



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

JEOTERMAL DESTEKLİ HİDROJEN SIVILAŞTIRMA ÇEVİRİMİNİN TERMODİNAMİK VE TERMOEKONOMİK ANALİZİ

**CEYHUN YILMAZ
MEHMET KANOĞLU
AYŞEGÜL ABUŞOĞLU
GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ**

JEOTERMAL DESTEKLİ HİDROJEN SIVILAŞTIRMA ÇEVİRİMİNİN TERMODİNAMİK VE TERMOEKONOMİK ANALİZİ

Ceyhun YILMAZ
Mehmet KANOĞLU
Ayşegül ABUŞOĞLU

ÖZET

Bu çalışmada bir jeotermal kaynaktan elde edilen elektrik enerjisini gelişmiş bir sıvılaştırma çevrimi olan Claude ünitesinde kullanarak hidrojenin sıvılaştırılması incelenmiştir. Bu sistemde sıvılaştırılabilecek birim hidrojen miktarı ve ekserjetik maliyetinin jeotermal kaynağın sıcaklığına göre değişimi araştırılmıştır. Bu amaçla bilgisayar ortamında sistem modellenerek termodinamik analizi yapılmış ve buna bağlı termoeconomik analiz yapılmıştır. Bu metotla elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, sistemden elde edilebilen sıvı hidrojenin birim ekserjetik maliyetini termoeconomik analiz yöntemi olan SPECO metot kullanılarak bulunmuştur.

Bu bağlamda gerekli termodinamik ve termoeconomik analizler yapıldığında, jeotermal kaynak sıcaklığı 200°C ve debisi 100 kg/s olarak kabul edilen sistemden üretilen net iş 7572 kW olarak hesaplanmıştır. Bu üretilen elektrik işi sıvılaştırma ünitesinde kullanılmaktadır. Sıvılaştırma ünitesinde birim sıvılaştırma miktarı 0.14 kg/s olarak hesaplanmıştır. Jeotermal güç çevrimi kısmının enerji ve ekserji verimleri %10.4 ve %46.6 olarak hesaplanmıştır. Sıvılaştırma çevriminin ekserji verimi %16.5 olarak hesaplanmıştır. Sıvılaştırma çevriminin COP değeri ise 0.153 olarak hesaplanmıştır. Modellenen sistemin geneli için ekserji ürün yakıt prensibi uygulanarak ekserji verimi %81.2 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra termodinamik analize bağlı ekonomik analizi ifade eden termoeconomik analiz yöntemiyle jeotermal santralden üretilen elektriğin birim ekserjetik maliyeti 10.8 \$/GJ (0.0386 \$/kWh) olarak hesaplanmıştır. Sıvılaştırılan hidrojenin birim ekserjetik maliyeti ise 10.2 \$/GJ (1.229 \$/kg H₂) olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Jeotermal, hidrojen sıvılaştırma, enerji, ekserji, termoeconomik.

ABSTRACT

In this study, hydrogen liquefaction by an advanced Claude liquefaction cycle using energy demand from a geothermal source is investigated. The unit amount of hydrogen liquefaction and unit exergetic cost of hydrogen are investigated at various geothermal resource temperatures. The system is modeled in the computer environment and thermodynamic analyses are performed. The unit exergetic cost of liquefied hydrogen is calculated using SPECO approach.

A geothermal resource at a temperature of 200°C and a flow rate of 100 kg/s is considered. The net power output under realistic operating conditions is calculated to be 7572 kW. The produced electrical energy is used in the liquefaction unit. The rate of liquefaction is calculated to be 0.14 kg/s. The energy and exergy efficiencies of the geothermal power unit are calculated to be 10.4% and 46.6%, respectively. The exergy efficiency and the COP of the liquefaction unit are calculated to be 16.5% and 0.153, respectively. The exergy efficiency of the overall system is calculated to be 81.2% by applying the principles of fuel-product approach. The unit exergetic cost of the generated electricity is

calculated to be 10.8 \$/GJ (0.0386 \$/kWh). The unit exergetic cost of liquefied hydrogen is calculated to be 10.2 \$/GJ (1.229 \$/kg H₂).

Key words: geothermal, hydrogen liquefaction, energy, exergy, thermoeconomic.

1. GİRİŞ

Dünya enerji talebi dünya nüfusunda devam eden artış ve gelişmekte olan ülkelerin hayat şartlarını iyileştirme taleplerindeki artışlar ile artmaya devam etmektedir. Mevcut durumda dünya enerji talebinin büyük bir kısmı, kolay bulunması ve kullanıma uygun olmaları sebebiyle sıvı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Ayrıca bu fosil yakıtların yanma ürünlerinin çevreye verdiği zararlarda ekonomi üzerinde doğrudan veya dolaylı olarak olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bununla birlikte, günümüzde kullanılmakta olan enerji kaynaklarının hızla tükenmekte olması, alternatif enerji kaynaklarına olan gereksinimi zorunlu kılmaktadır. Petrol krizinin ve çevre sorunlarının etkisi altında yakın gelecekte, fosil kaynakların yerini alacak, alternatif kaynaklar bulunması gerekmektedir. Dünyadaki petrol rezervlerinin aşırı kullanımı sonucu azalması ve buna bağlı olarak fiyatının artması, ayrıca insan sağlığına ve çevreye vermiş olduğu zararlar, bilim adamlarını doğada bol miktarda bulunan ve çevreci olan alternatif enerji kaynakları üzerinde araştırma yapmaya itmiştir. Fosil kaynakların kullanımından kaynaklanan emisyonların insan sağlığına, ekolojik dengeye ve çevreye verdiği zararın çok büyük boyutlara ulaşması ülkeleri bu konuda önlemler almaya itmiştir. Bunun için bilim adamlarına çevre dostu olan alternatif enerji kaynaklarının araştırılması için destekler verilmiştir.

Hidrojenin birçok yönüyle avantajlı olduğunu bilimsel bir gerçektir. İkincil bir enerji kaynağı durumunda olan hidrojenin değişik ve yenilenebilir birincil enerji kaynakları ile elde edilebilir olması, bu yakıt türünü geleceğin en önemli enerji taşıyıcısı konumuna getireceği kabul edilmektedir. Hidrojen, suyun ve temiz güç kaynağının olduğu her yerde potansiyel olarak mevcuttur. Diğer yakıt türlerine kıyasla da daha verimli yanma özelliğine sahiptir. Teorik olarak hidrojen yandığı zaman sadece su oluşur.

Hidrojenin kullanımının amacı olan çevre sorunları ve enerji problemlerinin çözümünde, önemli olan konu hidrojenin üretimi, depolanması ve kullanımında seçilecek olan yöntem ve teknolojilerdir. Hidrojen bir doğal yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak değişik hammaddelerden üretilen bir sentetik yakıttır. Hidrojenin temelde, sudan yenilenebilir enerjilerle üretilmesi ana ilkedir. Hidrojen üretim yöntemlerinin başında suyun direkt elektrolizi gelir. Elektroliz için elektrik gereksinimi fosil yakıtlardan, hidroelektrik kaynaktan, nükleer güçten, jeotermal, güneş ve rüzgâr enerjilerinden elde edilebilir. Elektrik üretimindeki yöntem önemlidir. Çünkü amaç çevre kirliliğinin azaltılması iken geleceğin enerjisini, çevreye zararlı bir metotla elektrik üretip de elde etmeye çalışmak uygun olmayacaktır. Kömür ve doğalgazdan konvansiyonel metotlarla hidrojen üretiminde ise emisyon faktörlerinin etkileri az da önemini koruyacaktır. Bu etkilerin en aza indirilebilmesi için hidrojen üretiminde ve sıfırlanmasında da jeotermal, güneş ve rüzgâr enerjileri gibi kaynaklar kullanılabilir.

Bu çalışmada, jeotermal kaynaktan elde edilen elektrik gelişmiş bir sıvılaştırma çevrimi olan Claude çevriminde, hidrojenin sıvılaştırılması için kullanımının bilgisayar ortamında modellenmesi olan bir sistem geliştirilmiştir. Bu geliştirilen hidrojen sıvılaştırma sisteminin termodinamik ve termoekonomik olarak analizleri yapılacak ve detaylı bir şekilde incelenecektir. Termodinamik sistemlerin tasarımları için çok farklı mühendislik yöntemleri kullanılabilir. Biz bu çalışma kapsamında, mühendislik açısından bir enerji sisteminin termodinamik olarak tasarımında gerekli olan parametreleri kullanacağız. Bu çalışmamızda sistemi iki ana başlık altında inceleyeceğiz. İlk olarak, düşünülen sistemin termodinamik olarak enerji ve ekserji analizlerinin yapılması ve etkili parametrelerin araştırılmasıdır. İkinci olarak, yapılan termodinamik analiz sonuçlarına bağlı olarak, sistemin ekonomik analizinin ve termodinamik altyapılı bir ekonomik analizi olan termoekonomik analizinin yapılması yer almaktadır. Bu bağlamda literatürde çalışmamıza yakın yapılmış bazı çalışmaların özetleri aşağıda verilmiştir.

Hotza ve Diniz da Costa[1], hidrojen üretimindeki çevreci yöntemler ve yakıt hücrelerinin kullanımı üzerine geniş literatür çalışması yapmış ve gelecekte hidrojen ekonomisi için en güvenilir üretim yöntemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanacağını vurgulamışlardır. Sigurvinnsson vd [2],

jeotermal enerjinin yüksek sıcaklıkta elektroliz işleminde kullanılabilirliğini araştırmış ve jeotermal ısının ısı değiştiriciler yardımıyla gerekli ısının bir bölümünü sağladığı bir sistemin termoekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla İzlanda'da bulunan jeotermal kaynakların özellikleri ve fiyatları kullanılmıştır. Sigurvinnsson vd[3], jeotermal enerjinin yüksek sıcaklıkta elektroliz işleminde kullanılmasında çıkış sıcaklığının enerji maliyeti üzerindeki etkisini incelemiş ve ısı değiştiricileriyle ilgili parametreleri incelemişlerdir. Sonuçlar, İzlanda'daki jeotermal kaynaklar için bu yöntemin gelecek vaat ettiğini göstermiştir. Mansilla vd[4], yüksek sıcaklıkta elektroliz işleminde yüksek sıcaklıkta reaktör (nükleer) kullanımı ile jeotermal enerji kullanımını termoekonomik olarak karşılaştırmış ve jeotermal enerji kullanımının avantajlarını ortaya koymuşlardır. Isı değiştirici optimizasyonu genetik algoritma ile yapılmıştır. Moriarty ve Honnery[5], hidrojen üretiminde güneş, rüzgâr, jeotermal, biokütle, hidroelektrik ve nükleer enerji kaynaklarının kullanımını genel çerçevede değerlendirmiş ve rüzgâr türbinlerinden elde edilecek elektriğin hidrojen üretiminde kullanımının en uygun metot olduğunu vurgulamışlardır.

