



Life cycle cost analysis of combined flash binary geothermal plant and integrated hydrogen generation system

Ceyhun Yılmaz

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

Highlights:

- Life cycle cost analysis of a geothermal supported hydrogen production system is performed.
- The unit cost of produced hydrogen is calculated to be 2.739 \$/kg H₂.
- Simple payback period (N_{sbp}) of the system is calculated to be 4.096 year and discount payback period (N_{dbp}) is calculated to be 5.968 years, respectively.

Keywords:

- Geothermal energy
- Hydrogen generation
- Thermodynamic analysis
- Life cycle cost analysis

Graphical/Tabular Abstract

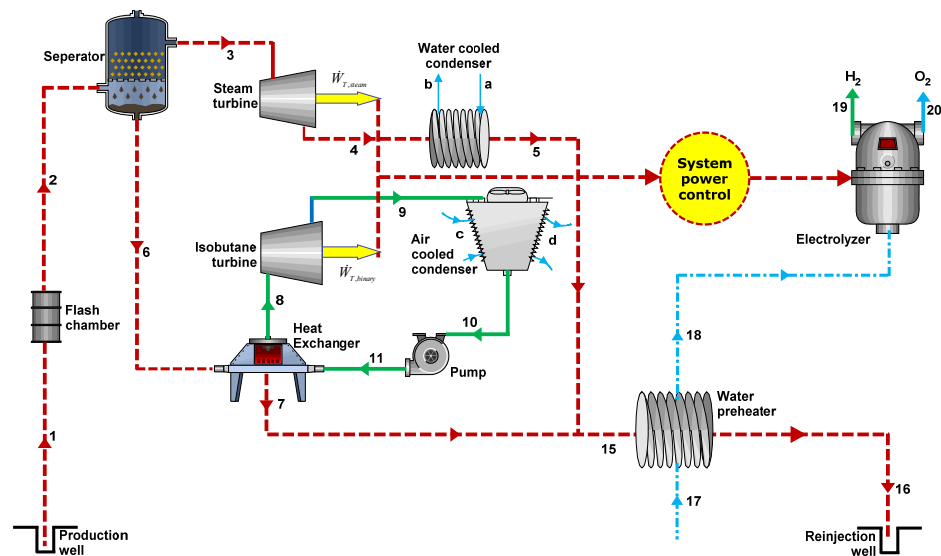


Figure A. Geothermal energy assisted hydrogen generation system.

Purpose: In this study, an integrated geothermal energy powered hydrogen generation system is investigated.

Article Info:

Research Article
Received: 09.08.2017
Accepted: 08.08.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.639800

Acknowledgement:

I would like to thank Prof. Dr. Mehmet Kanoğlu for endless support and valuable suggestions.

Correspondence:

Author: Ceyhun Yılmaz
e-mail: ceyhunyilmaz@aku.edu.tr
phone: +90 272 218 2549

Theory and Methods:

To simulate the integrated hydrogen energy system during thermodynamic conditions with life cycle cost analysis, the EES and Aspen Plus software is used. Moreover, thermodynamic and life cycle cost analyses concept is utilized as a cogeneration hydrogen energy production of unit product cost considering its thermodynamic and economic variables. Furthermore, a novel computer simulation analysis is used that links thermodynamic and life cycle cost aspect of the case study process. Accordingly, it will be found out how much the operating conditions can be affected to reduce the unit work consumption and product cost of plant output of hydrogen. Also, the relationship of these parameters with the technical analysis of the process is recognized. As well as, some parametric studies were conducted to examine the variation of some thermodynamic and economic parameters that are most effective on liquid hydrogen rate and unit cost.

Results:

The unit energy cost of electricity is calculated to be 0.0107 \$/kWh. Hydrogen production from the system is calculated to be 0.053 kg/s as the produced electricity is used directly to produce hydrogen in the electrolysis unit. The unit cost of produced hydrogen is calculated to be 2.767 \$ / kg H₂. As a result of the life cycle cost analysis of the system, Net Present Value (NPV) is calculated to be 35.340.000 \$. The levelized annual cost with the annual cost method (LAC) is calculated to be 3.395.000 \$/yr. Simple payback period (N_{sbp}) of the system is calculated to be 4.047 year and discount payback period (N_{dbp}) is calculated to be 5.442 years, respectively.

Conclusion:

This study is based on the results obtained by thermodynamic optimization and life cycle cost analysis of geothermal energy-assisted hydrogen production system. For this reason, the working conditions of the hydrogen production system which give minimum economic costs were investigated.



Kombine flaş ikili jeotermal santrali ve entegre hidrojen üretim sisteminin yaşam döngü maliyet analizi

Ceyhun Yılmaz*

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

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Bu çalışmada jeotermal destekli bir hidrojen üretim sisteminin yaşam döngü maliyet analizi yapılmıştır.
- Üretilen elektriğin birim enerji maliyeti 0,0107 \$/kWh ve üretilen hidrojenin debisi 0,053 kg/s olarak hesaplanmıştır.
- Üretilen hidrojenin birim maliyeti ise 1.088 \$/kg H₂ olarak hesaplanmıştır.
- Sistemin basit geri ödeme süresi (N_{sbp}) 4.096 yıl ve indirgenmiş geri ödeme süresi ise (N_{dbp}) 5.968 yıl olarak hesaplanmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 09.08.2017
Kabul: 08.08.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.639800

Anahtar Kelimeler:

Jeotermal enerji,
hidrojen üretimi,
termodinamik analiz yaşam
döngü maliyet analizi

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, hidrojen üretiminde jeotermal enerjinin kullanımı için bilgisayar ortamında termodinamik olarak modellenen bir sistemin kapsamlı bir şekilde termodinamik ve ekonomik yöntemler yardımıyla incelenmesi, optimize edilmesi ve yaşam döngü maliyet analizinin yapılmasıdır. Bu çalışmada sıvı bir jeotermal kaynak elektrik üretiminde kullanılmış ve bu elektrik elektroliz ünitesinde suyun hidrojen ve oksijene parçalanmasında, iş girdisi olarak kullanılmıştır. Gerekli termodinamik kabuller yapılarak, sistem bilgisayar ortamında bir simülasyon programıyla çalıştırıldığında jeotermal güç çevriminden elde edilen maksimum net iş 8063 kW'tır. Üretilen bu elektriğin birim enerji maliyeti 0,0107 \$/kWh. Üretilen elektriğin doğrudan elektroliz ünitesinde hidrojen üretilmesi için kullanılması ile sistemden üretilen hidrojenin debisi 0,053 kg/s olarak hesaplanmıştır. Üretilen hidrojenin birim maliyeti ise 2.767 \$/kg H₂ olarak hesaplanmıştır. Sistemin yaşam döngü maliyet analizi sonucunda, Net Bugünkü Değeri (NPV) 35.340.000 \$ olarak hesaplanmıştır. Levelize edilmiş yıllık maliyet metodu ile seviyelendirilmiş yıllık maliyeti ise (LAC) 3.395.000 \$/yr olarak hesaplanmıştır. Sistemin basit geri ödeme süresi (N_{sbp}) 4.047 yıl olarak hesaplanmıştır. İndirgenmiş geri ödeme süresi ise (N_{dbp}) 5.442 yıl olarak hesaplanmıştır.

Life cycle cost analysis of combined flash binary geothermal plant and integrated hydrogen generation system

H I G H L I G H T S

- In this study, life cycle cost analysis of a geothermal supported hydrogen production system is performed.
- The unit energy cost of the produced electricity is calculated to be 0.0107 \$ / kWh and the produced hydrogen is calculated to be 0.053 kg/s.
- The unit cost of produced hydrogen is calculated to be 1.088 \$/kg H₂.
- Simple payback period (N_{sbp}) of the system is calculated to be 4.096 year and discont payback period (N_{dbp}) is calculated to be 5.968 years, respectively

Article Info

Research Article
Received: 09.08.2017
Accepted: 08.08.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.639800

Keywords:

Geothermal energy,
hydrogen production,
thermodynamic analysis,
life cycle cost analysis
(LCC)

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate, optimize and analyze the life cycle cost of a system thermodynamically modeled in a computer environment using thermodynamic and economic methods in a comprehensive way for the use of geothermal energy in hydrogen production. In this study, a liquid geothermal resource is used for electricity generation and this electricity is used as a work input in the electrolysis unit to split of water into the hydrogen and oxygen. When the necessary thermodynamic assumptions are made and the system is run in a computer environment with a simulation program, the maximum net work is calculated to be 8063 kW from the geothermal power plant. The unit energy cost of electricity is calculated to be 0.0107 \$/kWh. Hydrogen production from the system is calculated to be 0.053 kg/s as the produced electricity is used directly to produce hydrogen in the electrolysis unit. The unit cost of produced hydrogen is calculated to be 2.767 \$ / kg H₂. As a result of the life cycle cost analysis of the system, Net Present Value (NPV) is calculated to be 35.340.000 \$. The levelized annual cost with the annual cost method (LAC) is calculated to be 3.395.000 \$/yr. Simple payback period (N_{sbp}) of the system is calculated to be 4.047 year and discont payback period (N_{dbp}) is calculated to be 5.442 years, respectively.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ceyhunyilmaz@aku.edu.tr / Tel: +90 272 218 2549

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hidrojen, bir enerji kaynağı değildir, bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojenin üretimi, depolanması ve kullanımı ile ilgili birçok problem vardır ve bu alanlarda çok sayıda bilimsel ve teknolojik çalışmalar yapılmaktadır. Hidrojen, mevcut enerji kaynaklarından ve enerji tüketilerek üretilmektedir. Sürdürülebilir bir enerji geleceğinde hidrojenin mutlaka yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi gerekmektedir. Güneş ve rüzgâra ilave olarak jeotermal enerjinin de hidrojen üretiminde kullanılması ve bunun hangi metotlarla yapılması gerektiği önemli araştırma konularından biridir. Bu çalışmada, hidrojenin jeotermal enerji kullanılarak üretimi ele alınmıştır. Hidrojen, jeotermal bir santralden elde edilecek elektriğin kullanıldığı bir elektroliz işlemi ile üretilmiştir.

Hidrojenin enerji içeriği bakımından ve kullanımda çevresel etkilerinden dolayı avantajlı olduğunu bilmekteyiz. Enerji içeriği termodinamik olarak fosil yakıtların yaklaşık üç katı fazladır. Ayrıca kullanımında sadece su ve/veya su buharı olur. İkincil bir enerji kaynağı durumunda olan hidrojenin yenilenebilir bir enerji kaynakları ile elde edilebilir olması, bu yakıt türünü geleceğin en önemli enerji taşıyıcısı konumuna getireceği kabul edilmektedir. Hidrojen, suyun ve temiz enerji kaynaklarının olduğu her yerde potansiyel olarak mevcuttur [1]. Hidrojenin gelecekte azalan benzin kaynaklarının yerini alabilecek muhtemel bir yakıt olduğu düşünülmektedir. Bu uygulama içten yanmalı motorlarda bir yakıt olarak ya da yakıt pili teknolojisinin taşıtların tahrikinde içten yanmalı motorların yerini alması durumunda, yakıt pillerinde kullanım şeklinde olabilir. Hidrojen içten yanmalı motor yakıtı olarak yüksek oktan sayısına sahiptir. Ve hidrojenin yakılması durumunda CO, CO₂ ve HC emisyonları oluşmaz. Hidrojeni kullanışlı bir yakıt haline getirmek için çözülmesi gereken, hidrojenin üretilmesi, depolanması ve yakıt ikmali gibi temel problemler vardır [2].

