

JEOTERMAL GÜÇ SANTRALLERİNİN İKİNCİ YASA ANALİZİ

Mehmet KANOĞLU

ÖZET

Jeotermal güç santralleri diğer geleneksel fosil yakıt kullanan elektrik üretim sistemlerine (kömür veya doğal gazlı termik santraller, nükleer santraller, vb.) göre daha düşük sıcaklıkta enerji kaynakları kullanarak elektrik üreten sistemlerdir ve dolayısıyla enerji (ısı) verimleri oldukça düşüktür. Tipik bir jeotermal santral kullandığı enerjinin %10'undan daha az bir kısmını elektriğe dönüştürürken kalan % 90'ından fazlası atık ısı olarak ortaya çıkar. Temel termodinamik eğitimi alan herkes bilir ki, kaynak sıcaklığı arttıkça, bir güç santralının ısı verimi yani ısının elektriğe dönüştürülebilme oranı artar. Yüzde 10'un altında bir verim çok verimsiz bir elektrik üretimi sistemine işaret ediyor gibi görünse de 200°C sıcaklığındaki bir jeotermal kaynağın enerjisinin teorik olarak maksimum % 37'i elektriğe dönüştürülebilir. Yani üst limit aslında % 100 değil sadece % 37'dir ve santralin verimi bu % 37'lik üst limite göre değerlendirilmelidir. Böyle bir değerlendirme ancak termodinamiğin ikinci yasa analizi ile mümkündür. İkinci yasa analizi, sistemin performansını gerçekçi bir şekilde ortaya koyarken, performansı düşüren nedenleri bulmamızı ve sayısal olarak ifade etmemizi sağlar. İkinci yasa analiz sonuçları yardımıyla sistemin performansının artırılma potansiyeli ve bunun hangi metotlarla gerçekleştirilebileceği ortaya konabilir.

Bu çalışmada jeotermal güç santrallerinin aynı zamanda ekserji analizi olarak da bilinen ikinci yasa analizi farklı jeotermal çevrimleri içine alarak anlatılacak ve jeotermal kaynakların elektrik üretim potansiyelleri ortaya konacaktır. Enerji ve ekserji verim ifadeleri çıkarılarak örnek uygulamalar ele alınacaktır.

1. GİRİŞ

Jeotermal enerji, 1960'lardan beri yaygın olarak elektrik üretiminde kullanılan bir enerji kaynağıdır. Bugün 21 ülkede jeotermal güç santralleri vardır ve kapasiteleri 8000 MW'ın üzerindedir. Mevcut jeotermal santrallerin çoğu 1970 ile 1980 arasında yapılmıştır. Petrol krizinin etkisi jeotermal enerjinin bedava bir kaynak olmasıyla birleşince santraller optimum olmayan şartlarda hizmete girmiştir. Dolayısıyla mevcut santrallerin önemli bir bölümünün performansı çeşitli değişikliklerle artırılabilir.

Termodinamiğin ikinci yasasına dayanan ekserji analizi enerji sistemlerinin analizinde ve performans incelemesinde önemli bir araçtır [1-6]. Jeotermal kaynakların sıcaklıkları düşük olduğu için birinci yasa verimleri (enerji verimi veya ısı verim olarak da ifade edilebilir) oldukça düşüktür.

DiDippo [7] ikincil (binary) jeotermal çevrimleri ikinci yasa analizi ile incelemiş ve ikincil çevrimlerin yüksek ikinci yasa verimleri (ekserji verimi) ile çalıştığını göstermiştir. % 40'ın üzerinde bir ekserji verimi gözlenmiştir. Yüksek ekserji verimi, büyük oranda ısı değiştiricisindeki ekserji kayıplarının azaltılması ve düşük sıcaklıkta soğutma suyu kullanılmasıyla sağlanmıştır.

Lee [8] jeotermal kaynakların ekserjilerine göre sınıflandırılmaları gerektiğini belirtmiştir. Ekserji analizinin jeotermal santrallere uygulandığı birçok sayıda çalışma vardır [6, 9-13]. Hepbaşlı [14] jeotermal enerjiyi de içeren yenilenebilir enerji sistemlerinin ekserji analizini detaylı bir biçimde bir derleme çalışmasında ele almıştır.

Bu çalışmanın konusu, jeotermal güç üretim santrallerinin ikinci yasa veya ekserji analizidir. İkinci yasanın ilgili denklemleri farklı termodinamik çevrimlere uygulanacak ve karmaşık olmayan sayısal örnekler yardımıyla bazı uygulamalar ele alınacaktır.

2. İKİNCİ YASA VE EKSERJİ ANALİZİ

Termodinamik bilimi iki temel doğal yasaya dayanır: Birinci yasa ve ikinci yasa. Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumunu ifade eder ve enerji dönüşümleri sırasında enerjinin bir şekilden diğerine dönüşebileceğini fakat toplam enerjinin sabit kalacağını ifade eder. Termodinamiğin ikinci yasası, enerjinin kalitesi olduğunu ve gerçek hal değişimlerinin enerji kalitesinin azalması yönünde olacağını ifade eder. Mesela, yüksek sıcaklıktaki ısı enerjinin kalitesi ısının daha düşük sıcaklıkta bir cisme transferi sırasında azalır. Enerjinin kalitesini veya iş yapma potansiyelini sayısal olarak ifade etme çabaları ekserji adı verilen bir özelliğin tanımlanmasını sağlamıştır.

