

# JEOTERMAL ELEKTRİK ÜRETİMİNDE KULLANILAN TERMODİNAMİK ÇEVİRİMLER

Y. Doç. Dr. Mehmet Kanoğlu

Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliđi Bölümü

## GİRİŞ

Jeotermal enerji, yerin altında bulunan ısıl enerjidir. Belli bir dereceye kadar yenilenebilir bir enerjidir. Çünkü bir jeotermal kaynağın tahmini ömrü 30-50 yıl arasındadır (ASHRAE Handbook of Applications, 1995). Jeotermal bir kaynağın ömrü kullanılan jeotermal akışkanı tekrar yer altına enjekte etme yoluyla uzatılabilir. Bu en yaygın atık yöntemidir. Kullanılmış jeotermal akışkanın yer üstüne akıtılması, ırmak ve göl sularının ve havanın kirlenmesine neden olur. ABD’de kullanılan jeotermal akışkanın yer altına enjekte edilmesi yasal bir zorunluluktur. Jeotermal enerji, elektrik üretiminde ve alan ısıtması ve soğutması, ısı pompaları, endüstriyel işlemler ve sera evleri ısıtması gibi direkt uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Bir jeotermal kuyudan sıvı su (doymuş veya sıkıştırılmış sıvı), ıslak buhar (sıvı-buhar karışımı) veya kuru buhar (doymuş veya kızgın buhar) çıkarılır. Sıvı ağırlıklı sistemler buhar ağırlıklı sistemlerden çok daha yaygındır. Sistemde seçilen basınca bağlı olarak sadece sıvı su veya sıvı-buhar karışımı çıkarılabilir. Eğer basınç jeotermal su sıcaklığındaki doyma basıncının altında tutulursa sıvının bir kısmı buhara dönüşür ve iki fazlı bir karışım elde edilir. Eğer basınç jeotermal su sıcaklığındaki doyma basıncının üstünde tutulursa sıvı elde edilir. İncelenen 100 jeotermal kaynak arasında % 10’unun buhar ağırlıklı, % 60’ının sıvı ağırlıklı ve % 30’unun sıvı olduğu görüldü (Hochstein, 1990). Genellikle jeotermal kaynaklardan yüksek sıcaklıkta olanlar (150° C’nin üstü) elektrik üretiminde; orta sıcaklıkta olanlarla (90° C ile 150° C arası) düşük sıcaklıkta olanlar ise direkt uygulamalarda kullanılır. Jeotermal kaynakların sıcaklıkları 250° C hatta 300° C’yi bulabilmektedir.

Dünyada bugün jeotermal enerjiden 7000 MW elektrik üretilmekte ve 8500 MW jeotermal ısı direkt uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu rakamların yaklaşık % 30’u ABD’de gerçekleşmektedir (Barbier, 1997). Jeotermal enerji bugün birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır. Türkiyenin özellikle Ege Bölgesinde zengin jeotermal kaynaklara sahip olduğu bilinmektedir. Bu kaynakların yüksek sıcaklıkta olanları elektrik üretiminde ve bölge ısıtmasını içine alan kojenerasyon

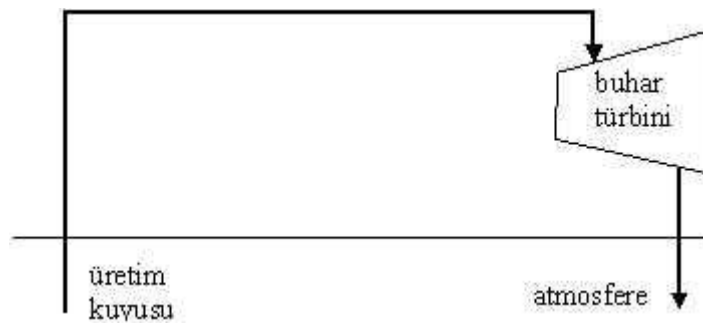
uygulamalarında; orta ve düşük sıcaklıktaki kaynaklar ise ısıtma, soğutma, endüstriyel uygulamalar ve seracılık gibi uygulamalarda yaygın kullanım alanı bulabilirler.