Hidrojen üretim yöntemlerinin başında suyun elektrolizi gelmektedir. Elektroliz için gerekli elektrik fosil yakıtlardan, hidroelektrik kaynaktan, nükleer güçten, jeotermal, güneş ve rüzgâr enerjilerinden elde edilebilir. Burada, kullanılacak olan elektriğin üretimindeki yöntem çok önemlidir. Çünkü amaç çevre kirliliğinin azaltılması iken, geleceğin enerjisini çevreye zararlı olan bir yöntemle elektrik üretip de elde etmeye çalışmak uygun olmayacaktır. Kömür ve doğalgazdan konvansiyonel metotlarla hidrojen üretiminde ise açığa çıkan emisyonların etkileri az da olsa önemini koruyacaktır. Bu etkilerin en aza indirilebilmesi için hidrojen üretiminde jeotermal, güneş ve rüzgâr enerjileri gibi doğrudan yenilenebilir enerji kaynakları kullanılması bir avantaj olabilecektir [3].

Burada aklımıza şöyle bir soru gelebilir, “bu kaynaklardan üretilen elektrik, niçin direk şebekede elektrik olarak kullanılmıyor da hidrojen üretiminde kullanıyoruz?” Çünkü hidrojen enerji taşıyıcısıdır, kaynaklardan üretilen elektrik

enerjisi bütünüyle ve doğrudan depolanmamaktadır. Batarya teknolojileri ise çok sınırlı ve verimsizdir, enerji kayıpları çok fazladır. Dolayısı ile üretilen elektrik doğrudan şebekelerde kullanılmaktadır. Fakat kullanım veya talep arzı dışı zamanlarda yine elektrik enerjisi verilmektedir. Güç üretim santrallerinin ölü zaman dediğimiz “off time” zamanlarda bu elektriğin, dolaylı yoldan depolanması için, hidrojene çevrilmesi, yani hidrojen üretiminde kullanılması verimli ve gayet etkili bir yöntem olacaktır. Üretilen hidrojen ise, ihtiyaç olduğunda hem elektrik üretiminde, hem de yakıt olarak araçlarda kullanılabilir [4].

Bu çalışmada, jeotermal enerjiden birleşik püskürtmeli binary güç çevrimi ile elde edilen elektrik Alkali elektroliz ünitesinde kullanılarak hidrojen üretililecek bir model tasarlanmıştır. Bu modelin, detaylı termodinamik analizleri (enerji ve ekserji) yapılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Termal sistemlerin modellenmesinde çok farklı mühendislik yöntemleri kullanılabilir. Literatürde de mevcut birçok yöntem vardır. Biz çalışmamızda, mühendislik açısından bir enerji sisteminin termal modellenmesinde gerekli olan termodinamik parametreleri kullandık. İlk olarak, modellenen sistemin termodinamik olarak, enerji ve ekserji analizlerinin yapılması ve etkili parametrelerin araştırılması yapılmıştır. İkinci olarak, yapılan termodinamik analiz sonuçlarına bağlı olarak, sistemin Yaşam Döngü Maliyet Analiz hesaplamaları yapılmıştır.

Yaşam döngü maliyet analizi endüstriyel sektörde ve mühendislik projelerinde kullanılan bir ekonomik analiz yöntemidir. Bu analizde bazı başlıkların tespiti önem arz etmektedir. Bunlar arasında rekabet, artan işletme ve bakım maliyetleri, bütçe limitleri, pahalı ürünler ve sistemler, artan enflasyon ve ürün, ekipman ve sistem kullanıcıları arasında artan maliyet etkinliği gibi unsurlar sayılabilir. Bu başlıklar gibi bir mühendislik sisteminin kurulduğunda çok sayıda bilgi ve veri yaşam döngü maliyetlendirme çalışmaları için gereklidir. Ürünün satın alma maliyeti, yıllık yararlı işletme ömrü, ulaştırma, indirim ve eskalasyon oranları ve ilk kurulduğunda yıllık maliyeti, bakım maliyeti, yıllık işletme maliyeti, vergiler ve ürünün hurda değeri maliyeti gibi detaylı ekonomik kalemler yer almaktadır [5]. Bu çalışmada jeotermal enerji kullanılarak hidrojen üretilmesi için geliştirilen sistemin yaşam döngü maliyet analizleri yapılmıştır. Net bugünkü değer, yıllık faiz oranı, üretilen hidrojenin birim maliyeti, geri ödeme süresi, iç karlılık oranı ve yıllık geri ödeme maliyeti gibi bazı ekonomik parametreler sistemin ekonomik ömrü boyunca dikkate alınarak incelenmiştir. Sistemin çalışma parametreleri optimizasyon sonuçları dikkate alınarak sabit kabul edilmiştir.

Bu alan ile ilgili mevcut literatür çalışmaları, konvansiyonel analizlere dayalı olarak yapılmış ve üretililecek hidrojen miktarı üzerinedir. Bu çalışmada, belli sıcaklık ve debiye sahip bir jeotermal kaynaktan üretilen elektrik ile bir elektroliz ünitesinden üretilen hidrojenin miktarı,

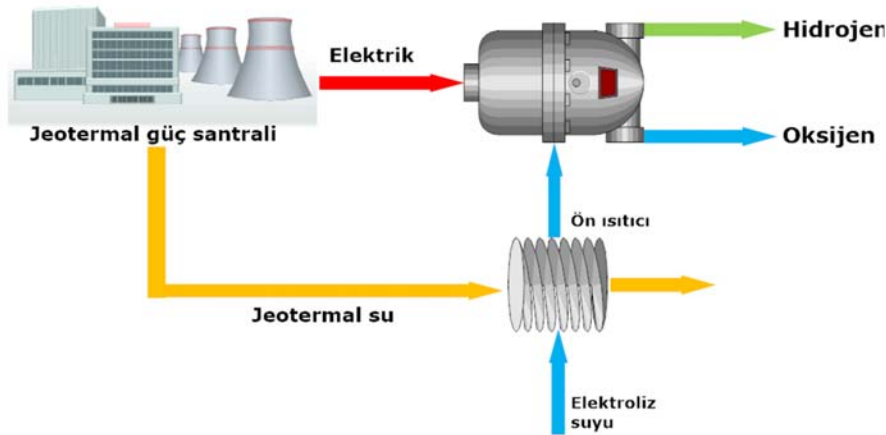
termodinamiğin birinci ve ikinci kanunları dikkate alarak incelenmiştir. Yani, seçilen metodun yanında, sistemden üretilen elektrik ve hidrojenin birim ekserjetik maliyetleri ve hidrojenin pazar maliyetini de içeren yaşam döngü maliyet analizleri yapılmıştır. Gerekli olan bazı iyileştirmeler ile termodinamik ve ekonomik parametreler de detaylı olarak araştırılmıştır. Bu analiz sonuçlarına bağlı olarak da yaşam döngü maliyet analizi (LCA) yapılmıştır. Bu kombine sistemden üretilebilecek birim hidrojenin miktarı ve ekonomik maliyeti incelenmiştir. Bu miktara jeotermal güç çevriminde kullanılan kaynak suyun sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, jeotermal kaynak su sıcaklığı değişiminin üretilen hidrojenin miktarı ve maliyeti üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan özetlenen çalışmalar bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla sistemdeki akışkanların termodinamik özellikleri yerleşik olan ve temel termodinamik hesaplamalara izin veren EES (Engineering Equation Solver) programı ile mühendislik sistemlerin detaylı ekonomik analizi ve değerleri içeren Aspen Plus programı kullanılmıştır. Bu çalışmada tasarlanan sistemin temel şematik gösterimi Şekil 1’de verilmiştir. Jeotermal güç santralinde üretilen elektrik elektroliz yöntemiyle hidrojen üretiminde kullanılırken santrali terk eden jeotermal su, elektroliz için kullanılacak suyun ön ısıtmasında kullanılmaktadır.

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

Tasarlanan sistem için jeotermal enerjiden hidrojen üretilirken, hidrojen üretim metodu olarak elektroliz yöntemi dikkate alınmıştır. Bu araştırma kapsamında sistem için 200°C sıcaklığında ve 100 kg/s akış debisine sahip sıvı yoğunluklu bir jeotermal kaynak göz önüne alınarak çalışmada kullanılmıştır. Sistemin termodinamik ve ekonomik analizleri bu kabule göre yapılmıştır. Yapılan örnek uygulamada jeotermal enerji kullanılarak sistemin termodinamik ve ekonomik analizleri yapılarak

üretilebilecek hidrojen miktarı ve üretim maliyetleri gibi parametreler araştırılmıştır. Bu parametrelerin nasıl değiştiği ve optimum değerlere termodinamik optimizasyon metodu ile jeotermal kaynak sıcaklığı gibi bazı parametrelerin değişimiyle araştırılarak verilmiştir.

Dikkate alınan sistemde, yüksek sıcaklık ve sıvı bir jeotermal kaynağın termodinamik özellikleri dikkate alındığında daha fazla güç üretimine uygun olan birleşik püskürtmeli binary (ikili) çevrim kullanılmıştır. Birleşik püskürtmeli binary güç çevrimi jeotermal kaynaklardan elektrik üretiminde son yıllarda yaygın olan yeni bir çevrimdir (Şekil 1). Bu çevrim hem püskürtmeli hem binary çevrimin avantajlarından aynı anda yararlanmayı sağlamaktadır. Bu çevrim yüksek sıcaklıklardaki jeotermal kaynaklar için uygundur ve bu özelliği ile çift püskürtmeli çevrimlere bir alternatif oluşturur. Öncelikle, üretim kuyusundan 1 halinde 200°C sıcaklıkta gelen jeotermal akışkan kısılma vanasıyla 2 halindeki basınca kısıılır. Sistem geneli dikkate alınarak yapılan sabit entalpili bir basınç optimizasyonu ile uygun basınca kısıılır. Bu kısılma ile kuruluk derecesi 0 olan akışkan, artık belli bir kuruluk derecesine sahip olan jeotermal akışkan ($x = m_{\text{buhar}}/m_{\text{toplam}}$) püskürtme havuzuna (Seperatör’e) gönderilir. Yüksek sıcaklıkta ve sıvı yoğunluklu jeotermal akışkan püskürtme havuzunda püskürtüldükten sonra 3 halinde elde edilen buhar bir buhar türbinine gönderilerek elektrik elde üretilir. Daha sonra türbinden 4 halinde çıkan akışkan 5 halinde Kondenserde yoğunlaştırıldıktan sonra 7 haliyle birleşerek 15 halinde tekrar yer altına enjekte edilir. Püskürtme havuzundan 6 halinde çıkan ve kuruluk derecesi 0 olan jeotermal akışkan ise, binary çevrimin ısı değiştiricisine gönderilir. Burada jeotermal akışkanın enerjisi çevrimdeki ikincil akışkana transfer edilir ve 7 halinde ısı değiştiriciden çıkıp 5 haliyle birleşerek 15 halinde yer altına enjekte edilir. Isı değiştiricide kızgın buhar olarak 8 halinde çıkan yüksek enerjili binary akışkan, pompa ile belli bir basınca basılır ve türbine gönderilir. Kuruluk derecesi 1 olan bu ikincil akışkan türbinden geçirilerek elektrik elde edilir ve 9 halindeki ikincil akışkan tekrar kondense edilmek için hava soğutmalı



Şekil 1. Bir jeotermal su kaynağından enerjisi kullanılarak elektroliz ile hidrojen üretimi sistemi.
(Hydrogen generation system by electrolysis using energy from a geothermal water source)

kondenserde 10 haline doymuş sıvı olarak çıkar ve böylelikle ikinci çevrimde tamamlanır.

