

JEOTERMAL DESTEKLİ BİR SIVI HAVA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Thermodynamic Analysis of Liquid Air Energy Storage System Supported By Geothermal Energy

Tuğberk Hakan ÇETİN
Mehmet KANOĞLU
Neslihan YANIKÖMER

ÖZET

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı gün geçtikçe artmaktadır. Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynakları kesintili doğaları nedeniyle şebeke elektrik ihtiyacını karşılayabilmek için enerji depolama sistemlerine gerek duyarlar. Jeotermal gibi baz yükte çalışabilen yenilenebilir enerji kaynakları ise, şebekenin değişken elektrik ihtiyacına göre esneklik kazanabilmek için enerji depolama sistemlerini entegre bir şekilde kullanabilirler. Bu çalışmada, sıvı hava enerji depolama sistemi entegre edilmiş tek flaşlı jeotermal güç santralının termodinamik analizi ele alınmıştır. Jeotermal kaynak sıcaklığı 180°C ve debisi 100 kg/s olarak kabul edilen jeotermal güç santralının ürettiği elektrik, şebekenin elektrik talebinin düşük olduğu zamanlarda, havayı sıvılaştırmak için kullanılmaktadır. Sıvılaştırılan hava, enerji talebi tepe yük değerlerine ulaştığında jeotermal atık su ile ısıtılarak bir türbinden geçirilmekte ve elektrik üretilmektedir.

Termodinamik analize göre, sıvılaştırma ünitesine giren havanın % 58,5'inin sıvılaştığı, sıvılaştırma ünitesinin 6 saatlik çalışması sırasında 4304 kW güç tükettiği, 1 saatlik pik enerji ihtiyacı süresinde ise sıvı hava enerji depolama sistemi ile 12049 kW net güç üretildiği hesaplanmıştır. Optimum flaş basıncı 255 kPa olan sistemin net güç üretimi 16100 kW olarak bulunmuştur. Bu şartlarda, sıvı hava enerji depolama sisteminin verimliliği % 46,7 olarak bulunurken, entegre sistemin genel ısı verimliliği % 24,4 olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerji, Enerji depolama, Sıvı hava enerji depolama sistemi

ABSTRACT

In today's World, share of the renewable energy sources in electricity production is rapidly increasing. Due to their natures, power generation from solar and wind energy is discontinuous and requires additional energy storage systems to meet electricity requirement of grid. Renewable energy sources which can work on base load such as geothermal energy, can also work with energy storage systems to gain additional flexibility. In this study, thermodynamic analysis of single-flash geothermal power plant integrated with liquid air energy storage system is carried out. Electricity produced from geothermal source with temperature of 180 °C and mass flow rate of 100 kg/s is used to liquefy air during off-peak hours. Liquefied air, heated with geothermal waste water and expanded with a turbine to produce electricity during peak-hours.

According to thermodynamic analysis, 58.5% of air mass entering the system liquefied and liquefaction unit consumes 4304 kW power during 6 hours of off-peak times. Liquid air energy storage system produces 12,049 kW net power during 1 hour of peak demand. Integrated system with optimum flash pressure of 255 kPa produces 16,100 kW net power. Under these conditions, liquid air energy storage system efficiency found as 46.7% and thermal efficiency of integrated system found as 24.4%

Key Words: Geothermal energy; Liquid air energy storage system, Energy storage

1. GİRİŞ

Uluslararası Enerji Ajansı'nın (UAE) 2017 verilerine göre dünya enerji ihtiyacı 14,050 Milyon ton eşdeğer petrol (MTEP)'e ulaşmıştır [1]. Bu ihtiyacın büyük bir çoğunluğu, petrol ve doğal gaz gibi sera gazlarının salınımı gibi çevresel etkileri olan fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Bu etkileri azaltmak ve gün geçtikçe artan enerji ihtiyacını karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, doğaları gereği kesintili bir yapıya sahiptirler. Bu nedenle bu tarz enerji kaynaklarından tam kapasite faydalanabilmek için enerji depolama teknolojileri geliştirilmelidir. Literatürde, enerji depolama sistemlerinin güneş ve rüzgâr enerjisine entegre edilmesi ile ilgili çeşitli çalışmalar vardır.

Jeotermal enerjiden, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının tersine kesintisiz olarak faydalanılabilir. Bundan dolayı jeotermal santraller baz yük üreticisi çalışabilmektedirler. Baz yük olarak çalışan güç santralleri, şebekenin elektrik ihtiyacının az olduğu gece saatlerinde güç üretimini azaltabilir veya tamamıyla durdurabilirler. Aynı şekilde elektrik ihtiyacının fazla olduğu zamanlarda, kapasitelerinin fazlasını üretmek zorunda kalabilirler. Bu gibi operasyonlar, güç santrallerinin ömürlerini olumsuz etkilerken, üretilen elektriğin maliyetini de arttırmaktadır. Baz yük üreticisi olarak güç santrallerinin enerji depolama sistemleri ile entegre edilmesi, hem elektrik talebinde ihtiyaç duyulan esnekliği sağlayacak hem de bahsedilen olumsuzlukların giderecektir.

