

JEOTERMAL SANTRALLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Ayşe Hilal KIVANÇ
Umran SERPEN

ÖZET

Jeotermal santrallerin ilki 1904 yılında kurulmuş olup, buhar baskın bir jeotermal sistemden beslenmekte olan bir atmosferik buhar türbininden ibaret bir proses idi. Daha sonra benzeri prosesler kondenser ile takviye edilerek 1930'lu ve 40'li yıllarda Larderello'da kurulmuştur. Su baskın jeotermal sistemler için ilk santral ise 1958 yılında Wairakei'de kurulan flaş sistemine dayalı santral idi. Bundan sonraki 1960'lı ve 70'li yıllarda, başlangıçta kullanılan tek flaşlı sistemlerin yanında iki flaşlı sistemler de (daha yüksek sıcaklıklı kaynaklar için) kurularak işletilmeye başlanmıştır. Bindokuzyüz seksenli yıllarda önce prototip olarak devreye giren "binary santraller" 1990'lı ve 2000'li yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Özünde termik santral grubunda bulunan ve onlar gibi temel yük santrali olarak işletilen jeotermal santraller, termiklerden kazanlarının yeraltında olmasıyla, ayrılırlar. Termik santrallerden diğer bir farkı da, düşük kaynak sıcaklıkları dolayısıyla, düşük verimlilikleridir. Yeraltındaki bir kaynağa bağlı oldukları için, bu kaynağın yalnız sıcaklığına değil, fizikokimyasal özelliklerine de bağlıdırlar. Bundan ötürü, santral tipi seçimi önem kazanmaktadır.

Ülkemizde çeşitli sıcaklıklarda jeotermal kaynaklar bulunmaktadır. Bunlardan bir kısmı orta entalpili kaynaklardır ve bu kaynaklar için santral seçimi ister istemez "binary" tip olacaktır. Özellikle yüksek entalpili kaynaklara dayalı santrallerin seçiminde, 1960'lı ve 70'li yıllarda devreye alınan flaş sistemlerin verimlerini arttırmak için, "bottoming binary" ve "kombine santral" tipi seçenekleri de ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada flaş proseslerle yeni ortaya çıkan kombine prosesler karşılaştırılmış, avantaj ve dezavantajları anlatılmış ve Türkiye'deki jeotermal kaynaklara uygunlukları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çift flaş sistemi, Bottoming Binary çevrim, Kombine çevrim, Optimizasyon

ABSTRACT

First geothermal power plant installed in 1904 was a process composed of atmospheric turbine, which used to be fed by a vapor dominated geothermal system. Later on in 1930s and 1940s, similar processes enhanced by condensers have been installed in Larderello area. First geothermal power plant based on flash process fed by water dominated systems was installed in 1958 at Wairakei, New Zealand. Afterwards in 1960s and 1970s, beside singleflash processes, double flash processes for higher enthalpy geothermal fields have been installed and operated. In 1980s first prototype binary geothermal power plants were introduced and they were started to be widely used in 2000s.

Geothermal power plants, which essentially belong to thermal plant group and are operated as base-load power plants like them are separated from thermal power plants as having boilers underground. They also differ from thermal plants for having low efficiencies due to low resource temperatures. As they depend upon underground resource, they are dependent on not only resource temperatures but

also physico-chemical properties of those resources. Therefore, power plant type selection is a very important issue.

We have various geothermal resources with different temperatures in Turkey. Some of them are resources with middle enthalpies, and therefore, binary type power plants are necessary to install for them. In recent years, in order to increase the efficiencies of flash geothermal processes, bottoming binary and combined geothermal power plants have been introduced for higher enthalpy geothermal fields.

In this study, old flash processes are compared with new combined systems; advantages and disadvantages are reported, and suitability of them for Turkish geothermal resources have been discussed and results are presented.

Key Words: Double flash system, Bottoming Binary cycle, Combine cycle, Optimization.

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji, uzun yıllardan beri, birçok ülkede kullanılan temiz enerji kaynaklarından biridir. Yerkabuğunda birikmiş, basınçlı, sıcak su, buhar enerjisi olarak tarif edilen jeotermal enerji ile ilgili ilk araştırmalar 1800'lü yıllarda İtalya'da başlamış, ülkemizde ise 1963 yılında araştırmalara başlanmıştır ve ilk santral 1984 yılında işletmeye alınmıştır.