Jeotermal çevrimi terk eden akışkan hala belli bir enerjiye sahiptir (70 – 90°C arası bir sıcaklık). Sistemde kullanılan jeotermal akışkan yer altına enjekte edilmeden önce bir ön ısıtıcı vasıtasıyla elektroliz suyunun ısıtılmasında kullanılmaktadır. Şekil 2’de 7 ve 5 halinde jeotermal akışkan çevrimlerini tamamlayıp 15 haline geldiklerinde belli bir enerjileri vardır. 15 halindeki jeotermal akışkan elektroliz işleminde hidrojen üretimi için kullanılacak suyun 17 haline ısıtılmasında kullanılmaktadır. Bu işlem, elektroliz işleminde kullanılacak olan suyun sıcaklığı hidrojen üretimi için gerekli olan iş miktarını doğrudan etkilediğinden, elektroliz işlemi için gerekli olan birim enerji miktarını düşürmeyi hedeflemektedir.

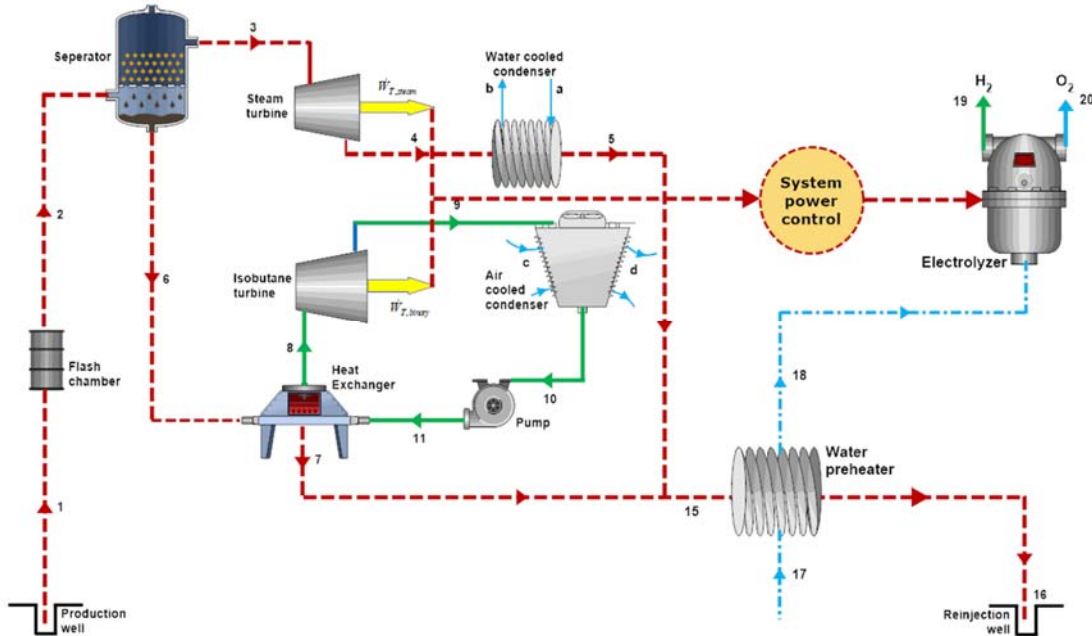
Bu çalışmamızda, jeotermal kaynağın sıcaklığı 200°C ve kütleli debisi 100 kg/s olarak kabul edilmiştir. Sistemdeki türbin ve pompa verimlilikleri %85 olarak kabul edilmiştir. Sistemde türbinden geçen ikincil aracı akışkan izobütan adı verilen ve kaynama sıcaklığı suyun kaynama sıcaklığından çok daha düşük olan bir akışkandır. Sistemin binary çevriminde, jeotermal akışkan bu çevrimin ısı kaynağını oluşturmaktadır. İzobütan, İzopentan, pentan ve R-114, jeotermal binary (ikincil) çevrim santrallerinde yaygın olarak kullanılan ikincil akışkanlardır. Jeotermal santralden üretilen kızgın buhar türbinden geçirilerek mekanik iş üretmektedir. Bu hareket enerjisi jeneratörden geçirilerek, DC akıma dönüştürülüp alkali elektroliz ünitesine gönderilmektedir. Elektroliz ünitesinde, suyu hidrojen ve oksijene ayırarak için gerekli elektrik enerjisi jeotermal

santralden üretilen elektrik işinden sağlanmaktadır. Sistemden üretilen hidrojen gaz halinde olup depolanmak üzere yüksek basınçlı tankerlerde veya sıvılaştırma çevrimlerine gönderilmektedir. Şekil 2’de sistemin çalışma şeması hal numaraları ve sistem bileşenlerinin detayları ile birlikte verilmiştir.

3. SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ (THERMODYNAMIC ANALYSIS OF SYSTEM)

Sistemin termodinamik analizinde her bir bileşen, kontrol hacim kabul edilerek analiz yapılmıştır. Sabit rejim ve akışlı termodinamik sistem elemanları için bu yaklaşım kullanılmakta analiz için kolaylık sağlamaktadır. Böylece genel enerji ve ekserji denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir. Sistem geneli ve sistem alt bileşenleri, kararlı hal durumu ve kontrol hacim kabul edilerek incelenmiştir. 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. Enerji verimliliği hesabında hidrojen için alt ısı değer referans alınmıştır. Çünkü elektroliz işleminde üretilen hidrojen gazı depolandıktan sonra içten yanmalı motorlarda veya yakıt hücrelerinde, güç veya elektrik elde etmek için kullanılırken, sistem çıkışında gaz halinde bulunmaktadır.

Üstteki termodinamik kabuller dikkate alınarak, model alınan sistem için genel enerji ve ekserji denklemleri Eş. 1, Eş. 2, Eş. 3 gibi yazılabilir [6],



Şekil 2. Flash binary güç çevriminden üretilen elektrik enerjisi alkali elektroliz ünitesinde suyun oksijen ve hidrojen parçalanmasında kullanılırken, jeotermal çevrimi terk eden ve yer altına geri basılacak olan jeotermal su elektroliz suyunun ön ısıtılmasında kullanılmaktadır.

(The electrical energy produced from the flash binary power cycle is used in the alkaline electrolysis unit to break down the water into oxygen and hydrogen, while the geothermal water leaving the geothermal cycle and being pressed back to the ground is used to preheat the electrolysis water.)

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad (2)$$

$$\dot{E}x_{heat} + \dot{W} = \sum \dot{m}_e ex_e - \sum \dot{m}_i ex_i + \dot{E}x_{dest} \quad (3)$$

Bu denklemlerde; \dot{Q} ısıyı, \dot{W} işi, \dot{m} kütle akış debisini, h durum entalpisini, i ve e sisteme giriş ve çıkış durumlarını, $\dot{E}x_{heat}$ ısı ekserjisi ve $\dot{E}x_{dest}$ ise ekserji yıkımını ifade etmektedir.

Özgül akış ekserjisini ve toplam ekserjiyi herhangi bir durum için Eş. 4, Eş. 5 gibi yazabiliriz [7],

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (4)$$

$$\dot{E}x = \dot{m}(ex) \quad (5)$$

buradaki, alt indis 0 ölü hali (çevre şartları), T_0 ise sistemin çalıştığı çevre sıcaklığını ifade etmektedir.

Kaynak sıcaklığı T_s ve sistemin çalıştığı çevre sıcaklığı T_0 olan bir jeotermal kaynaktan üretilebilecek maksimum özgül iş Eş. 6'daki gibi hesaplanabilir,

$$w_{max} = (h_s - h_0) - T_0(s_s - s_0) \quad (6)$$

Gibbs serbest enerjisi, elektroliz işlemi için gerekli olan minimum işin ifadesidir. Başka bir ifade ile bir kilogram hidrojenin üretilmesi için elektroliz işleminde gereken minimum iş miktarıdır. Bu iş elektroliz işlemi için pozitif değerdir, aynı iş yakıt hücresi için çıktı olarak negatif işi gösterir. Elektroliz işlemi, entropi artışına neden olduğundan çevre sıcaklığına katkı sağlayarak reaksiyona yardımcı olur. Bir elektroliz işleminde toplam enerji ihtiyacı ifadesi Eş. 7'deki gibi yazılabilir [8],

$$\Delta H = \Delta G + T_{elektroliz} \Delta S \quad (7)$$

burada, ΔG Gibbs enerjisindeki değişimi (tersinir iş veya minimum iş), T elektroliz işlemi sıcaklığını, ΔS ise entropi farkını ifade etmektedir. ΔG elektrik olarak sağlanması gereken minimum enerjiyi, $T_{elektroliz} \Delta S$ ise ısı enerjisi ifade etmektedir. ΔH reaksiyonda açığa çıkan toplam ısı enerjisini ifade etmektedir. Burada termodinamik parametrelerin hepsi sıcaklığa bağlı fonksiyonlardır.