Ekserji, enerjinin işe çevrilebilir potansiyeli olarak tanımlanır. Bu potansiyel, enerjinin bulunduğu duruma (sıcaklık, basınç, buhar oranı gibi) ve çevre şartlarına bağlı olarak hesaplanır ve elde edilebilecek maksimum işi ifade eder. Bir hal değişimi sırasında kaybedilen iş potansiyeli tersinmezlik veya ekserji kaybı olarak tanımlanır. Bir hal değişimi sırasında ekserji kayıpları ne kadar az ise üretilen iş o kadar fazladır veya tüketilen iş o kadar azdır. Bir sistemin performansı ekserji kayıplarının en aza indirgenmesi yoluyla maksimize edilebilir.

Ekserji analizi, ikinci yasaya dayanan bir termodinamik analiz olup enerji sistemlerini ve hal değişimlerini gerçekçi ve anlamlı biçimde değerlendirmeyi ve karşılaştırmayı mümkün kılar. Ekserji analizi ile bulunan ekserji veya ikinci yasa verimleri gerçek sistem performansını maksimum performansla karşılaştırırken, ekserji analizi yardımıyla termodinamik kayıpların yerleri, miktarları ve nedenleri bulunabilir. Ekserji analizi sonuçları sistem performansının iyileştirilmesinde ve daha iyi tasarımların yapılmasında kullanılır.

3. JEOTERMAL KAYNAKLARIN ELEKTRİK ÜRETİM POTANSİYELİ

Isıl enerjiyi elektriğe dönüştüren santrallerin enerji veya ısı verimi üretilen elektriğin sağlanan ısı enerjisiyle oranı olarak tanımlanır. Bir ısı enerjisi kaynağından elde edilebilecek maksimum ısı verim Carnot verimi ile sınırlıdır. Mesela, bir doğal gaz termik santralinde yanma odasındaki sıcaklık 1000°C'nin üzerine çıkar. Bu santralin atık ısısını 25°C sıcaklığındaki atmosfer havasına attığını kabul edersek Carnot ısı verimi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta_{\text{carnot,termik}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{(25 + 273) \text{ K}}{(1000 + 273) \text{ K}} = 0.766 = \%76.6$$

Yani bu santralden elde edilebilecek maksimum teorik verim % 76.6'dır. Bir başka deyişle, bir Carnot çevrimi ile bu kaynağın ısısının ancak %76.6'sı işe çevrilebilir. Şimdi ise 200°C sıcaklığında bir jeotermal kaynağımız olduğunu varsayalım. Bu kaynak kullanılarak elektrik elde etmek istersek teorik üst limit

$$\eta_{\text{carnot,jeotermal}} = 1 - \frac{(25 + 273) \text{ K}}{(200 + 273) \text{ K}} = 0.370 = \%37.0$$

olacaktır.

Yani, termodinamik olarak mükemmel bir santral bile kullanıldığında jeotermal ısının en fazla % 37'sini elektriğe dönüştürebiliriz. Gerçekte ise jeotermal santrallerin ısı verimleri genelde % 10'un altındadır. Bu iki uygulama arasındaki fark enerjinin kalitesi ile ilgilidir. Yüksek sıcaklıktaki bir enerji kaynağı düşük sıcaklıktakine göre daha kalitelidir ve yüksek kalitedeki bir enerjinin daha yüksek bir yüzdesi elektriğe dönüştürülebilir.

Örnek olarak verdiğimiz termik santralin ısı veriminin gerçekte % 30, jeotermal santralin gerçek ısı veriminin ise % 10 olduğunu varsayalım. Termodinamiğin ikinci yasasına göre verim (ekserji verimi) gerçek ısı veriminin maksimum ısı verime oranı olarak tanımlanabilir. Bu durumda,

$$\eta_{\text{ekserji,termik}} = \frac{0.30}{0.766} = 0.392 = \%39.2$$

$$\eta_{\text{ekserji,jeotermal}} = \frac{0.10}{0.370} = 0.270 = \%27.0$$

değerleri bulunur. İki santralin birinci yasaya dayanan ısı verimine göre karşılaştırılmasında termik santralin gerçek verimi jeotermal santrale göre çok yüksek olmakta; ikinci yasaya dayanan ekserji verimi karşılaştırılmasında ise aradaki fark oldukça azalmaktadır. Isıl verime dayanan bir karşılaştırma kaynağın kalitesini göz önüne almadığı için gerçekçi değildir ve ekserji verimi daha anlamlı ve gerçekçi bir karşılaştırma imkanı sağlamaktadır. Jeotermal santrallerin ısı verimleri düşük sıcaklıkta kaynaklar kullandıkları için çok düşük olduğundan performansı iyi olan bir santralle daha kötü olan bir santralin ısı verimleri arasında fark düşük olacak ve anlamlı bir karşılaştırma imkanı olmayacaktır. İkinci yasa veriminin bu dezavantajı büyük ölçüde ortadan kaldırdığı görülmektedir.

Jeotermal kaynakların elektrik üretme potansiyelleri büyük ölçüde kaynağın sıcaklığına ve buhar oranına bağlıdır. Sıcaklık ve buhar oranı arttıkça kaynağın entalpisi ve iş üretme potansiyeli (ekserji) artacaktır. Mevcut jeotermal kaynakların büyük çoğunluğu sıvı ağırlıklıdır. Şekil 1'de sıvı bir jeotermal kaynağın ekserjisinin yani iş potansiyelinin kaynak sıcaklığı ile değişimi verilmiştir. Değişimin lineer olduğu görülmektedir. Şekle göre 150°C'deki bir kaynağın ekserjisi 87 kJ/kg iken 200°C'de bir kaynağın ekserjisi 158 kJ/kg olarak görülmektedir. Başka bir deyişle 150°C'deki 1000 kg jeotermal sudan 24 kWh elektrik üretmek mümkün iken 200°C'deki 1000 kg'lık sudan 44 kWh elektrik üretilebilir. Bu değerlerin teorik üst limit olduğuna ve gerçek değerlerin bunların çok altında olduğuna dikkat edilmelidir.