## Jeotermal Elektrik Üretiminde Kullanılan Termodinamik Çevrimler

Çıkarılan jeotermal akışkanın haline bağlı olarak elektrik üretmek için farklı çevrimler kullanılır. Aşağıda anlatılacak olan çevrimlerin termodinamikteki çevrimin katı tanımına uymadığını belirtmek gerekir. Termodinamikte çevrim bir aracı akışkanın çeşitli hal değişimlerinden geçtikten sonra tekrar ilk haline döndüğü ve bunun tekrarlandığı durumlar için tanımlanmıştır. Bu tanıma Rankine çevrimi tam olarak uyar. Jeotermal elektrik santrallerinde ise jeotermal akışkan yer altından çıkarıldıktan sonra elektrik üretmek için kullanılır ve sonrasında ya atmosfere atılır ya da yer altına enjekte edilir.

## Kondensersiz ve Kondenserli Kuru Buhar Çevrimleri

En basit ve en ekonomik jeotermal çevrim kondensersiz kuru buhar çevrimidir (Şekil 1). Bu çevrimde, jeotermal kuyudan çıkarılan buhar bir türbinden geçtikten sonra atmosfere atılır. Türbinin çıkışı doğrudan atmosfere açık olduğundan buhar, türbini atmosfer basıncında terk eder. Bu çevrimin avantajı kondenser olmadığı için santralin yapım ve işletme masraflarının kondenserli santrallere göre daha az olmasıdır. Bu çevrimin istenmeyen bir sonucu ise jeotermal buharın doğrudan atmosfere atılmasının çevre kirliliğine yol açmasıdır.

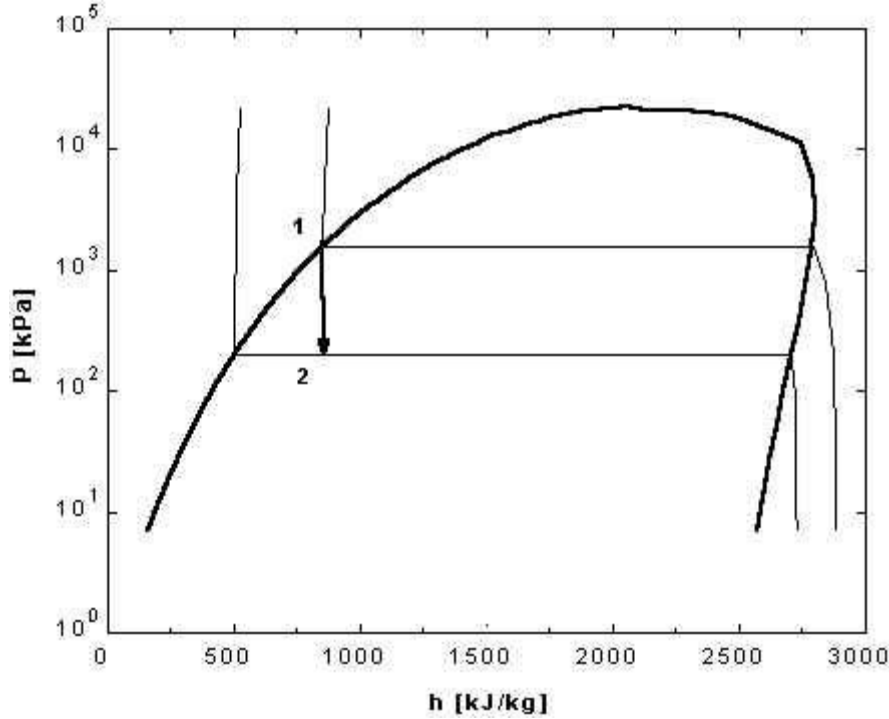


Şekil 1. Kondensersiz kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santrali.

Kondenserli kuru buhar çevrimlerinde, türbinin çıkışında kondenser bulunur (Şekil 2). Jeotermal buhar türbinden geçtikten sonra bir kondensere girer.

