

JEOTERMAL ENERJİ İLE HİDROJEN ÜRETİLMESİ VE SIVILAŞTIRILMASI

Ceyhun YILMAZ
Mehmet KANOĞLU
Ali BOLATTÜRK

ÖZET

Bu çalışmada, hidrojenin farklı üretim ve sıvılaştırma teknikleri incelenerek jeotermal enerjinin kullanımına uygun metotlar tespit edilmiş ve jeotermal enerjinin kullanılabileceği uygun modeller oluşturulmuştur. Modeller oluşturulurken jeotermal enerjinin doğrudan ısısının kullanılması ve/veya üretilen elektriğin kullanılması gibi farklı alternatifler değerlendirilmiştir. Hidrojen üretim metotları arasında olan ve jeotermal kullanımına uygun olan elektroliz ve yüksek sıcaklıkta elektroliz gibi metotlar öncelikle değerlendirilmiştir. Hidrojen sıvılaştırmasında, jeotermal enerjiden elde edilen elektriğin sıvılaştırma çevrimlerinde kompresör işini sağlamak için kullanımı ve jeotermal ısının absorpsiyonlu soğutma sistemi yardımıyla hidrojenin ön soğutmasında kullanımı gibi alternatifler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, jeotermal enerji, hidrojen üretimi, hidrojen sıvılaştırılması.

ABSTRACT

In this study, the models that can be used in hydrogen production and liquefaction by geothermal energy are investigated and thermodynamic analysis of these models is performed. When structuring the models, alternatives such as direct use of geothermal heat and/or the use of produced electricity are considered. Hydrogen production methods suitable for the use of geothermal energy such as electrolysis and high temperature electrolysis are evaluated. In hydrogen liquefaction, the use of geothermal electricity in liquefaction cycle and the use of geothermal heat in absorption refrigeration process for precooling of hydrogen are examined.

Key Words: Hydrogen production, Hydrogen liquefaction, Absorption cooling, Geothermal energy.

1. GİRİŞ

Dünyadaki fosil kökenli yakıt kaynaklarının giderek azalmasının yanı sıra bunların kullanımı ile oluşan çevre kirliliği ve küresel ısınma son yıllarda enerji üretimi alanındaki çalışmaların yenilenebilir ve temiz enerji üreten kaynaklar üzerine yoğunlaşmasına neden olmuştur. Hidrojen, bazılarınca geleceğin enerji kaynağı olarak görülen ve üzerinde çok sayıda araştırmanın yapıldığı alternatif bir enerji kaynağıdır. Hidrojen geleneksel anlamda bir enerji kaynağı değildir; daha doğru bir ifadeyle enerji taşıyıcısıdır. Hidrojenin geleceğin enerjisi olabilmesi için yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilmesi, depolanması, taşınması ve kullanılması gibi konulardaki teknik ve ekonomik problemlerin aşılması gerekmektedir. Hidrojen, hem fosil kaynakları hem de yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elde edilebilir. Hidrojen üretiminde kullanılan birçok yöntem vardır. Hem elektrik hem de ısı

girdisi gerektirebilen bu metotlarda güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra nükleer enerjinin kullanımı da mümkün görünmektedir. Hidrojen sıkıştırılmış gaz olarak depolanabileceği ve taşınabileceği gibi sıvılaştırılarak sıvı fazında çok daha küçük bir hacimde muhafaza edilebilmesi mümkündür. Hidrojen sıvılaştırması yüksek miktarda enerji tüketimi gerektiren ve ileri soğutma tekniklerinin kullanıldığı bir işlemdir.

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. Sigurvinsson ve ark. [2] jeotermal enerjinin yüksek sıcaklıkta elektroliz işleminde kullanılabilirliğini araştırmış ve jeotermal ısının ısı eşanjörleri yardımıyla gerekli ısının bir bölümünü sağladığı bir sistemin termoeconomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla İzlanda'da bulunan jeotermal kaynakların özellikleri ve fiyatları kullanılmıştır. Sigurvinsson ve ark.[3] jeotermal enerjinin yüksek sıcaklıkta elektroliz işleminde kullanılmasında çıkış sıcaklığının enerji maliyeti üzerindeki etkisini incelemiş ve ısı eşanjörleriyle ilgili parametreleri incelemişlerdir. Sonuçlar, İzlanda'daki jeotermal kaynaklar için bu yöntemin gelecek vaat ettiğini göstermiştir.

Mansilla ve ark.[4] yüksek sıcaklıkta elektroliz işleminde yüksek sıcaklıkta reaktör (nükleer) kullanımı ile jeotermal enerji kullanımını termoeconomik olarak karşılaştırmış ve jeotermal enerji kullanımının avantajlarını ortaya koymuşlardır. Isı eşanjörü optimizasyonu genetik algoritma ile yapılmıştır. Moriarty ve Honnery[5] hidrojen üretiminde güneş, rüzgar, jeotermal, biokütle, hidroelektrik ve nükleer enerji kaynaklarının kullanımını genel çerçevede değerlendirmiş ve rüzgar türbinlerinden elde edilecek elektriğin hidrojen üretiminde kullanımının en uygun metot olduğunu vurgulamışlardır.

Jónsson ve ark.[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 ve ark.[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. Geleneksel teknolojiler kullanılarak yapılan bu hesaplamalarda İzlanda' daki üretimin Amerika' dakinden % 9 daha ekonomik olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca çalışmada, jeotermal enerji destekli hidrojen üretilmesi ve hidrojenin sıvılaştırılması konuları da araştırılmıştır. Jeotermal buhar kullanarak hidrojenin %19 daha az maliyetle üretilbileceği ileri sürülmüştür.

Syed ve ark.[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]. Friedrich ve Hacker yaptıkları çalışmada Avusturya' da yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretim potansiyelini araştırmışlardır[10]. 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, 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 (<120°C) jeotermal enerji kullanılarak termoelektrik güç (Seebeck etkisi) üretimine destek olacağı vurgulanmıştır. Jónsson ve ark.[11] 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 en ekonomik yolları araştırılmıştır.

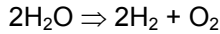
Kanoglu ve ark.[13] jeotermal enerjinin hidrojen sıvılaştırmasında kullanımını araştırmış ve bu amaçla üç model geliştirerek bu modelleri termodinamik olarak incelemişlerdir. Uygun performans kriterleri tanımlanarak jeotermal su sıcaklığının ve hidrojen ön soğutma sıcaklığının performans üzerindeki

etkileri çalışılmıştır. Jeotermal enerjinin kullanımı ile sıvılaştırma için gerekli işin önemli ölçüde azaltılabildiği ortaya konmuştur. Hand,[14] ele aldıkları modelde besleme suyu sıcaklığını jeotermal enerji ile arttırarak elektroliz işleminin veriminin ve diğer parametrelerin değişimini incelemiştir. Hidrojen üretiminin gerçekten çevreci bir proses olması için hem elektrolizde kullanılacak elektrik ve hem de besleme suyuna gerekli ısı jeotermal enerjiden karşılanmıştır. Elektroliz işleminde besleme suyunun çeşitli sıcaklık değerleri için optimizasyon yapılmış olup %17 oranında verim artışı sağlanmıştır.

Bu çalışmada, jeotermal enerji kullanarak hidrojenin üretilmesi ve sıvılaştırılması işlemleri için çeşitli modeller araştırılacak ve bu modellerin temel termodinamik modelleri oluşturulacaktır. Bu modellerde jeotermal enerjinin doğrudan ısısının kullanılması ve/veya jeotermal güç santralinde üretilen elektriğin kullanılması gibi alternatifler değerlendirilecektir. Hidrojenin sıvılaştırılmasında, jeotermal enerjiden elde edilen elektriğin sıvılaştırma çevrimlerinde kompresör işini sağlamak için kullanımı ve jeotermal enerjiden sağlanan ısının absorpsiyonlu soğutma sistemi yardımıyla hidrojenin ön soğutmasında kullanımı gibi alternatifler incelenecektir. Hidrojen üretim metodu olarak elektroliz değerlendirilecektir.

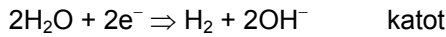
2. HİDROJENİN ELEKTROLİZ İLE ÜRETİMİ

İçinde az miktarda sodyum sülfat olan suyun içinden elektrik akımı geçirilirse elektrotların birinde hidrojen diğerinde oksijen üretilmiş olur. Bu işleme elektroliz denir ve aşağıdaki kimyasal denklemlerle gösterilir:

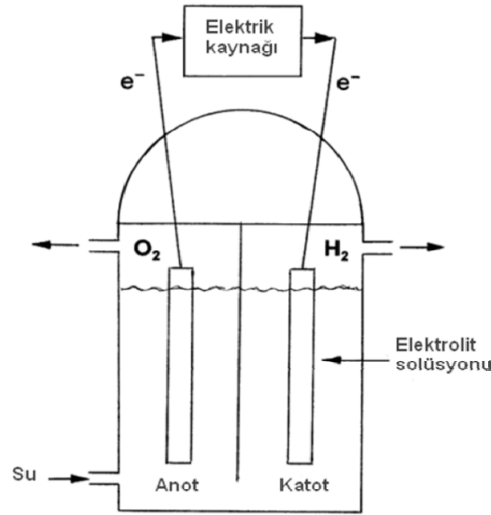


Sıvı suyun Gibbs oluşma fonksiyonu termofiziksel tablolarda 25 °C'de ve 1 atm basınçta –237,180 kJ/kmol olarak verilmektedir. Bu değer aynı zamanda elektroliz için gerekli minimum işin ifadesidir. 1 kg su için bu değer 13,166 kJ olurken, 1kg hidrojen için bu değer 117,650 kJ yani 32.7 kWh olmaktadır. Eğer su 25°C'de buhar fazındaysa minimum iş 1 kg hidrojen üretimi için 113,387 kJ yani 31.5 kWh olacaktır.