Bu aşamada bir örnek yardımıyla bir jeotermal elektrik santralinin genel enerji ve ekserji analizini gerçekleştirelim:

Örnek Uygulama: Bir jeotermal güç santrali 160°C sıcaklıkta ve 440 kg/s debide sıvı su kaynağını kullanarak 25°C'lik çevre şartlarında 15 MW net elektrik üretmektedir (Şekil 2). Bu santralin enerji ve ekserji analizini gerçekleştirelim.

Jeotermal su için normal su özelliklerini kullanarak suyun santral girişinde ve ölü haldeki özellikleri buhar tablosu kullanılarak şu şekilde bulunur:

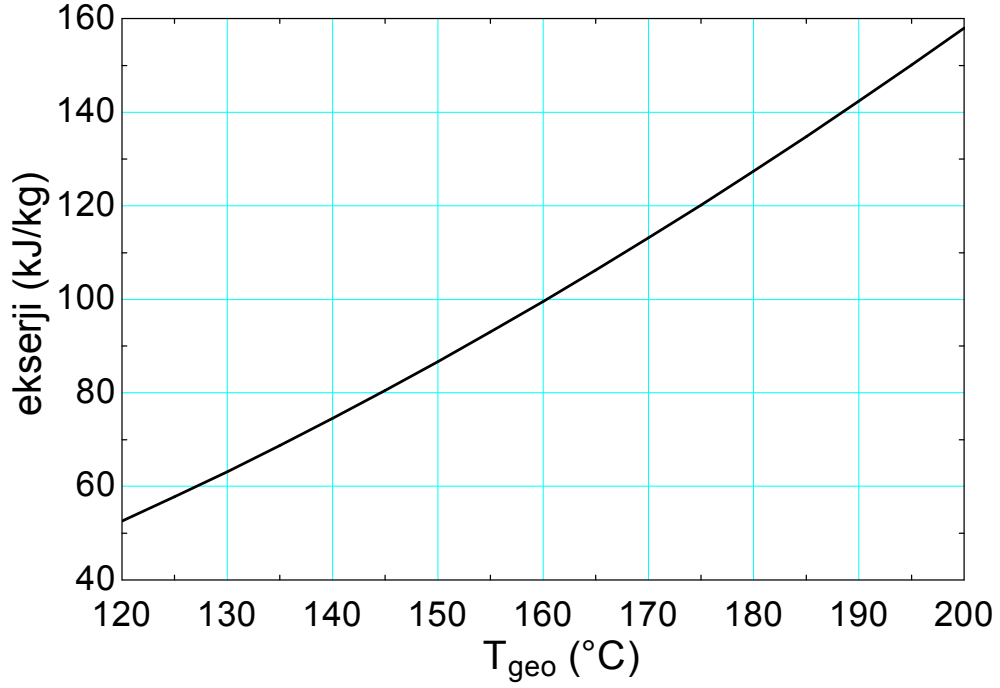
$$T_1 = 160^\circ\text{C}, \text{ sivi} \longrightarrow h_1 = 675.47 \text{ kJ/kg}, s_1 = 1.9426 \text{ kJ/kg.K}$$

$$T_0 = 25^\circ\text{C}, P_0 = 1 \text{ atm} \longrightarrow h_0 = 104.83 \text{ kJ/kg}, s_0 = 0.36723 \text{ kJ/kg.K}$$

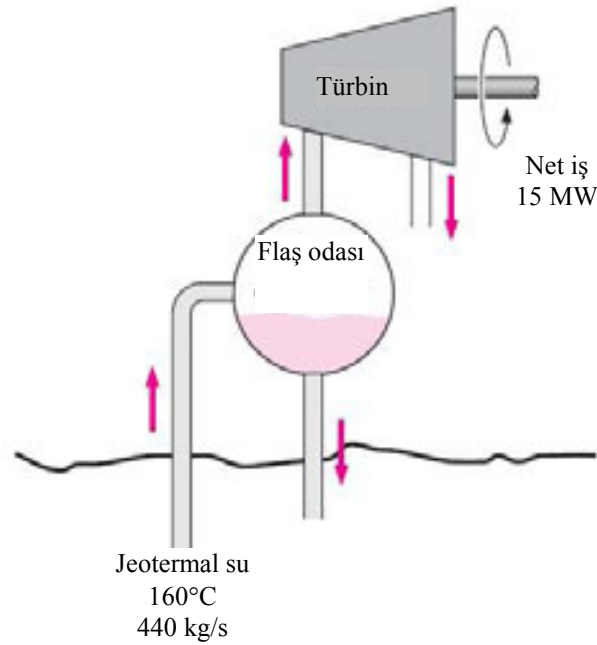
Jeotermal kaynağın enerjisi jeotermal kaynağın ölü hale (çevre şartları) göre sahip olduğu enerjiyi ifade eder:

$$\dot{E}_{in} = \dot{m}(h_1 - h_0) = (440 \text{ kg/s})[(675.47 - 104.83) \text{ kJ/kg}] = 251,082 \text{ kW}$$

Jeotermal kaynağın ekserjisi (iş potansiyeli)



Şekil 1. Sıvı bir jeotermal kaynağın iş potansiyelinin (ekserji) kaynak sıcaklığı ile değişimi



Şekil 2. Örnek 1'de incelenen jeotermal santral.

$$\begin{aligned}
\dot{E}x_{in} &= \dot{m}[(h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0)] \\
&= (440 \text{ kg/s})[(675.47 - 104.83) \text{ kJ/kg} + 0 - (25 + 273 \text{ K})(1.9426 - 0.36723) \text{ kJ/kg.K}] \\
&= 44,525 \text{ kW}
\end{aligned}$$