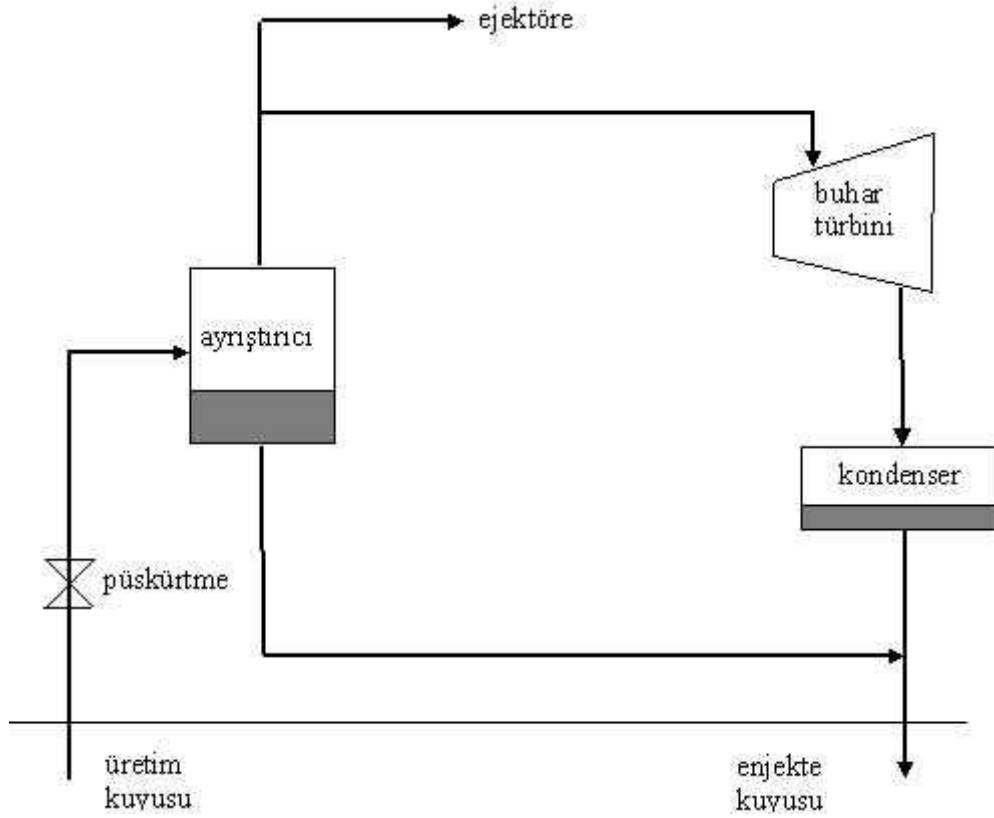


daha düşük fakat entalpinin girişteki akışkanla aynı olması dolayısıyla sıvının belli bir yüzdesi buharlaşır. Püskürtme işleminden sonra jeotermal akışkanın sıcaklığı düşer. Yeni sıcaklık, yeni basınçtaki doyma sıcaklığıdır. Püskürtme işlemi Şekil 3'de suyun Basınç-Entalpi (P-h) diagramında gösterilmiştir.



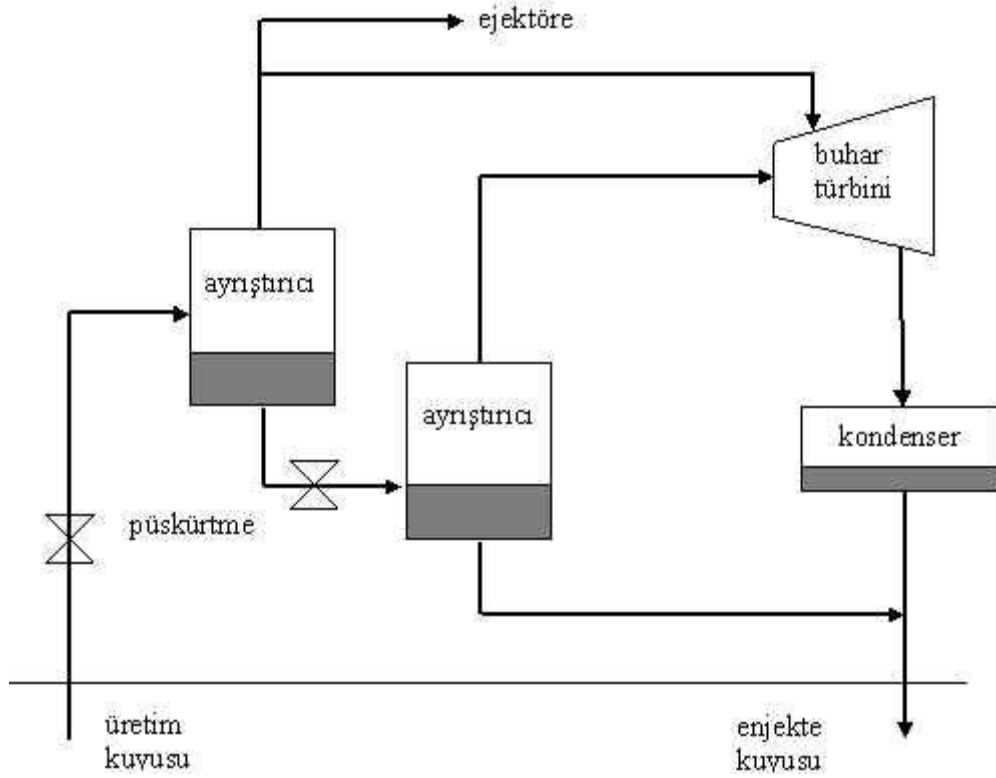
**Şekil 3.** Suyun basınç-entalpi diyagramında püskürtme işleminin görünümü. Su 1 halinde doymuş sıvı, 2 halinde ise doymuş sıvı-buhar karışımıdır.