Jónsson vd[6], hidrojen üretiminde jeotermal enerjinin kullanılabilirliğini araştırmış ve yüksek sıcaklıktaki elektroliz işleminin oldukça maliyetli olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmada; 200°C'lik bir jeotermal buhar ile yüksek sıcaklık elektrolizi işlemiyle hidrojen üretiminde %19 oranında maliyet azalması sağlanacağı ortaya konulmuştur. Arnason vd[7], İzlanda' da hidrojen üretimi için yeni konseptler üzerine yaptıkları araştırmalarında, elektrolizle hidrojen üretiminin maliyetine etki eden santralin büyüklüğü, santralin gücü, elektrik fiyatı gibi faktörlerle hesaplamalar yapmışlardır. Çalışmada, jeotermal enerji destekli hidrojen üretilmesi ve hidrojenin sıvılaştırılması konuları da araştırılmıştır. Jeotermal buhar kullanarak hidrojenin %19 daha az maliyetle üretilbileceği ileri sürülmüştür. Syed vd[8], hidrojenin sıvılaştırılması hususunda üç farklı sistemin ekonomik analizini yapmış olup, hidrojen üretimindeki toplam maliyetin, üretim, sıvılaştırma, depolama ve dağıtım maliyetlerinden ibaret olduğunu vurgulamışlardır. Hidrojenin sıvılaştırılması konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Sıvılaştırma sistemlerinde kullanılan bazı çevrimler için ikinci yasa analizi, performans ve optimizasyon ile ilgili çalışmalar yapmışlardır[9,10]. Friedrich ve Hacker[11], yaptıkları çalışmada Avusturya' da yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretim potansiyelini araştırmışlardır. Çalışmalarında daha çok elektroliz ve biokütle ile hidrojenin üretilmesi ve depolanması üzerinde durmuşlardır. Toplam enerji ihtiyacının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının yerinin giderek arttığını ifade etmişlerdir.

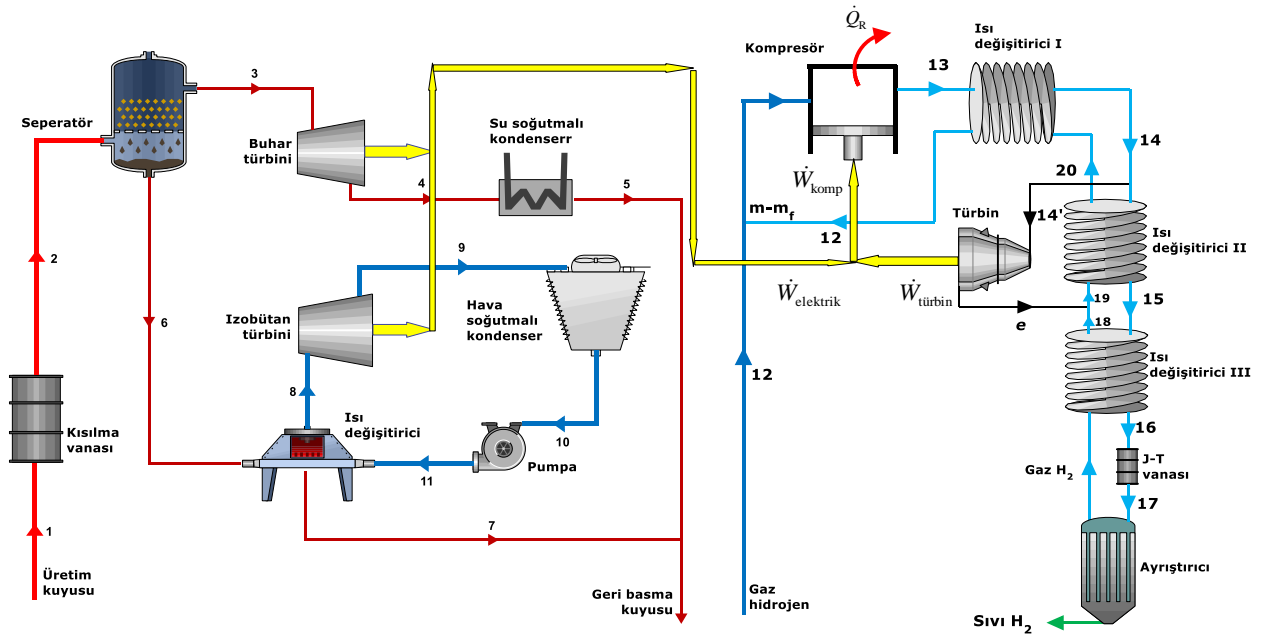
Arnason ve Sigfusson[7], hidrojenin üretilmesi, depolanması ve kullanılmasında jeotermal enerjinin uygulanabilirliğini tartışmışlardır. Jeotermal enerjinin bir güç santralinde elde edilen elektrikle elektroliz işlemine, yüksek sıcaklık elektroliz işlemine veya düşük sıcaklıklı jeotermal enerji kullanılarak termoelektrik güç (Seebeck etkisi) üretimine destek olacağı vurgulanmıştır. Jónsson vd[6], yaptıkları çalışmada hidrojen üretiminde jeotermal enerji kullanımını incelemişlerdir. Jeotermal buharın yüksek sıcaklık elektroliz işleminde kullanılmasıyla hidrojen üretiminde %19 oranında maliyet azalması sağlanacağı ortaya konmuştur. Ingason vd[12], İzlanda' da yenilenebilir enerji olarak hidrojen üretiminin optimizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, hidroelektrik ve jeotermal güç santrallerinden elde edilen elektrik enerjisini kullanarak suyun elektrolizinden hidrojen üretiminin ekonomik yolları araştırılmıştır. Hand vd[13], ele aldıkları modelde besleme suyu sıcaklığını jeotermal enerji ile arttırarak elektroliz işleminin veriminin ve diğer parametrelerin değişimini incelemiştir. Elektroliz işleminde besleme suyunun çeşitli sıcaklık değerleri için optimizasyon yapılmış olup %17 oranında verim artışı sağlanmıştır.

Kanoğlu vd[14], jeotermal enerjinin hidrojen sıvılaştırmasında kullanımını araştırmış ve bu amaçla üç model geliştirerek bu modelleri termodinamik olarak incelemişlerdir. Uygun performans ölçütleri tanımlanarak jeotermal su sıcaklığının ve hidrojen ön soğutma sıcaklığının performans üzerindeki etkileri çalışılmıştır. Jeotermal enerjinin kullanımı ile sıvılaştırma için gerekli işin önemli ölçüde azaltılabildiği ortaya konmuştur. Kanoğlu vd[15], jeotermal enerji destekli bir yüksek sıcaklık elektrolizi sisteminin eksergoekonomik analizini yapmıştır. Kanoğlu vd[16], jeotermal enerjinin hidrojen üretimi ve sıvılaştırılmasında kullanımı için geliştirdikleri yedi modelin birinci yasaya dayalı termodinamik analizini gerçekleştirmiştir. Yılmaz vd[17], jeotermal enerjinin hidrojen üretimi ve sıvılaştırılmasında kullanımı için geliştirdikleri yedi modelin basit ekonomik analizini yapmışlar. Bu farklı modellerden üretilen hidrojenin birim maliyetlerini, kendi içinde kıyaslamışlardır.

Literatür araştırmasından anlaşılacağı gibi jeotermal enerji kullanılarak hidrojen üretimi ve sıvılaştırılması konusundaki çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, belli sıcaklık ve kütleli debiye sahip bir jeotermal kaynaktan üretilen elektrikle çalışan bir sıvılaştırma sistemi bilgisayar ortamında modellenerek, hidrojen sıvılaştırma yapılacaktır. Burada sıvılaştırılan hidrojenin birim maliyeti, termodinamik ve termoeconomik olarak incelenecektir. Öncelikle modellenen jeotermal destekli hidrojen sıvılaştırma sisteminin enerji ve ekserji analizleri yapılacaktır. Bu analiz sonuçlarına bağlı olarak da termoeconomik analiz yapılacaktır. Bu sistemden üretilen birim sıvı hidrojenin miktarı ve ekserjetik maliyeti incelenecektir. Ayrıca, jeotermal kaynak su sıcaklığının değişiminin sıvılaştırılan hidrojenin ekserjetik birim maliyeti üzerindeki etkisi incelenecektir.

2. SİSTEMİN BİLGİSAYAR ORTAMINDA MODELLENMESİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Bu sistemde yüksek sıcaklıktaki sıvı yoğunluklu jeotermal akışkan yalnızca birleşik püskürtmeli binary güç çevriminde elektrik işi üretmek için kullanılmaktadır. Birleşik püskürtmeli binary jeotermal güç çevriminde üretilen elektrik işi, Claude sıvılaştırma çevrimine giren gaz hidrojenin depolama için sıvılaştırılmasında gerekli işi temin etmek için kullanılmaktadır. Böylece sıvılaştırma çevriminde hidrojenin sıvılaştırılması için gerekli kompresör işi, sıvılaştırma çevriminde kroyejenik türbinden elde edilen iş ve jeotermal çevrimden elde edilen elektrik işi ile daha da düşürülebilecektir. Bu modelde sıvılaştırılan birim hidrojen miktarı termodinamik ve termoeconomik olarak incelenmesi düşünülmüştür. Bu işlemler yapılırken sistem ve sistem elemanlarının enerji ve ekserji analizleri yapılacaktır. Bunlara bağlı olarak termoeconomik analiz yapılarak sonuçlar değerlendirilecektir. Sistem bilgisayarlı simülasyon programları olan EES programı ile termodinamik olarak analiz edilmiştir. Daha sonra aynı sistem Aspen Plus V8.4 ile ekonomik analizi yapılmıştır. Bu değerler termodinamik olarak ve literatür ile kıyaslanmıştır. Sistemin çalışma prensibi bir çizim programıyla, karmaşıklığı sadeleştirilerek, çalışma prensibinin anlaşılabilmesi için Şekil 1'deki gibi gösterilmiştir.