Literatürde, MWh-GWh gibi büyük ölçekli kapasitelere sahip enerji depolama sistemleri ile ilgili çalışmalar bulunabilir [2,3]. Bu sistemlerden en yaygın olanları, sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri ve pompalanmış su tabanlı enerji depolama sistemleridir. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sisteminde, elektrik ihtiyacının az olduğu zamanda hava yüksek basınca sıkıştırılarak yeraltı mağaralarında depolanır. Elektrik ihtiyacının fazla olduğu zamanlarda, depolanan hava ısıtılıp türbin ile genişletilip elektrik üretimi için kullanılır. Bu sistemlerin enerji depolama verimleri 70% civarındadır [4]. Pompalanmış su tabanlı enerji depolama sistemlerinde ise elektrik ihtiyacının az olduğu zamanlarda yüksek rezervuarda depolanan su, elektrik üretmek için alçak rezervuara yer çekiminin yardımıyla yönlendirilir ve su türbinlerinin yardımıyla elektrik üretilir. Bu tip sistemlerin enerji depolama verimi 90% civarındadır [5]. Bu iki yaygın sistem içinde en büyük sorun coğrafi koşullardır. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi için uygun yeraltı mağaraları gerekirken, pompalanmış su tabanlı enerji depolama sistemleri içinse uygun yüksek rezervuarlar oluşturmak gerekmektedir.

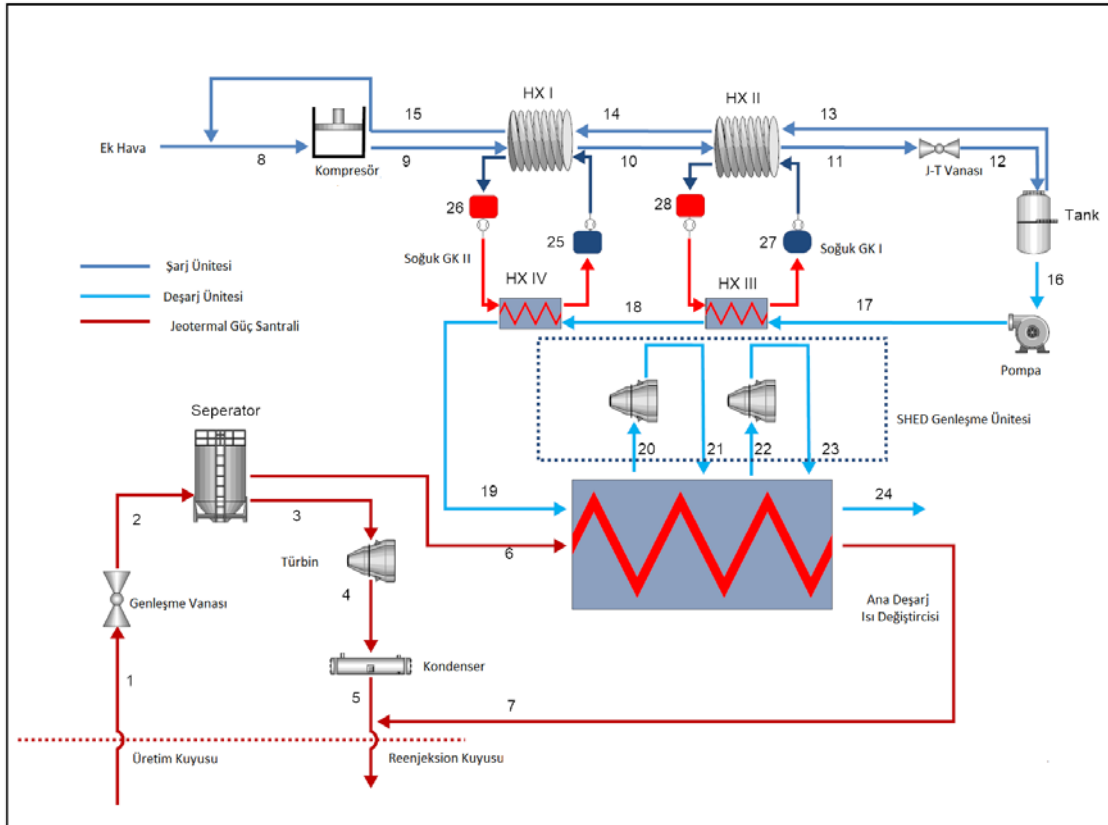
Sıvı hava enerji depolama sistemlerinde ise elektrik ihtiyacının az olduğu zamanlarda enerji, hava sıvılaştırılarak tanklarda depolanır. Depolanan sıvı hava, elektrik ihtiyacının fazla olduğu zamanlarda, dış bir ısı kaynağı ile ısıtılıp türbinden geçerek elektrik üretimi sağlanır.[6] Diğer enerji depolama sistemlerine göre yeni sayılabilecek sıvı hava enerji depolama sistemiyle ilgili ilk pilot tesisin analizi Morgan ve diğerleri tarafından gerçekleştirilmiştir [7]. Bu pilot tesis, 350 kW/2.5 MWh kapasiteye sahip olup yaklaşık olarak 8 saat boyunca şebekeye elektrik sağlayabilmektedir. Krawczyk ve diğerleri sıkıştırılmış hava ve sıvı hava enerji depolama sistemlerini karşılaştırmış ve bu sistemlerin enerji depolama verimlerini sırasıyla 40 % ve 55% olarak bulmuş ve aynı zamanda sıvı havanın, sıkıştırılmış havaya göre 6 kat fazla enerji yoğunluğu olduğunu göstermişlerdir[8]. Li ve diğerleri, sıvı hava enerji depolama sistemi entegre edilmiş bir nükleer güç santralının termodinamik analizini yapmış ve enerji depolama verimliliğini 70% olarak hesaplamışlardır. [9] Antonelli ve diğerleri potansiyel entegre sistemleri incelemiştir [10]. Li ve diğerleri, sıvı hava ile sıvı hidrojeni enerji depolama yönüyle karşılaştırmış ve sıvı havanın ekonomik olarak daha iyi performans verdiğini gözlemlemiştir [11].