Dünya'da jeotermal kaynaklardan elektrik üretimi en yüksek ülkeler ABD, Filipinler, Endonezya, İtalya ve Meksika'dır. 2008 yılı üretimlerine göre Dünya'da jeotermal kaynaklardan üretilen toplam elektrik enerjisi 10470 MWe'dir [1]. Gelişen santral teknolojileri ile orta ve düşük sıcaklıklı ve suyun hakim olduğu jeotermal kaynaklardan elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir [2]. Özellikle ikili (binary) elektrik üretim sistemleri ve birleşik (kombine) sistemler jeotermal kaynaktan elektrik üretim teknolojilerinde oldukça önemli bir yere sahiptir.

Hazırlanan bu çalışmada Türkiye'deki bir jeotermal kaynak için uygulanabilecek çevrim modellerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Çalışma kapsamında, sahada uygulanabilecek üç farklı santral modeli olarak çift flaş, bottoming binary ve kombine çevrimler tasarlanmıştır. Santral modellerinde, sistem elemanları üzerinde optimizasyon yapılmış böylece optimum santral işletme şartları tespit edilmiştir. Hesaplamalar sonucu elde edilen net elektrik enerjisi ile santral verimlerinin karşılaştırılması yapılarak, belirlenen şartlarda en verimli model tespiti yapılmıştır.

2. JEOTERMAL ENERJİDEN ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMLERİ

Jeotermal akışkanın kullanımı önceleri sadece ısınma, yemek pişirme amacıyla kullanılmasına rağmen, bor üretimi amaçlı ilk saha çalışmaları 1833 yılında İtalya'da başlamıştır. 1904 yılında yine İtalya Larderello sahasında ilk kez buhardan elektrik üretimi yapılmıştır [3]. Sonrasında birçok ülkede jeotermal saha çalışmaları devam ederken, 1963 yılında Türkiye'de ilk jeotermal sondaj yapılmış ve 1968 yılında Kızıldere jeotermal sahasının keşfedilmiştir [3].

Devam eden yıllarda jeotermal alanlarla ilgili çalışmalar hızlı bir şekilde devam etmiştir ve 2008 yılı sonunda Dünya'da jeotermal elektrik üretimi yaklaşık 10470 MWe düzeyine ulaşmıştır. Türkiye'de 2009 yılı itibarıyla jeotermal kaynaklı elektrik üretim tesisi kurulu gücü 87.7 MWe'dir [4].

Dünya jeotermal enerji kaynaklarının çoğu çift fazlı, sıvı yoğun ve içinde çözünmemiş gaz miktarı ile çökelmeye sebep olan karbonatlı bileşimler barındıran özelliktedir.

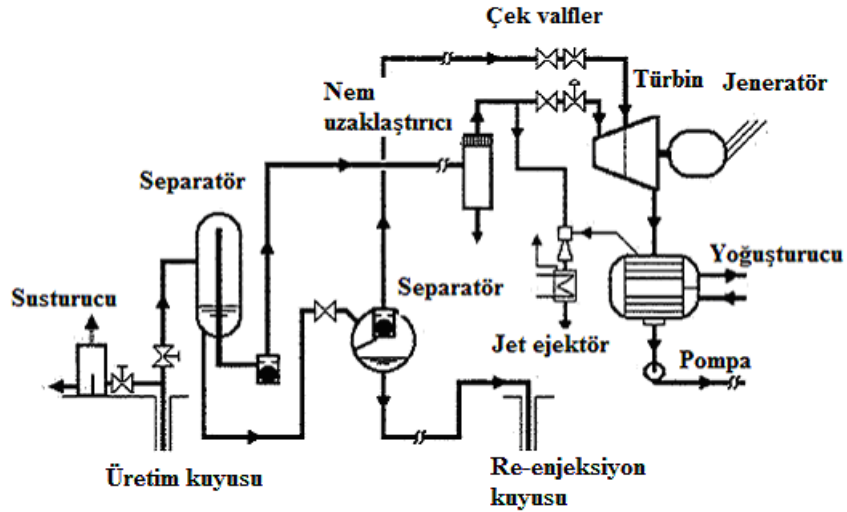
Orta sıcaklıklı jeotermal kaynaktan elektrik üretimine geçebilmek adına geliştirilen ikili (binary) çevrim modeli, üretilen akışkandaki ısı enerjisini ikincil bir akışkana aktarma ile elektrik üretme ilkesine dayanmaktadır. Bunların dışında, hem ayrıştırıcılı hem de ikili (binary) tip çevrim modelini kapsayan başka bir çevrim modeli de geliştirilmiş ya da kombine jeotermal enerji çevrimleri olarak ortaya çıkmıştır.