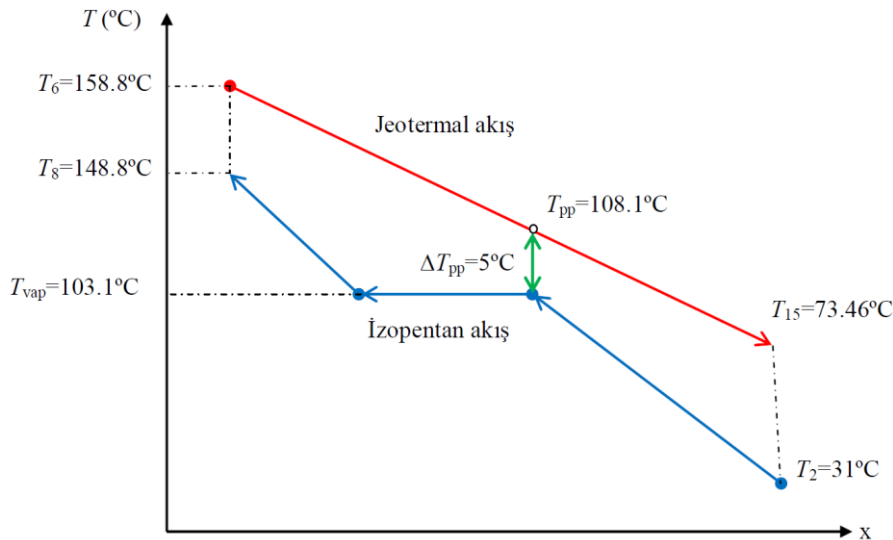
Şekil 1. Flash binary jeotermal çevriminden üretilen elektrik Claude sıvılaştırma çevriminde hidrojenin sıvılaştırılmasında kullanılan hidrojen gazı sıvılaştırma sistemi.

Yüksek sıcaklıktaki jeotermal akışkan, doğrudan birleşik püskürtmeli binary güç çevriminde elektrik üretiminde kullanılarak, sıvılaştırma çevrimin enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. Burada 200°C'de ve 100 kg/s debide olan jeotermal suyla güç çevriminde EES programı simülasyonu ile 7572 kW elektrik işi üretilmektedir. Claude sıvılaştırma çevriminde ise, 12 durumunda 25°C ve 100 kPa

basınçta birim hidrojen sıvılaştırılması için gerekli iş, idealde 11097 kJ/kg sıvı hidrojen (3.08 kWh/kg sıvı hidrojen) olarak hesaplanmıştır. Bu değer sıvılaştırma çevrimi gerekli termodinamik kabuller yapılarak EES programıyla bilgisayar ortamında gerçek olarak çalıştırıldığında, birim hidrojenin sıvılaştırılması için gerekli gerçek iş 54,292 kJ/kg sıvı hidrojen (15.08 kWh/kg sıvı hidrojen) olarak hesaplanmıştır.

Modellenen sistemin termodinamik analizi ekipmanların kontrol hacim ve sabit rejim şartlarında çalıştığı varsayılarak yapılmıştır. Sistemdeki elemanların basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Türbin ve pompaların izantropik verimlilikleri, güncel üretici firmalarının internet verileri kullanılarak, %85 kabul edilmiştir. Jeotermal akışkan sisteme girişte 1 durumunda 200°C ve 100 kg/s kütle debisine sahip sıvı yoğunluklu olarak kabul edilmiştir. EES programı kullanılarak kısılma vanası için basit bir basınç optimizasyonu yapılmış ve kısılma basıncı 600 kPa olarak alınmıştır. Binary güç çevrimi için birim enerji miktarı sıcaklık bazında daha yüksek olan izobütan gibi bir ikincil akışkan seçilmiştir. İzobütanın türbin giriş ve çıkış basınçları kızgın buhar bölgesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu bağlamda izobütan türbin giriş çıkış basınçları 2100 kPa ve 400 kPa olarak seçilmiştir. İzobütana ısı geçişinin sağlandığı ısı değiştiricinin tasarımı için Pinch noktası sıcaklık farkı 5°C olarak kabul edilmiştir ve tasarım kabulleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Soğutma suyu ve havası için çevre şartları kabulleri olan 25°C ve 100 kPa referans alınmıştır. Bu bağlamda modelin genel enerji ve ekserji denklemleri aşağıda Tablo 1'de verilmiştir. Model EES ve Aspen Plus programında yazılarak analiz sonuçları alınmıştır.

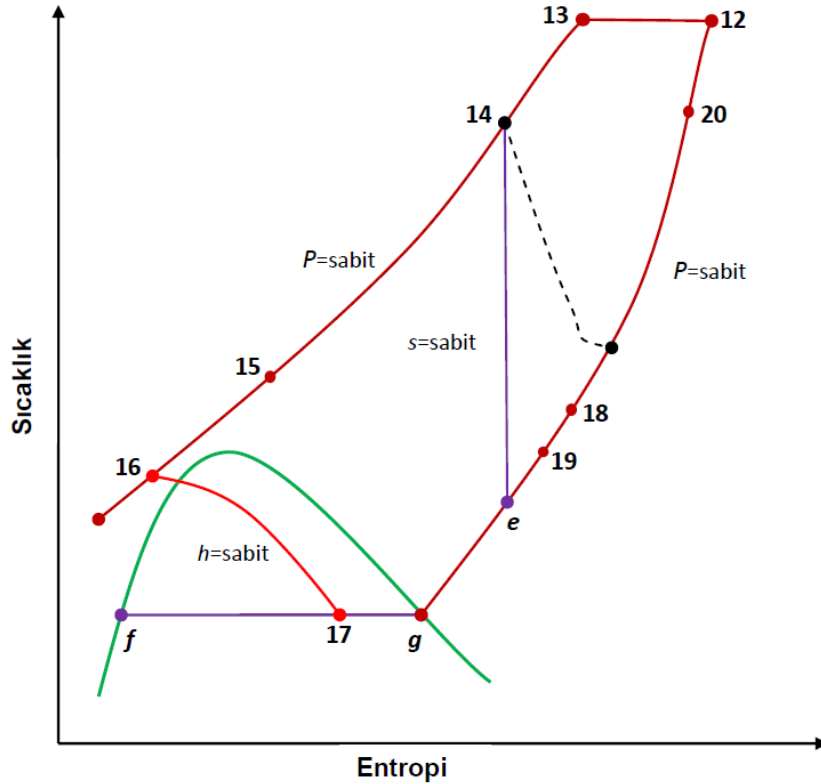
Şekil 2'de jeotermal akışkanın enerjisini izobütana aktarmak için kullanılan ısı değiştiricinin pinch noktası analizi yapılmıştır. Pinch analizi ısı değiştiricilerde iki farklı termodinamik özelliğe sahip akışkanın arasında enerji analizi için kullanılan önemli bir parametredir. Bu sistemde jeotermal sıvı akışkan 6 durumunda 158.8°C'dedir. Bu akış ile izobütanın sıcaklığının 148.8°C'ye kadar çıkarılabileceği kabul edilmiştir. İzobütanın kritik sıcaklığı 134.7°C'dir. Yani 148.8°C'de izobütan kızgın buhar halindedir. Fakat izobütan ısı değiştiriciye girmeden önce 2 durumunda 31°C'de doymuş sıvı halindedir. Yani, jeotermal akışkanın sıcaklığı faz değişimi olmaksızın 73.46°C'ye kadar düşerken, izobütanın sıcaklığı doyma sıcaklığı olan 103.1 °C'ye kadar artacak, daha sonra gizli ısı bölgesinde sabit sıcaklıkta entalpi değişimi olacaktır. Bu noktadan sonra sıcaklık tekrar 8 durumunda 148.8°C'ye kadar kızgın buhar bölgesinde artacaktır. Burada jeotermal akış ile izobütan akışın doyma sıcaklığı arasındaki fark pinch noktası farkı olan ΔT_{pp} sıcaklığını vermektedir. Daha önce yapılan çalışmalarımızdan referans alınarak pinch noktası sıcaklık farkı 5°C alınmıştır. İzobütan akışın karakteristiğine göre belirlenecek olan jeotermal akışın pinch noktası sıcaklığı ise $T_{pp} = T_{vap} + \Delta T_{pp} = 103.1 + 5 = 108.1^\circ\text{C}$ olmaktadır.



Şekil 2. Binary jeotermal çevriminde ısı değiştiricinin pinch noktası analizi.

Sıvılaştırma çevrimine 12 durumunda 25°C ve 100 kPa olarak giren hidrojen gazı sistemin ikinci kısmı olan Claude sıvılaştırma çevriminde sıvılaştırılmak üzere kompresörde 13 durumuna sıkıştırılarak

birinci ısı değiştiriciye gönderilmektedir. Hidrojen ve helyum dışındaki tüm gazlar basit Linde yöntemiyle Joule-Thomson etkisinden faydalanılarak, çevre sıcaklığından ve belli bir yüksek basınçtan itibaren kısılarak sıvılaştırılabilirler. Fakat hidrojenin sıvılaştırılabilmesi için sıcaklığının -173°C civarına düşürülmesi gerekmektedir. $P-h$ diyagramı üzerindeki eğriler incelenirse, belli bir basınçtan başlanarak gerçekleşen kısılma işlemlerinde kısılma başlangıcındaki sıcaklık ne kadar düşükse kısılma sonucunda sıcaklıkta meydana gelen azalmanın o kadar büyük olacağı görülür. Çalışmamızda Claude sıvılaştırma çevrimini seçmemizin nedeni, hidrojeni diğer gazlarla ara soğutma banyolarına maruz bırakmamaktır. Bir sebep de, Linde yönteminde kullanılan basınç düşürücü valf yerine iş üreten bir türbin kullanılabilse idi genişleme sonunda sıcaklıkta meydana gelen azalma çok daha büyük olurdu. Claude sıvılaştırma çevrimi, termodinamik çevrimlerin birleşmesinden meydana gelmektedir. Eşentropili ve eşentalpili çevrimlerin birleşimidir. Bu çevrimde kompresör, ısı dönüştürücü, türbin ve J-T vanası vardır.