Birim hidrojen için gerekli olan minimum (tersinir) elektroliz işi Eş. 8'deki denklem kullanılarak hesaplanabilir. Hidrojenin molar kütlesi M , 2.016 kg/kmol'dür [8].

$$w_{H_2} = \frac{\Delta G}{M_{H_2}} \quad (8)$$

burada, w_{H_2} (kJ/kg H_2) birim kilogram hidrojenin üretilmesi için gerekli olan minimum iş miktarını göstermektedir. Bu değer, elektroliz ünitesi verimi dikkate alındığında artmaktadır. Bu çalışmada, konvansiyonel bir elektroliz ünitesinin verimini (elektroliz ünite kapasitesine bağlı) literatürden %75 olarak alınmıştır [9]. Böylece gerçekte bir kilogram hidrojen üretimi için gerekli işi $w_{H_2}/\eta_{elektroliz}$ olarak hesaplayabiliriz. Sistemden üretilen hidrojenin miktarını (kg/s), jeotermal santralden elde edilen ve elektroliz için kullanılan elektrik işini (kJ/s), bu gerçek işe (kJ/kg H_2) oranlayarak bulunabiliriz (Eş. 9),

$$\dot{m}_{Hidrojen} = \frac{\dot{W}_{elektrik}}{w_{H_2,gerçek}} \quad (9)$$

Jeotermal enerjiden hidrojen üretimi sisteminin, genel enerji ve ekserji verimini çok farklı şekillerde ifade etmek mümkündür. Bu çalışmamızda, dikkate aldığımız termodinamik kabuller ve analizlere uygun olarak, sistemin genel enerji ve ekserji verimini Eş. 10, Eş. 11'deki gibi hesaplayabiliriz,

$$\eta_{en,sistem} = \frac{LHV_{H_2} \times \dot{m}_{H_2}}{\dot{m}_{geo} (h_{geo} - h_0)} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{ek,sistem} = \frac{\dot{E}x_{H_2}}{\dot{m}_{geo} (h_{geo} - h_0 - T_0 (s_{geo} - s_0))} \quad (11)$$

buradaki, LHV hidrojenin alt ısı değerini, \dot{m}_{H_2} sistemden elde edilen hidrojenin kg/s biriminde kütleli debisini, \dot{m}_{geo} jeotermal akışkanın kütle debisini, h_{geo} ise kaynak sıcaklığında jeotermal akışkanın sahip olduğu entalpi değerini ve h_0 ise referans duruma göre jeotermal akışkanın sahip olduğu entalpi değerini ifade eder. Bu denklemlerde sisteme giren jeotermal akışkanın enerji ve ekserji değerleri, kaynak kuyu başı durumu dikkate alınarak hesaplanmıştır.

4. SİSTEMİN EKONOMİK ANALİZİ (ECONOMIC ANALYSIS OF SYSTEM)

Bir mühendislik sisteminin ekonomik analizi, sistem elemanın maliyetlerini, işletme bakım masraflarını, yakıt maliyetlerini ve sistemin kurulum maliyetlerini içerir. Sistem ekipmanlarının ekonomik maliyetleri termodinamik değişkenlerin bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Ekonomik bir analiz için, analiz edilen sistemin tüm ekonomik ömrü için sermaye yatırımı, yakıt maliyetleri ve işletme ve bakım maliyetlerinin (OMC) seviyelendirilmiş değerlerine bağlı olan maliyet değerlendirmesi yapılır. Bu çalışmada

modellenen sistem için toplam gelir ihtiyacı (TRR) yaklaşımı uygulanmıştır [10]. Tablo 1’de temel ekonomik analizler için kullanılan varsayımlar ve parametreler özetlemiştir [11]. Sistem ve sistem bileşenlerinin ortalama ekonomik ömrü 20 yıl olarak kabullenilmiştir. Elektroliz ünitesinin satın alma ekonomik maliyetinin tahmini gelecek değeri nominal artış oranını (ör.%5,0) kullanarak hesaplanabilir ve ortalama faiz oranı (ör.%10) kullanılarak mevcut güncel değere indirgenir.

Sistem bileşenlerinin yatırım maliyet oranları, anapara geri kazanım faktörü (CRF) ve ilk yatırım maliyeti (TCI) arasındaki ilişkiye bağlı olarak hesaplanır. CRF değeri, sistemin ve ekipmanların ekonomik faiz oranına ve tahmin edilen ekonomik ömrüne bağlıdır. CRF değeri bir ekipmanın ortalama ekonomik maliyet ömrü için Eş. 12’deki gibi hesaplanır:

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (12)$$

Burada, i faiz oranını ve N sistemin toplam çalışma süresinin yıl olarak ifadesidir.

Bir termal sistemin “ k ” bileşeni için ilk yatırım, işletme ve bakım masrafları ile ilgili maliyet oranının ifadesi ise Eş. 13’deki gibidir (Bejan ve ark., 1996) [10]:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (13)$$

Burada, \dot{Z}_k değeri sistem bileşenlerinin yatırım maliyet oranını (\$/h), eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim ilk yatırım maliyetini (\dot{Z}_k^{CI}), ikinci terim ise işletme ve bakım masraflarını (\dot{Z}_k^{OM}) ifade etmektedir.

Sistemde herhangi bir bileşen için, yıllık düzeye getirilmiş sermaye yatırımı ve işletme bakım maliyetleri Eş. 14, Eş. 15’deki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{Z}_k^{CI} = \frac{CRF}{\tau} C_k (1 + r_n)^2 \quad (14)$$

$$\dot{Z}_k^{OM} = \left(CRF \frac{C_{L,OM}}{\tau} \right) \sum_k C_k \quad (15)$$

Burada, C_k dolar cinsinden sistemin herhangi bir bileşeni için satın alma maliyetini, τ sistemin yıllık çalışma süresini, $C_{L,OM}$ sistemin genel sevilendirilmiş işletme ve bakım maliyetini ve r_n yatırımın maliyet ömrü süresinde nominal artış oranını ifade etmektedir.

Her bir sistem ekipmanının seviyelendirilmiş sermaye maliyetleri ve hesaplanan ekonomik veriler, yaşam döngü maliyet analizinde sistem girdileri olarak kullanılmaktadır. Tüm sistem genelinin toplam satın alma ekipman maliyetleri Aspen Plus programı kullanılarak bilgisayar ortamında hesaplanmıştır [11]. Bu çalışmada sistemin termodinamik ve ekonomik ve analizi için EES ve Aspen Plus programı ile gerekli verileri tarafımızdan programlara kodlayarak hesaplamalar yapılmıştır. Bilindiği gibi güncel ekonomik verilere ulaşmak çok zordur. Bunları bazı yaklaşımlar ile bulmaya çalışmak da zordur ve çoğu zaman sonuçlar çok doğru olmayabiliyor. Bütün bu sepelelerden dolayı, ekonomik analizlerimizde Aspen Plus programından yararlanmak bize büyük bir avantaj ve kolaylık sağlamaktadır. Bu program ile hem enerji analizi yapmak hem de termal sistemlerin geçmişteki ve günümüzdeki bütün ekonomik verilerine ve sistem bileşenlerinin ilk yatırım maliyetleri ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu hesaplamalar ve veriler sistem ekonomisi için Tablo 2’de verilmiştir [11, 12].

Tablo 1. Sistemin Yaşam Döngü Maliyet Analizi hesaplamalarında kullanılan ekonomik parametreler ve kabuller [11].

(Economic parameters and assumptions used in the life cycle cost analysis of the system)

Parametreler	Değerler
Ortalama enflasyon değeri (2015-2034)	%5
Tüm maliyetler için ortalama eskalasyon oranı (2015-2034)	%5,0
Dizayn ve yapımın başlangıcı tarihi	1 Ocak 2015/1 Ocak 2016
Santralin ekonomik ömrü	20 yıl
Ortalama üretim kapasitesi	%95
Yıllık faiz oranı	%10
Hurda maliyeti oranı	%20 TCI (ilk yatırım maliyetinin %20’si)
Amortisman maliyeti	Doğrusal amortisman yöntemi
Vergi oranı (Tax rate)	%20
Nominal eskalasyon oranı	%5
Hidrojen pazar maliyeti	5-15 US\$/kg H ₂
Sıvı hidrojen pazar maliyeti	3-13 US\$/kg H ₂
İnşaat süresi	1 yıl (1 Ocak 2015 – 1 Ocak 2016)
Döner sermaye (Workin capital)	%15

Tablo 2’de sistem ekipmanlarının ve bütün sistemin kurulumu ve ekonomik ömrü boyunca çalışma sürecine kadar gerekli bütün maliyet kalemleri hesaplanmış ve başlıklar halinde verilmiştir. Bu bağlamda sistemin ekipman ilk yatırım maliyetleri (PEC) 9,874.200 US\$ olarak 1 Ocak 2015 zaman periyodu dikkate alınarak hesaplanmıştır. Sistemin kurulumu için proje hazırlanıp ekonomik yaşam ömrü faktörleri de dikkate alınarak toplam ilk yatırım maliyeti (TCI) 45.015.379 US\$ olarak ve sistemin ekonomik

ömrü olan 20 yıllık çalışma süresi dikkate alınarak hesaplanmıştır. İşletme ve bakım maliyeti yıllık olarak 1.595.000 US\$/yr olarak hesaplanmıştır, levelize edilmiş (seviyelendirilmiş) yıllık işletme ve bakım maliyeti ise 1.392.000 US\$/yr olarak hesaplanmıştır. Bu ekonomik ömür analizinin detaylı sonuçları tablo edilerek yaşam döngü maliyet analizi yapılarak diğer bölümde verilmiş ve açıklanmıştır.

Tablo 2. Jeotermal destekli hidrojen üretim sistemi ve alt bileşenleri için Aspen Plus ile ekonomik verileri kullanılarak oluşturulmuş maliyet tablosu [11, 12].
(Geothermal assisted hydrogen production system and its sub-components using Aspen Plus with economic data generated cost table)

I. Sabit ilk yatırım maliyetleri (FCI)	\$ (10³)
a. Doğrudan maliyetler	
1. Onsite maliyetler	
Ekipman satın alma maliyetleri (PEC)	
Isı değiştirici	465.600
İzobütan türbini	973.400
Hava soğutmalı kondenser	229.900
Pompa	153.400
Buhar türbini	942.600
Su soğutmalı kondenser	242.900
Ayrıştırıcı	65.200
Flaş vanası	20.500
Ön ısıtıcı	26.900
Elektroliz ünitesi	6.531.300
Diğer sistem elemanları	40.500
Toplam donanım satın alma maliyeti (PEC)	9.874.200
Ekipmanların kurulum maliyeti	3.258.486
Hatlar ve tesisat döşeme	3.455.970
Enstrüman ve kontroller	1.184.904
Elektrik ekipmanları ve malzemeleri	1.283.646
Toplam onsite maliyet	19.057.206
Offsite maliyetler	
Zemin uygulamaları	500.000
İnşaat, yapı ve proje çizimi	2.073.582
Servis faaliyetleri	3.455.970
Toplam offsite maliyet	6.029.552
Toplam direk maliyet (TDC)	25.086.758
b. Dolaylı maliyetler	
Mühendislik ve danışmalık	2.006.941
Yapım maliyetleri ve kar amaçlı çalışmalar	3.763.013
Toplam	30.856.713
Beklenmeyen olası maliyetler	4.628.507
Toplam dolaylı maliyetler	10.398.461
Toplam sabit ilk yatırım maliyeti (FCI)	41.255.174
II. Diğer harcamalar	
Açılış maliyeti	530.205
İşletme sermayesi	1.060.000
Lisans, araştırma ve geliştirme maliyetleri	1.060.000
Kurulum için gerekli izin ödemeleri	1.110.000
Toplam diğer harcamalar	3.760.205

Toplam ilk sermaye yatırımı (TCI)	45.015.379
Yıllık işletme ve bakım maliyetleri (O&M)(\$/yr)	1.595.939

6. SİSTEMİN YAŞAM DÖNGÜ MALİYET ANALİZİ (LIFE CYCLE COST ANALYSIS OF SYSTEM)

Yaşam döngüsü maliyet analizi (Life Cycle Cost Assessment, LCCA), bir sistemin mevcut durumdaki ve gelecekteki maliyetleri etkileyen alternatiflerin seçiminde kullanılan önemli bir ekonomik analizdir [10]. Böyle bir çalışma sistem için ilk yatırım seçeneklerini karşılaştırır ve örneğin ekonomik yaşam ömrü 20 yıllık bir süre olan sistem için en az maliyetli olan alternatifleri tanımlar.