2.1. Çift Fazlı Akışkan İçin Elektrik Üretim Sistemleri

Suyun hakim olduğu jeotermal kaynaklarda sıvı-buhar karışımı ve/veya kuyudan yükselirken 2 faza dönüşmesi gerçekleştiğinden, buharın türbine gönderilmeden önce sudan ayrılması gerekmektedir. Bu sebepten, bu tür jeotermal akışkanlardan elektrik üretimi sırasında ayrıştırıcı (separator) kullanılmaktadır. Tek separatorlü ve iki separatorlü olan modelleri mevcuttur. Bir separatorün kullanıldığı sistemler Tek Flaşlı "Single Flash" olarak anılırlar. Böyle bir jeotermal çevrimde akışkan separatorde ayrıştırıldıktan sonra buhar türbine, sıvı kısım ise formasyona geri basılmaktadır.

İki fazlı akışkanlardan daha fazla enerji elde edebilmek için iki kademeli separasyon sistemiyle birlikte çift giriş basıncına sahip türbinler kullanılır. "Double Flash" olarak ifade edilen çift flaşlı sistemlerde, birinci kademe ayrışımından sonra alınan sıcak su ikinci kademe separasyondan geçirildikten sonra, elde edilen buhar daha düşük basınçlı ikinci bir türbine gönderilerek ya da aynı türbinin düşük basınçlı kademesine gönderilerek daha fazla elektrik enerjisi üretilebilir. Türbinin dışarı boşalım (egzost) kısmını atmosfer basıncının altında tutabilmek için, buhar içinde bulunan CO₂, H₂S gibi yoğuşmayan gazların ayrıştırılması gerekmektedir. Yoğuşmayan bu gazları ayırmak için kondansörde bir pompa ya da ejektör kullanılmalıdır [5].

Şekil 1'de çift flaşlı örnek bir jeotermal elektrik santralinin şematik çalışma mekanizması görülmektedir.



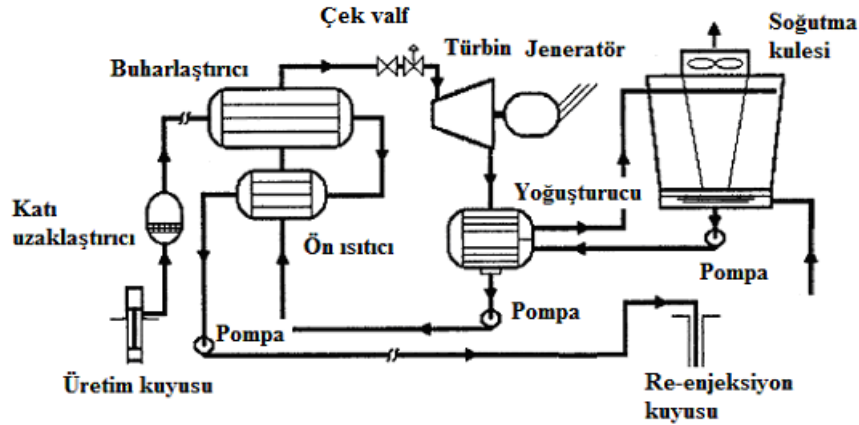
Şekil 1. Çift Flaşlı (Double Flash) Örnek Elektrik Üretim Santrali [2].