Elektroliz işleminde kullanılan üç yöntem vardır: alkaline su elektrolizi, katı polimer elektrolizi ve yüksek sıcaklık buhar elektrolizi (Dutta, 1990)[15]. Alkaline su elektrolizi en yaygın olan yöntemdir (Şekil 3.1). Elektrolit % 25-35 oranında KOH içeren yaklaşık 80°C'de bir solüsyon, elektrolit olarak kullanılır. Elektrot reaksiyonları şöyledir:



Su elektrolizinde harcanan elektrik miktarı yaklaşık 50 kWh/kg hidrojen'dir. Gelişmiş bir alkaline elektrolizer kullanarak elektrik tüketimini yaklaşık 43 kWh'e indirmek için çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca bir inorganik membran kullanarak elektrik tüketimini daha da azaltmak için araştırmalar yapılmaktadır[16].



Şekil 1. Alkaline Su Elektrolizi[16]

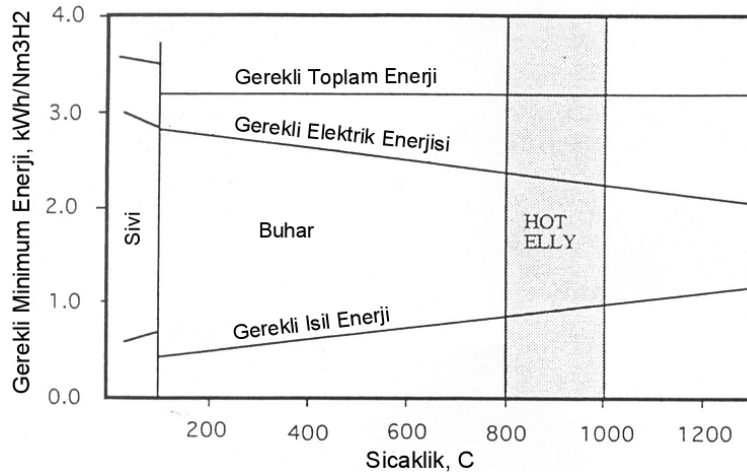
Katı polimer elektrolizi' nde KOH elektrotu yerine elektrotlar arasında bir katı membran kullanılır. Bu membran, iyonize hidrojen atomlarını geçirirken elektronları geçirmez. Membran maddesi olarak nafyon, karbon fiber kağıdı, proton değişim membranı kullanılabilir.

Suyun elektrolizi için, normal basınç ve sıcaklıkta, ideal olarak 1.23 volt yeterlidir. Tepkimenin yavaş olması ve başka nedenlerle, elektroliz işleminde daha yüksek gerilimlerde kullanılır. Hidrojen üretim hızı, gerçek akım şiddeti ile orantılı olduğundan, ekonomik nedenlerle yüksek akım yoğunlukları tercih edilir. Bundan dolayı pratikte suyun ayrıştırılması için hücre başına uygulanan gerilim genelde 2 volt dolayındadır.

Yüksek sıcaklık buhar elektrolizi' nde 1000°C sıcaklığında çalışan yitrium (Y_2O_3) ve zirkonyum oksit (ZrO_2) gibi seramik maddelerden yapılan katı elektrolitler kullanılır. Bu işlemde sıvı su yerine buhar kullanılır. Toplam enerji ihtiyacı:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S$$

formülüyle ifade edilir. Burada ΔG Gibbs enerjisindeki değişim, T sıcaklık, ΔS is entropi farkıdır. ΔG elektrik olarak sağlanması gereken enerjiyi $T\Delta S$ ise ısıl enerjiyi ifade eder. Şekil 2'de görüldüğü gibi ısıl enerji girdisi arttıkça elektrik girdisi azalmaktadır.



Şekil 2. Yüksek Sıcaklık Elektrolizinde Minimum Enerji Girdisinin Sıcaklıkla Değişimi. Taralı Bölge (Hot Elly) Optimum Çalışma Aralığını Göstermektedir[17].

3. JEOTERMAL ENERJİYLE HİDROJEN ÜRETİMİ

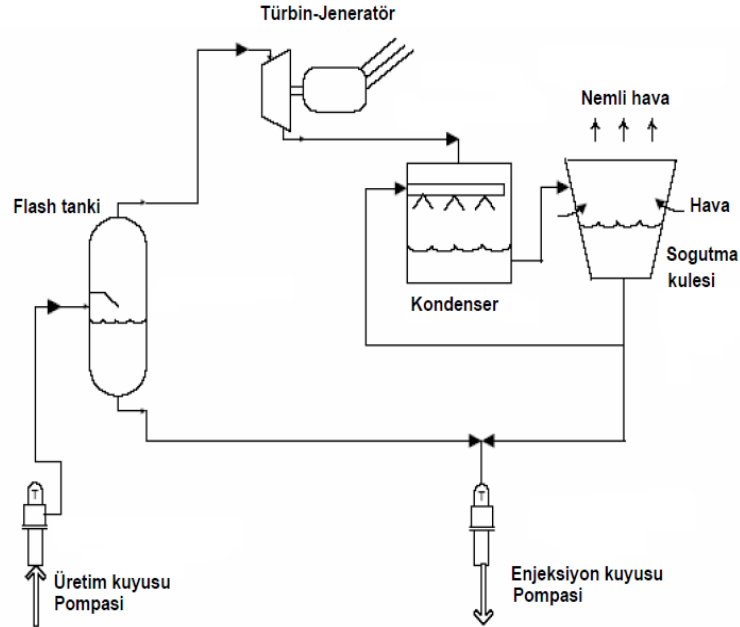
Jeotermal enerji dünyada farklı alanlarda kullanılabilen, yerkürenin derinliklerindeki magmanın ısısının kullanımına dayalı yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bu enerji türü dünyada elektrik üretiminden, balık üretimine kadar değişebilen geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmaktadır. Jeotermal enerji yeraltındaki sıcak suların kullanılmasıyla elde edilir. Genellikle ısınma ve elektrik üretimi için kullanılır. Ülkemiz mevcut jeotermal potansiyelin ancak % 6.3'ünü kullanabilmektedir. Jeotermal enerjiye dayalı modern santrallerde CO₂, NO_x, SO_x salınımının çok düşük düzeyde olması bu kaynağın elektrik enerjisi üretiminde kullanımını cazip hale getirmektedir. Günümüzde yaklaşık 22 ülkede sürdürülen jeotermal kaynaklı elektrik enerjisi üretimi yaklaşık 10000 MWe kapasiteye sahiptir.

Jeotermal enerji kaynakları sıcaklıklarına göre;

- Düşük sıcaklık (90°C'nin altı)
- Ortalama sıcaklık (90–150°C arası)
- Yüksek sıcaklık (150°C'den yüksek)

olarak sınıflandırılır.

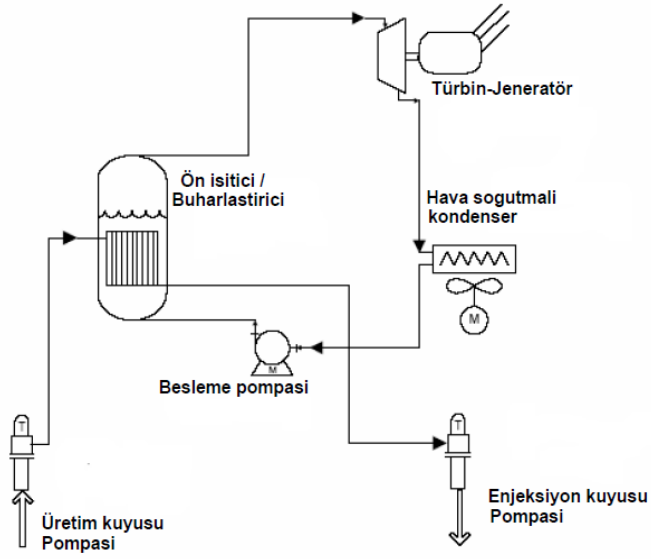
Yeraltından çıkarılan jeotermal akışkanın haline bağlı olarak elektrik üretmek için farklı çevrimler kullanılır. Bu çevrimler arasında, kuru buhar santrali, tek veya çift flaşlı buhar santraller, çift akışkanlı çevrimler ve kombine santraller sayılabilir (Şekil 3-5),[18].



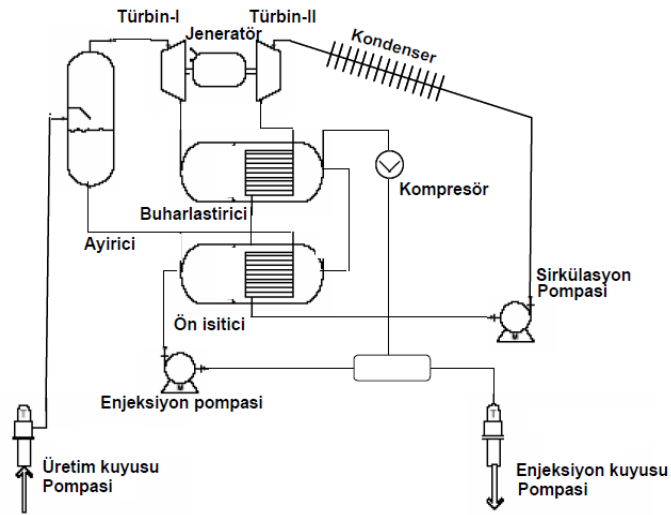
Şekil 3. Tek Flaşlı Jeotermal Güç Santrali

Bu santrallerin bazılarının ısıl verimleri jeotermal su sıcaklıklarına göre % 10–20 arasında değişmektedir. İkincil akışkan kullanan santrallerde bu değerler daha düşük olmaktadır. Çevre dostu bu jeotermal enerjiden elde edilecek ısıl enerji veya santrallerden elde edilecek elektrik enerjisi ile hidrojen üretimi, depolanması ve sıvılaştırılması yapılabilecektir.