Şekil 4'de görüldüğü gibi, buhar sıvıdan ayrıştırıldıktan sonra buhar türbine elektrik üretmek için gönderilirken kalan sıvı yer altına enjekte edilir. Türbinden çıkan buhar bir soğutma kulesinde veya püskürtme havuzunda elde edilmiş soğutma suyu ile yoğuşturulur ve yer altına enjekte edilir. Soğutma suyu genellikle yer altından çıkarılan ve kullanılan jeotermal akışkandan başka bir şey değildir. Jeotermal santralin bulunduğu yerde ırmak ve göl gibi bir soğuk su kaynağı varsa kondenserde bu su da kullanılabilir. Bütün kondenserli jeotermal buhar çevrimlerinde kondenserlerde vakum oluşturmak için buhar ejektörleri kullanılır. Belli miktarda buhar ejektörlerde kullanılır.



**Şekil 4.** Tek püskürtmeli çevrim jeotermal elektrik santrali.

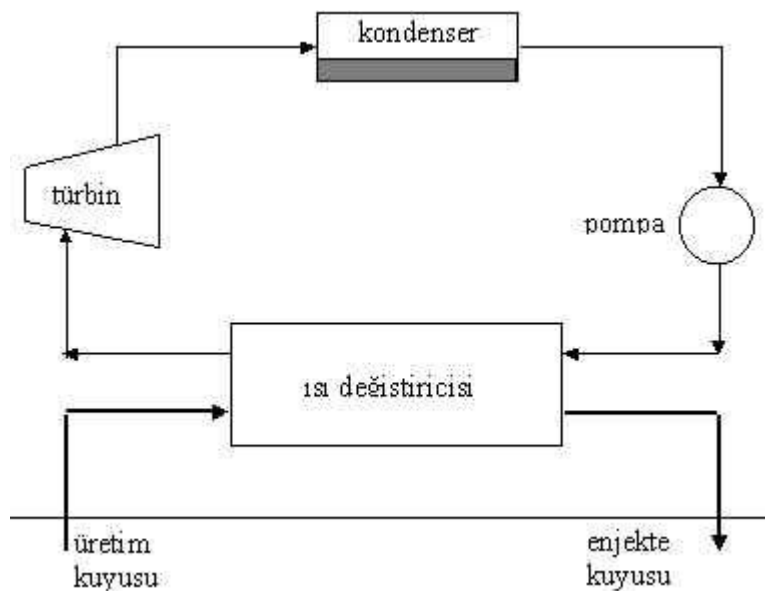
Yer altında çıkarılan jeotermal akışkanın sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda püskürtme işlemi birden fazla tekrarlanabilir. İlk püskürtmeden sonra elde edilen buhar türbine gönderildikten sonra kalan sıvının basıncı veya sıcaklığı hala yüksek ise bu sıvı ikinci bir püskürtme havuzunda tekrar püskürtülür (Şekil 5). Sıvının belli bir yüzdesi buharlaşır ve bu buhar türbine gönderilir. İkinci püskürtmeden elde edilen buharın basıncı ilk püskürtmeden elde edilen buhar basıncından daha düşük olduğundan düşük basınçlı buharın, türbine daha düşük bir basınç kademesinde alınması sağlanır. Alternatif olarak santralde düşük basınçlı buhar için ikinci bir türbin kullanılabilir. Püskürtme sayısına göre jeotermal çevrim tek püskürtmeli ve çift püskürtmeli olarak adlandırılırlar. İkinci püskürtme, çevrimden elde edilecek gücü arttırmakla birlikte beraberinde gelen ek yapım ve işletme masrafları dikate alındığında ekonomik olmayabilir. Pratikte çift püskürtmeli jeotermal santrallere rastlanmakla beraber ikiden fazla püskürtme ekonomik olmadığı için uygulanmamaktadır.



