

## PERFORMANCE ANALYSIS OF SINGLE FLASH GEOTHERMAL POWER PLANTS

**Ahmet DAĞDAŞ\***

*Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL*

**Geliş/Received: 09.11.2004 Kabul/Accepted: 09.03.2005**

---

### ABSTRACT

Single flash geothermal power plants are the most commonly used plants for power generation from liquid dominated geothermal reservoirs. There are numerous single flash geothermal power plants all over the world. The single flash power plants can be installed over high temperature geothermal reservoirs and they have low first and second law efficiencies. The main reason of low conversion efficiency is lower pressure and temperature values of geofluid.

In this paper, performance analysis methods are deliberated of single flash geothermal power plant. A hypothetical single flash power plant has been designed for a geothermal reservoir that ensured geofluid of 210 °C and 200 kg/s. According to results, optimum flashing pressure has been determined of 250 kPa and overall first and second law efficiencies have been calculated as 5.34% and 22.35%, respectively.

**Keywords:** Geothermal, Power plant, Exergy, Power production.

### TEK FLAŞLI JEOTERMAL GÜÇ SANTRALLERİNDE PERFORMANS ANALİZİ

#### ÖZET

Tek flaşlı güç santralleri, jeotermal kaynaklardan elektrik üretme açısından en yaygın kullanılan santrallerdendir. Dünyada halen bu teknolojiye sahip çok sayıda santral bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklı sahalarda kurulabilen bu tip santrallerin I. ve II. kanun verimleri oldukça düşüktür. Verim düşüklüğünün temel sebebi rezervuardan çıkan jeotermal akışkanın düşük sıcaklık ve basınca sahip olmasıdır.

Bu çalışmada, tek flaşlı jeotermal santrallerin performans değerlendirme yöntemi üzerinde durulmaktadır. 210 °C sıcaklıkta ve 200 kg/s debide jeotermal akışkan üreten bir saha için tasarlanan tek flaşlı santralin optimum flaşlama basıncı belirlenerek performans analizi yapılmıştır. Buna göre optimum flaşlama basıncı 250 kPa olarak belirlenmiş, santralin genel I. ve II. kanun verimleri de sırasıyla, %5,34 ve %22,35 olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Jeotermal, Güç santrali, Ekserji, Elektrik üretimi.

---

### 1. GİRİŞ

Flaş tipi jeotermal güç santralleri yüksek sıcaklıklı akışkana sahip jeotermal sahalarda kurulabilmektedir. Kaynak sıcaklığı genellikle 150 °C'den fazla olan sahalarda bu tip santraller için uygundur. Ülkemizde flaş tipi santrallere uygun olarak kullanılabilecek jeotermal sahalarda Çizelge 1'de görülmektedir [1].

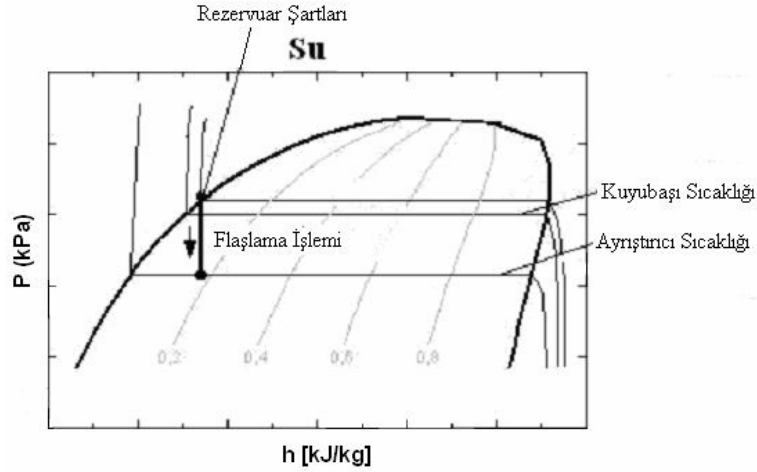
---

e-posta: dagdas@yildiz.edu.tr, tel: (0212) 259 70 70 / 2488

Çizelge 1. Türkiye’de flaş tipi santral ile elektrik üretimine uygun jeotermal sahalar ve rezervuar sıcaklıkları