şeklinde hesaplanır. Santralin ısıl verimi

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{E}x_{in}} = \frac{15,000 \text{ kW}}{251,082 \text{ kW}} = 0.0597 = 6.0\%$$

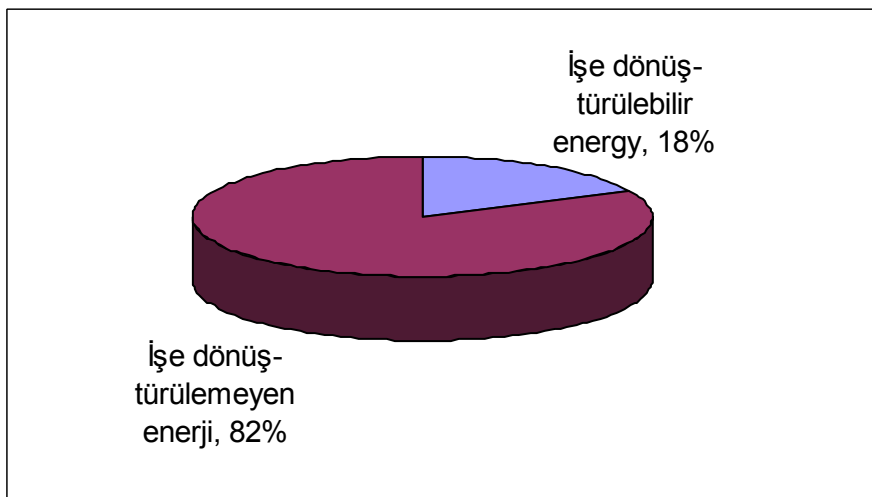
olarak bulunur. Santralin ekserji verimi üretilen işin kaynağın ekserjisine oranı olarak bulunur:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{E}x_{in}} = \frac{15,000 \text{ kW}}{44,525 \text{ kW}} = 0.337 = 33.7\%$$

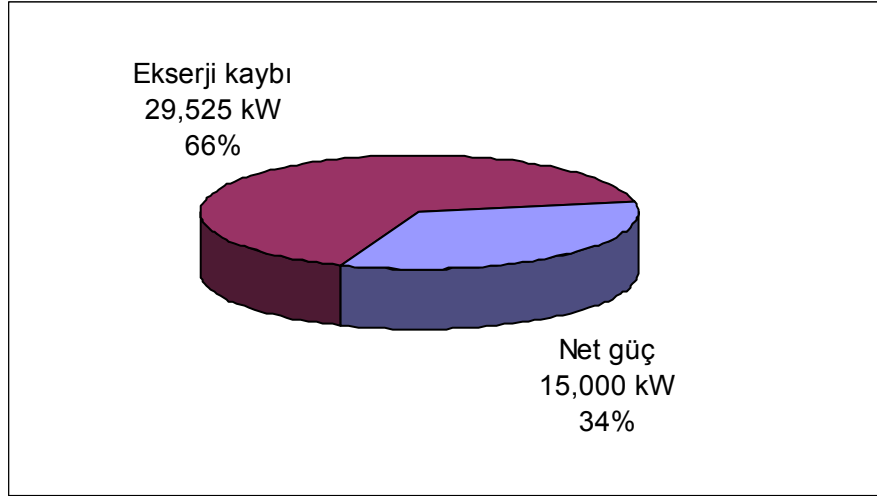
Santralde kaybedilen toplam ekserji, bir ekserji dengesi yardımıyla bulunur:

$$\begin{aligned}
\dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} - \dot{E}x_{dest} &= 0 \\
\dot{E}x_{in} - \dot{W}_{net,out} - \dot{E}x_{dest} &= 0 \\
44,525 - 15,000 - \dot{E}x_{dest} &= 0 \longrightarrow \dot{E}x_{dest} = 29,525 \text{ kW}
\end{aligned}$$

Bu örnekte elde edilen sonuçlar Şekil 3 ve 4'de gösterilmiştir. Jeotermal kaynağın ekserjisi enerjisinin % 18'ini oluşturmaktadır. Geriye kalan % 82'lik bölümü, Carnot ısı makinası ile bile işe dönüştürmek mümkün değildir. Santrale giren ekserjinin % 34'ü işe dönüştürülürken kalan % 66'sı kaybolan ekserjiyi ifade etmektedir. Jeotermal güç santrallerinde, kullanılan su, santrali yüksek sayılabilecek bir sıcaklıkta terk etmekte ve önemli miktarda iş potansiyeli (ekserji) yer altına enjekte edilmektedir. Bu örnekte hesaplanan 29,525 kW'lık ekserji kaybı, bu suyun ekserjisini de içermektedir.



Şekil 3. Jeotermal kaynağın sadece % 18'i işe dönüştürülmeye elverişlidir.



Şekil 4. Jeotermal kaynağın ekserjisinin % 34'ü işe dönüştürülürken kalan % 66 kaybedilen ekserjiyi ifade etmektedir.

4. JEOTERMAL SANTRALLERİN ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLERİ

Jeotermal kaynağın kuyudaki termodinamik özelliklerine bağlı olarak (sıcaklık, basınç, buhar oranı), elektrik üretmek için farklı termodinamik çevrimler kullanılır. Bunlar arasında doğrudan buhar çevrimi, tek veya çift flaş (single or double flash) çevrimi, ikincil (binary) ve birleşik flaş/ikincil (combined flash/binary) çevrim sayılabilir. Bir jeotermal santralin ısı verimi üretilen elektriğin giren enerjiye oranı olarak tanımlanır:

$$\eta_{th-1} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{E}_{in}} \quad (1)$$

Bu durumda,

$$\eta_{th-1} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{m}_{geo} (h_{geo} - h_0)} \quad (2)$$

denklemini elde edilir. Burada \dot{m}_{geo} jeotermal suyun debisidir. Bazıları jeotermal suyun santrale giriş halini kuyu başındaki özellikleri ile ifade ederken diğerleri kuyu dibindeki özellikleri kullanmayı tercih edebilir [6, 10, 12].