Yaşam döngüsü maliyet analizi farklı şekillerde yapılabilmektedir. Bunlardan birisi Net Şimdiki Değer (Net Present Value, NPV) hesabına dayanır. Bu yöntem, alternatif projelerin ve seçeneklerin karşılaştırılmasına imkân sağlar. Bu karşılaştırma yaşam döngüsü maliyet analizi ile projenin toplam maliyetini hesaplayarak yapılabilir. Böylece bir sistemin tüm ekonomik kalemleri ve toplam maliyeti tek bir değer ile ifade edilebilir. Projenin ekonomik yaşam ömrünün herhangi bir zaman diliminde meydana gelen masraflarını belirlemek ve dönüştürmek için bazı ekonomik denklemler kullanılır [5, 10].

Net bugünkü değer yöntemi, projenin ömrü boyunca oluşacak tüm yapılan masrafları ve elde edilen faydaları mevcut zamandaki değerle P (present value) ifade eder. Mühendislik ekonomisinde, mühendislik projelerinin analizinde kullanılan temel ekonomik parametreler tanımlanır. Bir proje veya teknolojinin maliyetinin belirlenmesi mühendislik ekonomisinin temel konusudur. Belli bir projenin toplam maliyetini bulmak veya farklı opsiyonların maliyetini karşılaştırmak için farklı zamanlarda oluşacak maliyetlerin basit bir şekilde toplanması doğru değildir. Bunun nedeni paranın faiz kazanabilme etkisinden dolayı zamanla değerinin değişmesidir. Paranın mevcut değerine P , gelecekteki değerine F , periyodik eşit miktarına U , proje ömrünü ifade eden periyot sayısına n ve yıllık faiz oranına i dersek, bu parametreler arasındaki ilişkiler Tablo 3'de verilen denklemler ile hesaplanır.

Bu denklemler yardımıyla farklı zamanlarda oluşan maliyetlerin ortak bir temelde ifadesi mümkün olur. Böylece bir projenin maliyetini tüm ekonomik ömrü için bulabiliriz. Toplam ömür maliyetini bulmak için çeşitli metotlar kullanılır. Bunlardan birisi net bugünkü değerdir (Net Present Value, NPV). Bu metotta farklı zaman dilimlerinde oluşacak olan para akışları (gelir ve gider) mevcut para değerine (P) dönüştürülür. Bu dönüşüm tek bir mevcut değer üzerinden veya periyodik eşit miktarlar halinde ifade edilebilir. Bir projenin toplam maliyetinin yıllık eşit maliyete dönüştürülmesi ile yıllık eşit maliyet (Levelized Annual Cost, LAC) bulunur. Yıllık eşit maliyetin içinde ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım masrafları bulunur. Tablo 3'deki ekonomik maliyet analizi denklemlerin her bir teriminin gösterimi Şekil 3'de nakit maliyet akış şemasında verilmiştir [5, 10].

Projede elde edilen ekonomik faydaları giderlerinden çıkarılarak projenin net bugünkü değeri elde edilir. Pozitif değerini maksimize edilmesi veya negatif değerini minimize edilmesi ekonomik açıdan arzu edilen bir projeyi ifade etmektedir. Bir başka yaşam döngü maliyet analizi metodu da seviyelendirilmiş (levelized) yıllık maliyet yöntemidir. Projenin net maliyeti (veya elde edilen net gelirler) proje süresince yıllık eşit miktarlarda ifade edilir. Projede farklı zamanlarda meydana gelen her gelir ve masraf düzgün bir dizi miktarı olarak U ile ifade edilir. U serisinin net değeri yıllık bazda gelirlerin toplamı ve giderlerin çıkarılmasıyla hesaplanır. Bu değer günlük maliyete bağlı olarak Eş. 16'daki gibi hesaplanabilir [5, 10]:

$$U = P \left[\frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \right] \quad (16)$$

bu denklemde U değeri n süresince maliyet üzerindeki miktarı temsil eder.

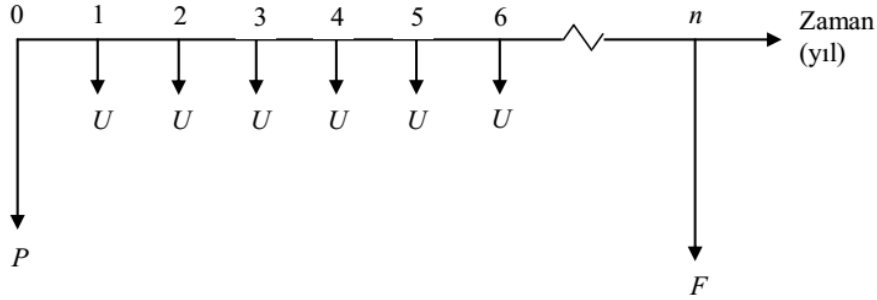
Birçok durumda, gelir ve giderler harcamaları ekonomik ömrün her bir zaman dilimi içinde meydana gelir. Mevduat ödemeleri, ipotek ödemeleri ve araç kiralama ödemeleri gibi

bazı kalemler bunlara örneklerdir. Bu maliyetler yıllık ya da aylık bazda olabilir. Bu durumda gelir veya giderin periyodik dağılımı üniform serisi miktarı olarak ifade edilir ve U ile gösterilir. Yıllık seviyelendirilmiş maliyet kullanılarak toplam maliyetin çok önemli bir ifadesi olan birim ürün başına düşen maliyet hesaplanabilir (Eş. 17)[5, 10]:

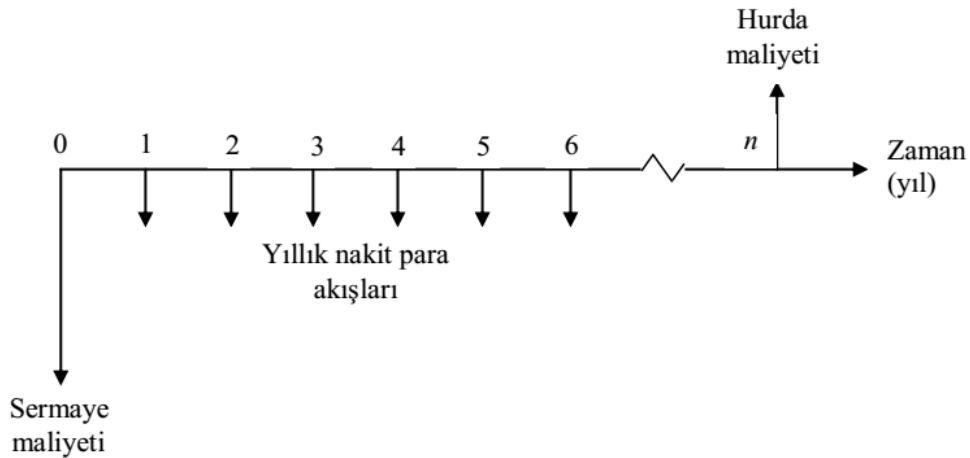
Tablo 3. Ekonomik analizde kullanılan temel denklemlerin listesi [10].

(List of basic equations used in economic analysis)

Gösterim	Denklemler
	$F = P(1 + i)^n$
	$P = \frac{F}{(1 + i)^n}$
P	: bugünkü değer
F	: gelecek değer
U	: üniform seri miktarı
i	: faiz oranı
n	: ekonomik maliyet ömrü
	$U = P \left[\frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \right]$
	$P = U \left[\frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \right]$
	$U = F \left[\frac{i}{(1 + i)^n - 1} \right]$



Şekil 3. Bugünkü değer P , gelecekteki değeri F , ve düzgün seri miktarını U ile gösteren bir nakit akışı şeması. (The present value is P , the future value is F , and the uniform series is represented by U cash flow chart)



Şekil 4. Bir projenin mali ömrü boyunca çeşitli masrafları gösteren maliyet akışı diyagramı. (Cost flow diagram showing various costs over the financial life of a Project)

$$F = U \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right]$$

$$\text{Birim Ürün Maliyeti (UPC)} = \frac{\text{Yıllık Seviyelendirilmiş Maliyet}}{\text{Yıllık Ürün Miktarı}} \quad (17)$$

Hidrojen üretiminde en önemli parametrelerden biri birim kütle hidrojen üretimi için harcanan enerji miktarıdır (kWh/kg H₂). Eğer hidrojen üretimi için kullanılan enerji elektrik ise ve elektrik bir jeotermal güç santralinde üretiliyorsa elektriğin birim kilovat-saatinin (kWh) maliyetinin mühendislik ekonomisi parametreleri yardımıyla hesaplanması ile US\$/kWh olarak elektriğin maliyeti ve dolayısıyla birim kütle hidrojen elde etmenin maliyeti US\$/kg H₂ olarak bulunur. Maliyet hesaplarının farklı sistemler için yapılması ile ekonomik karşılaştırma imkânı bulunabilir.