Bu çalışmada, sıvı hava enerji depolama (SHED) sistemi entegre edilmiş tek flaşlı jeotermal güç santralının termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Tek flaşlı jeotermal güç santrallerinde, jeotermal su genişleme vanasından geçtikten sonra, buhar kısmı türbine yönlendirilirken, jeotermal atık su direk veya yerel ısıtmada kullanılarak rezervuara geri gönderilmektedir. Bu çalışmada jeotermal atık su SHED sisteminin ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Elektrik ihtiyacının az olduğu zamanda jeotermal güç santralinde üretilen elektrik, havayı sıvılaştırmakta kullanılmıştır. Elektrik ihtiyacının fazla olduğu zamanda ise sıvı hava pompa yardımıyla yüksek basınca çıkarılıp, jeotermal atık su ile ısıtılarak türbinden genişletilip elektrik üretimi sağlanmıştır. Termodinamik analiz için, jeotermal kaynak sıcaklığı 180°C ve debisi 100 kg/s bir kaynak jeotermal kaynak ele alınmış ve entegre sistemin ısı verimliliği, enerji depolama verimliliği hesaplanmıştır. Jeotermal kaynak sıcaklığının sistemin genel performansına olan etkileri incelenmiştir.

2. SİSTEM MODELİ

Şekil 1’de incelenen sistemin şematik diyagramı verilmiştir. Sunulan sistemde tek flaşlı güç santralinde üretim kuyusundan alınan jeotermal su, genişleme vanasından geçirilir ve buhar kısmı türbine yönlendirilerek iş üretimi sağlanır. Üretilen elektrik, şebekenin elektrik ihtiyacının az olduğu zamanlarda hava sıvılaştırma ünitesini çalıştırmakta kullanılır. Sıvılaştırma ünitesinde kuru hava, kompresör yardımıyla yüksek basınca çıkarılır. Bir önceki çevrimden gelen sıvılaştırmamış hava ve soğuk geri kazanım ünitelerinden gelen metanol ve propan yardımıyla sırasıyla birinci ve ikinci ısı değiştiricilerde (HX I ve HX II) soğutulur ve Joule-Thompson (J-T) vanasında genişletilir. $-194\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa kadar düşürülen havanın sıvılaştıran kısmı tankta depolanır. Sıvılaştırmayan kısım bir sonraki çevrimi soğutmak üzere çevrime geri gönderilir. Bu işlemler sıvı hava depolama sisteminin şarj operasyonları olarak adlandırılabilir.

Elektrik ihtiyacının fazla olduğu durumlarda, depolanan sıvı hava pompa yardımıyla yüksek basınçlara çıkarılır. Yüksek basınçlı sıvı hava, soğuk geri kazanım (Soğuk GK I ve Soğuk GK II) ısı değiştiricilerinde (HX III ve HX IV) sırasıyla propan ve metanol yardımıyla ön ısıtmaya uğrar. Bu ön ısıtma sürecinden sonra hava jeotermal atık su yardımıyla ana deşarj ısı değiştiricisinde ısıtılır ve türbinde genişletirilerek iş üretimi sağlanır. Jeotermal atık su re-enjeksiyon kuyusu yardımıyla yer altına geri gönderilir.



Şekil 1. SHED sistemi entegre edilmiş tek flaşlı jeotermal güç santralinin şematik gösterimi

3. TERMODİNAMİK ANALİZ

Sıvılaştırma ünitesinde kuru hava, ideal süreçte izotermal olarak çalışan bir kompresördeki yüksek basınçlara sıkıştırılır. İzotermal kompresör için genel enerji dengesi yazıldığında, birim kütle sisteme giren hava için sıkıştırma işi şu şekilde ifade edilebilir:

$$w_{\text{komp}} = h_9 - h_8 - T_8(s_9 - s_8) \quad (1)$$

Bu denklemde yer alan h ve s sırasıyla entalpi ve entropi'yi ifade etmektedir. Sıkıştırma işlemi sırasında kuru hava ideal gaz davranışları göstermektedir. Bu yüzden birim kütle için kompresör işi aynı zamanda şu şekilde ifade edilebilir:

$$w_{\text{komp}} = RT_8 \ln \left(\frac{P_9}{P_8} \right) \quad (2)$$

Bu denklemde yer alan R gaz sabitini T sıcaklığı P ise basıncı ifade etmektedir. Bir sıvılaştırma çevriminde sıvılaştırılan havanın kütleli debisinin, sisteme giren toplam havanın kütleli debisine oranı sıvılaştırma oranı olarak ifade edilip, sıvılaştırma çevrimleri için çok önemli bir parametredir. Sıvılaştırma oranı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$y = \frac{\dot{m}_{16}}{\dot{m}_8} \quad (3)$$

Sıvılaştırma oranı aynı zamanda, ısı değiştirici I (HX I), ısı değiştirici II (HX II), J-T vanası ve depolama tankı için enerji dengesi yazılarak hesaplanabilir. Bu durumda sıvılaştırma oranı şu şekilde ifade edilir:

$$y = \frac{h_{15} - h_9 + q_{c,\text{toplamlam}}}{h_{15} - h_{16}} \quad (4)$$

Denklem (4)'te yer alan $q_{c,\text{toplamlam}}$, ifadesi, metanol ve propan yardımıyla sıvı havadan geri kazanılan soğuk enerjidir. Düşük sıcaklıklardaki yüksek ısı kapasitelerinden dolayı soğuk geri kazanım ünitelerinde metanol ve propan tercih edilmiştir. Toplam geri kazanılan soğuk enerji aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$q_{c,\text{toplamlam}} = c_1(h_{28} - h_{27}) + c_2(h_{26} - h_{25}) \quad (5)$$