Jeotermal Saha	Rezervuar Sıcaklığı
Denizli-Kızıldere	242 °C
Aydın-Germencik	232 °C
Manisa-Salihli-Göbekli	183 °C
Çanakkale-Tuzla	174 °C
Aydın-Salavatlı	171 °C
Kütahya-Simav	162 °C
İzmir-Seferihisar	153 °C
Manisa-Salihli-Caferbeyli	150 °C

Jeotermal akışkan, rezervuar içerisinde kuru buhar şartlarında, çift fazlı (sıvı+buhar) şartlarda ya da sıvı fazda bulunabilmektedir. Dünyadaki yüksek sıcaklıklı jeotermal sahaların % 90-95’inde jeotermal akışkan yeraltında çift fazlı olarak bulunur [2]. Bu tip kaynaklarda eğer buhar oranı fazla ise o kaynağa “buhar ağırlıklı kaynak”, su oranı fazla ise “sıvı ağırlıklı kaynak” denir. Genellikle rezervuarlar yüksek basınç altında olduğundan jeotermal akışkan sıvı fazda ( $x=0$ ) bulunmaktadır. Akışkan kendiliğinden yüzeye çıkarken basıncı azaldığından buharlaşma başlar. Kuyu başındaki akışkanın buhar oranı %3 - 8 civarındadır. Bu kadar düşük orandaki buhar ile güç üretmek yeterli olamamaktadır. Daha fazla buhar elde etmek için flaşlama işlemi yapılarak buhar oranı %10-50 arasına çıkartılır [4]. Böylece daha fazla miktarda fakat birim kütle başına daha düşük enerjiye sahip buhar elde edilir. Flaşlama prosesinde, akışkanın basıncı, sabit entalpide azaltılır. Böylece daha düşük entalpili fakat daha fazla buhar üretilir (Şekil 1) [3]. Bu çift fazlı akışkan bir separatörde buhar ile sıvı arasındaki yoğunluk farkı kullanılarak ayrıştırılır. Separatörden alınan buhar bir nem alıcıdan geçirilerek doymuş kuru buhar şartlarında türbine gönderilir.



Şekil 1. Flaşlama prosesine ait basınç-entalpi diyagramı

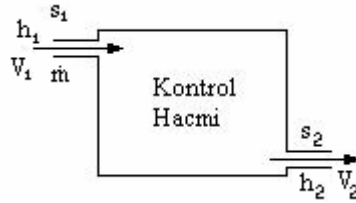
Türbinden çıkan akışkan kondenserden geçirilerek yoğuşturulur. Jeotermal akışkan sıvı faza geçtiğinde yeraltına reinjeksiyon yapılır. Şekil 2’de tek flaşlı santralin şematik resmi görülmektedir.



termodinamik hal arasında, sistem tarafından yapılan maksimum iş, hal değişiminin tersinir olması durumunda gerçekleşir. Bir termodinamik sistemden maksimum işin elde edilebilmesi için, hal değişimi sonundaki sistemin “ölü hal”de olması gerekir. Sistemin ölü halde olması demek, çevre ile ısı ve mekanik dengede olması demektir. Yani sistemin son hali, çevre sıcaklığında ve basıncında olmalıdır [5].

Ekserji yöntemi, enerji dönüşüm sisteminin tipine bakılmaksızın bir güç santralinin performansını değerlendirmek için kullanılabilir en iyi yöntemdir. Yakın bir zamana kadar santrallerin performans analizleri termodinamiğin I. kanun verimine (termik verim) göre yapılmaktaydı. Ancak son zamanlarda II. kanun veriminin daha gerçekçi sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Ekserji yöntemi, jeotermal enerji santrallerinin konvansiyonel veya konvansiyonel olmayan diğer santrallerle mukayeselerini de mümkün kılmaktadır.

Jeotermal güç santralleri sürekli akışlı halde çalışan santrallerdir. Sistem, bir girişli ve bir çıkışlı olarak kabul edilebilir (Şekil 4). Sürekli akışlı sürekli açık bir sistem için termodinamiğin birinci kanunu aşağıdaki gibi ifade edilebilir [6];



**Şekil 4.** Sürekli akışlı sürekli açık sistemin (kontrol hacmi) şematik kesiti

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \cdot \left[ (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) \right] \quad (1)$$

Jeotermal güç santralleri için kinetik ve potansiyel enerji değişimleri, entalpi farkına göre çok daha küçük olduğundan bu terimler ihmal edilebilir. Bu durumda denklem;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (2)$$

halini alır.