En basit çevrim doğrudan buhar çevrimidir. Kuyudan çıkarılan jeotermal buhar bir türbinden geçirilir ve çıkışta atmosfere veya bir yoğuşturucuya gönderilir. Flaş sistemler sıvı ağırlıklı kaynaklar için kullanılır ve sıvının basıncı düşürülerek belli bir oranın buharlaşması sağlanır. Bu buhar bir türbinden geçirilirken ayrıştırılan sıvı yer altına basılır. Türbin çıkışında yoğuşturucuya giden buhar sıvılaştırılarak yer altına basılır. Soğutma için soğutma kulesi veya soğutma havuzu kullanılabilir. Basınç düşürme işlemi bazen iki defa tekrarlanarak daha fazla buharın elde edilmesi sağlanır (Şekil 5 ve 6).

İkincil çevrimler nispeten düşük sıcaklıkta sıvı kaynaklar için kullanılır. Jeotermal suyun ısı ile kaynama sıcaklığı düşük olan bir ikincil akışkan (izobütan, izopentan, pentan, R114 gibi) buharlaştırılır. Bu buhar türbinden geçer, kondenserde yoğunlaştırılır ve pompa ile basılarak ısı değiştiricisine gönderilir. Birleşik flaş/ikincil çevrimde her iki sistemin avantajlarından yararlanılmaya çalışılır. Kaynağın sıvı kısmı ikincil çevrime ısı sağlarken, buhar kısmı türbinden geçirilir. Hem buhar türbininden hem de ikincil akışkanın geçtiği türbinden iş elde edilir.

Bir jeotermal güç çevriminde gerçek ısı girdi denklem 2'dekinden daha azdır. Bunun nedeni suyun yüksek bir sıcaklıkta yer altına enjekte edilmesidir. Bu yaklaşıma göre ısı verim üretilen elektriğin giren ısıya oranı olarak tanımlanır:

$$\eta_{th-2} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_{in}} \quad (3)$$

Tek flaş çevrim için (Şekil 5)

$$\eta_{th,single\ flash} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3} \quad (4)$$

denklemleri elde edilir. İki püskürtmeli çevrim için (Şekil 6)

$$\eta_{th,double\ flash} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{(\dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3) + (\dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_6 h_6)} \quad (5)$$

denklemleri elde edilir. Şekil 7 kullanılarak, ikincil çevrim için

$$\eta_{th,binary} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{m}_{geo} (h_1 - h_2)} \quad (6)$$

veya

$$\eta_{th,binary} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{m}_{binary} (h_4 - h_3)} \quad (7)$$

denklemleri bulunur. Burada \dot{m}_{binary} ikincil akışkanın debisidir. Birleşik flaş/ikincil çevrim için (Şekil 8)

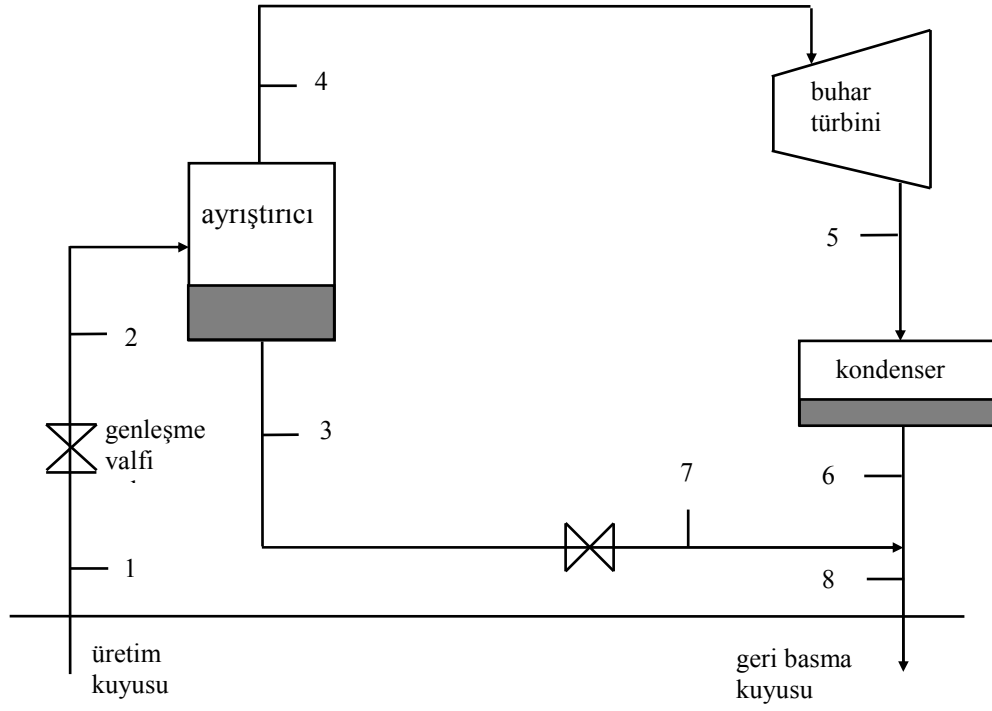
$$\eta_{th,flash-binary} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{(\dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3) + (\dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_7 h_7)} \quad (8)$$

denklemleri elde edilir.

