidrojen depolama için elektroliz

ünitesinde kullanıldığında 0,0154 kg/s hidrojen üretilmektedir. Elektroliz ünitesinin net ekserji çıkışı 1815 kW olarak hesaplanmıştır. Yakıt hücresinde 0,0154 kg/s hidrojen tüketildiğinde 1668 kW güç üretilmektedir. Jeotermal akışkan ile yapılan mahal ısıtma için kullanılan ısı değiştiricisinin ısı kapasitesi 8933 kW'dır. Jeotermal ve güneş enerjisi destekli sistemin enerji verimi %34,5 ve ekserji verimi %46 olarak hesaplanmıştır.

Wan vd. [18] ORC çevrimine dayanan güneş ve jeotermal enerji destekli bir hibrid enerji sistemi tasarlamışlardır. Hibrid sistemin net güç çıkışı 12,76 MW, genel enerji ve ekserji verimini sırasıyla %10,74 ve %23,9 olarak hesaplamışlardır. Yüksel vd. [21] elektrik, soğutma ve hidrojen üretimi için jeotermal enerji destekli ORC çevrimi ile çalışan bir sistem tasarlamışlardır. ORC çevrimi ile üretilen elektriğin bir kısmını elektroliz ünitesinde hidrojen



Şekil 5. Güneş ışınımına bağlı olarak net güç üretimi ve ısı girişi.
(Net power generation and heat input depending on solar radiation.)



Şekil 6. Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak elektrik ve hidrojen üretimi.
(Electricity and hydrogen generation depending on the solar radiation.)

üretimi için kullanmışlardır. Jeotermal kaynak sıcaklığının 130°C'den 200°C'ye yükselmesiyle sistemin ekserji veriminin %32'den %58'e, elektrik üretiminin 1000 kW'dan, 8000 kW'ya ve hidrojen üretiminin 0,005 kg/s'den 0,055 kg/s'ye yükseldiğini tespit etmişlerdir. Yuksel ve Ozturk [38] elektrik, soğutma, ısıtma, sıcak su ve hidrojen üretimi yapabilen jeotermal enerji destekli ORC çevrimi çalışan bir sistem geliştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda sistemin genel enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %47,04 ve %32,15 hesaplamışlardır. Jeotermal su sıcaklığının 130°C'den 200°C'ye yükselmesiyle güç üretiminin 4,5 MW'tan 8 MW'a ve hidrojen üretiminin 0,030 kg/s'den 0,075 kg/s'ye yükseldiğini tespit etmişlerdir. El-Emam ve Dincer [39] elektrik, hidrojen, soğutma ve sıcak su üretimi yapabilen güneş enerjisi destekli bir sistem tasarlamışlardır. Güneş enerji kaynağı için parabolik kolektör ve güç üretimi için ORC çevrimi kullanmışlardır. Sistemin enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %39 ve %21,7 hesaplamışlardır. Akrami vd. [40] elektrik, ısıtma, soğutma