Isı transferinin yalnızca sistem ile çevresi arasında olduğu bir proses sırasındaki toplam entropi üretimi [5] [6];

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m} \cdot (s_2 - s_1) - \frac{\dot{Q}}{T_0} \quad (3)$$

olarak yazılabilir. Burada  $T_0$  çevre sıcaklığıdır. Tersinir proseslerde entropi üretimi yoktur. Jeotermal sistemin tersinir olduğu kabul edilirse bu ifade sıfır olur. Bu durumda denklem;

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot T_0 \cdot (s_2 - s_1) \quad (4)$$

halini alır. Elde edilen bu ifade Denk. (2)'de yerine konulursa;

$$\dot{W}_{max} = \dot{m} \cdot \left[ (h_1 - h_2) - T_0 \cdot (s_1 - s_2) \right] \quad (5)$$

bulunur.

Entropi üretiminin sıfır olduğu, belirli bir başlangıç (1) ve son (2) haller arasındaki akışkanın maksimum iş miktarı (tersinir iş) bu bağıntı ile bulunur. Eğer tasarlanan sistemde

jeotermal akışkanın son hali çevre şartlarına eşit olursa, akışkandan üretilebilecek maksimum iş sağlanmış olur. Bu iş ekserjiye eşittir.

“o” alt indisi çevre şartlarını temsil ederse, ekserji aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\dot{E} = \dot{m} \cdot [(h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0)] \quad (6)$$

Burada bulunan ekserji değeri bir jeotermal güç santralinden üretilmesi mümkün olan maksimum gücü ifade etmektedir. Birim kütle için ekserjisi ise;

$$e_1 = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) \quad (7)$$

ile bulunur.

Jeotermal akışkandan sıvı olarak yararlanılan sistemler için, Denk. (7) aşağıdaki duruma gelir;

$$s_1 - s_0 = C_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_0} \quad (8)$$

ve

$$h_1 - h_0 = C_p \cdot (T_1 - T_0) \quad (9)$$

olduğundan, özgül ısı  $C_p$  olan bir sıvının özgül ekserjisi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$e_{sıvı} = C_p \left[ T_1 - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T_1}{T_0} \right] \quad (10)$$

$T_1$  sıcaklığından  $T_2$  sıcaklığına soğuyan bir jeotermal sıvıdan elde edilebilecek maksimum güç ise şöyle bulunur;

$$\dot{W}_{\max.sıvı} = \dot{m} \cdot C_p \left[ T_1 - T_2 - T_0 \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} \right] \quad (11)$$

Bir jeotermal sistem tarafından üretilen gerçek güç ile üretilmesi mümkün olan maksimum gücün oranı jeotermal sistemin “ikinci kanun verimi”ni verir. Buna göre jeotermal santralin genel II. kanun verimi, “santral tarafından üretilen net gücün, rezervuardaki jeotermal akışkan ekserjisine oranı” olarak tanımlanabilir;

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{rezervuar}} \quad (12)$$

Jeotermal santrallerin verimi hesaplanırken rezervuardaki ekserjinin kullanılması, bu tip santralleri klasik fosil yakıtlı santrallerle kıyaslandığında dezavantajlı duruma düşerler. Çünkü fosil yakıtlı santrallerde, santral sahasında yanan yakıtın ekserjisi hesaba katılır. Yakıtın yüzeye çıkartılması ve santrale iletilmesi ile ilgili yapılan işler dikkate alınmazlar. Bu durum bu tip santrallerin ekserji verimlerinde avantaja sebep olur. Farklı teknolojilere sahip santraller arasında kıyaslama yapılacağı zaman, jeotermal akışkanın kuyu başındaki ekserjisini kullanmak daha uygun olacaktır. Aynı sahadaki farklı jeotermal santraller kıyaslanacaksa rezervuardaki ekserjiyi dikkate almak daha akılcı olacaktır [6]. Bu durumda, hangi santralin mevcut rezervuardan daha verimli yararlandığı belirlenmiş olur. Öyleyse II.kanun verimi belirlenirken Denk. (12)’deki jeotermal akışkan ekserjisinin bazen kuyu başı şartlarında hesaplanması daha uygundur. Bu durumda Denk. (12) şu şekilde ifade edilir;