Şekil 5. Çift püskürtmeli çevrim jeotermal elektrik santrali.

## İkincil Çevrim

Düşük sıcaklıkta (genellikle  $170^{\circ}\text{C}$ 'nin altı) ve sıvı ağırlıklı jeotermal kaynaklardan elektrik üretiminde ikincil çevrim diye adlandırılan bir çevrim kullanılır (Şekil 6). Bu çevrimde türbinden geçen aracı akışkan jeotermal buhar değil fakat ikincil akışkan adı verilen ve kaynama sıcaklığı suyun kaynama sıcaklığından çok daha düşük olan bir akışkandır. Bu çevrimde jeotermal akışkan çevrimin ısı kaynağını oluşturur. İzobütan, İzopentan, pentan ve R-114, jeotermal ikincil çevrim santrallerinde yaygın olarak kullanılan ikincil akışkanlardır.



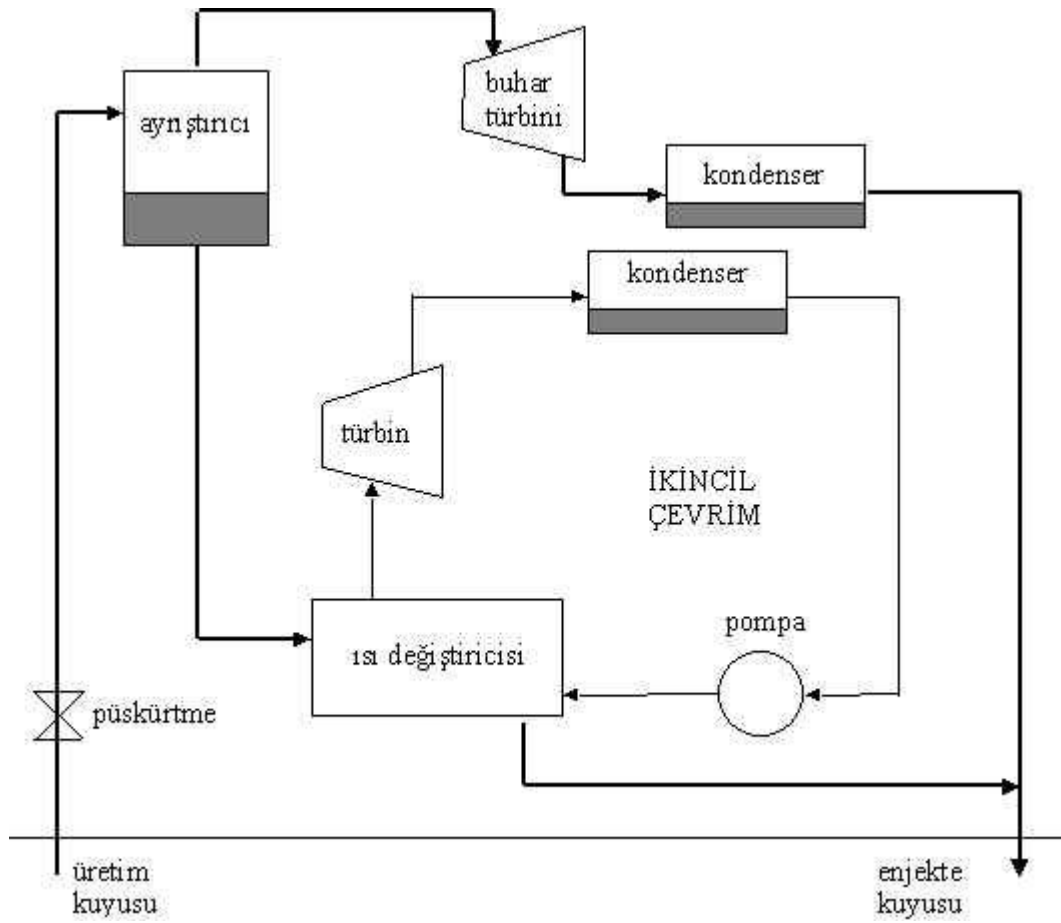
### Şekil 6. İkincil çevrim jeotermal elektrik santrali.