Bu denklemde yer alan c_1 ve c_2 ifadeleri, sırasıyla propan ve metanol kütleli debilerinin, sıvılaştırma çevrimine giren havanın kütleli debisine oranıyla hesaplanır.

$$c_1 = \frac{\dot{m}_{28}}{\dot{m}_8} \quad (6)$$

$$c_2 = \frac{\dot{m}_{26}}{\dot{m}_8} \quad (7)$$

Sıvılaştırma çevrimlerinde en önemli performans parametrelerinden biri sıvılaştırma işidir. Sıvılaştırma işi, birim kütle havayı sıvılaştırmak için gereken iştir ve toplam tüketilen işin sıvılaştırma oranına olan oranıyla hesaplanır.

$$w_s = \frac{W_{komp}}{y} \quad (8)$$

Deşarj ünitesinde, sıvı hava pompasının tükettiği iş birim kütle sıvı hava için aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$w_{pompa} = h_{17} - h_{16} \quad (9)$$

Deşarj ünitesinde bulunan türbinler tarafından üretilen iş, şu şekilde ifade edilir:

$$w_{türb} = (h_{20} - h_{21}) + (h_{22} - h_{23}) \quad (10)$$

Deşarj ünitesinde birim kütle sıvı hava için üretilen net iş aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$w_{shed} = w_{türb} - w_{pompa} \quad (11)$$

Bir enerji depolama sisteminde enerji depolama verimliliği, sistemden geri kazanılan enerjinin depolanan enerjiye oranı olarak ifade edilir. SHED sisteminde depolanan enerji, sıvı havayı oluşturmak için tüketilen enerjiye denk gelmektedir. SHED sisteminde enerji depolama verimliliği aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta_d = \frac{w_{shed}}{w_s} \quad (12)$$

Bu denklemde yer alan tüm ifadeler, birim kütle sıvı hava içindir. Aynı şekilde enerji depolama verimliliği, şarj ve deşarj operasyonları sırasında tüketilen ve üretilen işler cinsinden de yazılabilir.

$$\eta_d = \frac{\dot{W}_{shed} t_d}{\dot{W}_s t_s} \quad (13)$$

Bu denklemde yer alan t_s ve t_d ifadeleri sırasıyla şarj ve deşarj sürelerini ifade etmektedir.

Tek flaşlı jeotermal güç santrali için ısı verim aşağıdaki gibi ifade edilir [12].

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{jeo}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{m}_3(h_3 - h_4)}{\dot{m}_1(h_1 - h_0)} \quad (14)$$

Bu denklemde pay, jeotermal tesis tarafından üretilen işi, payda ise jeotermal suyun çevresel duruma göre içerdiği ısıyı ifade etmektedir. Entalpi h_0 değeri 25 °C ve 1 atm koşulları için hesaplanmıştır.

Deşarj operasyonları sırasında sistemde hem jeotermal türbin tarafından hem de SHED sisteminin türbin ünitesi tarafından iş üretilmekte ve aynı zamanda sıvı hava pompası tarafından iş tüketilmektedir. Bu durumda, entegre sistemin genel ısı verimliliği şu şekilde ifade edilir:

$$\eta_{genel} = \frac{\dot{W}_{jeo} + \dot{W}_{shed}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{m}_3(h_3 - h_4) + \dot{m}_{16}(h_{20} - h_{21} + h_{22} - h_{23}) - \dot{m}_{16}(h_{17} - h_{16})}{\dot{m}_1(h_1 - h_0)} \quad (15)$$

Jeotermal destekli SHED sisteminin performans değerlendirmesi için, jeotermal tesise giren birim kütle jeotermal su başına sıvılaştırılan hava miktarını ifade eden 'g' parametresi tanımlanmıştır. Bu parametre özgül sıvılaştırma işi ve jeotermal iş tarafından şu şekilde ifade edilmektedir:

$$g = \frac{w_{jeo}}{w_s} \quad (16)$$

Denklem (16)'da pay, tesise giren birim kütle jeotermal su başına üretilen işi ifade etmektedir ve bu iş sıvılaştırma ünitesinde kompresör tarafından tüketilen işe denktir. Payda ise, sıvılaştırma ünitesinde birim kütle havayı sıvılaştırmak için tüketilen işi ifade etmektedir. Böylece denklem (16)'yı sıvılaştırılan havanın tesise giren jeotermal suya oranı olarak ifade edilmektedir.

Sunulan entegre sistemin termodinamik analizi için, 180 °C kaynak sıcaklığına ve 100 kg/s kütleli debiye sahip olan bir jeotermal kaynak ele alınmıştır. Elektrik ihtiyacının az olduğu zamanlarda, jeotermal tesis tarafından üretilen güç çıkışının tamamı sıvılaştırma ünitesinde kullanılmıştır. Sıvılaştırma ünitesinde, hava 1 atm ve 25 °C olarak kompresöre girmiş ve 20 MPa sıkıştırılmıştır. Minimum sıcaklık farkı 1 °C olan ısı değiştiricilerde hava soğutulmuş ve vanada genişleyerek sıvılaştırılmıştır. Şarj ünitesi 6 saat boyunca çalışmaktadır. Elektrik ihtiyacının fazla olduğu zamanlarda, sıvı hava 18 MPa basınca pompa tarafından çıkarılarak jeotermal atık su ile ısıtılıp iş üretimi sağlanmıştır.

İncelenen sistemde, borularda ve ısı değiştiricilerde basınç düşüşü yoktur. Çevre ile sistem arasında ısı transferi yoktur. Soğuk geri kazanım ünitelerinde tüketilen pompa işleri etkilerinin azlığından dolayı hesaplamalara dahil edilmemiştir. Tablo 1'de analiz sırasında yapılan varsayımların listesi verilmiştir.