2.2. Binary (İkili) Elektrik Üretim Sistemleri

Düşük sıcaklıklı (<180 °C) ve sıvı ağırlıklı jeotermal kaynaklardan elektrik üretimi için, jeotermal akışkandan ikincil bir çalışma sıvısına ısı geçişinin bir ısı değiştiricide sağlanması ve ikinci sıvının da türbinde genişleyip yoğuşturucuda faz değiştirmesiyle ortaya çıkan artık ısının soğutma kulesinden atılması sonucu tamamlanan kapalı devre, bir Rankine çevrimidir [5].

İkili (binary) çevrimlerde ikincil akışkan olarak genellikle, n-pentan, izo-pentan, izo-bütan gibi hidrokarbonlar kullanılmaktadır. Kullanılan ikincil akışkanlar suya göre daha düşük kaynama sıcaklıklarına sahip oldukları için, rezervuar sıcaklığı düşük olan jeotermal kaynaklardan elektrik

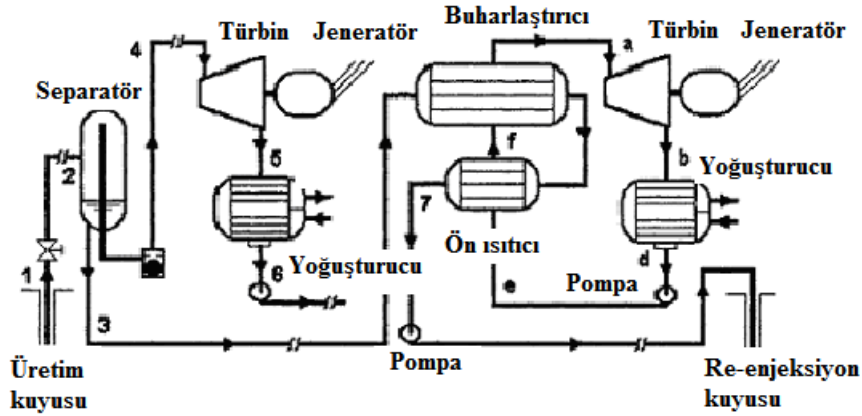
üretimi bu şekilde sağlanmaktadır. Şekil 2’de basit bir binary jeotermal elektrik santrali şeması bulunmaktadır.



Şekil 2. İkili (Binary) Çevrim Örnek Elektrik Üretim Santrali [2].

2.3. Jeotermal Kombine Elektrik Üretim Sistemleri

Jeotermal kaynaklardan diğer sistemlere göre daha fazla elektrik enerjisi üretebilmek için geliştirilmiş sistemlerdir. Genel olarak farklı tip çevrimlerin bir araya getirilerek oluşturulmuş olan bu sistemlerden en fazla kullanılanı tek separatörlü buharlaştırıcı sistem ile ikili (binary) çevrimin tümlenmesiyle oluşturulan “Bottoming Binary Çevrimi” olarak adlandırılan çevrim modelidir. Şekil 3’de örnek şema üzerinde Bottoming Binary tip bileşik santral örneği gösterilmiştir.



Şekil 3. Bileşik Jeotermal Santral Örnek Şeması (Bottoming Binary) [2].

Şekil 3’e göre, belirtilen numaralandırmalar, akışkanın santralde ilerlediği yolun sıralamasını ifade etmektedir. 1 ile 7 arası numaralandırmalar, üretilen jeotermal akışkanın santralde izlediği yolu, a ile e arası sıralama ise, ikili (binary) çevrimde kullanılan ikincil akışkanın izlediği yolu ifade etmektedir. 7 noktasındaki jeotermal akışkan ısısını ikincil akışkana aktardıktan sonra re-enjeksiyon kuyusuna geri basılacaktır. Jeotermal akışkanın ısısını alan ikincil akışkan ise ikili sistemde enerji üretimini sağlayacaktır.