Jeotermal akışkan kuyu başındaki basıncın yeterince yüksek tutulmasıyla tercihen % 100 sıvı olarak yer altından çıkarılır. Bunun nedeni akışkan akışı için gerekli olan pompa gücünün sıvı fazında daha düşük olması ve pompaların genelde sadece sıvı fazı için tasarlanmış olmasıdır. Jeotermal akışkan bir ısı değiştiricisinden geçirilir ve jeotermal akışkanın ısı enerjisi ısı değiştiricisine diğer uçtan giren ikincil akışkana transfer edilir. Jeotermal akışkan ısı değiştiricisini düşük sıcaklıkta terk eder ve yer altına enjekte edilir. İkincil akışkan ısı değiştiricisinde ısınır ve tamamen buharlaşır ve ısı değiştiricisini doymuş buhar veya hafifçe kızmış buhar olarak terk eder. İkincil akışkan türbinden geçer ve ısı enerjisi dönen mil mekanik gücüne çevrilir. Türbinin mili jeneratörün milini çevirerek mekanik gücün elektriğe dönüşmesini sağlar. Türbini düşük sıcaklıkta ve basınçta terk eden ikincil akışkan kondenserde yoğunlaştırılır. Daha sonra bir pompa yardımıyla basıncı tekrar ısı değiştiricisi basıncına yükselttilerek ısı değiştiricisine yönlendirilir. Böylece ikincil akışkan termodinamik anlamıyla bir çevrimi tamamlamış olur. İkincil akışkanın tamamladığı bu çevrim aslında Rankine çevrimidir. Jeotermal akışkanın bu santraldeki fonksiyonu sadece Rankine çevrimine ısı kaynak oluşturmaktır. İkincil akışkanın termodinamik ve kritik özellikleri ikincil jeotermal çevrimlerin performanslarını etkiler. Bu yüzden, belli bir jeotermal kaynaktan en fazla gücün üretilmesi için en uygun ikincil akışkanın seçilmesi gerekir.

Kondenserde soğutucu ortam olarak genellikle hava kullanılır. Jeotermal santralin yer seçimi jeotermal kaynağın yeriyle sınırlandırıldığından bir ırmak veya göl suyu ile soğutma genelde mümkün olmaz. Havanın soğutucu akışkan olarak kullanılması çevrenin temiz tutulmasına katkı sağlar fakat çevrimin verimini özellikle yaz günlerinde olumsuz olarak etkiler. Hava ile soğutmanın mevsimlere göre çevrim verimine etkisi gerçek bir ikincil çevrim jeotermal santral için önceden incelendi (Kanoğlu ve Çengel, 1999b).

### **Birleşik Püskürtmeli / İkincil Çevrim**

Jeotermal elektrik üretiminde özellikle son 10 yılda popüler olmaya başlayan yeni bir çevrim birleşik püskürtmeli/ikincil çevrimdir (Şekil 7). Bu çevrim hem püskürtmeli hem ikincil çevrimlerin avantajlarından aynı anda yararlanmayı amaçlar. Bu çevrim yüksek sıcaklıktaki jeotermal kaynaklar için uygundur ve bu özelliğiyle çift püskürtmeli çevrimlere bir alternatif oluşturur. Jeotermal akışkan püskürtme havuzunda püskürtüldükten sonra elde edilen buhar bir buhar türbininden geçer ve elektrik elde edilir. Kondenserde yoğuşturulan jeotermal akışkan tekrar yer altına enjekte edilir. Püskürtme havuzundan çıkan jeotermal sıvı ikincil çevrimin ısı değiştiricisinden geçerek ısı enerjisini ikincil akışkana transfer eder ve yer altına enjekte edilir. İkincil akışkan ikincil çevrimin türbininden geçerek elektrik elde edilir ve ikincil çevrim tamamlanır.