Tablo 1. Analiz sırasında yapılan varsayımların listesi

Minimum sıcaklık farkı ΔT_{min} (°C)	1
Maksimum propan sıcaklığı (°C)	-178,2
Maksimum metanol sıcaklığı (°C)	-58,15
Propan kütleli debi oranı c_1	0,6
Metanol kütleli debi oranı c_2	0,3619
Kompresör eş-sıcaklık verimi	0,8
Pompa eş-entropi verimi	0,85
Buhar türbini eş-entropi verimi	0,8
SHED sistemi türbini eş-entropi verimi	0,9
Şarj süresi t_s (h)	6
Deşarj süresi t_d (h)	1

4. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Tablo 2’de sistemin şarj süresinde, durumlar bazında kütleli debi, basınç, sıcaklık, entalpi ve entropi değerleri verilmiştir. 100 kg/s jeotermal su tesiste girmektedir. Tek flaş jeotermal güç tesisinde, buhar türbini tarafından üretilen işi maksimize etmek için flaş basıncı (genleşme vanası çıkışındaki basınç) optimize edilmiştir. Optimize edilmiş operasyonda, jeotermal enerji santrali, tesise giren birim jeotermal su kütlesi başına 43,04 kJ iş üretmektedir. Jeotermal tesis tarafından üretilen 4304 kW güç çıkışı, 6 saat boyunca sıvılaştırma ünitesini beslemek için kullanılmıştır. Bu operasyonda jeotermal tesisin ısıl verimi % 6,53 olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Şarj ünitesinin termodinamik verileri

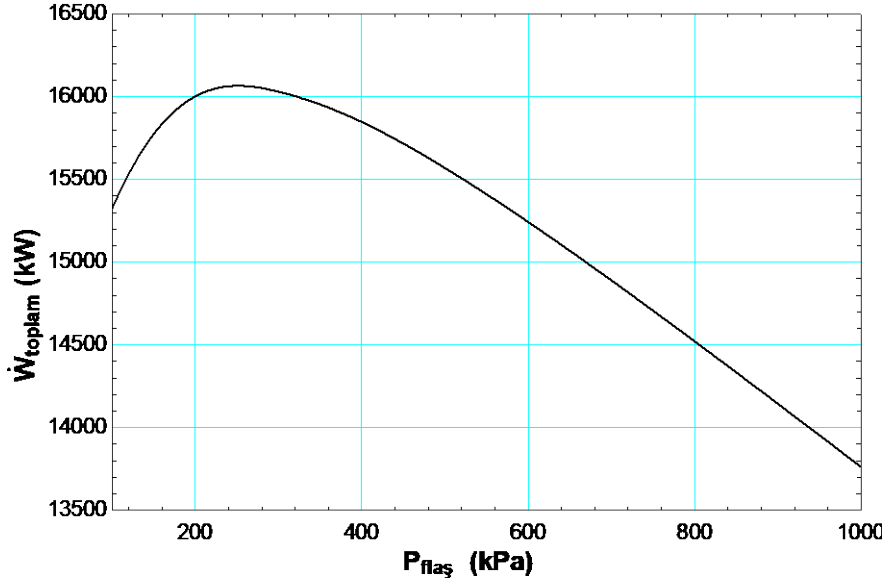
Durum	Akışkan	\dot{m} (kg/s)	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
0	Su	-	101,3	25	104,9	0,3672
1	Su	100	1003	180	763,1	2,139
2	Su	100	143,6	110	763,1	2,206
3	Su	13,52	143,6	110	2691	7,238
4	Su	13,52	10	45,81	2373	7,487
5	Su	100	10	45,81	191,8	0,6492
6	Su	86,48	143,6	110	461,6	1,419
8	Hava	7,63	101,3	25	298,4	6,859
9	Hava	7,63	20000	25	263,4	5,229
10	Hava	7,63	20000	-45,5	164,3	4,848
11	Hava	7,63	20000	-155,6	-41,07	3,607
12	Hava	7,63	101,3	-193,1	-41,07	4,041
13	Hava	3,16	101,3	-191,4	78,74	5,538
14	Hava	2,16	101,3	-46,5	226,5	6,583
15	Hava	3,16	101,3	23,2	296,6	6,853
16	Hava	4,466	101,3	-194,2	-126,1	2,978
25	Metanol	2,74	700	-58,15	-1350	-4,169
26	Metanol	2,74	700	24,25	-1157	-3,41
27	Propan	4,578	700	-178,2	-177,2	-1,192
28	Propan	4,578	700	-59,15	62,94	0,4345

Sıvılaştırma ünitesi 1 kg sıvı hava üretmek için 963,6 kJ iş tüketilmektedir. Bu operasyonda sisteme giren havanın %58,49 u sıvılaşmıştır. ‘g’ parametresi 0,04466 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda sisteme giren 1 kg jeotermal su için 44,66 gram hava sıvılaşmaktadır. Sisteme giren 100 kg/s jeotermal su ile 4,466 kg/s sıvı hava üretilmektedir. 6 saatlik operasyon sonucunda, sıvı hava tankının kapasitesi 96,04 ton olarak hesaplanmıştır. Şarj ünitesinin performans verileri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Şarj ünitesinin performans verileri

y (kg sıvı hava/kg gaz hava)	0,5849
w_s (kJ/kg sıvı hava)	963,6
w_{jeo} (kJ/kg jeotermal su)	43,04
\dot{W}_{liq} (kW)	4304
g (kg sıvı hava/ kg jeotermal su)	0,04466
η_{th} (%)	6,53