Yenilenebilir enerji kaynakları ile hidrojen üretimi içinde jeotermal enerji önemli bir seçenektir. İzlanda gibi jeotermal enerji kaynaklarının bol olduğu ülkelerde hidrojenin jeotermal enerjiden üretilmesi ve bunun enerji kaynağı olarak kullanılması önemli bir enerji üretim metodudur. Günümüzde hidrojen üretimi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

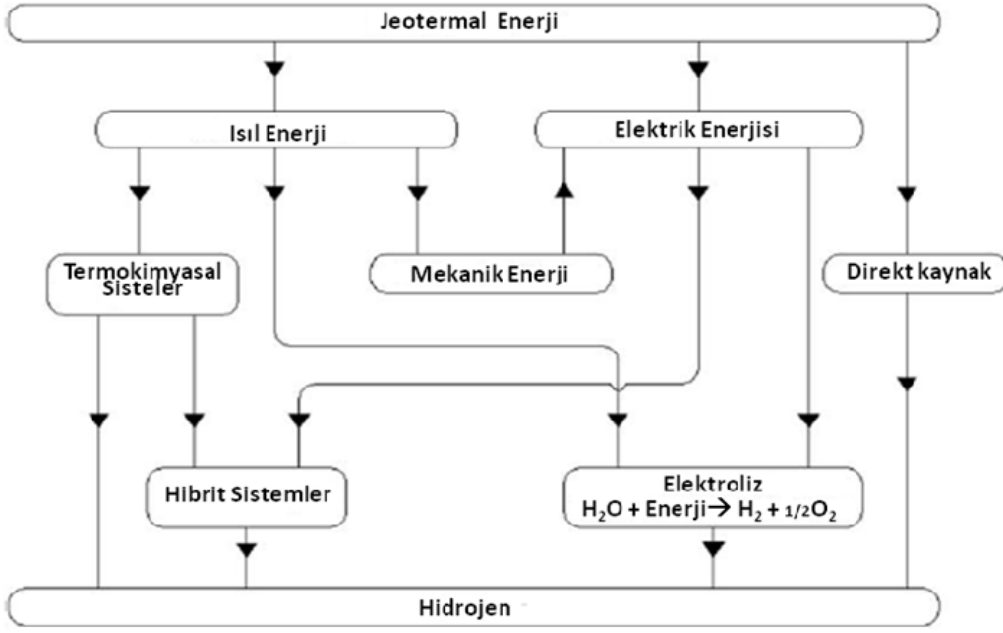


Şekil 4. Binary Jeotermal Güç Santrali



Şekil 5. Kombine (Flash-Binary) Jeotermal Güç Santrali

Dünyada jeotermal enerjiden hidrojen üretiminde lider konumda bulunan İzlanda'da ülkenin enerji üreticisi Landsvirkjun yaptığı çalışmalar sonucunda 4–5 km derinliklerde 500–600°C arasında buhar elde etmiştir. Bununla birlikte günümüzde hidrojen üretimi için sadece 200–250°C arasında jeotermal sıcaklık kullanılmaktadır. (Şekil 4.4),[19].



Şekil 6. Jeotermal Enerjiden Hidrojen Üretimindeki Kullanılan Temel Yöntemler

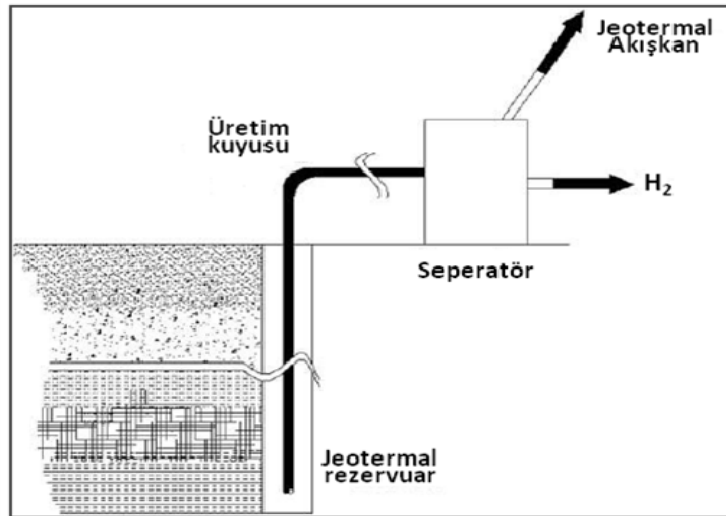
Şekil 6'da görüldüğü gibi, jeotermal enerji kullanılarak farklı yöntemlerle hidrojen üretimi gerçekleştirilebilir. Jeotermal enerji kullanarak hidrojen üretim yöntemleri hala araştırma ve geliştirme aşamasında olup hidrojen ekonomisine geçişte önemli bir adımdır. Bu yöntemler aşağıdaki şekildedir:

(a) Hidrojenin doğrudan jeotermal buhardan elde edilmesi

Dünya üzerindeki birçok bölgede jeotermal buhar atmosfere çıkarken hidrojen de çıkarmaktadır. Bu atmosfere çıkan hidrojen bir takım tekniklerle tekrar geri kazanılabilir. Bu jeotermalle gelen hidrojenin yararlanmak için gazlardan temizlenmesi gerekmektedir (Şekil 3)

(b) Jeotermal ısı enerjisi kullanılarak hidrojen üretimi

Jeotermal enerji, elektrik ve ısı olarak iki farklı enerji şeklinde değerlendirilebilir. Bu ısı ve elektrik şeklindeki enerji termokimyasal sistemlerle, hibrit sistemlerle veya elektroliz işlemleriyle hidrojenin üretilmesinde kullanılabilir. Isıl enerjiyle hidrojen üretiminde 500-950°C gibi yüksek sıcaklıklara ihtiyaç vardır.



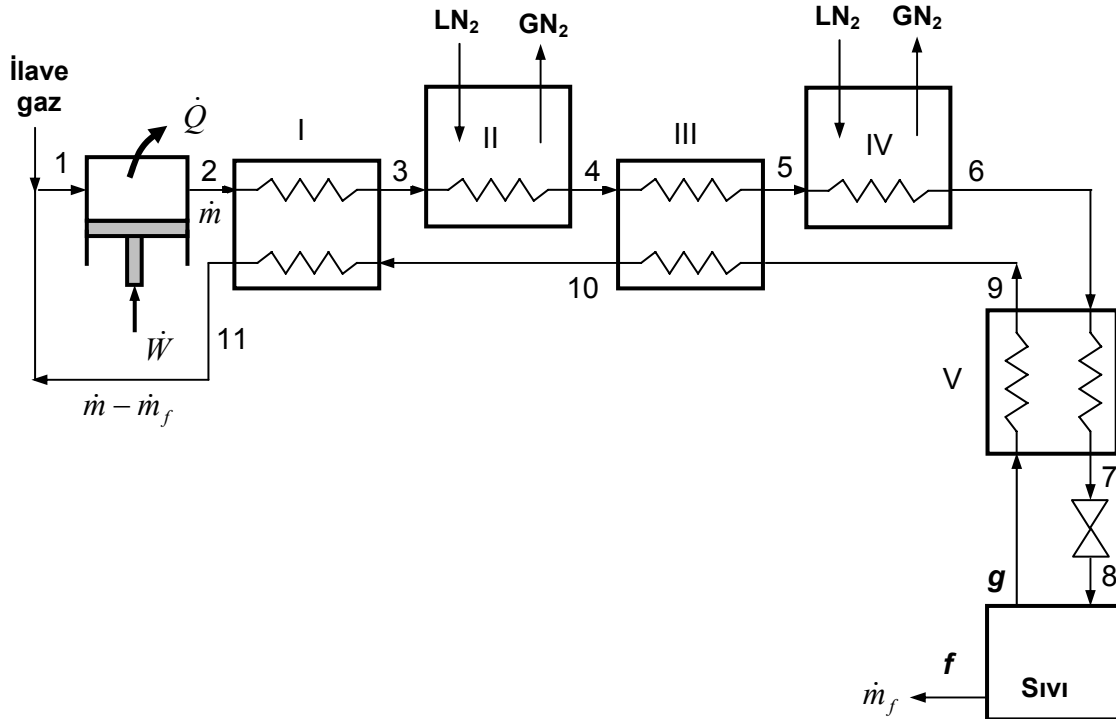
Şekil 7. Doğrudan Hidrojen Üretim Basitleştirilmiş Bir Şeması

(c) Elektroliz yöntemiyle hidrojen üretimi

Bu yöntem ile jeotermal ısı enerji öncelikle santralde mekanik enerjiye daha sonra elektrik enerjisine çevrilir. Santralde elde edilen elektrikle elektroliz işlemiyle su, hidrojen ve oksijene ayrılır. Düşük ve orta sıcaklıktaki jeotermal kaynaklar flaş türbinler için uygun olmayabilir.

4. HİDROJENİN SIVILAŞTIRILMASI

Hidrojenin depolanması ve taşınması için kullanılan bir yöntem önce sıvılaştırıp sonra süper yalıtılmış depolarda saklanmasıdır. Hidrojen sıvılaştırılarak yoğunluğu yaklaşık 600 kat artırılır. Hidrojen sıvılaştırma işleminde geleneksel olmayan ileri soğutma sistemleri kullanılır. Bu amaçla kullanılan çevrimlerden biri ön soğutmalı Linde-Hampson çevrimidir (Şekil 8). Bu çevrimde ilave edilen gaz yoğunlaşmayan gazla birleştirilerek karışım 1 halinden 2 haline sıkıştırılır. Sıkıştırma sırasında gazdan ısı atılır. Yüksek basınçtaki gaz bir ısı değiştiricisinde (I) hal 3'e soğutulur. Bu gaz iki nitrojen banyosu (II ve IV) ve iki rejeneratif ısı değiştiricisi (III ve V) ile daha fazla soğutulur. Daha sonra hal 8'e genişletilerek doymuş sıvı-buhar karışımı elde edilir. Sıvı istenen ürün olarak alınırken buhar çevrimin alt yarısından çevrime geri döndürülür. Bu gaz çevrime alınan gazla birleştirilerek çevrim tamamlanır ve tekrarlanır. Hidrojen sıvı olarak yaklaşık -253°C 'de elde edilir[20].



Şekil 8. Ön Soğutmalı Linde-Hampson Çevrimi.