Şekil 7. Birleşik püskürtme/ikincil çevrim jeotermal elektrik santrali.

Birleşik çevrimde jeotermal buharın ve ikincil akışkanın geçtiği iki ayrı türbin vardır. Benzer jeotermal kaynakları kullanan çift püskürtmeli ve birleşik püskürtmeli/ikincil çevrimler karşılaştırıldığında birleşik çevrimden daha fazla elektrik üretilebildiği; çift püskürtmeli çevrimin ise yapım ve işletme masraflarının daha düşük olduğu görülür. Benzer bir karşılaştırma tek



püskürtmeli ve ikincil çevrim için de geçerlidir. Belli bir jeotermal kaynaktan elektrik üretilmesi planlanıyorsa, en uygun çevrimin seçimi detaylı bir termodinamik ve ekonomik analiz sonucunda yapılabilir.

## Çevrimlerin Verimleri ve Geliştirilme Potansiyelleri

Üretilen net gücün kaynaktaki veya kuyu başındaki jeotermal akışkanın enerjisine oranı olarak tanımlanan buhar çevrimlerinin ısı verimleri % 10 ile % 17 arasında değişir. Bu yüzdelerin düşük olmasının nedeni jeotermal kaynakların düşük sıcaklıkta olmasıdır. Aynı şekilde tanımlanan ikincil santrallerin ısı verimleri % 2.8 ile % 5.5 arasında değişir (Barbier, 1997). Bu yüzdelerin daha da düşük olmalarının nedeni ikincil santrallerin daha düşük sıcaklıkta jeotermal kaynakları kullanmalarıdır. Ayrıca ikincil santrallerin çoğu için soğutma ortamı olarak sadece hava mevcuttur ve bu nedenle kondenser sıcaklığı özellikle yaz aylarında yüksektir. Bu durum ısı veriminin düşük olmasına neden olur. Alternatif olarak ikincil santraller için üretilen net gücün ikincil akışkana transfer edilen ısıya oranı olarak bir dönüşüm verimi tanımlanabilir. Aslında tanımlanan Rankine çevriminin ısı verimidir. Dönüşüm verimi % 6 ile % 12 arasında değişir. Yani bir ikincil santral kullanılan jeotermal enerjinin sadece % 6 ile % 12'sini elektriğe dönüştürürken geriye kalan % 88 ile % 94'ünü atmosfere atık ısı olarak atar.

Dünyada olan jeotermal elektrik santrallerinin çoğu 1970 ve 1980'lerde özellikle 1973 petrol krizinden sonra yapılmıştır. Alternatif enerji kaynaklarından elektrik üretmeye olan aşırı istek ve jeotermal enerjinin bedava olması nedenleriyle bu süreçte jeotermal santrallerin tasarımında gerekli dikkat gösterilmedi. Birleşik püskürtmeli/ikincil çevrimler ancak son on yılda pratiğe sunulabildi. Yeni jeotermal elektrik santrallerinin tasarımı yeni ve ileri teknolojiler kullanılarak yapılmaktadır. Bununla beraber, eskiden yapılmış jeotermal elektrik santrallerinde bugünkü teknolojilerin kullanılmasıyla yapılacak değişiklikler, bu santrallerin performanslarını % 50'ye varan oranlarda arttırabilir. Bu değişiklikler arasında santral için farklı bir çevrimin seçilmesi, çevrimin çalışma şartlarının optimizasyonu, ikincil çevrimlerde ikincil akışkanın değiştirilmesi ve kojenerasyon (birleşik ısı-elektrik üretimi) uygulanması sayılabilir (Kanoğlu, Çengel ve Turner, 1998), (Kanoğlu ve Çengel, 1999a), (Kanoğlu ve Çengel, 1999c).