Şekil 3. Claude sıvılaştırma çevriminin sıcaklık entropi ($T-s$) diyagramı.

Claude sıvılaştırma çevriminde türbinde eş entropili genişleme gerçekleşirken, J-T vanasında ise eş entalpili genişleme gerçekleşmektedir. Sisteme 12 durumunda verilen hidrojen gazının bir kısmı türbinde genişletilmek için kullanılır ve soğutulur. Türbinden e durumunda çıkan soğuk hidrojen gazı, ısı değiştiriciler sayesinde 14 durumundaki hidrojen gazının ön soğutmasında kullanılmaktadır. Ön soğutma işleminden geçen hidrojen gazı, J-T vanasında 17 durumunda daha da soğutulur. Genleşme vanasında basınç ve sıcaklıkta değişim olurken, çevreden ısı alınma ya da çevreye ısı verme işlemi olmaması ya da akışkanın kinetik enerjisinde değişim olmamaktadır. 16 durumunda hidrojen gazı bu süreçte basınç düşüncesine maruz kalarak, entalpi değişimi olmaksızın 17 durumuna genişler.

Bu çevrimde 12 durumunda ilave edilen hidrojen gazı bir önceki çevrimden gelen gazın sıvılaştırılmayan kısmıyla karıştırılır ve karışım 12 durumundan 13 durumuna sıkıştırılır. Sıkıştırılmış gazdan ısı bir soğutucu ile atılır. Burada nitrojen ile soğutma yapılmaktadır. Çalışmamızda detaylı nitrojen işi hesabına girilmemiştir, yalnızca birim hidrojeni sıvılaştırma için gereken nitrojen işi referans olarak alınmıştır. Yüksek basınçtaki gaz rejeneratif karşı akışlı ısı değiştirici (I)'de 14 durumuna sıvılaştırılmamış gaz tarafından soğutulur. Sonra diğer iki rejeneratif ısı değiştiricilerden (II ve III)

geçirilerek 16 durumuna kısılma vanasından önce, doymuş sıvı-gaz karışımı biraz daha soğutulur. Burada hidrojen doymuş sıvı-gaz karışımı halindedir. Sıvı hidrojen istenen ürün olarak ayrıştırıcının alt kısmında toplanır, sıvılaşmayan hidrojen gazı da tekrar çevrim yapmak üzere sisteme gönderilir. Sonuç olarak sıvılaşmayan hidrojen gazı, 12 durumunda temiz tamamlama gazıyla karıştırılır ve çevrim yeniden başlatılır.

3. SİTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Modellenen sistemin termodinamik analizi, sistem bileşenlerinin her biri kontrol hacim kabul edilerek incelenerek yapılmıştır. Sistem geneli ve sistem bileşenleri düzgün hal durumunda ve kontrol hacim olarak incelenmiştir. Kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir. Ölü hal için çevre sıcaklığı ve basıncı olarak standart kabuller olan 25°C ve 100 kPa referans alınmıştır. Böylece genel kütle, enerji ve ekserji denklemlerini aşağıdaki gibi yazılabilir:

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

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

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

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

Özgül akış ekserjisini ve toplam ekserjiyi herhangi bir durum için aşağıdaki gibi yazabiliriz:

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

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

Buradaki, alt indis 0 ölü hali (çevresel 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 şöyle hesaplanabilir:

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

Bu çalışmada sistemin güç üretim kısmı olan jeotermal santral için enerji ve ekserji verimliği denklemleri, jeotermal akışkanın kuyu başı durumu dikkate alınarak, aşağıdaki gibi hesaplanabilir,

$$\eta_{\text{geo}} = \frac{\dot{W}_{\text{geo}}}{\dot{m}_{\text{geo}}(h_1 - h_0)} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{geo}} = \frac{\dot{W}_{\text{geo}}}{\dot{m}_{\text{geo}}[h_1 - h_0 - T_0 (s_1 - s_0)]} \quad (7)$$

Sistemin sıvılaştırma çevriminde türbin aracılığıyla da iş üretilmektedir ve bu iş kompresör işini sağlamak için kullanılmaktadır. Böylece net iş ihtiyacı düşürülmektedir. Sisteme verilen hidrojen gazı kompresör ile sıkıştırılarak ısı değiştiriciye gönderilmektedir. Bu gazın yaklaşık %60'ı (x) türbin kısmında genişletilmekte ve diğer kısmı ise ikinci ısı değiştiriciye gönderilmektedir. Sıvılaştırma çevrimi için, sistem elamanlarında ısı kayıpları ihmal edilerek, bir enerji denge denklemi yazmak istersek aşağıdaki gibi yazabiliriz[18]:

$$(\dot{m} - \dot{m}_f)h_{12} + \dot{m}_f h_f + \dot{m}_e h_e - \dot{m}h_{13} - \dot{m}_e h_{14} = 0 \quad (8)$$

Türbine gönderilen gaz miktarı oranı:

$$x = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}} \quad (9)$$

Çevrimde sıvılaştırılabilen hidrojen gazı miktarı:

$$y_{\text{liq}} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{h_{12} - h_{13}}{h_{12} - h_f} + x \frac{h_{14} - h_e}{h_{12} - h_f} \quad (10)$$

Çevrimde türbinden üretilen iş:

$$\dot{W}_{\text{turb}} = \dot{m}_e (h_{14} - h_e) \quad (11)$$

Toplam sıvılaştırma işi, kompresör işinden üretilen türbin işi çıkarılarak aşağıdaki gibi detaylı yazılabilir:

$$w_{\text{in}} = w_{\text{comp}} - w_{\text{turb}} = [T_{12}(s_{12} - s_{13}) - (h_{12} - h_{13})] - x(h_{14} - h_e) \quad (12)$$

Son olarak birim kütle hidrojeni sıvılaştırmak için gerekli iş miktarının, ön soğutmada kullanılan nitrojen işi de hesaba katılarak hesaplanması için aşağıdaki ifade türetilmiştir:

$$w_{\text{act,liq}} = \frac{w_{\text{comp}} + w_{\text{N}_2} - w_{\text{turb}}}{y_{\text{liq}}} \quad (13)$$

Burada birim hidrojen sıvılaştırılmasında kullanılan özgül nitrojen işi tahmini olarak literatürden 7760 kJ/kg olarak alınmıştır[10]. Çalışmalarımızdaki sıvılaştırma çevrimlerinde birim iş için bu değer bütün sıvılaştırma kısımlarında kullanılmıştır.

Şekil 1'e göre sistemin sıvılaştırma çevrimi için ideal şartlarda gerekli işi aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz:

$$w_{\text{rev,liq}} = h_f - h_{12} - T_0(s_f - s_{12}) \quad (14)$$

Burada sıvılaştırma çevrimin ekserji verimi, ideal işin gerçek işe oranı olarak da hesaplanabilir. Literatürde FOM (figure of merit) olarak geçen bu ifade aynı zamanda ekserji verimini de ifade etmektedir[14]:

$$\varepsilon = \frac{w_{\text{liq,rev}}}{w_{\text{liq,act}}} \quad (15)$$

Bizim çalışmamızda temel olarak kullanacağımız yaklaşım ekserji yakıt-ürün yaklaşımı ile ekserji verimi hesaplamaktır. Çünkü bu metot ile hem sistem geneli için hem de sistemin her bir bileşeni için ekserji verimi ve kayıpları daha sağlıklı yapılabilmektedir. Bu ifadeyi şöyle ifade edebiliriz:

$$\varepsilon_{\text{liq}} = \frac{\sum_k \dot{E}x_P}{\sum_k \dot{E}x_F} \quad (16)$$

Şekil 1'deki durum numaraları da dikkate alınarak bu ifade açıldığında aşağıdaki denklemi yazabiliriz:

$$\varepsilon_{\text{liq}} = \frac{\dot{E}x_{\text{H}_2,\text{liq}} - \dot{E}x_{12}}{\dot{W}_{\text{comp}} + \dot{W}_{\text{N}_2} - \dot{W}_{\text{turb}}} \quad (17)$$

Sıvılaştırma çevrimi için etkinlik katsayısı olan COP değeri ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\text{COP}_{\text{liq,act}} = \frac{\dot{Q}_{L,\text{liq}}}{\dot{W}_{\text{liq}}} = \frac{\dot{m}_{12}h_{12} - \dot{m}_f h_f}{\dot{W}_{\text{comp}} + \dot{W}_{N_2} - \dot{W}_{\text{turb}}} \quad (18)$$

Burada $\dot{Q}_{L,\text{liq}}$ sıvılaştırma için hidrojenden atılan ısı miktarını göstermektedir ve \dot{W}_{liq} ise sıvılaştırma için harcanan işi göstermektedir.

Modellenen sistemin geneli için ekserji yakıt-ürün ($F-P$) yaklaşımı ve muadili olan ekserji kaybını ifade eden ekserji verimi ifadesi şöyledir:

$$\varepsilon_{\text{overall}} = \frac{\sum_k \dot{E}x_P}{\sum_k \dot{E}x_F} = 1 - \frac{\sum_k \dot{E}x_D}{\sum_k \dot{E}x_F} \quad (19)$$

Ayrıca, ekserji verimini sisteme toplam girenlerin ekserji ve sistemden toplam çıkanların ekserjisi olarak hesaplamak istersek, aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\varepsilon_{\text{overall}} = \frac{\dot{E}x_{\text{liq},H_2} - \dot{E}x_{11}}{\dot{E}x_{\text{geo,in}} + \dot{W}_{\text{comp}} + \dot{W}_{\text{nit}} - \dot{W}_{\text{turb}} - \dot{W}_{\text{geo}}} \quad (20)$$

Bu denklemde sisteme giren toplam ekserjiyi jeotermal akışkanın ekserjisi ve sisteme olan iş girdileri olan kompresör ve türbin işleri göstermektedir. Sistemden çıkanların toplam ekserjisini ise, 11 durumunda gaz olarak sisteme giren hidrojenin sıvı halinde çıkışında arasındaki ekserji farkı ifade etmektedir.