Deşarj ünitesinde durumlar için termodinamik veriler Tablo 4'te verilmiştir. 1 saatlik deşarj operasyonları sırasında depolanan sıvı havanın tamamı sisteme girmiştir. Bu da 26,79 kg/s kütleli debiye denk gelmektedir. Jeotermal tesisin flaş basıncı toplam güç çıktısını maksimize etmek için optimize edilmiştir. Optimum operasyon sırasında flaş basıncı 255,1 kPa olarak bulunmuştur. Optimum basınç ile jeotermal tesis, birim kütle jeotermal su başına 40,07 kJ iş üretmektedir. Bu 4007 kW güç çıktısına denk gelmektedir. Flaş basıncının, toplam güç çıktısına olan etkisi şekil 2'de verilmiştir. Toplam güç çıktısı maksimum flaş basıncından sonra, artan flaş basıncı ile 13762 kW'a kadar düşmektedir.

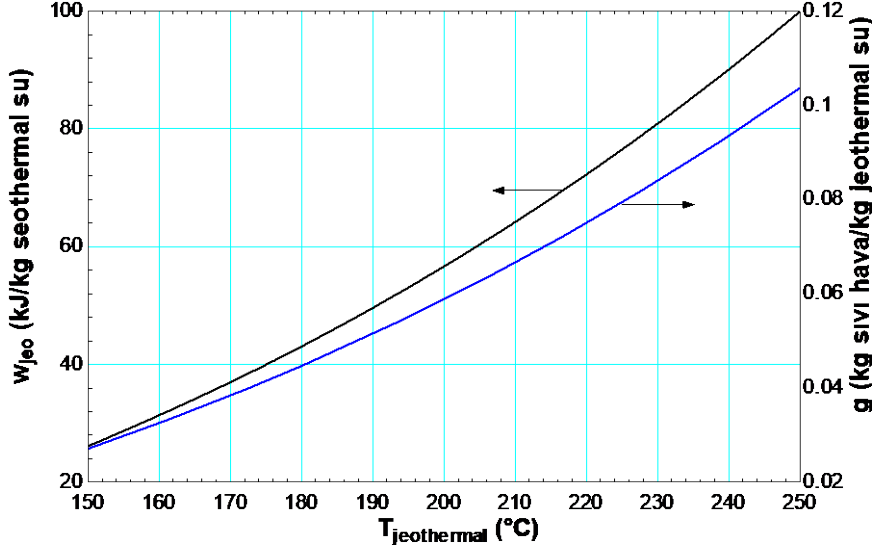


Şekil 2. Toplam güç çıktısının flaş basıncı ile değişimi

Tablo 4. Deşarj ünitesinin termodinamik verileri

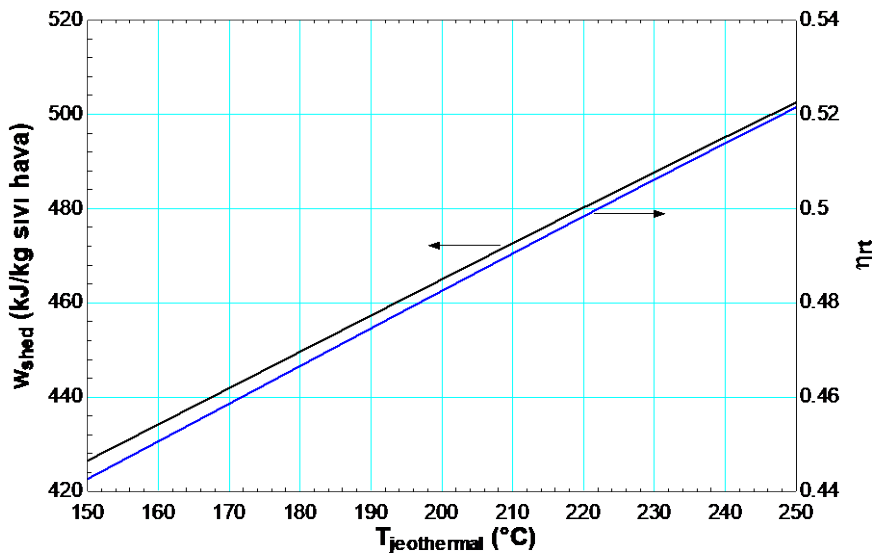
Durum	Akışkan	\dot{m} (kg/s)	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	
0	Su	-	101,3	25	104,9	0,3672	
1	Su	100	1003	180	763,1	2,139	
2	Su	100	255,1	128,1	763,1	2,175	
3	Su	10,32	255,1	128,1	2717	7,046	Jeotermal
4	Su	10,32	10	45,81	2329	7,35	
5	Su	100	10	45,81	191,8	0,6492	
6	Su	89,68	255,1	128,1	538,2	1,614	
7	Su	89,68	255,1	92,19	386,4	1,259	
16	Hava	26,8	101,3	-194,2	-126,1	2,978	
17	Hava	26,8	18000	-188,2	-102,3	3,02	
18	Hava	26,8	18000	-60,25	144	4,783	
19	Hava	26,8	18000	23,35	263,7	5,261	
20	Hava	26,8	18000	127,1	386,8	5,618	
21	Hava	26,8	800	-90,99	177,6	5,754	Deşarj
22	Hava	26,8	800	118,4	391,8	6,538	
23	Hava	26,8	101,3	-144,4	127,6	6,012	
24	Hava	26,8	101,3	25	298,4	6,859	
25	Metanol	16,58	700	-58,15	-1350	-4,169	
26	Metanol	16,58	700	24,25	-1157	-3,41	
27	Propan	27,49	700	-178,2	-177,2	-1,192	
28	Propan	27,49	700	-59,15	62,94	0,4345	