### Performance Analysis of Single Flash ...

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{kuyubaşı}} \quad (13)$$

II. kanun analizlerinin temel anlamı, jeotermal akışkanın (veya santralde kullanılan diğer akışkanların) tüm temel noktalardaki ekserjilerini hesaplamak ve her bir elemanın ekserji değişimini belirleyerek, o elemanın performansını incelemektir.

Ekserji, enerji gibi korunan bir büyüklük değildir. Ekserji, sürtünme, karışma ve ısı transferi gibi proseslerden dolayı kaybolabilir. Bir prosteki ekserji kaybına tersinmezlik denir. Tersinmez prosesler bir sistemin üretebileceği maksimum iş potansiyelini azaltır [6].

Herhangi bir santral elemanının II. kanun analizi yapılırken aşağıdaki ifade kullanılır;

$$\Delta\dot{E} = \dot{E}_{giriş} - \dot{E}_{çıkış} \quad (14)$$

Burada  $\Delta\dot{E}$  o elemandaki ekserji kaybını,  $\dot{E}_{giriş}$  kütleli debi veya ısı tarafından sisteme taşınan ekserjileri,  $\dot{E}_{çıkış}$  ise kütleli debi tarafından dışarı taşınan ekserjileri ve iş olarak üretilen ekserjileri kapsar. İş ile ilgili ekserji tam olarak işe eşittir. Fakat ısı ile ilgili ekserji ise Denk (15)'deki gibi ifade edilebilir [6].

$$\left[1 - \frac{T_0}{T}\right] \cdot \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m}.e - \sum_{out} \dot{m}.e = \Delta\dot{E} \quad (15)$$

Burada ekserji kaybı ( $\Delta\dot{E}$ ) daima pozitif olmalıdır.

Santralin temel noktalarında jeotermal akışkanın özgül enerjisi, özgül ekserjiyi veren yöntemle benzer bir yöntemle hesaplanabilir. Herhangi bir haldeki jeotermal akışkanın özgül enerjisi ( $e_n$ );

$$e_n = h - h_0 \quad (16)$$

ile bulunur. Burada  $h$ , jeotermal sıvının verilen bir haldeki entalpisi,  $h_0$  ise jeotermal akışkanın çevre şartlarındaki entalpisidir. Özgül enerjinin kütleli debi ile çarpımı birim zamandaki enerjii ya da gücü verir.

$$\dot{E}_n = \dot{m}.e_n = \dot{m}.(h - h_0) \quad (17)$$

Jeotermal santrallerin I. kanun verimi; santralde üretilen net gücün, kuyu başındaki jeotermal akışkan enerjisine oranı olarak tanımlanabilir;

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_n}_{kuyubaşı} \quad (18)$$

Rezervuar şartlarına göre I. kanun verimi de aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_n}_{rezervuar} \quad (19)$$

### 3. SAYISAL ANALİZ

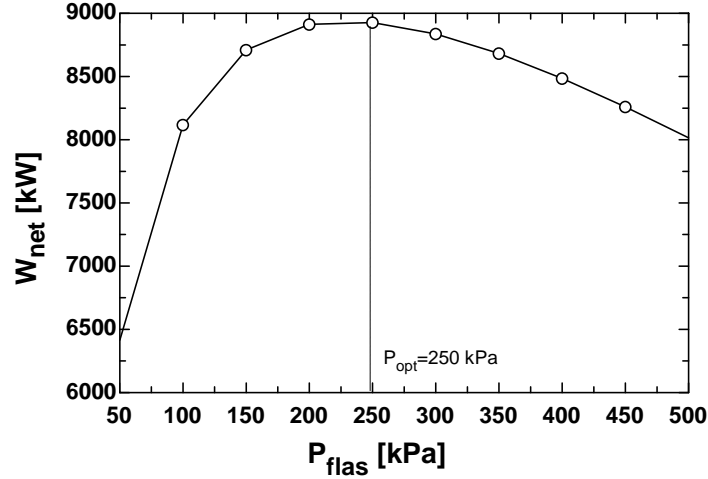
Bu bölümde, teorik bir tek flaşlı santrale ait performans analizleri yapılacaktır. Bu amaçla, rezervuar sıcaklığı 210 °C ve akışkan debisi 200 kg/s olan bir sahada tek flaşlı santral kurulacağı