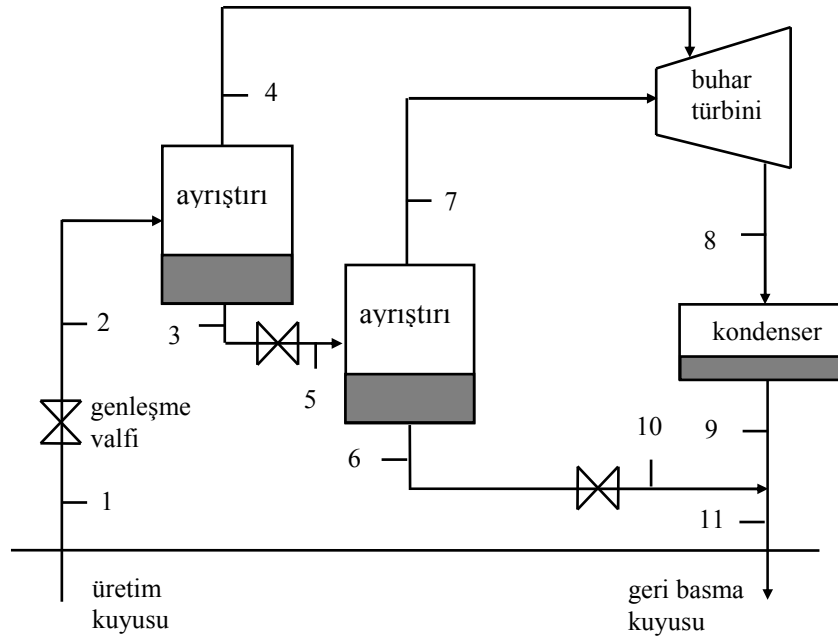
Jeotermal kaynağın kuyu başında veya kuyu dibindeki ekserjisini referans alarak, bir jeotermal santralin ekserji (ikinci yasa) verimi

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{E}x_{in}} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{m}_{geo} [h_{geo} - h_0 - T_0 (s_{geo} - s_0)]} \quad (9)$$

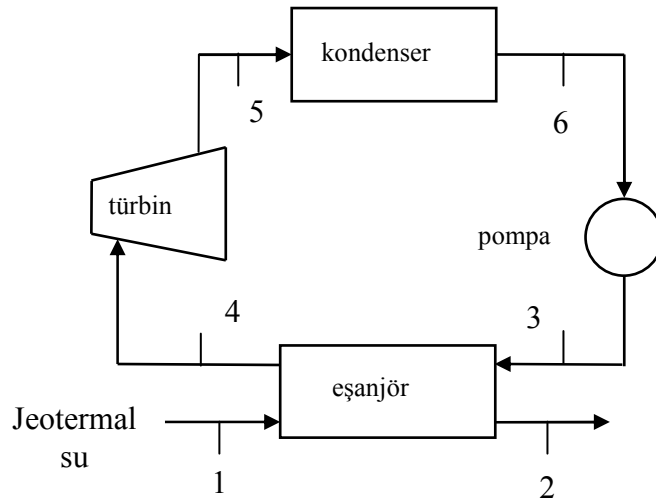
şeklinde ifade edilir. Eğer jeotermal suyun çevrimdeki ekserji değişimi referans alınırsa, ekserji verimleri tek flaş, çift flaş, ikincil ve birleşik flaş/ikincil çevrimler için aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:



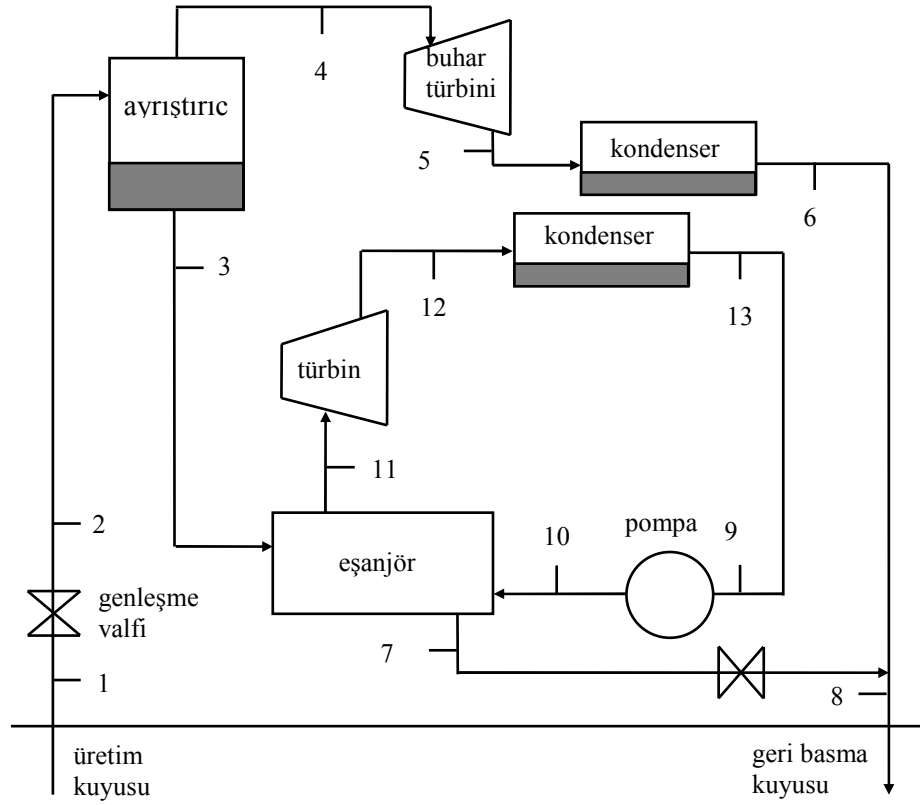
Şekil 5. Tek flaş jeotermal güç santrali.