5. JEOTERMAL HİDROJEN ÜRETİMİ VE SIVILAŞTIRMASI MODELLERİ

Gerek bu makalenin yazarlarının yaptıkları çalışma ve araştırmalar; gerekse literatürde yapılan çalışmalardan esinlenerek jeotermal enerji kullanarak hidrojenin üretimi ve sıvılaştırılması konusunda 7 farklı model geliştirilmiştir. Modellerde jeotermal kaynaktan sağlanan ısının doğrudan kullanımı ve güç santralinde üretilen elektriğin kullanımı gibi alternatifler değerlendirilirken hidrojen üretimi için

elektroliz ve yüksek sıcaklıkta buhar elektrolizi yöntemleri göz önüne alınmıştır. Sıvılaştırma işleminde absorpsiyonlu soğutma ile hidrojen gazının sıvılaştırma öncesi soğutulması ile sıvılaştırma için gerekli işin azaltılması ve absorpsiyonlu soğutma için gerekli ısı enerjisinin jeotermal enerji ile karşılanması hedeflenmektedir. İncelenen modeller aşağıdaki gibi listelenebilir:

Model 1: Jeotermal güç santralinde üretilen elektrik, elektroliz yöntemiyle hidrojen üretiminde kullanılıyor (Şekil 9).

Model 2: Jeotermal güç santralinde üretilen elektrik elektroliz yöntemiyle hidrojen üretiminde kullanılırken santrali terk eden jeotermal su, elektrolizöre giden suyun ön ısıtmasında kullanılıyor (Şekil 10).

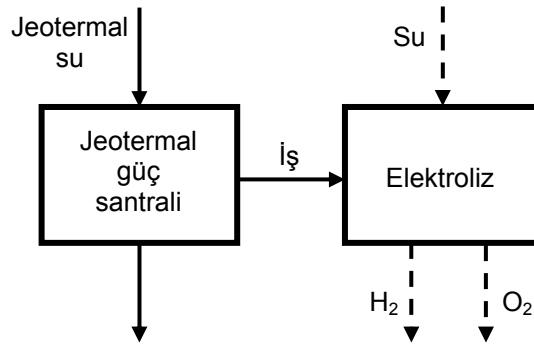
Model 3: Jeotermal enerji, yüksek sıcaklıkta elektroliz için gerekli olan buharın ön ısıtmasında kullanılıyor (Şekil 11).

Model 4: Jeotermal güç santralinde üretilen elektrik hidrojenin sıvılaştırılmasında kullanılıyor (Şekil 12).

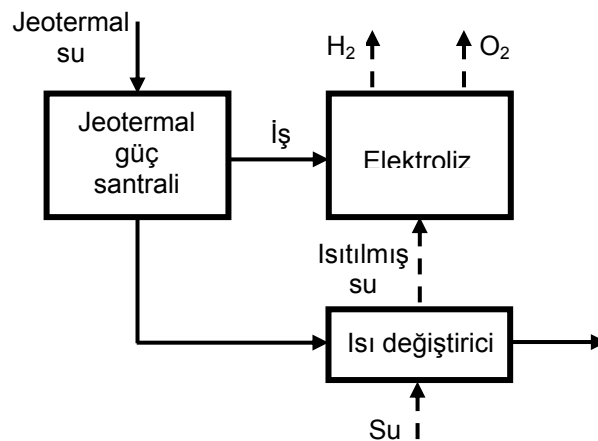
Model 5: Jeotermal enerjinin ısı absorpsiyonlu bir soğutma sisteminde kullanılıyor ve hidrojen gazı soğutuluyor. Soğutulan gaz elektrik tüketen bir sıvılaştırma çevriminde sıvı hale dönüştürülüyor (Şekil 13).

Model 6: Jeotermal enerji önce absorpsiyonlu sisteme ısı sağlayarak hidrojeni soğutuyor ve sonra bir güç santralinde elde edilen elektrik sıvılaştırma çevriminde kullanılıyor (Şekil 14).

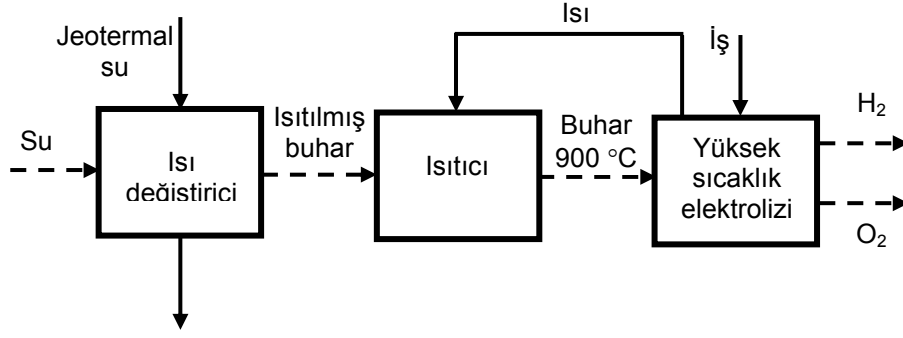
Model 7: Jeotermal güç santralinde üretilen elektriğin bir kısmıyla elektroliz gerçekleştirilirken diğer kısmıyla üretilen hidrojenin sıvılaştırılması için gerekli iş sağlanıyor (Şekil 15).



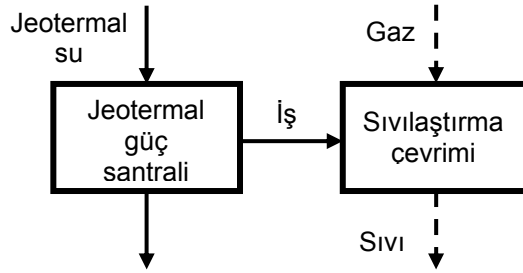
Şekil 9. Model 1: Jeotermal Güç Santralinde Üretilen Elektrik, Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Üretiminde Kullanılıyor.



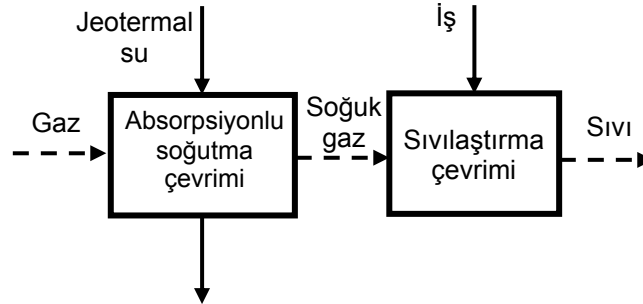
Şekil 10. Model 2: Jeotermal Güç Santralinde Üretilen Elektrik Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Üretiminde Kullanılırken Santrali Terk Eden Jeotermal Su, Elektrolizöre Giden Suyun Ön Isıtmasında Kullanılıyor.



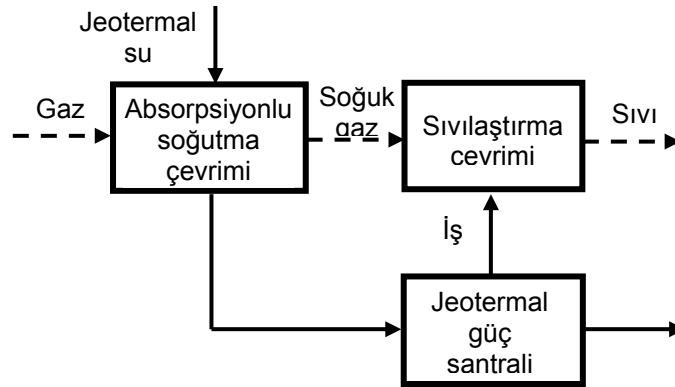
Şekil 11. Model 3: Jeotermal Enerji, Yüksek Sıcaklıkta Elektroliz İçin Gerekli Olan Buharın Ön Isıtılmasında Kullanılıyor.



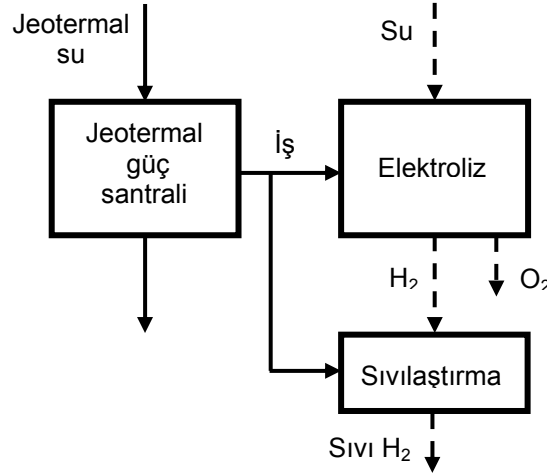
Şekil 12. Model 4: Jeotermal Güç Santralinde Üretilen Elektrik Hidrojenin Sıvılaştırılmasında Kullanılıyor.



Şekil 13. Model 5: Jeotermal Enerjinin Isısı Absorpsiyonlu Bir Soğutma Sisteminde Kullanılıyor ve Hidrojen Gazı Soğutuluyor. Soğutulmuş Gaz Elektrik Tüketen Bir Sıvılaştırma Çevriminde Sıvı Hale Dönüştürülüyor.



Şekil 14. Model 6: Jeotermal Enerji Önce Absorpsiyonlu Sisteme Isı Sağlayarak Hidrojeni Soğutuyor ve Sonra Bir Güç Santralinde Elde Edilen Elektrik Sıvılaştırma Çevriminde Kullanılıyor.



Şekil 15. Model 7: Jeotermal Güç Santralinde Üretilen Elektrik Bir Kısmıyla Elektroliz Gerçekleştirilirken Diğer Kısmıyla Üretilen Hidrojenin Sıvılaştırılması İçin Gerekli İş Sağlanıyor.

7. MODELLERİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Yukarıda açıklanan modellerin termodinamik analizini gerçekleştirmek için birinci ve ikinci yasa analizlerinin temel formülasyonuna ihtiyaç vardır. Gerekli denklemler bu bölümde verilmiştir. Jeotermal santraller, hidrojen üretim ve sıvılaştırma sistemleri sürekli akışlı zamana bağlı olmayan proseslerden oluşur. Isı girişi ve güç çıkışı olan sürekli akışlı bir açık sistem için kütle, enerji, entropi ve ekserji denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (1)$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{Q}_{in} = \dot{m}_2 h_2 + \dot{W}_{out} \quad (2)$$

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{T_s} + \dot{m}_1 s_1 + \dot{S}_{gen} = \dot{m}_2 s_2 \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{in} \left(1 - \frac{T_0}{T_s} \right) + \dot{m}_1 ex_1 = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{W}_{out} + \dot{E}x_{dest} \quad (4)$$

Akan bir akışkanın özgül ekserji ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$ex = h - h_0 - T_0 (s - s_0) \quad (5)$$

Bu denklemlerde \dot{m} kütle debisini, h entalpiyi, s entropiyi, T_0 ölü hal sıcaklığını, T_s kaynak sıcaklığını, \dot{Q} ısı transferini, \dot{W} gücü ve $\dot{E}x_{dest}$ ekserji yıkımını ifade etmektedir. Bir jeotermal güç santralinin ısıl verimi elde edilen net işin jeotermal suyun birim kütlesinin enerjisine oranı olarak tanımlanabilir:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{e_{geo}} \quad (6)$$

Burada giren enerji, jeotermal akışkanın entalpisi ile ölü hal şartlarındaki entalpinin farkı olarak ifade edilebilir:

$$e_{in} = h_{geo} - h_0 \quad (7)$$

Kaynağın enerjisi sıcaklığa ve buhar oranına bağlıdır. Santralin ikinci yasa verimi gerçek net işin jeotermal akışkanın ekserjisine oranı olarak tanımlanır:

$$\eta_{II} = \frac{w_{net,out}}{ex_{geo}} \quad (8)$$

Bu ekserji aynı zamanda verilen jeotermal kaynaktan elde edilebilecek maksimum işin ifadesidir:

$$ex_{geo} = w_{max} = h_{geo} - h_0 - T_0 (s_{geo} - s_0) \quad (9)$$

Jeotermal akışkan sıvı fazda olduğu için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$ex_{in} = w_{max} = c_p (T_{geo} - T_0) - T_0 c_p \ln \left(\frac{T_{geo}}{T_0} \right) \quad (10)$$

Burada T_{geo} jeotermal akışkan sıcaklığını ve c_p özgül ısıyı göstermektedir. Jeotermal santraller düşük sıcaklıkta kaynakları kullandıkları ve maksimum iş kapasiteleri sınırlı olduğu için ısı verimleri genellikle %10' un altındadır. Bu yüzden ikinci yasa verimi ile daha anlamlı karşılaştırmalar yapılması mümkündür.

Elektroliz işleminin verimi, elektroliz işlemi için gerekli minimum işin harcanan gerçek işe oranı olarak tanımlanabilir:

$$\eta_{elektroliz} = \frac{w_{min}}{w_{act}} \quad (11)$$

Bir absorpsiyonlu soğutma sisteminin etkenlik katsayısının alabileceği maksimum değer

$$COP_{rev} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{geo}} \right) \left(\frac{T_L}{T_0 - T_L} \right) \quad (12)$$

eşitliğiyle bulunur. Burada, T_L soğutulan alanın sıcaklığıdır. Absorpsiyonlu soğutma sisteminin etkenlik katsayısı (COP) giren ısının soğutma yüküne oranı olarak bulunur:

$$COP_{ARS} = \frac{q_L}{q_{gen}} \quad (13)$$

Bu denklemde q_L soğutma yükü, q_{gen} ısıtıcıda transfer edilen ısı miktarıdır. Sistemin ikinci yasa verimi gerçek COP'nin maksimum COP'ye oranı olarak ifade edilir.

$$\eta_{II} = \frac{COP_{ARS}}{COP_{rev}} \quad (14)$$

COP değeri birden büyük değerler alabilir ama ikinci yasa verimi % 100'ü geçemez. Birim kütlede bir gazın sıvılaştırılması için harcanması gereken minimum iş,

$$w_{rev,in,liq} = h_2 - h_1 - T_0(s_2 - s_1) \quad (15)$$

denklemlerle bulunur. Burada 1 gaz halini 2 ise sıvı halini ifade eder. Birim kütlede hidrojen gazının sıvılaştırılması için gerekli minimum işin gerçek iş tüketimine oranı sıvılaştırmanın verimini ifade eder:

$$\eta_{liq} = \frac{w_{rev,in,liq}}{w_{act,in,liq}} \quad (16)$$

Jeotermal bir kaynaktan elde edilen elektriğin sıvılaştırma için kullanılması durumunda bir performans parametresi olarak tanımlanabilir:

$$y = \frac{w_{out,geo}}{w_{in,liq}} \quad (17)$$

Burada y parametresi kullanılan 1 kg jeotermal suyun sıvılaştırabileceği gaz kütlelerini ifade etmektedir. Jeotermal ısının absorpsiyonlu soğutma sisteminde kullanılması durumunda bir z parametresi tanımlanabilir:

$$z = \frac{m_{gas}}{m_{geo}} \quad (18)$$

Burada z parametresi kullanılan 1 kg jeotermal suyun soğutabileceği gaz kütlelerini ifade etmektedir.

8. MODELLERİN TERMODİNAMİK ANALİZ SONUÇLARI

8.1. Modellerin İdeal (Tersinir) Analiz Sonuçları

Model 1: Model 1 için, elimizde 200°C sıcaklığında sıvı bir jeotermal kaynak olduğunu varsayalım. Ölü hal sıcaklığını 25°C alırsak, jeotermal akışkanın maksimum iş potansiyeli denklem 2.1'den 157.9 kJ/kg olarak bulunur. Denklem 2.12'den H₂'nin elektrolizi için gerekli minimum iş birim kütle başına 117,649 kJ/kg olarak bulunur. Jeotermal santralden elde edilen maksimum iş (157.9 kJ/kg) bu elektroliz işine oranlandığında 1 kg jeotermal su ile elde edebilecek hidrojen miktarı 0.001343 kg H₂/kg jeotermal su olarak bulunur. Bir başka ifadeyle 1kg hidrojen üretimi için 745 kg jeotermal akışkanın kullanılması gerekir.

Model 2: Bu modelde ideal şartlarda jeotermal güç santralinden elde ettiğimiz maksimum işte bir değişme olmamaktadır. Model 1'den farklı olarak, bu modelde, santralden çıkan su elektroliz öncesi suyun ön ısıtmasında kullanılmaktadır. Jeotermal akışkanın santrale 200°C'de girip 95°C'de çıktığını ve suyu elektroliz öncesi 25°C'den 85°C'ye ısıttığını kabul ediyoruz. Bu modelde kullanılan düşük sıcaklıktaki elektroliz yöntemi, 50–85°C arasındaki sıcaklıklarda geçerlidir. Elektroliz işlemi için gerekli Gibbs serbest enerjisini sıvı haldeki su (H₂O) için 230.5 kJ/mol olarak hesaplarız. Denklem 2.12'yi kullanarak birim kütlede hidrojen üretimi için gerekli minimum elektroliz işini 111,421 kJ/kg hidrojen olarak buluruz. Jeotermal kaynaktan elde edilen net işi elektroliz için gerekli minimum işe oranlarsak 0.001418 kg H₂/kg jeotermal su değerini buluruz. Diğer bir ifadeyle, model 2 için ideal şartlarda 1 kg hidrojen üretebilmek için 705 kg jeotermal suyun kullanılması gerekir.

Model 3: Bu modelde yüksek sıcaklıkta buhar elektrolizi metodu kullanılmaktadır. Bu metod bilinen metotlar içinde en yüksek verime sahip elektroliz metodu olarak bilinmektedir. Kullanılan elektroliz suyu 800–1000°C sıcaklıkları arasındadır. Bu modelde elektrolize tabi tutulacak su öncelikle jeotermal akışkan ile 200°C'de buhar haline getirilmektedir. Daha sonra bu buhar, elektroliz içerisinde üretilen ısı

kullanılarak yaklaşık 900°C'ye ısıtılmaktadır. Denklem 1'den jeotermal kaynaktan elde edilen maksimum iş 157.9 kJ/kg olarak bulunmuştur. Denklem 11'den $\Delta G(T)=166.7$ kJ/mol H₂O olarak bulunur. Suyun yüksek sıcaklıktaki buhar elektrolizi için bulunan Gibbs enerjisini 1 kmol hidrojenin molar kütlelerine (2.016 kg H₂) oranladığımızda hidrojen için gerekli olan minimum elektroliz işini denklem 2.12'den 82,672 kJ/kg H₂ olarak buluruz. Bu modelde jeotermal santralden elde edilen maksimum işi elektroliz için gerekli olan minimum elektroliz işine oranlayarak 0.001911kg H₂/kg jeotermal su değerini buluruz. Başka bir ifadeyle 1 kg hidrojeni ideal şartlarda üretebilmek için 524 kg jeotermal su gerekmektedir.

Model 4: Jeotermal kaynağın sıcaklığı 200°C ve ölü hal sıcaklığı 25°C alındığında jeotermal santralden elde edilen maksimum özgül iş denklem 2.1'den 157.9 kJ/kg olarak bulunur. Gazın giriş durumunu ölü hal olarak alıp (25°C, 1 atm) doymuş sıvı olarak çıktığı varsayılmıştır. Hidrojenin sıvılaştırılması için gerekli tersinir iş denklem 2.21'den 11,963 kJ/kg olarak hesaplanır. Denklem 2.22 ile 200°C'de 1 kg jeotermal suyla sıvılaştırılabilen hidrojen miktarı, $y = (157.9 \text{ kJ/kg jeotermal su}) / (11,963 \text{ kJ/kg hidrojen gazı}) = 0.01319$ kg hidrojen/kg jeotermal su olarak hesaplanır.

Model 5: Bu modelde jeotermal enerji, ideal absorpsiyonlu soğutma sistemi (ARS) ile sıvılaştırmadan önce gazın ön soğutmasında enerji kaynağı olarak kullanılıyor. Ts=200°C, T0= 25°C ve TL= -20°C için ideal soğutma sisteminin performans katsayısı denklem 20'yi kullanarak COP=2.08 olarak bulunur. Jeotermal suyun jeneratörden çıkış sıcaklığını 95°C olarak alırsak, jeneratördeki ısı transferi $q_{gen}=447.5$ kJ/kg olarak bulunur. Sonra denklem 20 kullanılarak gazdan alınan özgül ısı q_L , $1= 931$ kJ/kg gaz olarak bulunur. Hidrojenden alınan ısıyla, hidrojen 25°C ve 1 atmosfer durumundan -20°C ve 1 atmosfer durumuna gelir ve buradan q_L , $2=639.1$ kJ/kg H₂ olarak bulunur.