ve hidrojen üretimi olmak üzere dört faydalı çıktıya sahip ORC çevrimi ile çalışan jeotermal enerji destekli bir sistem geliştirmişlerdir. Tasarladıkları sistemin net güç üretimini 952,3 kW, ısıtma kapasitesini 1618 kW ve hidrojen üretimini 0,052 kg/s hesaplamışlardır. Sistemin genel enerji verimini %34,98 ve genel ekserji verimini %49,17 hesaplamışlardır. Alirahmi vd. [41] elektrik, ısıtma, soğutma ve hidrojen üretimi için jeotermal ve güneş enerji destekli bir sistem tasarlamışlardır. Güneş enerji kaynağı için parabolik kolektör ve güç üretimi için ORC çevrimi kullanmışlardır. Sistemin genel enerji ve ekserji verimini sırasıyla %18,69 ve %31,99 hesaplamışlardır. Sistemin net güç üretimini 860,3 kW ve hidrojen üretimini 0,007 kg/s hesaplamışlardır. Siddiqui vd. [42] elektrik, hidrojen ve soğutma üretimi olmak üzere üç faydalı çıktıya sahip jeotermal ve güneş enerjisi destekli bir sistem geliştirmişlerdir. Sistemin net güç üretimini 3398 kW, enerji verimini %19,6 ve ekserji verimini %19,1 olarak hesaplamışlardır. Cao vd. [43] elektrik ve hidrojen üretimi için jeotermal enerji destekli üç farklı sistem tasarlamışlardır. ORC çevriminde üretilen elektrik enerjisini PEM elektroliz ünitesinde hidrojen üretiminde kullandıkları sistemde elektrik ve hidrojen üretimini 815,7 kW ve 4,78 kg/saat olarak hesaplamışlardır. Sistemin genel enerji ve ekserji verimini %11,89 ve %50,82 hesaplamışlardır. Ebadollahi vd. [44] elektrik, hidrojen, ısıtma ve soğutma üretimi için jeotermal enerji destekli bir sistem geliştirmişlerdir. ORC çevriminde üretilen elektrik enerjisini, PEM elektroliz ünitesinde hidrojen üretmek için kullanmışlardır. Sistemin net güç üretimini 1060 kW, hidrojen üretimini 5,43 kg/saat, genel enerji verimini %38,33 ve genel ekserji verimini %28,91 hesaplamışlardır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Açık literatürde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik ve hidrojen üretiminde güneş ve rüzgâr enerjilerinin kullanıldığı çalışmalar oldukça fazladır. Güneş ve rüzgâr enerjisi ile güç ve hidrojen üretiminin en önemli zorluklarından biri değişken karakteristiğe sahip olmalarıdır. Güneş ve rüzgâr enerjisinin günün her saatinde tam kapasite ile çalışması mümkün olmadığı için, hidrojen üretimi elektrik yükündeki değişkenliği takip ederek gerçekleştirilebilir. Bu enerjilerden tam kapasite