Burada sisteme net enerji girdisi jeotermal akışkanın ekserjisi ve sıvılaştırma için harcanan iş oluşturmaktadır. Sistemden net üretilen enerji kısmını ise, sıvılaştırma çevriminin ısı yükü ifade etmektedir. Böylece modellenen sistem için genel bir etkinlik katsayısı yazmak istersek aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\text{COP}_{\text{overall}} = \frac{\dot{Q}_{L,\text{liq}}}{\dot{E}x_{\text{geo,in}} + \dot{W}_{\text{liq}} - \dot{W}_{\text{geo}}} \quad (21)$$

Bir termodinamik sistemin detaylı ekserji analizi yapılırken her bir bileşenin ekserji yıkımı oranı da hesaplanmalıdır. Sürtünme, karışım, kimyasal tepkimeler, sonlu bir sıcaklık farklı aracılığı ile ısı geçişi, serbest genişleme, sanki-dengeli olmayan sıkıştırma veya genişleme gibi tersinmezlikler daima entropi üretir ve entropi üreten herhangi bir şey o sistemin ekserjisini yok eder. Yani sistemden ekserji kaybı olmaktadır. Bu kayıplar sistem bileşenleri bazında incelenmelidir. Hesaplanan bu ekserji kaybının, sisteme olan toplam ekserji girdisine oranı ve sistemdeki toplam ekserji kaybı ile aralarındaki ilişki hesaplanmalı ve incelenmelidir. Bu durumda, düzenli hal ve akışa sahip bir bileşenin ekserji kaybı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{E}x_{\text{dest}} = T_0 \dot{S}_{\text{gen}} \quad (22)$$

Burada, \dot{S}_{gen} bileşenin entropi üretimi miktarını ifade eder. Ekserji kaybı denklem 22'den da görülebileceği gibi entropi üretimi ile orantılıdır. Sistemdeki yok olan ekserji, kaybedilen iş potansiyelini temsil eder ve buna aynı zamanda tersinmezlik veya kayıp iş de diyebiliriz. Herhangi bir sistem bileşeninin sisteme sağlanan toplam ekserji girdisine oranı o bileşenin ekserji yıkım oranını ifade eden bir parametre olarak karşımıza çıkar. Bu bileşenin yıkım oranını aşağıdaki gibi ifade edebiliriz[19]:

$$y_{dest,k} = \frac{\dot{E}x_{dest,k}}{\dot{E}x_{fuel}} \quad (23)$$

Alternatif olarak, herhangi bir sistem bileşeninin ekserji yıkım oranı sistemin toplam ekserji yıkım oranına kıyaslanarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir[19]:

$$y_{dest,k}^* = \frac{\dot{E}x_{dest,k}}{\dot{E}x_{dest,total}} \quad (24)$$

Yukarıda tanımlanan, iki ekserji yıkım oranı parametresi de, sistemin çeşitli bileşenlerinin sistem üzerindeki ve birbirleri arasındaki toplam ekserji kayıplarının kıyaslanmasında ve yorumlanmasında kullanışlı olacaktır.

4. SİSTEMİN EKONOMİK VE TERMÖKONOMİK ANALİZİ

Bir termodinamik sistemin modellenmesinin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için projede yer alan ilk yatırım ve işletme maliyetleri, giren yakıtın ve çıkan ürünün maliyetleri, bakım masrafları gibi ana maliyetler hakkında bir ön tahmin ile, mühendislik ekonomisinden alınan teknikler, çevresel düzenlemeler, teknolojik ve ekonomik girdiler ile ilişkili olarak çeşitli kabul ve düzenlemelerin göz önüne alınması gereklidir[20]. Termodinamik sistemler için, tasarım özelliğine etki eden en büyük faktörlerden birisi son ürünün maliyetidir. Bu durumda nihai maliyeti, belli bir ürünü üretmek, taşımak ve pazarlamak için ödenen fiyat olarak tanımlayabiliriz. Bir ürünün pazar fiyatı, genel olarak sadece istenen kâr ve ürünün üretim maliyetlerinden etkilenmez, aynı zamanda sübvansiyon, düzenleme, rekabet, talep gibi diğer ekonomik faktörlerden de etkilenir.

Termodinamik sistemlerin ekonomik analizinde, sisteme giren yakıt maliyetleri, işletme ve bakım giderleri gibi masrafların giriş değerlerini bilmek önemlidir. Bununla birlikte bu maliyet bileşenlerinin değerleri ekonomik ömür içerisinde önemli bir şekilde değişebilir. Bu yüzden bütün maliyet bileşenleri için seviyelendirilmiş değerler, sistemin değerlendirilmesinde ve maliyet analizinde kullanılmış olmalıdır. Seviyelendirilmiş maliyet aşağıdaki gibi tanımlanabilir[21]:

$$A = CRF \sum_{m=1}^n P_m = \frac{i_{eff} (1+i_{eff})^n}{(1+i_{eff})^n - 1} \sum_{m=1}^n P_m \quad (19)$$

ve

$$P_m = C_m \frac{1}{(1+i_{eff})^m} \quad (20)$$

Bir termal sistemin “k” bileşeni için ilk yatırım, işletme ve bakım masrafları ile ilgili maliyet oranının ifadesi ise aşağıdaki gibidir[20]:

$$\dot{Z}_k = \left[\frac{CC_L + OMC_L}{\tau} \right] \frac{PEC_k}{\sum_k PEC_k} \quad (21)$$

Yukarıdaki eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim ilk yatırım maliyetini (\dot{Z}^{CI}), ikinci terim ise işletme ve bakım masraflarını (\dot{Z}^{OM}) ifade etmektedir. Sisteme giren kaynak giderlerinin seviyelendirilmiş maliyet oranı ise aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{C}_{EX} = \frac{EXC_L}{\tau} \quad (22)$$

Konvansiyonel bir ekonomik analizde, fiyat dengesi yazılırken genellikle bütün sistem maliyetleri aşağıdaki ilişkide ifade edildiği şekilde formüle edilebilir[20]:

$$\dot{C}_{P,TOT} = \dot{C}_{F,TOT} + \dot{Z}_{TOT}^{CI} + \dot{Z}_{TOT}^{OM} \quad (23)$$

Sistemin ürünü ile ilişkili maliyet değeri \dot{C}_P , ürünün üretilmesi sırasında oluşan maliyetler toplamına eşittir. Bu maliyetler, yakıt maliyeti \dot{C}_F , ilk yatırım ile ilgili maliyet \dot{Z}^{CI} ve işletme ve bakım \dot{Z}^{OM} masraflarından oluşmaktadır. Bir yakıt ve ürün ile ilişkili tek bir akım söz konusu olduğunda, yakıt ve ürün akışı kullanılır. \dot{Z}^{CI} ve \dot{Z}^{OM} değerleri sırasıyla yıllık işletme ve bakım maliyetleri ile sermaye yatırımlarının yıllık katkılarına ve sistemin bir yılda çalıştığı zaman biriminin değerine bölünmesiyle elde edilir. Bu iki değişkenin toplamı \dot{Z} ile gösterilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{Z} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (24)$$

Literatürde birçok termoekonomik maliyet hesaplama yaklaşımı mevcuttur. Biz yaygın olan ve uygulaması daha pratik ve makul değerlendirilebilecek sonuç verebilen SPECO (özgül ekserji maliyeti hesaplama metodu) metodu kullanacağız. SPECO uygulamasının temel ilkeleri, madde ve enerji akımlarının yerine doğrudan ekserji akımlarına uygulanmasıdır[22]. Bileşenlerin yakıt ve ürünlerinin sistematik bir şekilde tanımı için yerel ortalama maliyetlerin ve bu maliyetlerin hesaplamasında kullanılan yardımcı maliyet denklemlerinin çıkarılabilmesi için yakıt-ürün temeline dayanan değerlendirmenin elverişli olduğu literatürdeki çalışmalarla kanıtlamıştır. SPECO metodu aşağıdaki şu adımdan oluşur: Ekserji akımlarının belirlenmesi termodinamik analiz ile ve her bir sistem bileşeni için yakıt ve ürünün belirlenmesi ise SPECO metot ile maliyet denklemleri ve yardımcı eşitliklerin çıkarımı ise termoekonomik analiz ile yapılır.

Yakıt (\dot{F}) yaklaşımı ise, bir ekserji akımı içerisinde herhangi bir sistem bileşeninden ekserjinin çıkarılması olarak tanımlanır. Yakıtın belirlenmesinde giriş ve çıkış arasındaki ekserji farkı göz önüne alınır. Ürün (\dot{P}) yaklaşımı ise, ilgili sistem bileşeninin içindeki bir ekserji akımına ayrıca ekserji eklenmesi durumu ile ilişkilidir. Ürün yaklaşımı, sistem bileşeni içinde ürün olarak tanımlanan akımlara eklenecek her ekserji akımının aynı ortalama maliyette olduğunu kabul eder. Bu kural, ürün akım sayısının bir eksiği kadar ilave yardımcı denklem çıkarılmasını sağlar.

Sistemlerdeki kütle, ısı ve iş akışlarının kullanılabilir termodinamik değerlerinin ekserji ile belirlenebilir olmasından dolayı, termal sistemlerde maliyet ataması yapılırken ekserjinin kullanılması anlamlıdır. Termoekonomi; kaçınılmaz bir biçimde çevre ile etkileşimde olan termal bir sistemin, bu etkileşimlere maliyetin atanması ile meydana gelen son derece gerçekçi bir değerlendirme yöntemidir[20]. Bu uygulama 'ekserjinin maliyetlendirilmesi' olarak adlandırılır. Ekserjinin maliyetlendirilmesinde her bir ekserji akımı karakteristik bir maliyetle ilişkilidir. Böylece sisteme giren ve çıkan ekserji ile ilişkili maliyet, ekserji ile ilişkili güç ve ısı akımı aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir,

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}x_i = c_i (\dot{m}_i e x_i) \quad (25)$$

$$\dot{C}_e = c_e \dot{E}x_e = c_e (\dot{m}_e e x_e) \quad (26)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (27)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}x_q \quad (28)$$

Yukarıdaki eşitliklerde c_i , c_e , c_w , ve c_q sırasıyla sistem giriş ve çıkışında, iş ve ısıya bağlı birim madde akış ekserjisinin ortalama maliyetini temsil eder. Bunların maliyet oranları ise, \dot{C}_i , \dot{C}_e , \dot{C}_w and \dot{C}_q ile gösterilir. $\dot{E}x_i$ ve $\dot{E}x_e$ giriş ve çıkıştaki ekserji oranlarını, \dot{W} gücü, $\dot{E}x_q$ ısı transferi ile ilişkili ekserji oranını ifade eder. Buradan hareketle, bir sistem bileşeni için alınan ısı ve üretilen güce bağlı ekserjetik maliyet dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sum_e (c_e \dot{E}x_e)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}x_{q,k} + \sum_i (c_i \dot{E}x_i)_k + \dot{Z}_k \quad (29)$$

Yukarıdaki eşitlik, bir sistem bileşeni için sistemden çıkan ekserji akımının toplam maliyetinin, bu maliyeti hesaplayabilmek için gerekli olan tüm harcamalara eşit olduğunu basit bir şekilde ifade eder: giren ekserji akımının maliyeti artı ilk yatırım ve diğer maliyetler. Bu maliyet denge eşitliğinde dikkat edilmesi gerekli husus, bir bileşene iş girdiğinde (pompa ve kompresördeki gibi) sol taraftaki ikinci terim bu ifadenin sağ tarafına pozitif işaretiyle birlikte yazılmalıdır. Maliyet dengesinde tüm terimler pozitif olarak yazılır. Herhangi bir k bileşeni için giren ve çıkan ekserji oranları ekserji ilişkilerinin kullanılmasıyla hesaplanır. \dot{Z}_k terimi ilk olarak k bileşeni ile ilişkili ilk yatırım ve işletme ve bakım maliyetlerinin hesaplanmasıyla daha sonra sistem çalışmasının birim zamandaki (yıl, saat, saniye) seviyelendirilmiş değerlerinin hesaplanmasıyla elde edilebilir.