3. TÜRKİYE'DEKİ JEOTERMAL BİR KAYNAK İÇİN TASARLANACAK SANTRAL MODELLERİ, SİSTEM ANALİZLERİ

Türkiye'deki bir jeotermal santral için tasarlanan üç farklı çevrim modeline ait yüzey tesislerinin her biri ayrı bir sistem elemanı olarak ele alınmış ve hesaplamaları yapılmıştır. Her bir santral modelinin hesaplamaları sırasında bazı değerler sabit tutulmuştur. Bunlar, rezervuar şartları, kuyubaşı basınç ve sıcaklık değerleri, buhardaki yoğuşmayan gaz miktarı, toplam akış debisi, mevcut santralin bulunduğu bölgeye ait hava sıcaklığı ve nemlilik değerleri, santral elemanları olan türbin, jeneratör, pompa ve soğutma kulesi fan verimlilikleri şeklinde sıralanmaktadır. Her bir model için kullanılan sabitler Tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Model Uygulamalarında Kullanılan Sabitler

	Birim	Değer
Rezervuar sıcaklığı	°C	200–240
Kuyubaşı basıncı	bar	19
Kuyubaşı çift fazlı akışkan entalpisi	kJ/kg	943
Toplam üretilen debi	ton/st	1155
Buhardaki ağırlıkça yoğuşmayan gaz miktarı	%	15
Yoğuşmayan gazların tamamı		CO ₂
Buhar türbini verimi	%	80
Organik türbin verimi	%	85
Jeneratör verimi	%	95
Pompa verimi	%	80
Pompa motor verimi	%	90
Soğutma kulesi fan verimi	%	50
Bölgenin atmosfer basıncı	bar	0.959
Bölgenin yıllık ortalama hava sıcaklığı	°C	16
Bölgenin yıllık ortalama bağıl nem miktarı	%	61
Soğutma kulesinden çıkan hava nemliliği (bağıl)	%	90

Kullanılan sabitlerin yanında, her bir model için gerçekleştirilecek sistem elemanlarının analizleri de sabit tutulmuştur.

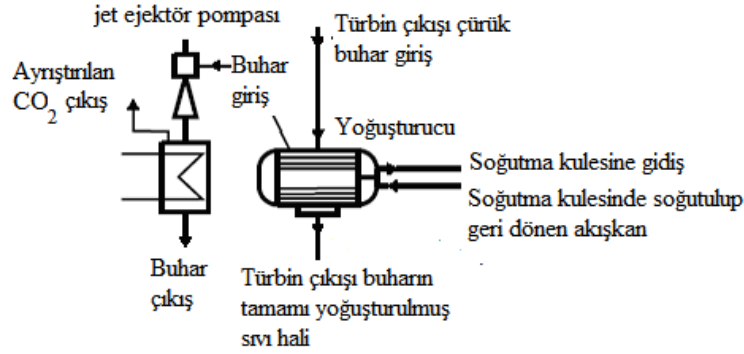
Model tasarımlarına kaynak oluşturan jeotermal sistem, yüksek entalpili, çift fazlı ve buhar içinde yoğuşmayan gaz miktarı yüksek bir kaynak olduğundan, tasarlanan her bir model için, separatör kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Burada kullanılan separatör Webre tipi siklon ayırıştırıcılardır. Separatörlerin analizinde, çevrimin tamamını da etkileyecek en önemli nokta separatör basıncının yani çift fazlı akışkanın flaş edileceği basınç değerinin en fazla buhar elde edecek şekilde tespit edilmesi olacaktır. Separatör analizinde temel alınacak prensip, termodinamiğin 1. yasasına göre enerji korunumu ve kütle korunumu olacaktır.

Modellemelerde yapılan bir diğer önemli analiz, türbin- jeneratör analizleridir. Genel termodinamik sistemlerde kabul edilen sürekli, adiyabatik şartı türbindeki genişleme prosesinde de geçerli olup, potansiyel ve kinetik enerji terimlerinden gelen kayıplar ihmal edilmektedir. Türbinden elde edilebilecek maksimum iş değeri, izantropik ve adiyabatik genişleme ile yani tersinir süreçte oluşacaktır.

Separatör ve türbin- jeneratör analizlerinin yanında, yoğuşturucu (kondansör) analizi de santralden elde edilecek elektrik enerjisini etkileyebilecek özelliğindedir. Yoğuşturucu çalışma prensibi genel olarak, hava ya da soğutucu akışkan olarak soğutma kulesinden tedarik edilen sıvı ile türbin çıkışındaki yüksek sıcaklıktaki akışkanın sıcaklığını düşürmek ve akışkanın tamamını yoğuşturmak esasına

dayanmaktadır [6,7]. Termodinamiğin 1. yasasına göre enerji ve kütle korunum denklemleri kullanılarak yoğuşturucu analizleri yapılabilmektedir.