faýdalanılmadığı zaman dilimlerinde elektrolizin düşük kapasite ile çalışması sonucunda ortaya bir maliyet çıkmaktadır. Böylece üretilen hidrojenin birim maliyetinde artış meydana gelmektedir. Bu çalışmada ise sürekliliği sağlamak amacıyla sisteme Afyonkarahisar'da mevcut bir jeotermal enerji santralının entegrasyonu tercih edilmiştir. Böylece şehir şebekesine kesintisiz enerji sağlanmış olacaktır. Ayrıca fazla elektrik enerjisinin hidrojene dönüştürülüp depolanmasıyla, kısa süreli elektrik kesintilerinde şebekede elektrik ihtiyacı da karşılanmış olacaktır. Enerji santrallerinde elektrik üretimi sırasında, değerli enerji içeriğine sahip ısı enerjisi çevreye atık ısı olarak atılmaktadır. Bu çalışmada ise enerji santrallerinde kullanılmayan atık ısı enerjisi, ısıtma için kullanılmıştır. Bu şekilde sera gazı salımının büyük oranda önüne geçilmesi ve ayrıca atık ısının geri kazanılması ile birlikte sistem verimliliğinin artması ve bunun sonucunda enerji maliyetlerinin azalması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada jeotermal ve güneş enerjisine dayalı elektrik/hidrojen/ısıtma enerjisi üretim sistemi dikkate alınmış ve sistemin termodinamik değerlendirmesi yapılmıştır. Jeotermal kaynak sıcaklığı ve güneş ışınımının sistemin güç, elektrik ve hidrojen üretimi üzerindeki etkilerini araştırmak için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmadan çıkarılabilecek bazı sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Jeotermal ve güneş enerjisinin düşük entalpi enerji kaynağını kullanan yeni bir konfigürasyon düşünülmüştür. Elektrik üretimi için ORC çevrimi ve ORC çevriminde atık ısı olarak çevrimden atılan ısı enerjisi mahal ısıtmasında kullanılmıştır. Su elektroliz ünitesi aracılığıyla bir hidrojen üretim sistemi ve hidrojen enerjisi dönüşümü için bir yakıt hücresi genel sistemin bir parçasıdır.
- Jeotermal ve güneş enerjisinin bir hidrojen depolama ünitesi ile entegre edilebileceği gösterilmiştir.
- Bu jeotermal ve güneş enerji destekli entegre sistem 2420 kW güç üretmektedir.
- Hidrojen depolamak için 2420 kW elektrik gücünün tamamı kullanılırsa, 0,0154 kg/s hidrojen üretilir. Daha sonra ihtiyaç duyulduğunda, yakıt hücresinde hidrojen kullanılarak 1668 kW elektrik üretilir.
- ORC çevriminden atık ısı olarak atılan jeotermal akışkan ile yapılan mahal ısıtma için kullanılan ısı değiştiricisinin ısı kapasitesi 8933 kW'dır.
- Tüm sistemin enerji ve ekserji verimi sırasıyla %34,5 ve %46,0 olarak belirlenmiştir.
- Farklı jeotermal kaynak sıcaklıkları ve güneş ışınımı değerleri dikkate alınarak parametrik çalışmalar yapılmıştır. Sistemin daha yüksek jeotermal sıcaklık ve güneş ışınım değerlerinde, daha yüksek elektrik ve hidrojen üretimi yapabildiği görülmüştür.
- Türkiye enerji sektörünü karbonsuzlaştırmak için daha fazla yenilenebilir enerji entegre etmeli ve yenilenebilir enerji kapasitesini en üst düzeye çıkarması gerekmektedir.
- Jeotermal ve güneş enerjisi destekli elektrolizörler kullanılarak yeşil hidrojen üretimi Türkiye'nin gelecek hidrojen planlarına önemli bir alternatif sunacak ve Türkiye'nin bu alanda rekabet gücünü arttıracaktır.