5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Aşağıda verilen Tablo 1’de modellenen sistemin durumlar bazında basınç, sıcaklık ve akışkanların termodinamik özellikleri verilmiştir. Ayrıca jeotermal suyun, izobütan ve havanın ekserji değerleri verilmiştir. Verilen termodinamik değerler Şekil 1’deki sistemin durum numaralarına göre. Sistemin ölü hal özellikleri 25°C ve 100 kPa kabul edilerek ekserji oranları hesaplanmıştır ve Tablo 1’de ona göre verilmiştir. Akışkanın, jeotermalin ve hidrojenin termodinamik özellikleri bilgisayar simülasyon programı olan EES aracılığıyla hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplamalarda EES ve Aspen Plus programında yapılan simülasyonlara göre sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Şekil 1’de verilen sistemin termodinamik verileri.

Durum	Akışkan	Basınç P (kPa)	Sıcaklık T (°C)	Kütle debisi \dot{m} (kg/s)	Entalpi h (kJ/kg)	Entropi s (kJ/kg·K)	Özgül ekserji ex (kJ/kg)	Ekserji $\dot{E}x$ (kW)
0	Jeotermal	100	25	100	104.8	0.3672	0	0
0'	İzobütan	100	25	60.8	599	2.515	0	0
0''	Hava	100	25	2793	298.6	5.699	0	0
0'''	Hidrojen	100	25	1	3929	53.37	0	0
1	Jeotermal	1555	200	100	852.3	2.331	162.3	16227
2	Jeotermal	600	159	100	852.3	2.352	155.9	15591
3	Jeotermal	600	159	8.72	2756	6.759	746.4	6509
4	Jeotermal	10	45	8.72	2233	7.049	137	1194
5	Jeotermal	10	45	8.72	191.8	0.649	2.851	24.86
6	Jeotermal	600	159	91.28	670.40	1.931	99.5	9082
7	Jeotermal	600	76	91.28	318.6	1.029	16.51	1507
8	İzobütan	2100	149	60.8	802.7	2.689	151.5	9209
9	İzobütan	400	100	60.8	732.5	2.722	71.27	4332
10	İzobütan	400	30	60.8	270.8	1.245	50.03	3041
11	İzobütan	2100	31	60.8	274.5	1.246	53.15	3231
12	Hidrojen	100	25	1	3929	53.37	0	0
13	Hidrojen	5000	25	1	3951	37.24	4844	4844
14	Hidrojen	5000	-113	1	2015	28.55	5497	2199
14'	Hidrojen	5000	-113	0.6	2015	28.55	5491	3294.6
15	Hidrojen	5000	-210	0.4	732.4	16.07	7934	3174
16	Hidrojen	5000	-226	0.4	450.7	10.85	9209	3683
17	Hidrojen	100	-253	0.4	450.7	22.17	5833	2333
18	Hidrojen	100	-208	0.236	926	34.61	2602	614

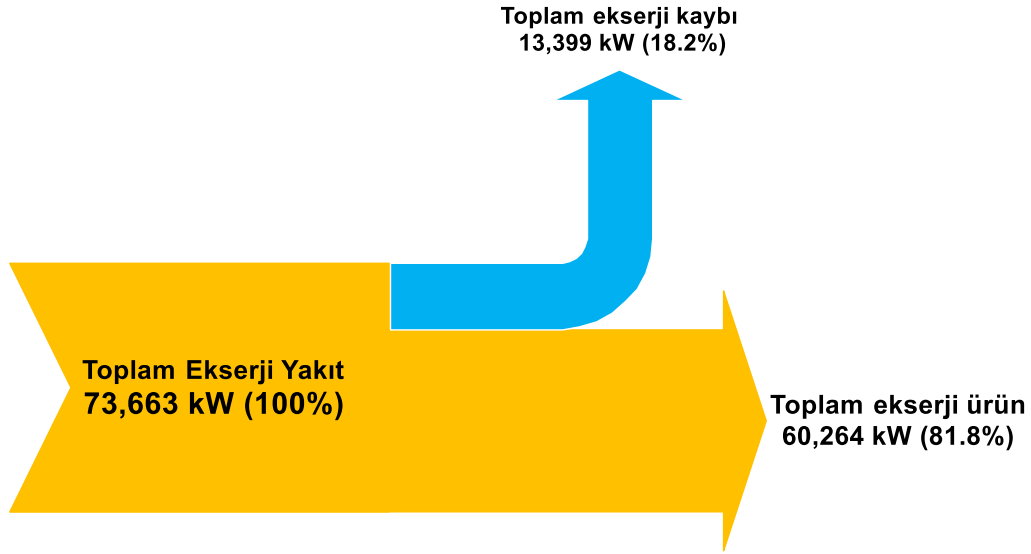
19	Hidrojen	100	-201	0.836	999.7	35.69	2355	1968
20	Hidrojen	100	-143	0.836	1613	25.76	5925	4954
e	Hidrojen	100	-210	0.6	904.5	34.27	2681	1608
g	Hidrojen	100	-253	0.236	448.4	22.06	5833	1376
f	Hidrojen	100	-253	0.164	0.001913	0.00009282	11974	1963.7
geo,rein	Jeotermal	36	74	100	307.6	0.9971	14.92	1492

Bu çalışmada modellenen sistem, yüksek sıcaklıktaki jeotermal akışkan doğrudan birleşik püskürtmeli binary güç çevriminde elektrik üretiminde kullanılarak sıvılaştırma çevrimin enerji ihtiyacını karşılamak üzere kullanılmaktadır. Burada 200°C'de ve 100 kg/s debide olan jeotermal suyla güç çevriminde EES programı ile yapılan simülasyonda 7572 kW iş üretilmektedir. Sistemin Claude sıvılaştırma çevriminde ise, 12 durumunda 25 °C ve 100 kPa basınçta birim hidrojen sıvılaştırılması için gerekli iş, idealde 11097 kJ/kg sıvı hidrojen (3.08 kWh/kg sıvı hidrojen) olarak hesaplanmıştır. Bu değer sıvılaştırma çevrimi için gerekli termodinamik kabuller yapılarak EES programıyla bilgisayar ortamında gerçek olarak çalıştırıldığında, birim hidrojenin sıvılaştırılması için gerekli iş 54,292 kJ/kg sıvı hidrojen (15.08 kWh/kg sıvı hidrojen) olarak hesaplanmıştır. Bu da şu demek oluyor, bu modellemede birim zamanda 0.14 kg/s sıvılaştırılıyor. Başka bir ifade ile 1 kg jeotermal su ile 0.0014 kg hidrojen sıvılaştırılabilir. Sistem bileşenlerinin enerji ve ekserji değerleri, ekserji verimi ve kayıpları Tablo 2'de verilmiştir. Jeotermal güç çevrimi kısmının enerji ve ekserji verimleri %10.4 ve %46.6 olarak hesaplanmıştır. Sıvılaştırma çevriminin ekserji verimi, aynı zamanda "figüre of merit (FOM)" diye adlandırılan ifade ile %20.4 olarak hesaplanmıştır. Bu ifade birim hidrojenin sıvılaştırılması için gerekli ideal ve gerçek iş oranını göstermektedir. Fakat biz tablolar kısmında, sisteme giren yakıt ekserjisi ve sistemden çıkan ürün ekserjisi olarak ifade edeceğiz. Çünkü sistemlerin termoekonomik analiz ve optimizasyonunda bu yaklaşım önem arz etmektedir. Ayrıca Tablo 2'de sistem geneli ve sistem bileşenlerinin enerji ve ekserji oranları yakıt ürün yaklaşımı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Sistem geneli ve her bir sistem bileşeni için ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Her bir sistem elemanında da ekserji verimi hesaplanmıştır.

Tablo 2. Jeotermal enerji destekli hidrojen sıvılaştırma sisteminin alt bileşenlerinin enerji ve ekserji özellikleri.

Bileşenler	\dot{Q} (kW)	\dot{W} (kW)	\dot{E}_{x_F} (kW)	\dot{E}_{x_P} (kW)	\dot{E}_{x_D} (kW)	γ^* (%)	γ (%)	ϵ (%)
Buhar türbini	-	4562	5314	4562	752	13	1.25	85.85
İzobütan türbini	-	4270	4877	3238	607	10.5	1.01	87.57
Pompa	-	223.5	223.5	190.2	33.36	0.6	0.06	85.07
Isı değiştirici	32112.3	-	7575	5978	1597	28	2.66	78.91
Hava soğutmalı kondenser	28066.8	-	1291	433.8	857.2	15	1.43	33.59
Su soğutmalı kondenser	17799.3	-	1170	300.8	868.3	15	1.45	25.72
Ayrıştırıcı	85230	-	15591	15591	0	0	0	100
Kısılma vanası	85230	-	16227	15591	636	11	1.06	96.08
Kompresör	-	5672	5672	4844	827.5	-	-	85.41
Isı değiştirici I	1192	-	4561	2718	1842	-	-	60
Isı değiştirici II	532.4	-	2824	1050	1774	-	-	37.18
Isı değiştirici III	93.4	-	632	434.5	197.5	-	-	68.75
Türbin	-	666.5	1690	666.5	1023	-	-	40
J-T vanası	-	-	3683	2333	1350	-	-	63.34
Reseptör	-	-	2333	2333	0	-	-	100
Sistem geneli	165026	15394	73663.4	60264	13399.4	-	-	81.8

Aşağıda Şekil 4'te sistemin geneli için ekserji akış diyagramı ekserji yakıt-ürün yaklaşımına göre verilmiştir. Modellenen sistemin geneli için düşünüldüğünde ekserji akış şeması görülmektedir.