Yapılan analizlerin bir parçası olarak, değişken jeotermal kaynak sıcaklığının entegre sistemin performansına olan etkileri incelenmiştir. Şekil 3'te değişen jeotermal kaynak sıcaklığının, birim kütle jeotermal su başına üretilen iş ve tanımladığımız 'g' parametresine olan etkileri verilmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığı 150 °C' den 250°C' ye arttıkça, birim kütle jeotermal su başına üretilen iş 26,1 kJ/kg'dan 99,96 kJ/kg'a kadar artmaktadır. Bu artış aynı zamanda 'g' parametresinde 0,027'den 0,1037'ye kadar bir artışa sebep olmaktadır. Sisteme giren jeotermal su sıcaklığı arttıkça, daha fazla jeotermal tesisten daha fazla iş üretilmekte ve aynı zamanda daha fazla hava sıvılaştırılmaktadır.



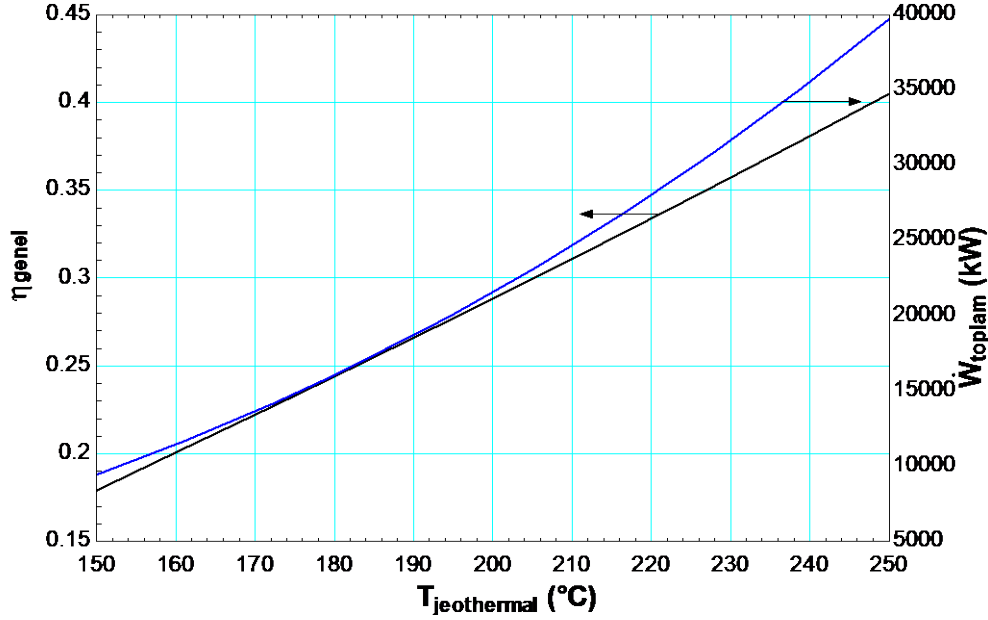
Şekil 3. Jeotermal işi ve 'g' parametresinin şarj zamanında kaynak sıcaklığıyla değişimi

Jeotermal kaynak sıcaklığının SHED sisteminden üretilen iş ve enerji depolama verimliliğine olan etkisi Şekil 4'te verilmiştir. Deşarj süresinde, jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça SHED tarafından üretilen iş ve enerji depolama verimliliği artmaktadır. Çünkü kaynak sıcaklığı arttıkça, genleşme vanasından çıkan jeotermal akımının buhar kalitesi artmaktadır. Bu sayede jeotermal buhar türbininden üretilen iş artmaktadır. Aynı zamanda sıcaklığın artmasıyla göreceli olarak daha az miktarda SHED ünitesinin gaz türbinlerinde üretilen işte artış olmaktadır. Jeotermal kaynak sıcaklığı 150 °C' den 250°C' ye arttıkça, enerji depolama verimliliği % 44,26'dan % 52,15'e yükselmiştir. Üretilen iş ise 426 kJ/kg'dan 502 kJ/kg'a yükselmiştir.



Şekil 4. SHED sistemi tarafından üretilen iş ve enerji depolama verimliliğinin kaynak sıcaklığıyla değişimi

Son olarak, genel ısı verimliliği ve üretilen toplam güç çıktısının jeotermal kaynak sıcaklığı ile değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 4'te olduğu gibi kaynak sıcaklığı arttıkça genel verimlilik ve üretilen toplam güç artmaktadır. Sıcaklık 150 °C' den 250 °C' ye arttıkça, verim % 17,91'den % 40,48'e yükselmekte aynı zamanda üretilen toplam güç 9,444 kW'tan 39,072 kW'a yükselmektedir.



Şekil 5. Genel verim ve toplam net güç çıktısının jeotermal kaynak sıcaklığı ile değişimi

SONUÇ

Bu çalışmada, tek flaşlı jeotermal güç tesisi tarafından desteklenen bir sıvı hava enerji depolama sisteminin termodinamik analizi yapılmıştır. 180 °C kaynak sıcaklığına ve 100 kg/s kütleli debiye sahip olan jeotermal tesis 4304 kW güç üretmektedir. Üretilen bu güç elektrik ihtiyacının az olduğu zamanlarda hava sıvılaştırma ünitesinde kullanılmaktadır. 6 saatlik şarj operasyonları sırasında toplam 96,06 ton sıvı hava depolanmıştır. Depolanan sıvı havadan 1 saatlik deşarj operasyonları sırasında 12049 kW güç üretilmiştir. Entegre sistemin enerji depolama verimliliği % 46,6 ve genel ısı verimliliği % 24,4 olarak hesaplanmıştır.