## Ekonomik Veriler

Jeotermal uygulamalar ilk masraflarının yüksekliği ve çalıştırma ve bakım masraflarının azlığı ile bilinirler. Elektrik üretimi için olan toplam masrafların

yaklaşık % 50'sini jeotermal akışkanın yer altından çıkarılması ve tekrar yer altına enjekte edilmesi; % 40'ını elektrik santralının yapılması ve kalan % 10'unu ise diğer masraflar oluşturur. Üretim ve enjekte kuyularının delme ve geliştirme masrafları üretilecek her kW elektrik için 500 dolarla 4000 dolar arasında değişirken elektrik santralının yapım masrafları üretilecek her kW elektrik için 1500 dolarla 1700 dolar arasında değişir. Dolayısıyla toplam masraflar her kW için 2000 dolarla 6000 dolar arasında değişir. Çalıştırma ve bakım masrafları toplam elektrik üretimi masraflarının % 10'u ile % 20'si arasındadır. Elektrik üretim masrafları üretilen her kWh elektrik için 0.03 dolarla 0.12 dolar arasında değişir. Petrol ve kömür yakıtlı ve nükleer elektrik santrallerinde her kWh elektriğin masrafı yaklaşık 0.06 dolarken hidroelektrik santrallerinde bu masraf 0.03 dolarla 0.09 dolar arasındadır (Allegrini ve Barbier, 1993; Gould, 1993). Jeotermal elektrik santralleri hidroelektrik santrallerinden daha ekonomik olarak ve daha küçük boyutlarda yapılabilirler. Kondensersiz bir jeotermal elektrik santralının yapım masrafı üretilecek her kW elektrik için 1050 dolarla 1250 dolar arasındayken kondenserli bir santralin masrafı 1500 dolarla 1700 dolar arasında değişir. İkincil bir santralin masrafı ise yaklaşık 1900 dolardır (Hudson, 1995). Jeotermal enerjinin bölge ısıtması ve soğutmasında kullanılmasıyla karşılaştırıldığında, jeotermal elektrik santrallerinin yapım masraflarının daha düşük olduğu ve kendini amorti etme süresinin daha kısa olduğu görüldü (Kanoğlu and Çengel, 1999c).

## Kaynakça

**Allegrini, G. and Barbier, E.**, The geothermoelectric Generation in Italy: Planning Strategies, Experience Gained During Operation, and Cost Analysis, VDI Berichte 1024. VDI Verlag, Munich, Germany, 1993, pp. 123-139.

**ASHRAE Handbook of Applications**, Ch. 29, American Society of Heating, Refrigerating, and Air -Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, 1995.

**Barbier E.**, "Nature and Technology of Geothermal Energy: A Review", Renewable & Sustainable Energy Reviews-An International Journal, Vol.1, Number 1/2, pp. 1-69, 1997.

**Gould, W.R.**, Edison's QF Experience. Proc. Geothermal Energy-The Environmentally Responsible Energy Technology for the Nineties, Geothermal Program Review XI, U.S. Dept. of Energy, CONF/-930484, 1993.

**Hochstein, M. P.**, Classification and Assessment of Geothermal Resources, UNITAR/UNDP Center on Small Energy Resources, Rome, Italy, 1990.

**Hudson, R.B.**, *Geothermal Energy*, John Wiley & Sons, Chichester, 1995.

**Kanoğlu, M. and Çengel, Y. A.**, "Retrofitting a Geothermal Power Plant to Optimize Performance: A Case Study", *Transactions of the ASME, Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 121, No. 4, September 1999a.

**Kanoğlu, M. and Çengel, Y. A.**, "Improving the Efficiency of an Existing Binary Geothermal Power Plant: A Case Study". *Transactions of the ASME, Journal of Energy Resources Technology*. Vol. 121, No. 3, September 1999b.

**Kanoğlu, M. and Çengel, Y. A.**, "Economic Evaluation of Geothermal Power Generation, Heating, and Cooling", *Energy-The International Journal*, Volume 24, Issue 6, pp. 501-509, June 1999c.

**Kanoğlu, M., Çengel, Y. A., and R. H. Turner**, "Incorporating a District Heating/Cooling System to an Existing Geothermal Power Plant", *Transactions of the ASME, Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 120, No. 2, pp. 179-184, June 1998.