6. SEMBOLLER (SYMBOLS)

c_p	: özgül ısı (kJ/kg K)
ex	: özgül ekserji (kJ/kg)
\dot{E}	: enerji (kW)
$\dot{E}x$: ekserji (kW)
G	: güneş ışınım şiddeti (W/m ²)
h	: özgül entalpi (kJ/kg)
\dot{m}	: kütle debisi (kg/s)
\dot{Q}	: ısı (kW)
\dot{W}	: güç (kW)
ΔG	: gibbs serbest enerjisi (kJ/kmol)
M	: molekül ağırlığı (kg/kmol)

6.1. Yunan Sembolleri (Greek Symbols)

η	: enerji verimi
ε	: ekserji verimi

6.2. Alt indis (Subscripts)

0	: ölü hal
elec	: elektrik
g	: gaz
geo	: jeotermal akışkan
in	: giriş durumu
out	: çıkış durumu
sol	: güneş

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, 218M739 numaralı proje kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Wang, H., Ruan, J., Wang, G., Zhou, B., Liu, Y., Fu, X., Peng, J., Deep learning-based interval state estimation of AC smart grids against sparse cyber attacks, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14 (11), 4766-4778, 2018.
2. Li, Y., Yang, Y., Thermodynamic analysis of a novel integrated solar combined cycle, *Applied Energy*, 122, 133-142, 2014.
3. Karapekmez, A., Dincer, I., Thermodynamic analysis of a novel solar and geothermal based combined energy system for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (9), 5608-5628, 2020.
4. Inayat, A., Raza, M., District cooling system via renewable energy sources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 360-373, 2019.
5. DeLovato, N., Sundarnath, K., Cvijovic, L., Kota, K., Kuravi, S., A review of heat recovery applications for solar and geothermal power plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109329, 2019.
6. Borunda, M., Jaramillo, O. A., Dorantes, R., Reyes, A., Organic rankine cycle coupling with a parabolic trough solar power plant for cogeneration and industrial processes, *Renewable Energy*, 86, 651-663, 2016.
7. Valenzuela, C., Mata-Torres, C., Cardemil, J. M., Escobar, R. A., CSP+ PV hybrid solar plants for power and water cogeneration in northern chile, *Solar Energy*, 157, 713-726, 2017.
8. Vittorini, D., Antonini, A., Cipollone, R., Carapellucci, R., Villante, C., Solar thermal-based orc power plant for micro cogeneration—performance analysis and control strategy, *Energy Procedia*, 148, 774-781, 2018.
9. Pina, E. A., Serra, L. M., Lozano, M. A., Hernández, A., Lázaro, A., Comparative analysis and design of a solar-based parabolic trough—orc cogeneration plant for a commercial center, *Energies*, 13 (18), 4807, 2020.
10. International Energy Agency. The Future of Hydrogen. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Yayın tarihi Haziran, 2019. Erişim tarihi Mart 23, 2021.
11. Yılmaz C., Life cycle cost analysis of combined flash binary geothermal plant and integrated hydrogen generation system, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (1), 1-16, 2020.
12. Bicer, Y., Dincer, I., Development of a new solar and geothermal based combined system for hydrogen production, *Solar Energy*, 127, 269-284, 2016.
13. International Energy Agency. Hydrogen. <https://www.iea.org/reports/hydrogen>. Yayın tarihi Haziran, 2020. Erişim tarihi Mart 23, 2021.
14. International Renewable Energy Agency. Green Hydrogen. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf. Yayın tarihi Kasım, 2020. Erişim tarihi Mart 23, 2021.
15. SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi. Türkiye'nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelik Alanları. https://www.shura.org.tr/wpcontent/uploads/2021/03/Turkiye_nin_ulusal_hidrojen_stratejisi_in_öncelik_alanlari.pdf. Yayın tarihi Şubat, 2021. Erişim tarihi Mart 23, 2021.
16. Acar, M. S., Arslan, O., Energy and exergy analysis of solar energy-integrated, geothermal energy-powered Organic Rankine Cycle, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137 (2), 659-666, 2019.
17. Song, A., Zhu, J., Zhang, P., Chang, N., Cui, Z., Experimental research on solar and geothermal energy coupling power generation system, *Energy Procedia*, 158, 5982-5987, 2019.
18. Wan, P., Gong, L., Bai, Z., Thermodynamic analysis of a geothermal-solar flash-binary hybrid power generation system, *Energy Procedia*, 158, 3-8, 2019.
19. Ayub, M., Mitsos, A., Ghasemi, H., Thermo-economic analysis of a hybrid solarbinary geothermal power plant, *Energy*, 87, 326-335, 2015.
20. Akrami, E., Chitsaz, A., Ghamari, P., Mahmoudi, S. M. S., Energy and exergy evaluation of a tr generation system driven by the geothermal energy, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31 (1), 401-408, 2017.
21. Yuksel, Y.E., Ozturk, M., Dincer, I., Energetic and exergetic performance evaluations of a geothermal power plant based integrated system for hydrogen