Şekil 4. Modellenen jeotermal hidrojen sıvılaştırma sisteminin geneli için ekserji akış diyagramı.

Tablo 3'te sistem bileşenlerinin zamana bağlı maliyet değerleri türetilmiştir. Burada maliyetlerin levelize edilmesi gerekmektedir. Toplam maliyetin gerekli geri ödeme miktarı ve işletme bakım maliyetlerinin levelize edilmiş değerler ile zamana bağlı maliyet akışları hesaplanmıştır.

Tablo 3. Sistem bileşenlerinin ilk yatırım (PEC) ve işletme ve bakım maliyetleriyle (OMC) ilişkili maliyet oranları (Maliyet değerleri 2014 yılı Ocak Amerikan Doları (\$) ortalama değeri esas alınarak çıkarılmıştır, Aspen PlusV8.4 Programı güncel ekonomik veri tabanları kullanılmıştır).

Model bileşenleri	PEC ($\times 10^3$ \$)	Z_k^{CI} (\$/h)	Z_k^{OM} (\$/h)	Z_k^I (\$/h)
Flaş vanası	20.500	0.5289	0.1564	0.685
Seperatör	65.200	1.682	0.4973	2.179
Buhar türbini	942.600	24.32	7.19	31.51
Su soğutmalı kondenser	242.900	6.266	1.853	8.119
Binary ısı değiştirici	348.600	8.993	2.659	11.65
İzobütan türbini	973.400	25.11	7.425	32.54
Hava soğutmalı kondenser	229.900	5.931	1.754	7.685
Pompa	153.400	3.957	1.17	5.128
Kompresör	7,620.000	196.6	58.12	254.7
Isı değiştirici I	69.300	1.788	0.5286	2.316
Isı değiştirici II	21.600	0.5572	0.1648	0.722
Isı değiştirici III	11.800	0.3044	0.09	0.394
Türbin	122.800	3.168	0.9366	4.105
J-T vanası	20.500	0.5289	0.1564	0.685
Ayrıştırıcı	22.700	0.5856	0.1731	0.758
Diğer sistem bileşenleri	500.000	12.9	3.814	16.71
Toplam ilk yatırım Maliyetleri (PEC)	11,355.500			
İşletme ve bakım Maliyetleri (OMC)	2,766.390			

SPECO yöntemi temel alınarak, modellenen sistem için F ve P prensibi yardımıyla sistem bileşenleri için yeterli sayıda yardımcı eşitlik geliştirilmiş ve bu eşitlikler ile ekserjiye bağlı maliyet denge denklemi olarak Tablo 4'te verilmiştir. Teknik kabuller yapılarak yardımcı eşitlikler yazılmış ve buna göre bilgisayar ortamında Aspen Plus programında kodlanarak çözümlenmiştir.

Tablo 4. Jeotermal enerjiyle elde edilen enerji ile hidrojen gazının sıvılaştırma çevriminde sıvılaştırılması olan sistemin alt bileşenlerinin ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.

Model bileşenleri	Ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri	Yardımcı eşitlikler
Kısılma vanası	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_{EV} = \dot{C}_2$	c_1 (biliniyor, jeotermal) c_2 (değişken)
Seperatör	$\dot{C}_2 + \dot{Z}_{SEP} = \dot{C}_3 + \dot{C}_6$	$c_3 = c_6$
Buhar türbini	$\dot{C}_3 + \dot{Z}_{ST} = \dot{C}_{W_{ST}} + \dot{C}_4$	c_{ST} (değişken) $c_4 = c_{63}$
Su soğutmalı kondenser	$(\dot{C}_4 - \dot{C}_5) + \dot{Z}_{WCC} = \dot{C}_b - \dot{C}_a$	$c_5 = c_4$ $c_a = 0$ c_b (değişken)
İzobütan türbini	$\dot{C}_8 + \dot{Z}_{IT} = \dot{C}_{W_{IT}} + \dot{C}_9$	c_{IT} (değişken) $c_9 = c_8$
Binary ısı değiştirici	$(\dot{C}_6 - \dot{C}_7) + \dot{Z}_{HE} = (\dot{C}_8 - \dot{C}_{11})$	$c_7 = c_6$ c_8 (değişken)
Hava soğutmalı kondenser	$(\dot{C}_9 - \dot{C}_{10}) + \dot{Z}_{ACC} = (\dot{C}_d - \dot{C}_c)$	$c_{10} = c_9$ $c_c = 0$ c_d (değişken)
Pompa	$\dot{C}_{10} + \dot{Z}_P + \dot{W}_P = \dot{C}_{11}$	c_5 (biliniyor) c_6 (değişken)
Kompresör	$\dot{C}_{12} + \dot{Z}_{COMP} + \dot{W}_{COMP} = \dot{C}_{13}$	c_{12} (biliniyor) c_{13} (değişken)
Isı değiştirici 1	$(\dot{C}_{12} - \dot{C}_{20}) + \dot{Z}_{HE1} = (\dot{C}_{13} - \dot{C}_{14})$	$c_{20} = c_{12}$ c_{14} (değişken)
Isı değiştirici 2	$(\dot{C}_{20} - \dot{C}_{19}) + \dot{Z}_{HE2} = (\dot{C}_{14} - \dot{C}_{15})$	$c_{19} = c_{20}$ c_{15} (değişken)
Isı değiştirici 3	$(\dot{C}_{18} - \dot{C}_{gas}) + \dot{Z}_{HE3} = (\dot{C}_{15} - \dot{C}_{16})$	$c_{18} = c_{gas}$ c_{16} (değişken)
Ayrıştırıcı	$\dot{C}_{17} + \dot{Z}_{REC} = \dot{C}_{gas} + \dot{C}_{liquid}$	$c_{liquid} = c_{gas}$
J-T vanası	$\dot{C}_{16} + \dot{Z}_{EV3} = \dot{C}_{17}$	

Türbin	$\dot{C}_{14'} + \dot{Z}_{TURB} = \dot{C}_{W_{TURB}} + \dot{C}_e$	$c_e = c_{14'}$ c_{TURB} (değişken)
--------	---	---

Toplam maliyetin gerekli geri ödeme miktarı ve işletme bakım maliyetlerinin levelize değerleri ile zamana bağlı maliyet akışları hesaplanmış ve Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Jeotermal enerjiden hidrojen üretimi sisteminin durum numaralarına göre ekserji akışı, maliyet akışı ve birim ekserji maliyet akışları gösterilmiştir.

Durum	\dot{E}_x (kW)	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/h)	Genel maliyet
1	16227	0.5779	33.76	
2	15591	0.6137	34.44	
3	6509	0.6525	15.29	
4	1194	0.6525	2.805	
5	24.86	0.6525	0.058	
6	9082	0.6525	21.33	
7	1507	0.6525	3.540	
8	9209	15.6	517.3	
9	4332	15.6	243.3	
10	3041	15.6	170.8	
11	3231	41.94	487.8	
12	0	26.89	0	
13	4844	6.048	105.5	
14	2199	6.048	47.88	
14'	3295	6.048	71.73	
15	3174	7.043	80.47	
16	3683	7.043	93.38	
17	2333	11.2	94.06	
18	614	4.848	10.72	
19	1968	3.099	21.96	
20	4954	3.099	55.27	
geo,rein	1492	0.669	3.598	
e	1608	6.048	35.01	
g	1376	4.848	24.02	
f	1964	10.22	72.22	
\dot{W}_P	223.2	11.02	8.85	
\dot{W}_{IT}	4270	19.94	306.5	
\dot{W}_{ST}	4562	2.68	44.01	
\dot{W}_{COMP}	5672	10.38	211.9	
\dot{W}_{TURB}	666.6	17.02	40.85	
Sıvı hidrojen	-	-	-	1.229 \$/kg

Jeotermal santralden hidrojen sıvılaştırma çevriminde kullanılmak üzere üretilen elektriğin birim ekserjetik enerji maliyeti 10,8 \$/GJ (0,0386 \$/kWh) olarak hesaplanmıştır. Sıvılaştırma işinin ucuz olan enerji kaynağı kullanılarak yapılmasıyla, sıvılaştırma çevrimine 12 durumunda atmosfer şartlarında ve 26,9 \$/GJ (3.232 \$/kg H₂) ekserjetik enerji maliyetiyle giren hidrojen gazı çevrimi sıvı olarak 10.2 \$/GJ



(1.229 \$/kg H₂) ekserjetik enerji maliyeti ile terk etmektedir. Yani modellenen sistemde, ana sıvılaştırma çevrimine nazaran sıvılaştırılan hidrojenin ekserjetik maliyeti %38,2 olarak azalmaktadır. Sıvılaştırma çevrimine 25°C'de 26.9 \$/GJ ekserjetik enerji maliyeti ile giren hidrojen gazının, çevrimi -252.9°C'de ve 10.2 \$/GJ ekserjetik enerji maliyeti ile sıvı olarak terk ederek, %62 oranında ekserjetik maliyetinde düşüş olmaktadır.

7. SONUÇ

Jeotermal enerji bugün birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır. Türkiye de özellikle Ege Bölgesinde zengin jeotermal kaynaklara sahip olduğu bilinmektedir. Bu kaynakların yüksek sıcaklıkta olanları elektrik üretiminde ve bölge ısıtmasını içine alan kojenerasyon uygulamalarında orta ve düşük sıcaklıktaki kaynaklar ise ısıtma, soğutma, endüstriyel uygulamalar ve seracılık gibi uygulamalarda yaygın kullanım alanı bulabilirler. Ekonomik olarak yenilebilir enerji kaynaklarının ısıtma ve soğutmada kullanılması elektrik üretiminde daha karlı olmaktadır.