Birim ürün maliyeti özgül enerji veya ekserji maliyetinden farklıdır. Bu değer üretilen ürünün piyasa Pazar değeri ile ve sistemin ekonomik ömrüne bağlı olarak şekillenen bir değerdir. Ürünün Pazar maliyetinden de doğrudan etkilenmektedir. Bu çalışmada jeotermal destekli hidrojen üretimi sisteminde elde edilen ürünün birimi kg hidrojen dir ve birim hidrojen ürün maliyeti (UHC) de \$/kg H₂ olacaktır. Bu maliyet değeri yıllık seviyelendirilmiş maliyeti adı altında enerji maliyeti ile tüm maliyet değerlerini içermektedir. Bu çalışmamız için jeotermal enerji ile birim hidrojen maliyeti: (Eş. 18)

$$\text{Birim hidrojen maliyeti (UHC)} = \frac{\text{LAC}}{\dot{m}_{\text{H}_2, \text{yılılık}}} \quad (18)$$

Farklı projelerin ekonomik karşılaştırılması net bugünkü değere (Net Present Value) ve yıllık seviyelendirilmiş maliyete (Levelized Annual Cost) göre yapılabileceği gibi geri ödeme süresine (Payback Period) göre de yapılabilir. Gelecekteki tasarruf miktarının bugünkü net değerinin tasarrufu sağlayacak yatırıma eşit olduğu zaman periyoduna geri ödeme süresi denir ve Eş. 19'daki gibi hesaplanır [5, 10]:

$$N_{dbp} = \frac{\log \left[1 - \left(\frac{P}{U} \right) i \right]^{-1}}{\log(1+i)} \quad (19)$$

Bu denklemde P ilave yatırım maliyeti ve U eşit periyodik tasarruf miktarıdır. Çoğu mühendislik uygulamasında, paranın zaman değeri ihmal edilir ve basit bir geri ödeme süresi hesaplanır. Buna basit geri ödeme süresi denir ve Eş. 20'deki gibi hesaplanır [5, 10]:

$$N_{sbp} = \frac{\text{TCI}}{\text{Annual savings}} \left(\frac{\$}{\$/\text{year}} = \text{year} \right) \quad (20)$$

Burada, TCI projenin toplam maliyetini ve ekonomik ömrü boyunca proje ile ilişkili tüm masrafların basit bir toplamını temsil eder. Genellikle ilk yatırım maliyeti olarak dikkate alınır. Basit geri ödeme süresi N_{sbp} 'nin iskonto edilmiş geri ödeme süresi N_{dbp} 'den daha kısa olduğu ve bu nedenle fiili değeri hafife alması gösterilebilir. Faiz oranı düştükçe iki geri ödeme dönemi arasındaki fark da azalmaktadır. Basit geri ödeme süresi paranın zaman değerini dikkate almadığı için yukarıdaki formülle hesaplanan süreden daha kısadır.

7. (SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR) (RESULTS AND DISCUSSIONS)

7.1. Sistemin Termodinamik Analiz Sonuçları (Thermodynamic Analysis Results of System)

Modellenen sistem termodinamik olarak çalıştırıldığında kabuller kapsamında gerçek şartlar altında elde edilen sonuçlar ve yorumlar bu kısımda verilmiştir. Normalde 12 halinde 25°C'de elektroliz ünitesine verilen elektroliz suyu bir ön ısıtıcı sayesinde 17 halinde 70°C'ye ısıtılarak elektroliz işlemine tabi tutulmaktadır (Şekil 3). Böylece elektrolizde kullanılan iş miktarının düşürülmesi amaçlanmaktadır. Burada sisteme entegre edilen ısı değiştirici (elektroliz suyu ön ısıtıcısı) ve elektroliz işleminde düşürülen birim iş miktarı hesaplanmıştır.

Sistem için yapılan termodinamik analize göre jeotermal çevrimden 200°C ve 100kg/s akış debisiyle üretilen net iş 7572 kW olarak hesaplanmıştır. Bu iş doğrudan elektroliz ünitesine gönderilerek hidrojen üretiminde kullanılmıştır. Elektroliz işlemi sıcaklığı 70°C'ye yükseltilmesiyle, sistemden üretilen hidrojenin akış debisi 0,050 kg/s olarak hesaplanmıştır. Jeotermal güç çevriminin enerji ve ekserji verimi 10,4% ve 46,6% olarak hesaplanmıştır. Elektroliz işleminin, 70°C'de çalıştığında, enerji ve ekserji verimliliği ise %79,1 ve %77,1 olarak hesaplanmıştır. Elektroliz işleminde birim hidrojenin üretilmesi için gerekli olan iş ön ısıtma dâhil edildiğinde yeniden hesaplanırsa 151,964 kJ/kg hidrojen olarak hesaplanır. Yani birim hidrojen başına gerekli olan elektriksel iş 42,2 kWh/kg hidrojen olarak hesaplanmıştır. Normalde 25°C'de gerçekleştirilen elektroliz işlemi için gerekli olan gerçek iş 43,51 kWh/kg hidrojen olarak hesaplanmıştır. Yani elektroliz işlemi sıcaklığının 25°C'den 70°C'ye çıkarılmasıyla, elektroliz işinde yaklaşık %3 bir azalma gözlemlenmiştir. Tüm sistem genelinde enerji ve ekserji verimi ise, %8 ve %45,8 olarak hesaplanmıştır.

Bu sonuçlar temel kabuller yapılarak elde edilmiş genel termodinamik sonuçlarıdır. Modellenen sistemi optimize ederek daha uygun çalışma şartlarında sistem bilgisayar ortamında simüle edildiğinde bazı termodinamik parametrelerin kayda değer ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir.

Burada, termodinamik analize bağlı olarak sistemin tüm bileşenlerinin nasıl tepki verdiği incelenerek optimizasyon yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle genel maliyet analizleri Aspen Plus programıyla yapılmış ve optimizasyon

hesaplamaları EES programıyla kodlanmıştır. EES termodinamik tabanlı bir analiz programı olduğu için, ısı sistemler için termodinamik olarak tasarım değişkenlerini seçmeye ve sistemin termodinamik tepkisini izlemeye kolaylık sağlamaktadır. EES programında yapılan optimizasyon ile termodinamik sınır şartları dikkate alınabilmektedir. Bu çalışmamızda, EES programı alt kütüphanesinden genetik algoritma ile optimizasyon metodunu seçerek tüm sistem parametrelerini programa kodlayıp, tasarım değişkenleri ve termodinamik sınır şartlarını girerek bir optimizasyon yapılmıştır. Genetik algoritma ile optimizasyon metodu, kainatta gözlemlenen değişim sürecine benzer bir şekilde çalışan arama ve optimizasyon yöntemidir. Karmaşık çok boyutlu arama uzayında en iyinin bulunması veya en iyiye ulaşılması ilkesine göre tüm sistem geneli için en iyi çözümü arar [11, 12].

Bu sistemde popülasyonun (sistem) ilk birey toplam sayısı, ölçekleme faktörü ve yavru nesillerin sayısı sırasıyla EES programında 1000, 0,378 ve 16 olarak alınmıştır. Ayrıca sistem için düşünülen değişkenlerin termodinamik olarak sınır şartları şunlardır: $100 \leq P_2 \leq 1000$ kPa, $5 \leq \Delta T_{pp} \leq 30$ °C, $0,70 \leq \eta_{turbines} \leq 0,90$, $130 \leq T_8 \leq 190$ °C, $0,70 \leq \eta_p \leq 0,90$, $1000 \leq P_{11} \leq 3000$ kPa. Kararlaştırılmış değişkenler yukarıdaki kabul edilebilir aralıklar için rastgele oluşturulmaktadır. Burada sistem ömrü 20 yıl ve yıllık faiz oranı da %15 olarak alınmıştır. Tablo 4'te temel kabuller ve genetik algoritma ile yapılan analiz sonucunda elde edilen optimum kabuller verilmiştir.

Bu analiz sonuçlarında önemli olan parametreler, Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi için de önemli olacak olan, sistemden üretilen hidrojen miktarı, gerekli olan elektroliz işi ve jeotermal santralden üretilen maksimum ıştır.

7.2. Sistemin Yaşam Döngü Maliyet Analizi Sonuçları (Life Cycle Cost Analysis Results of System)

Tablo 5'de sistem bileşenlerinin zamana bağlı maliyet değerleri üretilmiştir. Burada maliyetlerin levelize edilmesi gerekmektedir. Toplam maliyetin gerekli geri ödeme miktarı ve işletme bakım maliyetlerinin levelize edilmiş değerler ile zamana bağlı yıllık maliyet akışları hesaplanmıştır. Burada sistem çalışma kapasitesi 0,95 olarak dikkate alındığında ve mevcut ekonomik kabuller ile hesaplamalar yapıldığında net güç 8063 kW ve hidrojen üretim miktarı ise 1.589.000 kg/yr hidrojen olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5'de sistemin ekonomik ömrü hesaplamalarının alt kalemleri 1. yıldan 20. Yıla kadar olan ekonomik ömür süresince her bir yıl için hesaplanarak verilmiştir. Bu kapsamda 0 yılında ilk defter değeri ilk yatırım maliyeti olan 45.015.379 US\$ değeri olarak alınmıştır. Bu değere bağlı olarak düz hat amortisman yöntemi ile ilk yıl için geçerli olan amortisman maliyeti 4.501.537 US\$ olarak hesaplanmıştır. 2. yılın defter değeri ise bu amortisman maliyetinin çıkarılması ile elde edilen değerdir. Sabit değer olarak yıllık geri kazanım maliyeti 11.120.000 US\$ olarak hesaplanmıştır. Levelize edilmiş yıllık işletme-bakım maliyeti ise 1.392.000 US\$ olarak hesaplanmıştır. Vergi maliyeti yıllık gelirden işletme-bakım masrafları ve amortisman maliyetinin çıkarılması ile elde edilen değer %20'lik kısmını oluşturmaktadır. Net yıllık geri ödeme maliyeti ise, yıllık geri ödeme miktarından işletme-bakım maliyeti ve o yıla ait vergi maliyetinin farkı olarak hesaplanır. Bu sistem için 20. yıl sonunda net geri ödeme miktarı 8.998.583 US\$/yr olarak hesaplanmıştır.

Projenin belirlenen ekonomik ömrü olan 20 yıl sonunda, hurda maliyeti ise ilk yatırım maliyetinin %20'lik bir kısmını oluşturduğu dikkate alınarak 9.003.000 US\$ olarak hesaplanmıştır. Yapılan kabuller dâhilinde ekonomik analiz sonuçlarından faydalı gelir maliyet oranı (Benefit cost ratio, BCR) 1.639 olarak hesaplanmıştır. Bu da bu projenin kabul edilebilir bir maliyet düzeyinde olduğunu göstermektedir. Net Bu Günkü Değer yöntemine göre yaşam döngü maliyet analizi yapıldığında modellenen sistem için net bugünkü değer (NPV) 37.440.000 US\$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4. Sistemin temel durum kabulleri ve optimizasyon sonucu elde edilen optimum çalışma koşulları.
(Baseline assumptions and optimum operating conditions of the system)

Termodinamik değişkenler	Temel kabuller	Optimumizasyon sonuçları
Flaş basıncı, P_2 (kPa)	600	482,1
Binary ısı değiştirici basıncı, P_{11} (kPa)	2100	2052
Binary ısı değiştirici sıcaklığı, T_8 (°C)	148,8	140,5
Pinch noktası sıcaklığı, ΔT_{pp} (°C)	5	5,172
Pompa izentropik verimi (%)	85	89
Buhar türbini izentropik verimi (%)	85	90
İzobütan türbini izentropik verimi (%)	85	87,9
Jeotermal elektrik üretimi, (kW)	7572	8063
Elektroliz enerji tüketimi, (kWh/kg)	42,12	41,07
Elektroliz hidrojen üretimi, (kg/s)	0,04993	0,05278
Sistem geneli enerji verimi, η (%)	8,032	8,489
Sistem geneli ekserji verimi, ϵ (%)	36,37	38,44

Tablo 5. Sistem için detaylı para akışı ve yıllık maliyet göstergeleri.
(Detailed money flow and annual cost indicators for the system)