Yukarıdaki ifadelere göre alınan ısıların oranını ifade eden bir z parametresi,

$$z = \frac{q_{L,1}}{q_{L,2}} \quad (\text{ARS'de soğutulan gaz kütlesi/kullanılan jeotermal su kütlesi}) \quad (2.32)$$

şeklinde tanımlanabilir. Buradaki z parametresi absorpsiyonlu soğutma sistemine giren birim kütle jeotermal suyla, absorpsiyonlu soğutma sisteminde soğutulabilen gaz kütlesini ifade eder. Yukarıdaki denklem 2.32' den $z = 1.457$ ($=931/639.1$) olarak bulunur. Böylece, 200°C'deki 1 kg jeotermal suyla 1.457 kg hidrojeni, 25°C'den -20°C'ye soğutabileceğimiz görülür.

Model 6: Bu modelde 200°C'deki jeotermal su ideal absorpsiyonlu soğutma sisteminde gazın sıvılaştırmadan evvel ön soğutmasında kullanılmaktadır. Jeotermal su ARS'den 150°C'de ayrılarak jeotermal santrale iş üretimi için girmektedir. Hidrojen gazının soğutulduğu sıcaklık -20°C'dir. Bu bilgilere dayanarak absorpsiyonlu sistemde $z = 0.7139$ kg gazın, 1 kg jeotermal suyla 25°C'den -20°C'ye kadar soğutulabildiğini görürüz. Jeotermal santralde elde edilen net ideal işi 86.7 kJ/kg olarak ve hidrojen için gerekli ideal sıvılaştırma işini de 11918 kJ/kg olarak buluruz. Bu sıvılaştırma işlemine göre $y = 0.00727$ olarak bulunur. Bir başka ifadeyle 1 kg jeotermal suyla 7.227 gram hidrojen sıvılaştırılabilir.

Model 7: Basit alkalin elektroliz işlemiyle 1 kg hidrojenin üretilmesi için gerekli minimum elektroliz işi 117,650 kJ/kg H₂ olarak bulunmuştur. Sıvılaştırma için gerekli minimum iş ise 11,965 kJ/kg H₂ olarak elde edildi. Bu modelde santralden elde edilen iş hem elektroliz hem de sıvılaştırmada kullanılacağı için yukarıdaki minimum iş miktarları oranlandığında elektroliz için gereken işin sıvılaştırmanın 9.83 katı olduğu hesaplanır. Yani üretilen işin % 90.8'i elektroliz için, % 9.2'si de sıvılaştırma için kullanılmalıdır. Jeotermal santralden elde edilen maksimum işi ve elektroliz için gerekli olan minimum işe oranladığımızda 1 kg hidrojen üretilmesi için gereken jeotermal su miktarını model 7'de ideal şartlar için bulmuş oluruz. Üretilen hidrojen miktarı 0.001219 kg H₂/kg jeotermal su olarak bulunur. Diğer bir ifadeyle, model 7'de 1 kg hidrojen üretebilmek için 820 kg jeotermal su gerekmektedir.

Gerçekte ideal değerlerin elde edilmesi mümkün değildir. Gerçek termodinamik analizlerde tersinmezlikler dikkate alınmak zorundadır. İdeal olmayan şartlardaki termodinamik analiz sonuçları aşağıya çıkarılmıştır.

8.2. Modellerin İdeal Olmayan (Tersinmez) Analiz Sonuçları

Model 1: İdeal olmayan, gerçek şartlarda analiz yapıldığında jeotermal santralden elde edilen net iş denklem 2.4'ten 57.75 kJ/kg olarak bulunur. Elektroliz verimi denklem 2.15'ten % 75 olarak bulunur. Hidrojenin elektrolizi için gerekli gerçek iş denklem 2.17'den 156,865 kJ/kg hidrojen olarak bulunur. Jeotermal sudan üretilebilen hidrojen miktarı denklem 2.18'den 0.0003682 kg H₂/kg jeotermal su olarak bulunur. Bir başka ifadeyle 1 kg hidrojeni tersinmez şartlarda elde edebilmek için 2716 kg jeotermal su gerekmektedir.

Model 2: Bu modelde elektroliz verimi denklem 2.15'ten % 78 olarak bulunur. Hidrojenin elektrolizi için gerekli gerçek iş denklem 2.17'den 142,880 kJ/kg H₂ olarak bulunur. Jeotermal sudan üretilebilen hidrojen miktarı denklem 2.18'den 0.0004043 kg H₂/kg jeotermal su olarak bulunur. Bir başka ifadeyle gerçek şartlarda 1 kg hidrojen üretebilmek için 2473 kg jeotermal su gerekmektedir.

Model 3: Bu modelde elektroliz verimi denklem 2.15'ten % 90 olarak bulunur. Hidrojenin elektrolizi için gerekli minimum gerçek iş denklem 2.17'den 84,723 kJ/kg hidrojen olarak bulunur. Üretebileceğimiz hidrojen miktarını ideal olmayan şartlarda model 3 için denklem 2.18'den 0.0006816 kg H₂/kg jeotermal su olarak bulunur. Bir başka ifadeyle gerçek şartlarda 1 kg hidrojen elde edebilmek için 1467 kg jeotermal su kullanmak gerekmektedir.

Model 4: Bu modelde jeotermal kaynaktan üretilen işle, sıvılaştırılma çevriminde hidrojen gazı sıvılaştırılıyor. Net jeotermal gerçek işi 57.75 kJ/kg olarak bulunur. 1 kg hidrojenin sıvılaştırılması için gerekli gerçek iş 70,379 kJ/kg hidrojen olarak bulunur. Bu sistemde sıvılaştırılabilecek hidrojen gazı miktarı ise, 0.0008206 kg H₂/kg jeotermal su olarak hesaplanır. Yani, 1 kg hidrojeni bu yöntemle sıvılaştırabilmek için 1219 kg jeotermal akışkan gerekmektedir.

Model 5: Jeotermal kaynak enerjisi, hidrojenin sıvılaştırılmasından önce ASR sistemiyle ön soğutma yapmakta kullanılıyor. Bu sayede birim hidrojenin sıvılaştırılması için gerekli maksimum işte bir azalma gerçekleşmektedir. Hesaplamalar yapıldığında gerçekte, -20°C'ye soğutulmuş hidrojen gazının bu sistemle sıvılaştırılması için gerekli iş miktarı 58,594 kJ/kg hidrojen olarak bulunur. ASR sisteminin gerçek etkinlik katsayısı ise, 0.52 olarak bulunur. Soğutulabilen hidrojen gazı miktarı ise, 0.07058 kg H₂/kg jeotermal su olarak bulunur. Yani, 25°C'de 1 kg hidrojeni, bu sistemle sıvılaştırma öncesi -20°C'ye soğutmak için gerçekte 14.17 kg jeotermal akışkan gerekmektedir.

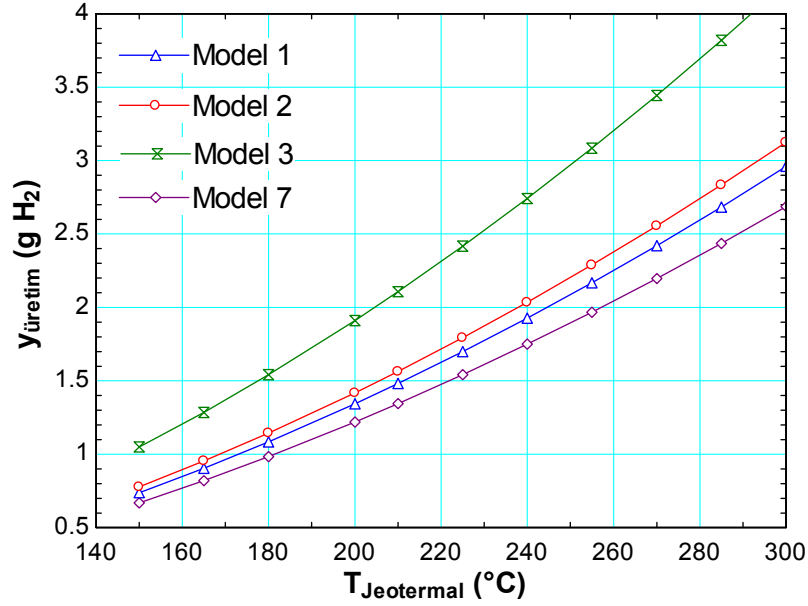
Model 6: Jeotermal enerji önce ASR sisteminde ön soğutmada, daha sonra sıvılaştırma çevriminde iş olarak kullanılmaktadır. Yani, gerçekte bu sistemde jeotermal akışkan üretilebilen iş 49.25 kJ/kg olarak bulunur. Sıvılaştırma işlemi için gerekli iş ise, 57,999 kJ/kg hidrojen olarak bulunur. Birim kütle soğutulabilen hidrojen miktarı 0.03469 kg H₂/kg jeotermal su olarak hesaplanır. Sıvılaştırılabilen birim kütle hidrojen gazı miktarı ise, 0.0008491 kg H₂/kg jeotermal su olarak bulunur. Yani, 1 kg hidrojen soğutulup sıvılaştırılması için bu sistemde, 1178 kg jeotermal akışkan gerekmektedir.

Model 7: Minimum elektroliz entalpi değeri 25°C ve 1 atmosfer basınç altında 285,830 kJ/kmol olarak bulunmuştu. Gibbs serbest oluşum değeri ise 237,180 kJ/kmol olarak bulunmuştu. Bu değerlerden elektroliz verimliliği denklem 2.15'ten 0.75 olarak bulunur. Bu değeri kullanarak ideal olmayan şartlarda minimum elektroliz işini denklem 2.17'den bulabiliriz. Buradan ideal olmayan şartlardaki minimum elektroliz işini hidrojen için 156,865 kJ/kg olarak hesaplarız. Sıvılaştırma için gerekli olan iş ise, 70,379 kJ/kg hidrojen olarak hesaplanmıştı. Dolayısıyla bu sistemde jeotermal kaynaktan üretilen işin bir kısmı üretimde ve diğer kısmı da sıvılaştırma da kullanılacaktır.