Şekil 6. Çift flaş jeotermal güç santrali.



Şekil 7. İkincil jeotermal güç santrali.



Şekil 8. Birleşik flaş/ikincil jeotermal güç santrali.

$$\eta_{\text{ex, single flash}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{\dot{m}_2 ex_2 - \dot{m}_3 ex_3} \quad (10)$$

$$= \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{\dot{m}_2 [h_2 - h_0 - T_0 (s_2 - s_0)] - \dot{m}_3 [h_3 - h_0 - T_0 (s_3 - s_0)]}$$

$$\eta_{\text{ex, double flash}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{(\dot{m}_2 ex_2 - \dot{m}_3 ex_3) + (\dot{m}_5 ex_5 - \dot{m}_6 ex_6)} \quad (11)$$

$$\eta_{\text{ex, flash-binary-1}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{(\dot{m}_2 ex_2 - \dot{m}_3 ex_3) + (\dot{m}_3 ex_3 - \dot{m}_7 ex_7)} \quad (12)$$

Burada ex akışkanın birim kütle sinin akış ekserjisidir. Bir ikincil çevrimde ekserji verimi, ısı değiştiricisinde jeotermal suyun ekserji dūřūřüne veya ikincil akışkanın ekserji artışına bağlı olarak ifade edilebilir:

$$\eta_{\text{ex, binary-1}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{\dot{m}_{\text{geo}} [h_2 - h_1 - T_0 (s_2 - s_1)]} \quad (13)$$

$$\eta_{\text{ex, binary-2}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{\dot{m}_{\text{binary}} [h_4 - h_3 - T_0 (s_4 - s_3)]} \quad (14)$$

Bu iki denklemde paydaların farkı ısı değiştiricisinde kaybedilen ekserjidir. Denklem 14'deki yaklaşımla birleşik flaş/ikincil çevrimin ekserji verimi

$$\eta_{\text{ex, flash-binary-2}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{(\dot{m}_2 ex_2 - \dot{m}_3 ex_3) + \dot{m}_{\text{binary}} (ex_{11} - ex_{10})} \quad (15)$$

olarak ifade edilir. Denklem 12'de ekserji giriři hem flaş hem de ikincil çevrim tarafında jeotermal suyun ekserjisinde olan deđiřimle ifade edildiđi için denklem 15'e göre tercih edilmelidir.

Örnek Uygulama: Bir ikincil çevrim jeotermal santrali göz önüne alalım (Şekil 7). Santral, 165°C'de ve 555 kg/s debide bir kaynağı kullanmaktadır. İkincil akışkan izobütan'dır. Isı değiştiricisinde ve kondenserdeki basınçlar sırasıyla 3000 kPa ve 400 kPa'dır ve türbin giriş sıcaklığı 150°C'dir. Türbin ve pompanın izantropik verimleri sırasıyla % 80 ve % 70'dir ve elektrik üretiminin % 10'unun santral içinde kullanıldığı varsayılmıştır. Bu varsayımlar Kanoglu ve Çengel [11] çalışmasına dayanmaktadır.

Bu santral üzerinde yaptığımız birinci ve ikinci yasa analizleri sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

$$\dot{W}_{\text{net,out}} = 22,382 \text{ kW} , \quad \dot{E}_{\text{in}} = 328,786 \text{ kW} , \quad \dot{Q}_{\text{in}} = 185,181 \text{ kW} , \quad T_2 = 86.6^\circ\text{C}$$

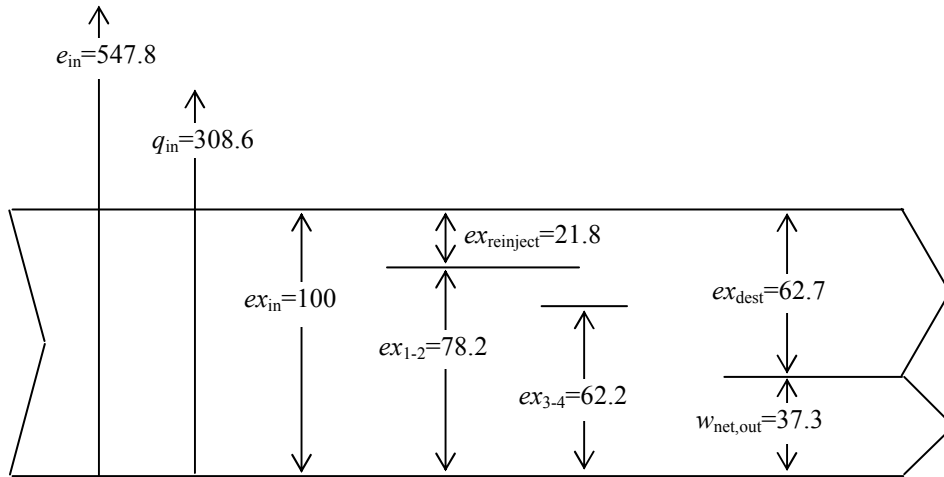
$$\dot{E}x_{\text{in}} = 60,014 \text{ kW} , \quad \Delta\dot{E}x_{1-2} = 46,904 \text{ kW} , \quad \Delta\dot{E}x_{3-4} = 37,316 \text{ kW} ,$$

$$\eta_{\text{th-1}} = 6.8\% \text{ (denk. 2)} , \quad \eta_{\text{th-2}} = 12.1\% \text{ (denk. 6)}$$

$$\eta_{\text{ex}} = 37.3\% \text{ (denk. 9)} , \quad \eta_{\text{ex,binary-1}} = 47.7\% \text{ (denk. 13)} , \quad \eta_{\text{ex,binary-2}} = 60.0\% \text{ (denk. 14)}$$