Yıl	Defter değeri (US\$)	Amortisman maliyeti (US\$)	Yıllık geri ödeme maliyeti (US\$/yr)	İşletme bakım maliyeti (US\$/yr)	Vergi maliyeti (US\$)	Yıllık net geri ödeme (US\$)
0	45.015.379					
1	40.513.842	4.501.537	11.120.000	1.392.000	1.045.292	8.682.708
2	36.462.458	4.051.384	11.120.000	1.392.000	1.135.323	8.592.677
3	32.816.213	3.646.245	11.120.000	1.392.000	1.216.359	8.511.641
4	29.534.592	3.281.621	11.120.000	1.392.000	1.289.275	8.438.725
5	26.581.113	2.953.459	11.120.000	1.392.000	1.354.908	8.373.092
6	23.923.022	2.658.111	11.120.000	1.392.000	1.413.977	8.314.023
7	21.530.720	2.392.302	11.120.000	1.392.000	1.467.139	8.260.861
8	19.377.648	2.153.072	11.120.000	1.392.000	1.514.985	8.213.015
9	17.439.884	1.937.764	11.120.000	1.392.000	1.558.047	8.169.953
10	15.695.896	1.743.988	11.120.000	1.392.000	1.596.802	8.131.198
11	14.126.307	1.569.589	11.120.000	1.392.000	1.631.682	8.096.318
12	12.713.677	1.412.630	11.120.000	1.392.000	1.663.074	8.064.926
13	11.442.310	1.271.367	11.120.000	1.392.000	1.691.326	8.036.674
14	10.298.079	1.144.231	11.120.000	1.392.000	1.716.753	8.011.247
15	9.268.272	1.029.807	11.120.000	1.392.000	1.739.638	7.988.362
16	8.341.445	926.827	11.120.000	1.392.000	1.760.234	7.967.766
17	7.507.301	834.144	11.120.000	1.392.000	1.778.771	7.949.229
18	6.756.571	750.730	11.120.000	1.392.000	1.795.454	7.932.546
19	6.080.914	675.657	11.120.000	1.392.000	1.810.468	7.917.532
20		6.080.914	11.120.000	1.392.000	729.417	8.998.583

Levelize edilmiş yıllık maliyet metodu kullanılarak yaşam döngü maliyet analizi yapıldığında ise, projenin levelize edilmiş yıllık maliyeti 4.398.000 US\$/yr olarak hesaplanmıştır. Projenin levelize maliyetine bağlı olarak hesaplanan birim ürün maliyeti ise, levelize yıllık maliyetin yıllık üretilen ürün miktarına oranı olarak hesaplanır. Yani bu projede ürün olarak üretilen hidrojenin birim maliyeti bütün yaşam döngü maliyetleri dikkate alınarak hesaplandığında 2.767 US\$/kg H₂ olarak hesaplanmıştır. Bu sistemin geri ödeme süresi basit geri ödeme süresi formülü dikkate alınarak (N_{sbp}) 4.047 yıl olarak hesaplanmıştır. İndirgenmiş geri ödeme süresi ise (N_{dbp}) 5.442 olarak hesaplanmıştır. Sistem için Tablo 6'da yaşam döngü maliyet analizi genel sonuçları verilmiştir.

Tablo 6. Modellenen sistem için yapılan Yaşam Döngü Maliyet Analizi genel sonuçları.
(General results of Life Cycle Cost Analysis for the modeled system)

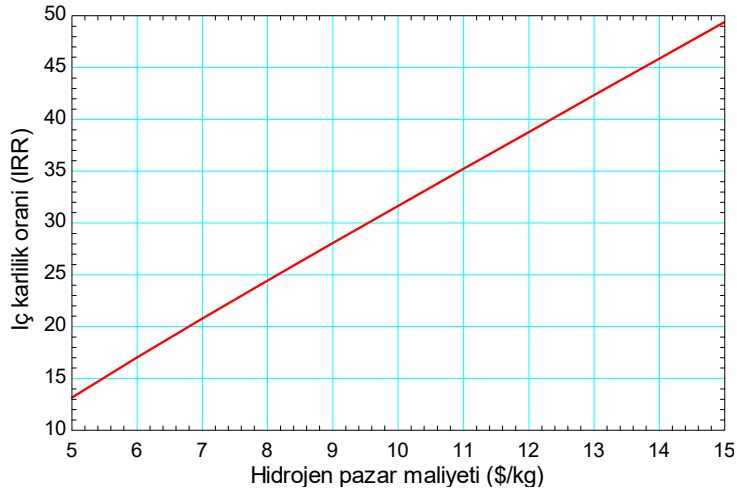
Parametreler	Değerler
Sistem toplam ilk yatırım maliyeti (TCI)	45.015.379 US\$
Tahmini sistem ömrü (n)	20 yıl
Yıllık yıpranma oranı	%20
Hurda maliyeti (SV)	9.003.000 US\$
Yıllık faiz oranı (i)	%10
Yıllık işletme bakım maliyeti	1.595.939 US\$/yr
Levelize yıllık maliyet (LAC)	4.398.000 US\$/yr

Net bugünkü değer (NPV)	37.440.000 US\$
Birim ürün maliyeti (UPC)	2.767 US\$/kg
Geri ödeme süresi (N_{sbp})	4.047 yıl
İç karlılık oranı (IRR)	%20,78

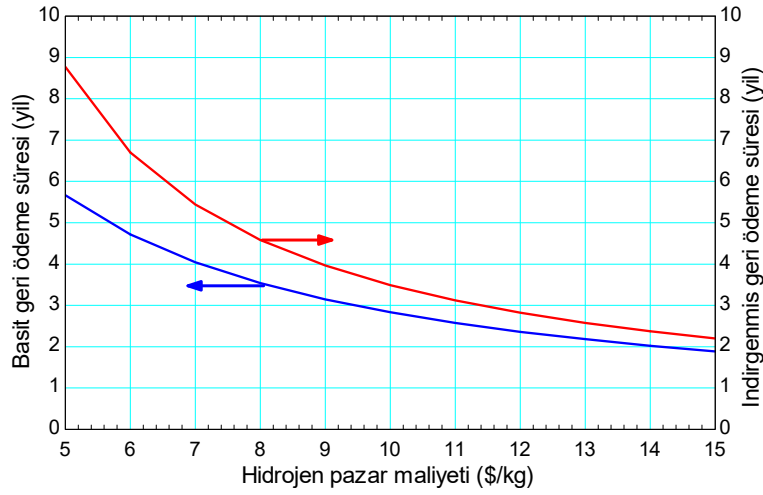
Analizlerde yıllık olarak %10 faiz oranı için net bu günkü değer (NPV) 37.440.000 US\$ olarak hesaplanmıştır. Projenin bu ekonomik kabuller dâhilinde (hidrojenin birim satış maliyeti 7 US\$/kg ve yıllık faiz oranı %10 iken) iç karlılık oranı (IRR) 20,8 olarak hesaplanmıştır. İç karlılık oranının yüksekliği yatırımın iyi bir düzeyde olduğunu ifade eder. Üretilen hidrojenin pazar fiyatının değişimine göre bazı önemli Yaşam Döngü Maliyet Analizi sonuçlarının değişimini gösteren grafikler Şekil 5 - 8 arası grafiklerde verilmiştir. İç karlılık oranı, levelize yıllık maliyet ve birim ürün maliyeti hidrojen maliyeti ile artarken geri ödeme süresi hidrojen maliyeti arttıkça azalmaktadır. Hidrojenin Pazar maliyeti kar oranını ve geri ödeme süresini doğrudan etkilemektedir. Pazar maliyetinin artışı ile iç karlılık oranı lineer olarak artmaktadır. Şekil 6'te ise Pazar maliyetinin artışı ile geri ödeme süresi logaritmik olarak azalmaktadır. Bu da geri ödeme süresinde toplam maliyet ve yıllık eşdeğer kazanç gibi ekonomik parametrelerin hesabı etkilemesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 9'de verilen grafikte sistem için yapılan parametrik çalışmada seçilen sıcaklık aralıkları olan 160°C ile 200°C arasında birim ürün maliyetinin değişimi gösterilmiştir. Bu grafiğe göre sıcaklığın artmasıyla üretilen hidrojenin yaşam döngü maliyeti sonucu oluşan birim ürün maliyeti negatif bir

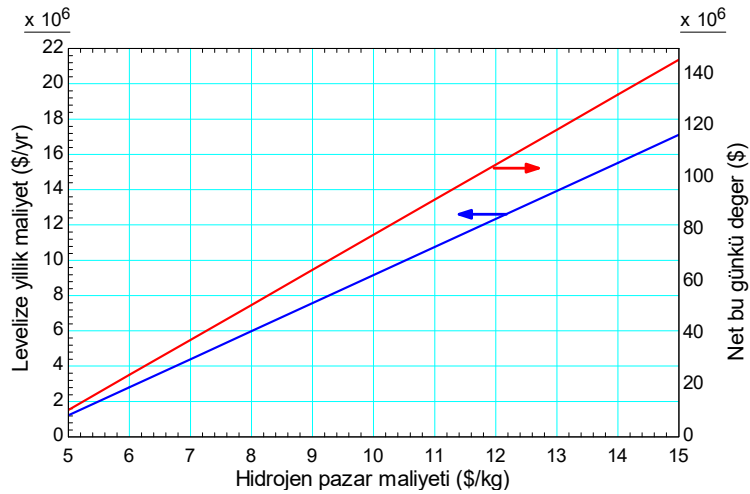
eğime sahip logaritmik bir eğri ile azalmaktadır. Çalışmanın referans sıcaklığı olan 200°C’de birim ürün maliyeti (UPC) 2.767 US\$/kg olarak hesaplanmıştı, bu değer sıcaklık 240°C olduğunda %33,1’lik bir azalma göstererek 1.849 US\$/kg olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. İç karlılık oranının (IRR) üretilen hidrojenin birim satış maliyetine göre değişimi.
(Change of internal profitability (IRR) according to the unit sales cost of hydrogen produced)

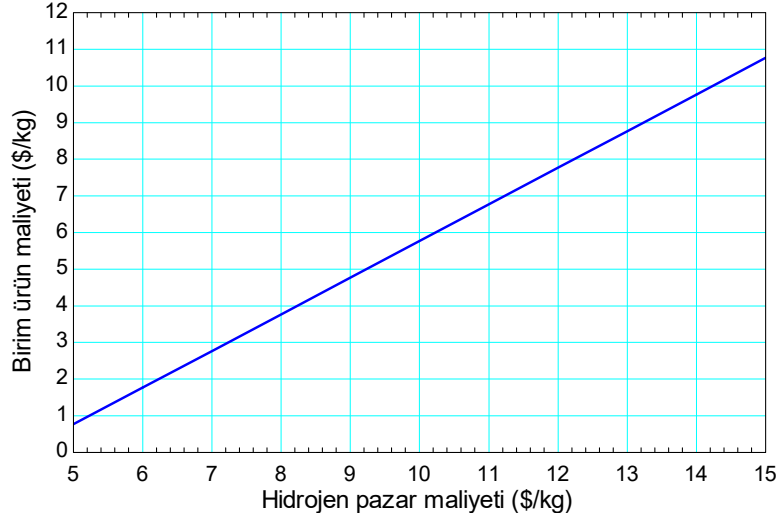


Şekil 6. Sistemin basit geri ödeme ve indirgenmiş geri ödeme sürelerinin hidrojenin birim satış maliyeti ile değişimi.
(Variation of the system's simple reimbursement and reduced reimbursement times with the unit sales cost of hydrogen)