düşünülecek ilgili analizler yapılmıştır. Bu amaçla bir bilgisayar programı hazırlanarak, programda Çizelge 2’de görülen giriş değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 2 . Yapılan analizlerde kullanılan giriş değerleri

Kaynak Sıcaklığı	210 °C
Jeotermal akışkan debisi	200 kg/s
Kuyu başında jeoakışkan basıncı	1300 kPa
Türbin izentropik verimi	%70
Jeneratör verimi	%94
Türbin çıkış basıncı	10 kPa
Ölü hal sıcaklığı	15 °C
Ölü hal basıncı	96 kPa

Rezervuar sıcaklığı 210 °C olan bir sahada üretilen jeotermal akışkanın debisi 200 kg/s olmaktadır. Akışkanın rezervuarda doymuş sıvı şartlarında olduğu kabul edilmiştir. Yer üstüne ulaşan jeoakışkanın kuyu başındaki basıncı 1300 kPa kabul edildiğinde elde edilen buhar oranı % 4,2 olmaktadır. Optimum flaşlama basıncının belirlenmesi ile ilgili yapılan optimizasyonda, santralde üretilen net gücü maksimum yapan flaşlama basıncı 250 kPa olarak bulunmuş ve bu basınç değeri optimum flaşlama basıncı olarak seçilmiştir (Şekil 5). Yani tek flaşlı sistemdeki flaşlama işlemi 250 kPa basınç altında yapılırsa, verilen şartlarda bu santralden maksimum güç üretimi gerçekleşmiş olacaktır.



Şekil 5. Optimum flaşlama basıncının belirlenmesi

Flaşlama işlemi optimum basınç olan 250 kPa ile yapıldığında, elde edilen buhar oranı %16,6 olmaktadır. Buradan da anlaşılacağı gibi üretilen buhar miktarı neredeyse 4 katına çıkmaktadır. Bu durum net gücün artmasının en önemli nedenidir.

Optimum flaşlama basıncı altında Şekil 2’de görülen tek flaşlı santralin temel noktalarındaki akışkan özellikleri Çizelge 3’de görülmektedir.

Çizelge 3. Tek flaşlı santrale ait temel noktalara ait çeşitli özellik değerleri

Temel Noktalar	Sıcaklık (T) (°C)	Basınç (P) (kPa)	Debi (m) (kg/s)	Entalpi (h) (kJ/kg)	Entropi (s) (kJ/kg K)	Toplam Enerji (kW)	Toplam Ekserji (kW)
0	15	96	---	63,05	0,2244	-----	---
R	210	1905	200	897,5	2,423	166882	40247
1	191,7	1300	200	897,5	2,428	166882	39944
2	127,4	250	200	897,5	2,512	166882	35139
3	127,4	250	33,22	2716	7,054	88142	22797
4	45,85	10	33,22	2380	7,505	76969	7303
5	45,85	10	33,22	191,8	0,649	4278	213,6
6	127,4	250	166,8	535,2	1,607	78740	12342

Yapılan analiz sonuçlarına göre santral türbininde üretilen güç 11173 kW'dır. Jeneratör verimi %94 kabul edildiğinde, üretilen elektriksel güç 10503 kW<sub>e</sub> olmaktadır. santralde bulunan yardımcı makine güçlerinin üretilen elektriksel gücün %15'ini harcadığı kabul edildiğinde santralin net güç üretimi 8927 kW<sub>e</sub> olarak bulunmaktadır.

Bu sonuçlara göre santralin I. ve II. kanun verimleri rezervuar şartlarına göre sırasıyla, %5.34 ve % 22.18, kuyu başı şartlarına göre ise sırasıyla %5.34 ve %22.35 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4).