Yapılan çalışmada, jeotermal destekli Claude sıvılaştırma sisteminin bilgisayar ortamında EES programıyla termodinamik (enerji ve ekserji) ve termoekonomik analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları grafikler ve çizelgeler halinde verilmiştir. Jeotermal su için 200°C ve 100 kg/s olarak dikkate alınarak sıvılaştırma yükü ve COP hesaplamaları yapılmıştır. Hidrojen üretimi ve sıvılaştırılması prosesleri elektriğin birim maliyeti ile doğrudan ilişkilidir. Jeotermal kaynak sıcaklığı da üretilen iş veya elektriğin maliyetini de doğrudan etkilemektedir. Artan jeotermal kaynak sıcaklığı ile hidrojen üretimi ve sıvılaştırılması maliyeti de düşüş göstermesi beklenebilir.

Bütün sonuçlar beraber değerlendirildiğinde jeotermal enerjinin hidrojen sıvılaştırılması sistemlerinde kullanımı için farklı yaklaşımlar geliştirilebileceği ve bunların termodinamik açıdan başarıyla uygulanabileceği görülmektedir. Jeotermal enerjiden üretilen elektriğin birim maliyeti, diğer enerji kaynaklarına oranla daha düşüktür. Bu maliyet entegre sistemler söz konusu olduğunda daha da düşmektedir. Elde edilen veriler ile ve literatüre bakıldığında, farklı metodlarla hidrojen sıvılaştırma maliyeti karşılaştırıldığında jeotermal destekli hidrojen sıvılaştırılmasının rekabetçi bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 113M207 nolu proje kapsamında TÜBİTAK desteği ile yürütülen bir çalışmadır. TÜBİTAK'a desteğinden dolayı teşekkür ederiz.

SEMBOLLER

c	birim ekserji maliyeti (\$/GJ)
\dot{C}	zamana bağlı ekserji maliyet oranı (\$/h)
C_m	yıllık ödeme miktarı (\$/y)
\dot{E}_x	ekserji oranı (kW)
$\dot{E}_{x_{dest}}$	ekserji yıkım oranı (kW)
$\dot{E}_{x_{heat}}$	ısı transfer olan ekserji oranı (kW)
h	entalpi (kJ/kg)
i_{eff}	iskonto oranı (%)



\dot{m}	kütleli debi (kg/s)
P_m	paranın şimdiki değeri (\$)
\dot{Q}	ısı transfer oranı (kW)
s	entropi (kJ/kg K)
T	sıcaklık (K)
T_0	çevre sıcaklığı (K)
w	özgül iş (kJ/kg)
\dot{W}	güç (kW)
$y_{dest,k}$	bir bileşenindeki ekserji yıkımının toplam sisteme ekserji girdisine oranı
$y_{dest,k}^*$	bir bileşendeki ekserji yıkımının toplam sistemdeki ekserji yıkımına oranı
\dot{Z}	ilk yatırım maliyeti ve işletme bakım giderleri maliyetleri toplamının zamana bağlı değişken ifadesi (\$/h)
\dot{Z}^{CL}	ilk yatırım maliyetinin oranı (\$/h)
\dot{Z}^{OM}	işletme ve bakım maliyetinin oranı (\$/h)
CRF	kapital geri kazanım faktörü
PEC	bileşenlerin alım maliyeti
CC	taksitli alımlarda ödenen faiz miktarı
OMC	işletme bakım maliyeti
EXC	harcama oranı
COP	etkinlik katsayısı
η	enerji verimi
ε	ekserji verimi
τ	sistemin yıllık çalışma periodu (saat)
eff	efektif
L	levelizasyon (seviyelendirme)
k	herhangi bir sistem bileşeni

KAYNAKLAR

- [1] Hotza, D. ve Diniz da Costa, J.C., Fuel cells development and hydrogen production from renewable resources in Brazil, *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 4915-4935, 2008.
- [2] Sigurvinsson, J., Mansilla, C., Lovera, P. ve Werkoff, F., Can high temperature steam electrolysis function with geothermal heat?, *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (9), 1174-1182, 2007.
- [3] Sigurvinsson, J., Mansilla, C., Arnason, B., Bontemps, Marechal, A., Sigfusson, T.I. ve Werkoff, F., Heat transfer problems for the production of hydrogen from geothermal energy, *Energy Conversion and Management* 47, 3543-3551, 2006.
- [4] Mansilla, C., Sigurvinsson, J., Bontemps, A., Marechal, A. ve Werkoff, F., Heat management for hydrogen production by high temperature steam electrolysis, *Energy* 32, 423-430, 2007.
- [5] Moriarty, P. ve Honnery, D., Intermittent renewable energy: The only future source of hydrogen?., *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 1616-1624, 2007.
- [6] Jonsson, V.K., Gunnarsson, R.L., Arnason, B. ve Sigfusson, T.I., The feasibility of using geothermal energy in hydrogen production, *Geothermics* 21, 673-681, 1992.
- [7] Arnason, B., Sigfusson, T.I. ve Jonsson, V.K., New concepts in hydrogen production in Iceland, *International Journal of Hydrogen Energy* 18(11), 915-919, 1993.
- [8] Syed, M.T., Sherif, S.A., Veziroglu, T.N. ve Sheffield, J.W., An economic analysis of three hydrogen liquefaction systems, *International Journal of Hydrogen Energy* 23(7), 565-576, 1998.



- [9] Syed, M.T., Sherif, S.A., Veziroglu, T.N. ve Sheffield, J.W., Second law analysis of hydrogen liquefiers operating on the modified Collins cycle, *International Journal of Energy Research* 25, 961–978, 2001.
- [10] Nandi, T.K. ve Sarangi, S., Performance and optimization of hydrogen liquefaction cycles”, *International Journal of Hydrogen Energy* 18(2), 131–139, 1993.
- [11] Friedrich, K. ve Hacker, V., The potential for the production of hydrogen from renewable energy sources in Austria, *Energy Markets - The Challenges of the New Millennium, 18th World Energy Congress*, Buenos Aires - Argentina. 21-25 October 2001.
- [12] Ingason, H.T., Ingolfsson, H.P. ve Jensson, P., Optimizing site selection for hydrogen production in Iceland, *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 3632-3643, 2008.
- [13] Hand, T.W., Hydrogen production using geothermal energy, *M.Sc. thesis*, Utah State University, Logan, Utah, 2008.
- [14] Kanoglu, M., Dincer, I. and Rosen M.A., Geothermal energy use in hydrogen liquefaction, *International Journal of Hydrogen Energy* 32 , 4250– 4257, 2007.
- [15] Kanoglu, M., Ayanoglu, A., and Abusoglu, A., Exergoeconomic assessment of a geothermal assisted high temperature steam electrolysis system. *Energy* 36, 7, 4422-4433, 2011.
- [16] Kanoglu, M., Bolatturk, A., and Yilmaz, C., Thermodynamic analysis of models used in hydrogen production by geothermal energy. *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 8783–91, 2010.
- [17] Yilmaz, C., Kanoglu, M., Bolatturk, A., and Gadalla, M., Economics of hydrogen production and liquefaction by geothermal energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37-2, 2058-2069, 2012.
- [18] Timmerhaus K.D., Flynn T.M., *Cryogenic process engineering. The international cryogenic monographs series*. New York: Plenum Press; 1989.
- [19] Szargut J, Morris DR, Steward FR. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [20] Bejan, A., *Advanced Engineering Thermodynamics* (First Ed.), Wiley, New York, 1988.
- [21] Tsatsaronis, G., Moran, M.J., Exergy-aided cost minimization, *Energy Conversion and Management*, 38, 1535-1542, 1997.
- [22] Lazzaretto, A., Tsatsaronis, G., Comparison Between SPECO-Based and Functional Exergoeconomic Approaches, In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition in New York*, 1-16, 2001.

ÖZGEÇMİŞ

Ceyhun YILMAZ

1987 yılı İzmit Kandıra doğumludur. 2009 yılında Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümünü bitirmiştir. Aynı üniversitede Enerji Anabilim dalında 2009'dan bu yana yüksek lisans yapmıştır. 2009-2010 yılında TÜBİTAK 108M226 kodlu araştırma projesinde asistanlık yapmıştır. GAZÜ Makine Mühendisliği'nde Enerji Anabilim dalında asistanlık yapmaktadır. Enerji anabilim dalında 2011 yılında doktora başlamıştır. Şuan doktora kapsamında 113M207 kodlu TÜBİTAK projesinde asistanlık yapmaktadır.

Mehmet KANOĞLU

Mehmet Kanoğlu İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümünü 1992'de bitirdi. Yüksek lisansını ve doktorasını ABD'de Nevada Üniversitesi'nde (University of Nevada, Reno) 1996 ve 1999 yıllarında tamamladı. 2000 yılından beri Gaziantep Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 2006-2007'de University of Ontario Institute of Technology'de ve 2010-2012'de American University of Sharjah'da misafir öğretim üyesi olarak bulunmuştur. Üç uluslararası kitabı ve çok sayıda uluslararası makale ve bildirisi vardır. Çalıştığı alanlar arasında ileri enerji sistemleri, jeotermal enerji, güç santralleri, kojenerasyon, enerji yönetimi ve tasarrufu, soğutma sistemleri, doğal gaz ve hidrojen üretimi ve sıvılaştırması sayılabilir.

**Ayşegül ABUŞOĞLU**

Malatya'da doğdu. 1994 yılında Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1994-2000 yılları arasında sanayide proses suyu hazırlanması, evsel ve endüstriyel su ve atık su arıtımı projelendirilmesi ve marketing işinde çalıştı. 2000 yılında Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Ana bilim dalında yüksek lisans çalışmasına başladı ve 2002 yılında yüksek lisansını tamamladı. Aynı yıl Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı. 2008 yılında doktora çalışmasını tamamlayan araştırmacı 2010 yılında Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne yardımcı doçent olarak atanmıştır, 2014 yılında doçent olmuştur ve halen bu görevini sürdürmektedir. Çalışma alanları; termodinamik, ısı transferi, enerji dönüşüm ve güç üretim sistemleri, kojenerasyon, ekserji analiz ve uygulamaları, eksergoekonomi, atıktan enerji ve hidrojen eldesi çalışmaları.