Jeotermal kaynak sıcaklığı entegre sistemin performansına etki eden önemli bir parametredir. Kaynak sıcaklığı arttıkça, belirli şarj süresince daha fazla sıvı hava depolanmakta ve aynı zamanda deşarj süresince daha fazla iş üretilmektedir. Jeotermal destekli sıvı hava enerji depolama sistemlerinden, yüksek kaynak sıcaklıklarda daha yüksek verim elde edilebilir.

Enerji depolama verimliliği, geri kazanılan enerjinin depolanan enerjiye oranı olarak tanımlanabilir. Sıvı hava enerji depolama sistemi için depolanan enerji, havayı sıvılaştırmak için gereken enerji olarak tanımlanmaktadır. Jeotermal destekli sıvı hava enerji depolama sistemi için enerji depolama verimliliği % 40 ile % 60 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Sıvı hava enerji depolama sistemleri, jeotermal güç santrallerine sürdürülebilirlik ve elektrik üretiminde esneklik kazandırmak için uygun bir çözüm olabileceği gözlemlenmiştir. Sonraki çalışmalarda, farklı entegre konfigürasyonlar için sistemin enerji ve ikinci kanun analizleri ele alınacaktır.

SEMBOLLER

c_1	Birinci Soğuk geri kazanım ünitesi kütle debi oranı
c_2	Birinci Soğuk geri kazanım ünitesi kütle debi oranı
h	Özgül entalpi-saat (kJ/kg)
g	Sıvılaştırılan hava kütleli debisinin jeotermal su kütleli debisine oranı
\dot{m}	Kütleli debi (kg/s)
P	Basınç (kPa,MPa)
Q	Isı Transferi (kJ)
q	Özgül Isı Transferi (kJ/kg)
s	Özgül entropi (kJ/kg-K)
T	Sıcaklık (K, °C)
t	Operasyon Süresi (h)
R	Gaz Sabiti (kJ/kg-K)
w	Özgül iş (kJ/kg)
\dot{W}	Güç (kW)
y	Sıvılaştırılan gaz oranı (\dot{m}_g/\dot{m})

Yunan Harfleri

η	Verim
Δ	Fark

İndis, Alt indis

1,2,3..	Çevrimin durumları
c	Soğuk geri kazanım
SHED	Sıvı hava enerji depolama
komp	Kompresör
jeo	Jeotermal
s	Sıvılaştırma
th	Termal
turb	Türbin

KAYNAKLAR

- [1] IEA, "Global Energy and CO2 Status Report 2017," *Glob. Energy CO2 Status Rep. 2017*, no. March, 2017.
- [2] D. O. AKINYELE and R. K. RAYUDU, "Review of energy storage technologies for sustainable power networks," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 8, pp. 74–91, 2014.
- [3] H. CHEN, T. N. CCONG, W. YANG, C. TAN, Y. LI, and Y. DING, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Prog. Nat. Sci.*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, 2009.
- [4] L. CHEN, T. ZHENG, S. MEI, X. XUE, B. LIU, Q. LU, "Review and prospect of compressed air energy storage system," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 529–541, 2016.
- [5] M. ANEKE, M. WANG, "Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review," *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 350–377, 2016.
- [6] Centre for Low Carbon Futures and Liquid Air Energy Network, "Liquid Air Technologies – a guide to the potential," p. 28, 2013.
- [7] R. MORGAN, S. NELMES, E. GIBSON, G. BRETT, "Liquid air energy storage – Analysis and first results from a pilot scale demonstration plant q," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 845–853, 2015.
- [8] P. KRAWCZYK, Ł. SZABLOWSKI, S. KARELLAS, E. KAKARAS, K. BADYDA, "Comparative thermodynamic analysis of compressed air and liquid air energy storage systems," *Energy*, vol. 142, pp. 46–54, 2018.
- [9] Y. LI, H. CAO, S. WANG, Y. JIN, D. LI, X. WANG, Y. DING., "Load shifting of nuclear power plants using cryogenic energy storage technology," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1710–1716, 2014.
- [10] M. ANTONELLI, S. BARSALI, U. DESIDERI, R. GIGLIOLLI, F. PAGANUCCI, "Liquid air energy storage : Potential and challenges of hybrid power plants," *Appl. Energy*, vol. 194, pp. 522–529, 2017.



- [11] Y. LI, H. CHEN, X. ZHANG, C. TAN, and Y. DING, “Renewable energy carriers: Hydrogen or liquid air/nitrogen?,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 14–15, pp. 1985–1990, 2010.
- [12] M. KANOĞLU, Y. A. ÇENGEL, and İ. DINCER, *Efficiency evaluation of energy systems*. Springer Science & Business Media, 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Tuğberk Hakan ÇETİN

1994 İstanbul doğumludur. Lisans ve yüksek lisansını Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2017’den beri Gebze Teknik Üniversitesi Enerji Teknolojileri Enstitüsü’nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışma alanlarında kriyojenik, enerji sistemleri tasarımı ve optimizasyonu sayılabilir.

Neslihan YANIKÖMER

1991 İstanbul doğumludur. Lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde almıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü’nde yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 2017’den beri Gebze Teknik Üniversitesi Enerji Teknolojileri Enstitüsü’nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışma alanlarında nükleer atık yönetimi ve enerji depolama sistemleri sayılabilir.

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 Bölümü’nde 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 verimliliği, soğutma sistemleri, hidrojen üretimi ve gaz sıvılaştırması sayılabilir.