Jeotermal santrallerin II. kanun verimleri, konvansiyonel santrallerin I. kanun verimleri ile doğrudan mukayese edilebilir [7]. Bu mukayeseye göre tek flaşlı santralin, konvansiyonel santrallerden daha düşük performansa sahip oldukları görülmektedir. Özellikle jeotermal santrallerin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, bu tip santrallerin en önemli olumsuzluğudur. Fakat işletme ve bakım maliyetlerinin düşük olması, temiz enerji üreten sistemler olması, küresel ısınmanın en büyük sebebi olan CO<sub>2</sub> emisyonunun çok düşük olması, ulusal bir enerji kaynağı olması ise bu santrallerin başlıca avantajları olarak değerlendirilebilir.

Optimum flaşlama basıncında separatörden ayrılan sıvı ile atılan ekserji %30 olmaktadır. bu ekserjiden faydalanmak bu tip santraller için mutlaka gerekli olan bir durumdur. Benzer çalışmalarda bu kayıpların % 30 ile % 55 arasında olabildiği bildirilmiştir [3], [7], [8].

Çizelge 4. Analiz sonuçlarına göre tek flaşlı santralin güç ve verim değerleri

Türbin gücü	11173 kW <sub>e</sub>
Jeneratör gücü	10503 kW <sub>e</sub>
Santral iç tüketimi	1576 kW <sub>e</sub>
Santral net gücü	8927 kW <sub>e</sub>
I. kanun verimleri	%5.34
II. kanun verimleri	%22.18 (rezervuara göre)
	%22.35 (kuyu başına göre)

#### 4. SONUÇLAR

Bir jeotermal saha için tasarlanan tek flaşlı santralin, ekserji yöntemi ile analizleri yapılmıştır. 210 °C rezervuar sıcaklığına sahip kaynaktan üretilen jeotermal akışkanın kütleli debisi 250 kg/s'dir. Yapılan optimizasyonla net gücü maksimum yapan flaşlama basıncı optimum basınç olarak seçilmiş ve optimum basınç 250 kPa olarak bulunmuştur. Optimum flaşlama basıncında flaşlanan jeotermal akışkan ile tek flaşlı santralden üretilen net güç 8927 kW<sub>e</sub> olmaktadır. Bu santralin rezervuar şartlarına göre I. ve II. kanun verimleri sırasıyla %5.34 ve %22.18, kuyu başına göre verimleri ise sırasıyla %5.34 ve %22.35 olarak bulunmuştur. Jeotermal santrallerde



özellikle ikinci kanun verimleri, performans göstergesi olarak daha anlamlıdır ve tasarlanan santral rezervuardaki mevcut ekserjinin %22.35'ini faydalı güce dönüştürebilmektedir.

**KAYNAKLAR**

- [1] Dağdaş A., “Jeotermal Enerji Kaynaklarının Optimal Kullanım Modelinin Geliştirilmesi ve Yöresel Uygulaması”, Doktora Tezi, Makine Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2004.
- [2] Barbier E., “Geothermal Energy Technology and Current Status: An Overview”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 3-65, 2002.
- [3] Dağdaş A., Öztürk R., Bekdemir Ş., “Thermodynamic Evaluation of Denizli Kızıldere Geothermal Power Plant and its Performance Improvement”, *Energy Conversion and Management*, 46, 242-253, 2005.
- [4] Di Pippo R., “Small Geothermal Power Plants - Design, Performance and Economics”, *GHC Bulletin*, 20,2,1-8, 1999.
- [5] Çengel, Y., Boles, M., “Mühendislik Yaklaşımı ile Termodinamik”, Literatür Yayınevi, İstanbul, 1996.
- [6] DiPippo R., Marcille D.F., “Exergy Analysis of Geothermal Power Plants”, *Geothermal Resources Council, Transactions*, 8, 47-52, 1984.
- [7] Kanoğlu M., Çengel Y., Turner R., “ Thermodynamic Evaluation of a Single Flash Geothermal Power Plant in Nevada”, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Atlanta, Georgia,USA, November17-22, 1996*, 347-354.
- [8] Çerçi Y., “Performance Evaluation of a Single-Flash Geothermal Power Plant in Denizli Turkey”, *J. of Energy*, 28, 27-35, 2003.