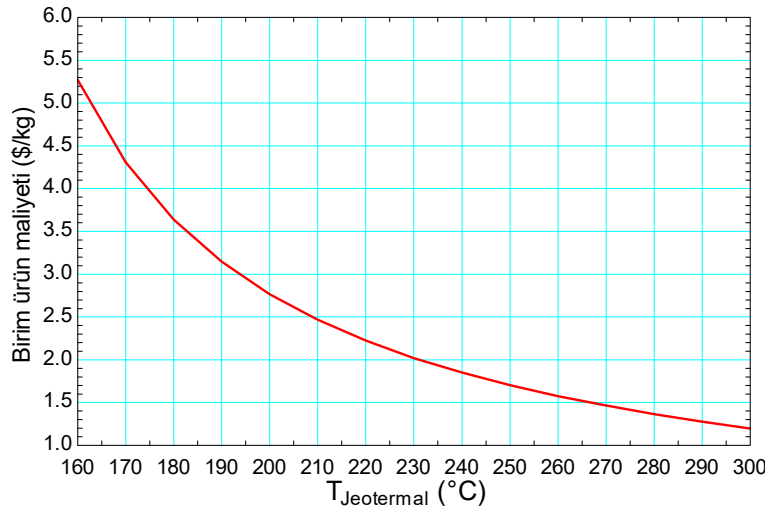


Şekil 7. Sistemin Levelize yıllık maliyetinin (LAC) ve net bugünkü değerinin (NPV) birim hidrojenin satış maliyeti ile değişimi.
(Variation of the levelized annual cost (LAC) and net present value (NPV) of the system with the sale cost of unit hydrogen)

ΔH : elektroliz için toplam enerji talebi (kJ/kmol)



Şekil 8. Sistemden üretilen hidrojenin birim ürün maliyetinin (UPC) hidrojenin satış maliyeti ile değişimi.
(Variation of the unit product cost (UPC) of hydrogen produced from the system with the sale cost of hydrogen)



Şekil 9. Sistemden üretilen hidrojenin (UPC) birim ürün maliyetinin jeotermal kaynağın sıcaklığı ile değişimi.
(Variation of the unit product cost of hydrogen produced from the system with the temperature of the geothermal source)

8. SEMBOLLER (SYMBOLS)

c	: özgül ekserji maliyeti (\$/kJ)
C	: ekipman satın alma maliyeti (\$)
\dot{C}	: ekserjetik maliyet oranı (\$/h)
CRF	: sermaye geri kazanım faktörü
ex	: özgül ekserji (kJ/kg)
$\dot{E}x$: Ekserji (kW)
h	: özgül entalpi (kJ/kg)
\dot{m}	: kütle debisi (kg/s)
P	: basınç (kPa)
\dot{Q}	: Isı (kW)
s	: özgül entropi (kJ/kg K)
\dot{W}	: Güç (kW)

ΔG	: Gibbs serbest enerjisi (kJ/kmol)
ΔS	: elektroliz için ısı enerji talebi (kJ/kmol K)
M	: molekül ağırlığı (kg/kmol)
LHV	: alt ısı değer (kJ/kg)
N	: geri ödeme süresi (yıl)
TCI	: toplam ilk yatırım maliyeti (\$)
US\$: Amerikan doları (\$)
\dot{Z}^T	: toplam maliyet oranı (\$/h)
\dot{Z}^{CI}	: ilk yatırım maliyet oranı (\$/h)
\dot{Z}^{OMC}	: işletme ve bakım maliyeti oranı (\$/h)

8.1. Yunan Sembolleri (Greek Symbols)

η	: enerji verimi
ε	: ekserji verimi
τ	: system kapasite faktörü

8.2. Alt indis (Subscripts)

0	: ölü hal
dbp	: iskonto edilmiş geri ödeme süresi
e	: çıkış durumu
ex	: ekserji
F	: yakıt
g	: gaz
geo	: jeotermal akışkan
i	: giriş durumu
k	: herhangi bir ekipman
L	: levelize maliyet (\$/yr)
OMC	: işletme ve bakım maliyeti
P	: Ürün
sbp	: basit geri ödeme süresi
tot	: tüm sistem

8.3. Üst indis (Superscripts)

CI	: ilk yatırım maliyeti
------	------------------------

9. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma jeotermal enerji destekli hidrojen üretim sisteminin termodinamik optimizasyonu ve yaşam döngü maliyet analizi ile elde edilen sonuçlara dayanmaktadır. Bu nedenle hidrojen üretim sisteminin ekonomik olarak minimum maliyetleri veren çalışma şartları araştırılmıştır. Tasarlanan jeotermal enerji destekli hidrojen üretim sisteminin yaşam döngü maliyet analizi yapılmış ve sonuçlar elde edilip değerlendirilmiştir. Özetle bazı temel sonuçlar aşağıda verilmiştir:

Yaşam döngü maliyet analizi sonucu sistemin ekonomik ömrü dikkate alınarak net bugünkü değeri (NPV) 37.440.000 US\$'dır. Levelize yıllık maliyet (LAC) ise 4.398.000 US\$/yr olarak bulunmuştur. Sistemden üretilen hidrojenin birim ürün maliyeti (UPC) 2.767 US\$/kg H₂'dir. Sistemin basit geri ödeme süresi ise 4.047 yıl olarak hesaplanmıştır.

Tasarlanan sistemden üretilen hidrojen miktarı yıllık 1.589.000 kg'dır ve bu ürünün yıllık levelize maliyeti de 4.389.000 US\$/kg iken birim ürün maliyeti 2.767 US\$/kg olarak hesaplanmıştır. Böylece elektroliz ünitesine jeotermal destekli ön ısıtma ünitesi eklenmesi ile sistemde üretilen hidrojen miktarı, toplam maliyet ve birim maliyeti konvansiyonel sistemlere göre artış gösterecektir.

Bu çalışmada yapılan termodinamik ve ekonomik analiz ve değerlendirme çalışmasından açıkça görüldüğü gibi, sistemini oluşturan bileşenlerin maliyet akışları iki temel unsur üzerine yapılmaktadır: 1) İşletme ve bakım maliyetleri, 2) Ekserji analizine bağlı olarak elde edilen ekonomik maliyet değerleri.

İşletme ve bakım maliyetleri, bu çalışmada modellenen sistemde olduğu gibi, temel ekonomik kabuller gereği, sabit bir bakım faktörü ile belirlenebilir. Ancak sistemin ekonomik ömrüne bağlı ekonomik rakamları ve oranları

belirlenmedikçe, sistemin gerçek maliyet performansını belirleyen etkenler, yani sistem tersinmezliklerinden kaynaklanan giderlere ödenen para sadece enerji analizi ve konvansiyonel yatırım sonuçları ile hesaplanamaz. Bu noktada Yaşam Döngü Maliyet Analizine bağlı olarak geliştirilen ekonomik yaklaşımların değeri açıkça ortaya çıkmaktadır.

Bütün sonuçlar beraber değerlendirildiğinde, jeotermal enerjinin hidrojen üretiminde kullanımı için farklı yaklaşımlar geliştirilebileceği ve bunların termodinamik açıdan başarıyla uygulanabileceği görülmektedir. Bu çalışmanın farklı sistemler için de yapılabilir olması, farklı jeotermal kaynaklar için uygun fırsatlar oluşturmasına katkı sağlayacaktır.

Dünyanın enerji geleceğinde hidrojen önemli bir rol üstlenecekse, hidrojen üretimi, taşınması ve kullanımı ile ilgili teknolojik, pratik ve ekonomik problemlerin çözülmesi için jeotermal kaynaklar gibi alternatif kaynakların kullanılması önemli bir avantaj sağlayabilecektir.

Sürekli bir hidrojen ekonomisinin olmazsa olmazı hidrojenin yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilmesidir. Jeotermal enerji böylelikle hidrojen üretiminde önemli bir rol oynayabilir. Bu çalışmada incelenen kombine jeotermal elektroliz sisteminin farklı uygulamalara bağlı olarak teknolojik ve ekonomik olarak uygun koşullarının incelenmesi, araştırılması ve kullanılması jeotermal enerjinin hidrojen teknolojisine katkısını arttıracaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada bilimsel destek ve önerilerinden dolayı Gaziantep Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Mehmet Kanoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bilgili, Muhittin, and Mecit Sivrioğlu. PEM yakıt pilinin değişik membran elektrot çifti kalınlıklarında ve farklı çalışma basıncı koşullarında üç boyutlu sayısal analizi. Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University 31(1), 51-63, 2016.
2. Willard, W. Pulkrabek. Engineering fundamentals of the internal combustion engine. Editorial Prentice Hall. New Jersey (2004).
3. Koçer, Abbas Alpaslan, and Murat Öztürk. Elektrik ve hidrojen üretimi için entegre sisteminin termodinamik analizi. Engineer & the Machinery Magazine 57.681 (2016).
4. Yılmaz, C., Kanoğlu, M., & Bolattürk, A. Jeotermal Enerji İle Hidrojen Üretilmesi Ve Sivilaştırılması. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi – 13/16 Nisan 2011/İzmir
5. Dhillon, Balbir S. Life cycle costing for engineers. CRC Press, 2009.
6. Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. Thermodynamics: An Engineering Approach (Mechanical Engineering)

- 8th Edition. McGraw-Hill Education; 8 edition (January 7, 2014)
7. Atılgan, Ali İbrahim, and Utku Türkmen. Farklı akışkanlarda değişken soğutucu akışkan debili (vrf) sistemin ekserji ve termoeconomik analizlerinin karşılaştırılması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32(2), 343-353, 2017.
 8. Yılmaz, Ceyhun, and Mehmet Kanoglu. Thermodynamic evaluation of geothermal energy powered hydrogen production by PEM water electrolysis. *Energy* 69 (2014): 592-602.
 9. Özyonar, Fuat, and Bünyamin Karagözoğlu. İçme sularından elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon ile bulanıklığın giderimi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 27(1), 81-89, 2012.
 10. Bejan, Adrian, and George Tsatsaronis. *Thermal design and optimization*. John Wiley & Sons, 1996.
 11. Aspen PlusV8.4., 2015. *Engineering Economic Analysis Library* (Based on 01 January).
 12. F-Chart Software, 2015. EES, engineering equation solver. In: F-Chart Software, Inter-net Website, www.fchart.com/ees/ees.shtml.