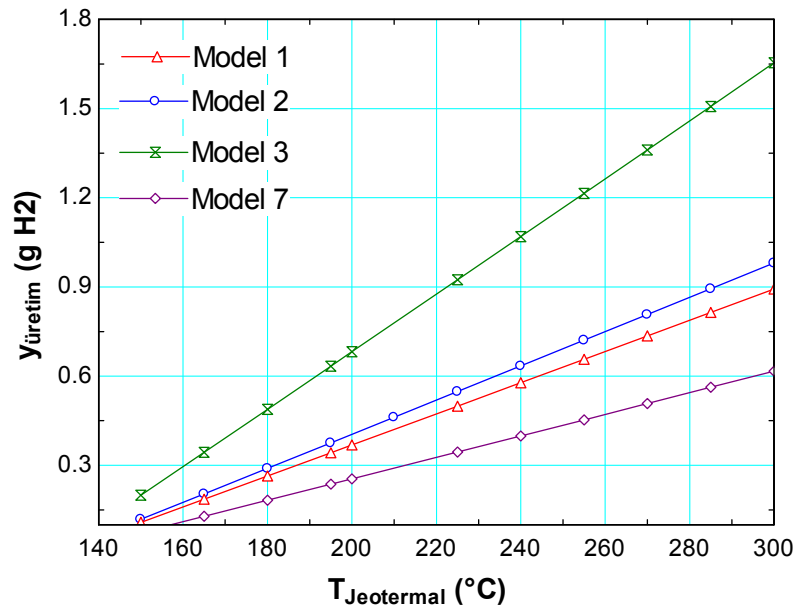
Üretebileceğimiz ve sıvılaştırılabileceğimiz hidrojen miktarını bulmak için jeotermal santral güç çıktısını elektroliz için gerekli işe bölersek 0.0002541 kg H₂/kg jeotermal su değeri elde edilir. Sıvılaştırılan hidrojen miktarı da 0.0002541 kg H₂/kg jeotermal su olarak bulunur. Diğer bir ifadeyle 1 kg hidrojeni gerçekte bu sistemle üretebilmek ve sıvılaştırmak için 3935 kg jeotermal su gerekmektedir.

8.3. Modellerin Termodinamik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

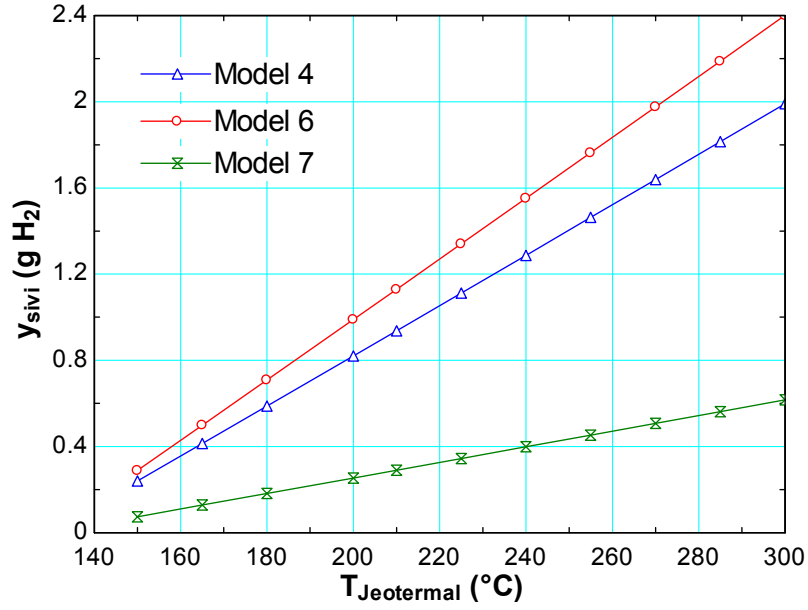
Proje kapsamında jeotermal enerji destekli hidrojen üretimini ve sıvılaştırılmasını içeren 7 ayrı model ideal ve ideal olmayan şartlarda termodinamik analizleri yapılmıştır. Modeller ile ilgili parametrik çalışma grafikleri incelendiğinde termodinamik performans parametrelerinin jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça olumlu yönde değiştiği görülmektedir (Şekil 15-16). Bir başka ifadeyle jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça aynı miktarda jeotermal su ile daha fazla hidrojen üretilebilmekte ve sıvılaştırılabilmektedir. Ayrıca, bu değişim trendinin ideal ve gerçek çalışma şartları analizine göre değişiklik göstermediği gözlenmiştir. Gerçekçi jeotermal santral ve sıvılaştırma çevrim verileri kullanıldığında, gerçek sistemin ikinci-yasa verimi % 20'lerin biraz altında seyretmektedir. Bu değer de gerçek sistemlerin performansını arttırmak için % 80'lik bir potansiyel olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 15. Hidrojen Üretim Modellerinin İdeal Şartlarda Kg Jeotermal Su Başına Üretilen Gram Hidrojen Miktarları.



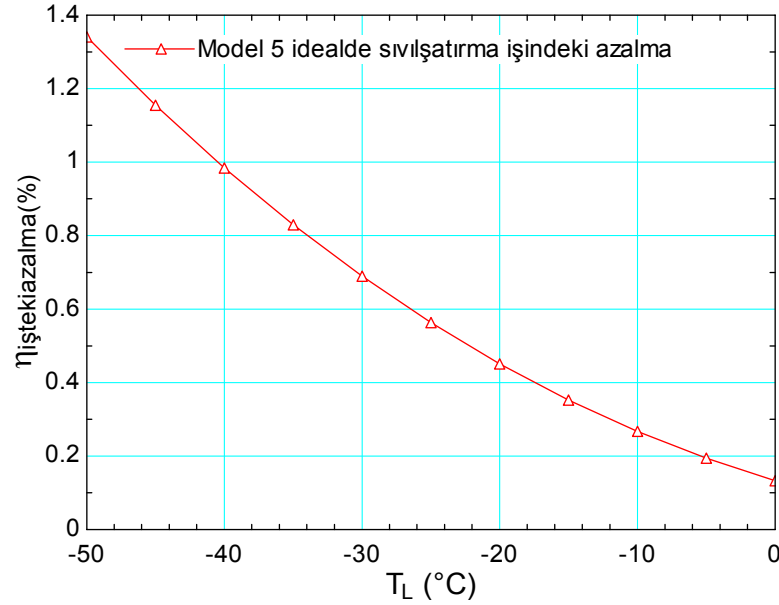
Şekil 16. Hidrojen Üretim Modellerinin İdeal Olmayan Şartlarda Kg Jeotermal Su Başına Üretilen Gram Hidrojen Miktarları.



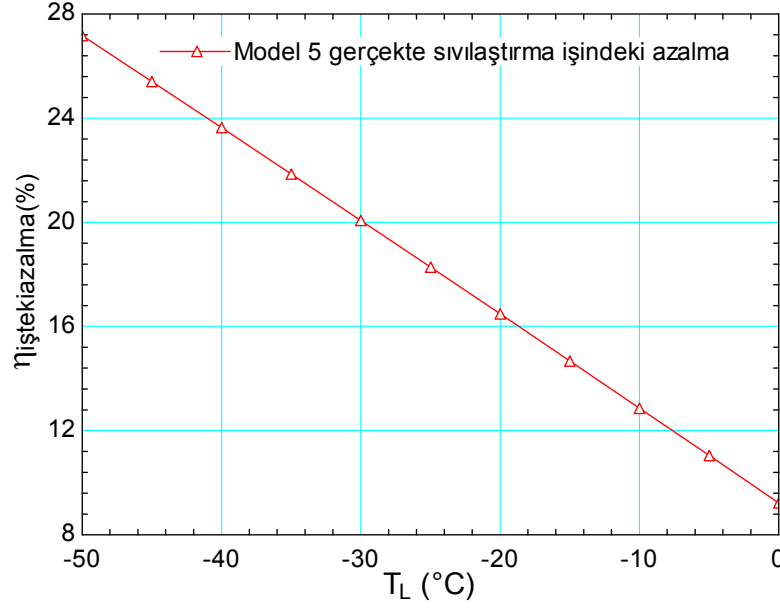
Şekil 17. Hidrojen Sıvılaştırma Modellerinin İdeal Olmayan Şartlarda 1 Kg Jeotermal Suyla Sıvılaştırılabilen Hidrojen Miktarları.

Hidrojen gazı sıvılaştırma öncesi absorpsiyonlu soğutma sisteminde ön bir soğutmaya tabi tutulduğu için sıvılaştırmada harcanan iş miktarı düşmektedir. Daha düşük sıcaklığa bir ön soğutmada, iş düşüşünün daha fazla olduğu gözlenir (Şekil17). Şekilde görüleceği gibi ön soğutma sıcaklığı -20°C iken sıvılaştırma için gerekli işteki azalma ideal şartlarda % 0.45 civarında iken, ideal olmayan durumda % 17 civarında olmaktadır.