Bu sonuçlar, farklı verim tanımlarının oldukça farklı sonuçlar verdiğini açıkça göstermektedir ve bu durum jeotermal santraller için sürpriz değildir. Hem enerji hem de ekserji sonuçlarını Şekil 9'deki diyagram yardımıyla gösterdik. Jeotermal suyun ısı değiştiricisi girişindeki ekserjisini 100 birim enerji ile ifade edip diğer değerleri buna göre gösterdik. Bu bölümde tanımladığımız enerji ve ekserji verimlerini bu diyagramdaki değerleri kullanarak kolayca bulabiliriz. Isıl ve ekserji verimleri, jeotermal suyun ısı değiştiricisi girişindeki enerji ve ekserji değerlerine göre % 6.8 ve % 37.3 olarak bulundu. Eğer jeotermal suyun ısı değiştiricisinde izobütan'a aktardığı enerjiyi referans alırsak, ısıl verimi % 12.1 olarak hesaplarız. Bu yaklaşım, bir termik santralin verim hesabında referans olarak yakıtın ısıl değeri yerine kazandan suya transfer edilen ısıyı kullanmaya benzetmektedir.

Jeotermal suyun ısı değiştiricisinde düşen ekserji miktarı referans alındığında ekserji verimi % 47.7 olurken izobütanın ısı değiştiricisinde artan ekserjisi referans alındığında ekserji verimi % 60.0 olmaktadır. Isı değiştiricisinin çıkışında bulunan ve tekrar yere basılacak olan jeotermal suyun ekserjisi santrale giren ekserjinin % 21.8'ini oluşturmaktadır. Bu nisbeten yüksek oranın nedeni burada jeotermal suyun sıcaklığının 86.6°C gibi yüksek bir değerde olmasıdır. Isı değiştiricisinde ısının jeotermal sudan izobütana transferi sonucu giren ekserjinin % 16.0'sı kaybedilmektedir. Geriye kalan % 24.9'luk ($100 - 21.8 - 16.0 - 37.3 = 24.9$) ekserji kayıpları türbinde, pompada ve yoğuşturucuda meydana gelmektedir. Buradaki kayıpların nedeni büyük oranda sürtünme ve sonlu sıcaklık farkında gerçekleşen ısı transferidir.



Şekil 9. Örnek uygulamadaki ikincil çevrimin enerji ve ekserji akış diyagramı.

SONUÇ

Jeotermal güç santrallerinin performanslarının gerçekçi bir biçimde ortaya konması ve performansı düşüren nedenlerin sayısal olarak belirlenmesi ancak ikinci yasanın etkili bir biçimde ekserji kavramı yardımıyla kullanılmasıyla mümkündür. Ülkemizde yeni santrallerin yapıldığı bu dönemde termodinamik araçların etkili biçimde kullanılması, bu santrallerin optimize edilerek jeotermal kaynaklardan maksimum faydanın elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] ÇENGEL, Y.A., BOLES, M.A., 2008. Thermodynamics: an Engineering Approach, McGraw-Hill. 6th ed. New York.
- [2] MORAN MJ. Availability analysis: A guide to efficient energy use. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall;1998.
- [3] BEJAN A. Advanced engineering thermodynamics. New York:John Wiley & Sons;1988.
- [4] GAGGIOLI RA. Available energy and exergy. International Journal of Applied Thermodynamics 1998;1:1-8.
- [5] SZARGUT, J., MORRIS, D.R., StEWARD, F.R., 1988. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. Hemisphere Publishing Corp., New York.
- [6] KESTIN J. Available work in geothermal energy. U.S. Department of Energy. Division of Geothermal Energy. Washington, D.C.;1978.
- [7] DIPIPO R. Second law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids. Geothermics 2004;33:565–586.
- [8] LEE KC. Classification of geothermal resources by exergy. Geothermics 2001;30:431-442.
- [9] DIPIPO R. Geothermal energy electricity generation and environmental impact. Energy Policy 1991;19(8):798-807.
- [10] DIPIPO R. Second law analysis of flash-binary and multilevel binary geothermal power plants. Geothermal Resources Council Transactions 1994;18:505-510.
- [11] KANOĞLU M, ÇENGEL YA. Retrofitting a geothermal power plant to optimize performance: A case study. Transactions of the ASME, Journal of Energy Resources Technology 1999;121(4):295-301.
- [12] KANOĞLU M. Exergy analysis of a dual-level binary geothermal power plant. Geothermics 2002;31:709–24.
- [13] ÖZTÜRK HK, ATALAY O, YILAN A, HEPBAŞLI A. Energy and exergy analysis of Kizildere geothermal power plants, Turkey. Energy Sources A 2006;28(15):1415–24.
- [14] HEPBAŞLI A. A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Corrected proof 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet KANOĞLU

1992 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Yüksek lisansını ve doktorasını ABD’de University of Nevada, Reno’da 1996 ve 1999 yıllarında tamamlamıştır. 2002 yılında doçent olmuştur. 2000 yılından beri Gaziantep Üniversitesi’nde görev yapmaktadır. 2006-2007 akademik yılını Canada’da University of Ontario Institute of Technology’de misafir öğretim üyesi olarak geçirmiştir. Biri uluslararası kitap ve 20’si uluslararası dergi makalesi olmak üzere 50’nin üzerinde makale ve bildirisi vardır. Çalıştığı alanlar arasında jeotermal enerji, kojenerasyon, enerji yönetimi ve tasarrufu, soğutma sistemleri, doğal gaz ve hidrojen sıvılaştırması sayılabilir.