- production, *International Journal of HydrogenEnergy*, 43 (1), 78-90, 2018.
22. Bassetti, M.C., Consoli, D., Manente, G., Lazzaretto, A., Design and off-design models of a hybrid geothermal-solar power plant enhanced by a thermal storage, *Renewable Energy*, 128, 460-472, 2018.
 23. Bicer, Y., Dincer, I., Analysis and performance evaluation of a renewable energy based multigeneration system, *Energy*, 94, 623-632, 2016.
 24. Calise, F., d'Accadia, M. D., Macaluso, A., Piacentino, A., Vanoli, L., Exergetic and exergoeconomic analysis of a novel hybrid solar-geothermal polygeneration system producing energy and water, *Energy Conversion and Management*, 115, 200-220, 2016.
 25. Desai, N. B., Bandyopadhyay, S., Thermo-economic comparisons between solar steam Rankine and organic Rankine cycles, *Applied Thermal Engineering*, 105, 862-875, 2016.
 26. Çetin B., Avcı H., Technical and economic analysis of the conversion on an existing coal-fired thermal power plant to solar-aided hybrid power plant, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 1027-1046, 2020.
 27. Bellos, E., Tzivanidis, C., Belessiotis, V., Daily performance of parabolic trough solar collectors, *Solar Energy*, 158, 663-678, 2017.
 28. Cabrera, F. J., Fernández-García, A., Silva, R. M. P., Pérez-García, M., Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 103-118, 2013.
 29. Cengel, Y. A., Boles, M. A., Kanoglu, M., *Thermodynamics: An Engineering Approach*, McGraw-Hill, ninth edition, New York, A.B.D., 2019.
 30. Bellos, E., Tzivanidis, C., A detailed exergetic analysis of parabolic trough collectors, *Energy Conversion and Management*, 149, 275-292, 2017.
 31. Jaramillo, O. A., Borunda, M., Velazquez-Lucho, K. M., Robles, M., Parabolic trough solar collector for low enthalpy processes: An analysis of the efficiency enhancement by using twisted tape inserts, *Renewable Energy*, 93, 125-141, 2016.
 32. Hocoğlu, F. O., Stochastic approach for daily solar radiation modeling, *Solar Energy*, 85 (2), 278-287, 2011.
 33. Kanoglu, M., Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., *Fundamentals and Applications of Renewable Energy*, McGraw-Hill Education, first edition, New York, A.B.D., 2020.
 34. Yılmaz, C., Kanoglu, M., Thermodynamic evaluation of geothermal energy powered hydrogen production by PEM water electrolysis, *Energy*, 69, 592-602, 2014.
 35. Aslan A., Gümüşdereli E., Soydan A.M., Producing of imidazol functional SiO₂ nanoparticles/Nafion nanocomposite membranes for PEMFC applications, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 351-363, 2019.
 36. Yılmaz, C., Thermoeconomic modeling and optimization of a hydrogen production system using geothermal energy, *Geothermics*, 65, 32-43, 2017.
 37. Kanoglu, M., Exergy analysis of a dual-level binary geothermal powerplant, *Geothermics*, 31 (6), 709-724, 2002.
 38. Yuksel, Y. E., Ozturk, M., Thermodynamic and thermoeconomic analyses of a geothermal energy based integrated system for hydrogen production, *International Journal of HydrogenEnergy*, 42 (4), 2530-2546, 2017.
 39. El-Emam, R. S., Dincer, I., Investigation and assessment of a novel solar driven integrated energy system, *Energy Conversion and Management*, 158, 246-255, 2018.
 40. Akrami, E., Chitsaz, A., Nami, H., Mahmoudi, S. M. S., Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy, *Energy*, 124, 625-639, 2017.
 41. Alirahmi, S. M., Dabbagh, S. R., Ahmadi, P., Wongwises, S., Multi-objective design optimization of a multi-generation energy system based on geothermal and solar energy, *Energy Conversion and Management*, 205, 112426, 2020.
 42. Siddiqui, O., Ishaq, H., Dincer, I., A novel solar and geothermal-based trigeneration system for electricity generation, hydrogen production and cooling, *Energy Conversion and Management*, 198, 111812, 2019.
 43. Cao, Y., Mihardjo, L. W., Farhang, B., Ghaebi, H., Parikhani, T., Development, assessment and comparison of three high-temperature geothermal-driven configurations for power and hydrogen generation: Energy, exergy thermoeconomic and optimization, *International Journal of HydrogenEnergy*, 45 (58), 34163-34184, 2020.
 44. Ebadollahi, M., Rostamzadeh, H., Pedram, M. Z., Ghaebi, H., Amidpour, M., Proposal and assessment of a new geothermal-based multigeneration system for cooling, heating, power, and hydrogen production, using LNG cold energy recovery, *Renewable Energy*, 135, 66-87, 2019.