(a)

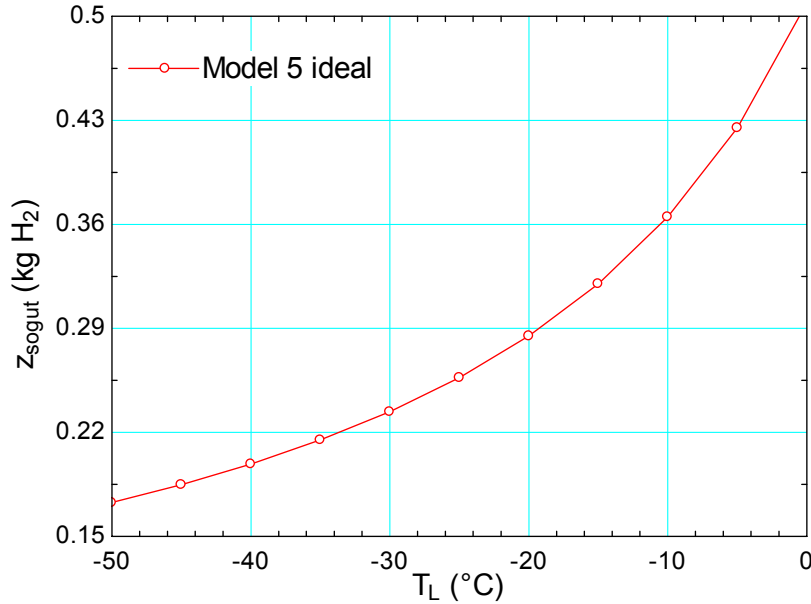


(b)

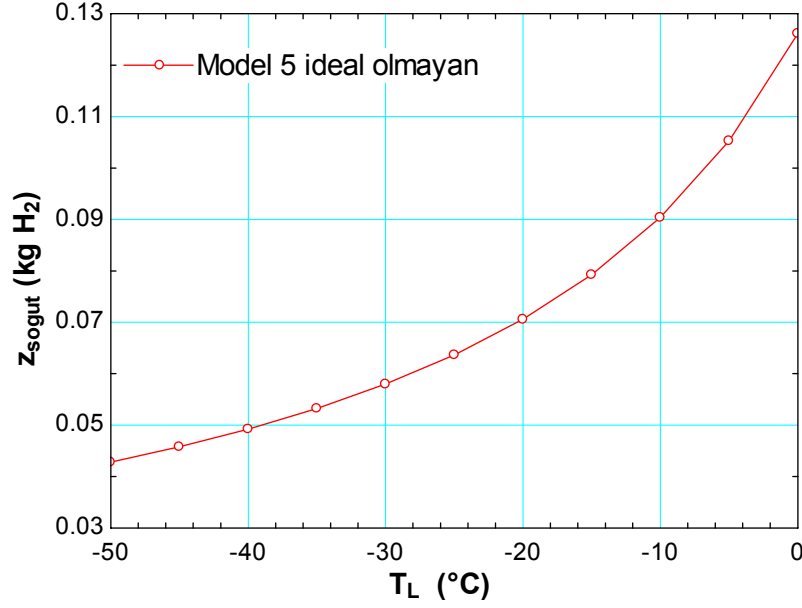


Şekil 18. Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi Soğutulan Hidrojen Gazının Sıvılaştırılması İçin Gerekli İş Miktarındaki Azalmanın Sıcaklıkla Değişimi. (a) İdeal, (b) İdeal Olmayan Şartlarda

Model 5' teki absorpsiyonlu soğutma sisteminde sıvılaştırılan gaz kütesinin birim kütle jeotermal suya oranı (z parametresi), gaz soğutucusunun sıcaklığının bir fonksiyonu olarak hem ideal hem de ideal olmayan şartlar için Şekil 19 ve 20'de görülmektedir. Artan soğutucu sıcaklığıyla z parametresi hiperbolik olarak artmaktadır.



Şekil 19. Jeotermal Suyula Absorpsiyonlu Soğutma İşleminde, Sıcaklığın Değişimine Göre Soğutulan Hidrojen Miktarının İdeal Şartlardaki Değişimi.



Şekil 20. Jeotermal Suyla Absorpsiyonlu Soğutma İşleminde, Sıcaklığın Değişimine Göre Soğutulan Hidrojen Miktarının İdeal Olmayan Şartlardaki Değişimi.

Tablo 1’de özetlenen sonuçlar incelendiğinde modellerin performanslarının birbirine yakın olduğu ve her üç modelin de termodinamik açıdan uygulanabilir olduğu görülmektedir. İdeal şartlarda elde edilen sonuçlar ışığında Model 2’de uygulanan ön ısıtma ile elektroliz için gerekli işin yaklaşık % 5 azaltılabildiği hesaplanmıştır. Model 3’te uygulanan yüksek sıcaklıkta buhar elektrolizi işleminde elde edilen tasarrufun % 30’a ulaştığı görülmektedir. Gerek Model 2 gerekse Model 3’teki sistemin daha karmaşık olması nedeniyle ekonomik analizde bu modellerin ilk yatırım maliyetlerinin daha fazla olması beklenmelidir. İdeal olmayan şartlarda elde edilen sonuçlarda hesaplanan verimlerin her modelde farklı olması nedeniyle Model 2 ve Model 3’ün sağladığı avantajlar ortaya çıkmamıştır. Bu bağlamda ideal şartlarda yapılan analiz sonuçlarının termodinamik açıdan yol gösterici olduğu düşünülmektedir.

Tablo 2.de özetlenen sonuçlar incelendiğinde Model 5’in Model 4 ve Model 6 ile doğrudan karşılaştırılmasının mümkün olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni Model 5’te jeotermal enerjinin tamamen gazın ön soğutması için kullanılmasıdır. Model 6’da elektroliz için gerekli olan iş Model 4’e göre önemli ölçüde artmaktadır. Çünkü jeotermal ısının bir kısmı absorpsiyonlu sistemde gazın ön soğutması için kullanılmaktadır. Termodinamik açıdan Model 4’ün Model 6’ya göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Model 5’te uygulanan absorpsiyonlu soğutmanın ise cazip bir alternatif oluşturabileceği anlaşılmaktadır.

Model 7’de önerilen sistemle jeotermal gücün hem hidrojen üretimi hem de hidrojen sıvılaştırması için kullanımı ile ilgili termodinamik performans sonuçları üretilen gücün % 90’ını üretimde kullanılırken % 10’u ile sıvılaştırmanın yapılabileceğini ortaya koymuştur. Bu modelin hidrojen üretimi ve sıvılaştırmasına imkan veren komple bir santral fikrini hayata geçirmek için son derece elverişli olduğu düşünülmektedir.

Bütün sonuçlar beraber değerlendirildiğinde jeotermal enerjinin hidrojen üretimi ve sıvılaştırmasında kullanımı için farklı modellerin termodinamik açıdan başarıyla uygulanabileceği görülmektedir.

Tablo 1. Üretim Modellerinin Termodinamik Analiz Sonuçları

Model	1 kg jeotermal sudan üretilen hidrojen miktarı (kg hidrojen/kg jeotermal su)		1 kg hidrojen üretmek için gerekli jeotermal su miktarı (kg jeotermal su/kg hidrojen)	
	İdeal Şartlarda	İdeal Olmayan Şartlarda	İdeal Şartlarda	İdeal Olmayan Şartlarda
Model 1	0.001343	0.0003682	745	2716
Model 2	0.001418	0.0004043	705	2473
Model 3	0.001911	0.0006818	524	1467
Model 7	0.001219	0.0002541	820	3935

Tablo 2. Sıvılaştırma Modellerinin Termodinamik Analiz Sonuçları

Model	1 kg jeotermal suyla sıvılaştırılabilen hidrojen miktarı (kg sıvı hidrojen/kg jeotermal su)		1kg hidrojeni sıvılaştırmak için gerekli olan jeotermal su miktarı (kg jeotermal su/kg sıvı hidrojen)		1kg jeotermal suyla soğutulabilen hidrojen miktarı (kg hidrojen/kg jeotermal su)	
	İdeal	İdeal Olmayan	İdeal	İdeal Olmayan	İdeal	İdeal Olmayan
Model 4	0.01319	0.0008206	75.82	1219	-	-
Model 5	-	-	-	-	1.457	0.07058
Model 6	0.01193	0.0008491	83.81	1178	0.1430	0.03469
Model 7	0.001219	0.0002541	820	3935	-	-

KAYNAKLAR

- [1] HOTZA, D., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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] FRIEDRICH, K., 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.
- [11] NANDI, T.K., SARANGI, S., “Performance and optimization of hydrogen liquefaction cycles”, *International Journal of Hydrogen Energy* 18(2), 131–139, 1993.
- [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] KANOGLU, M., DINCER, I., ROSEN M.A., “Geothermal energy use in hydrogen liquefaction”, *International Journal of Hydrogen Energy* 32 , 4250– 4257, 2007.
- [14] HAND, T.W., “Hydrogen production using geothermal energy”, M.Sc. thesis, Utah State University, Logan, Utah, 2008.
- [15] DUTTA, S., “Technology Assessment of Advanced Electrolytic Hydrogen Production”, *International Journal of Hydrogen Energy* 15, 379–385, 1990.
- [16] KRUGER, P., “Alternative Energy Resources: The Quest for Sustainable Energy”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2006.
- [17] JONSSON, V.K., GUNNARSSON, R.L., ARNASON, B., SIGFUSSON, T.I., “The feasibility of using geothermal energy in hydrogen production”, *Geothermics* 21, 673–681, 1992.
- [18] LIU, S., QUINLAN, P., GOGGIN, M., BURNS, S., YUZUGULLU, E., LEE K., “Economic assessment of hydrogen generation for transportation applications using geothermal energy on the Island of Hawaii”, The US Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Sentech Inc., 50624-011; 1 June 2006.
- [19] BALTA, M.T., DINCER, I., HEPBASLI, A., “Thermodynamic assessment of geothermal energy use in hydrogen production”, *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 2925-2939, 2009.
- [20] TIMMERHAUS, K.D, FLYNN, T.M., “Cryogenic process engineering”, The international cryogenic monographs series. New York: Plenum Press;1989.

ÖZGEÇMİŞ

Ceyhun YILMAZ

1987 yılı İzmit doğumludur. 2009 yılında Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Bölümünü bitirmiştir. Aynı üniversitede Enerji Anabilim dalında 2009'dan bu yana yüksek lisans yapmaktadır. 2009–2010 yılında TÜBİTAK 108M226 kodlu araştırma projesinde asistanlık yapmıştır. Enerji Anabilim dalında asistanlık yapmaktadır.

Mehmet KANOĞLU

1972 yılı Gaziantep İslahiye doğumludur. 1992 yılında İTÜ. İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Bölümünü bitirmiştir. University of Nevada, Reno, ABD'de 1996 yılında Yüksek Mühendis, 1999 yılında Doktor ünvanını almıştır. 2000 yılından beri GAZÜ Mühendislik Fakültesi Makina Bölümü Enerji Anabilim Dalı'nda öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Şuan Profesör olarak Enerji Anabilim Dalı'nda görev yapmaktadır.

Ali BOLATTÜRK

1969 yılı İskenderun doğumludur. 1990 yılında Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Bölümünü bitirmiştir. Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine bölümünde 1992 yılında Yüksek Mühendis, 1997 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi'nden Doktor ünvanını almıştır. 1997 yılından beri Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Bölümünde Termodinamik Anabilim Dalı'nda öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Şuan Doçent olarak Termodinamik Anabilim Dalı'nda görev yapmaktadır.