Hazırlanan bu çalışmada geçen jeotermal kaynak gibi yüksek yoğuşturucu gaz içeren jeotermal kaynaklardan enerji üretim sistemlerinde, türbinden elde edilecek elektrik gücünde kayıp yaşanmaması için kondanserde biriken yoğuşturucu gazları ayırmak gerekmektedir. Örnek olarak kullanılan jeotermal kaynaktaki yoğuşturucu gazların tamamının CO₂ olduğu kabul edilmiştir ve sistemden ayırmak için jet-ejektör pompa sistemi kullanılmıştır. Şekil 4’de modellenmelerde kullanılan jet ejektör pompa sistemi görülmektedir.



Şekil 4. Jet Ejektör Pompası Şeması [2].

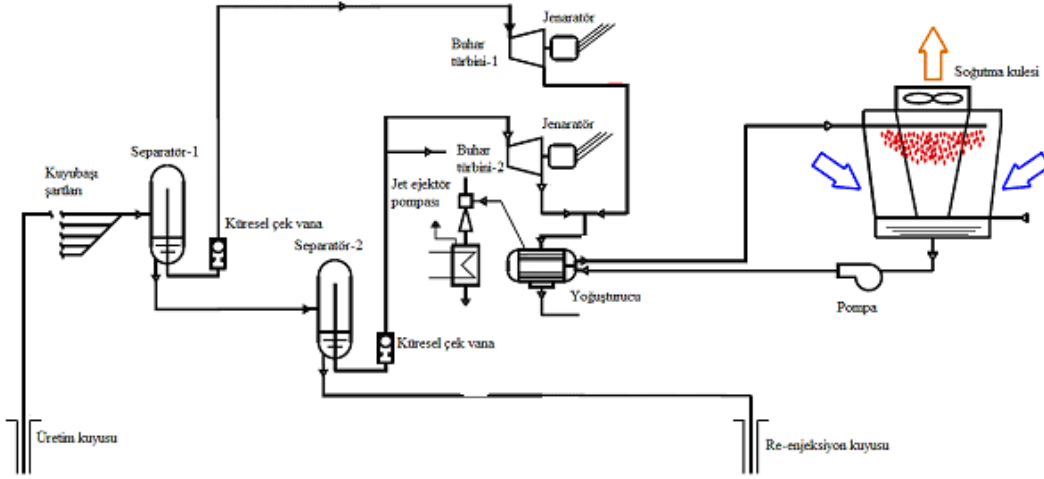
Santral elemanlarının her biri için yapılan analizler içinde, pompa, soğutma kulesi ve ikili (binary) sistemlerde kullanılan ısı değıştiricilerin (buharlaştırıcı, ön ısıtıcı vb.) analizleri de yer almaktadır.

Soğutma kulesi, kondanserde yoğuşan akışkanın sıcaklığını azaltmak için kullanılan bir sistemdir. Hava ve su soğutmalı tipleri bulunmaktadır. Hazırlanan bu çalışmada hava soğutmalı tip soğutma kulesi sistemi kullanılmıştır. Soğutma kulesi analizlerinde termodinamiğin 1. yasası olan enerji ve kütle korunumu ilkelerinden yararlanır. Buna göre, yoğuşuk halde kondanserden soğutma kulesine gönderilen akışkanın kütleli debisi, soğutma işlemi sonrasında kondansere geri döndüğünde herhangi bir kütle ve enerji kaybı olmayacağı kabul edilmektedir. Hava soğutmalı tip soğutma kulesi analizlerinde, akışkanı soğutmak için gereken havanın kütleli debisi ve fanda harcanan gücün hesaplamaları yapılmaktadır.

Buharlaştırıcı ve ön ısıtıcı gibi ısı değıştiriciler ikili (binary) sistemlerde kullanılan en önemli sistem elemanlarındanıdır. Buharlaştırıcı ve ön ısıtıcıların çalışma prensibi, jeotermal akışkan ve çalışma akışkanı arasındaki enerji transferinin sabit olduğu ve termodinamiğin birinci yasasına göre, herbirinde kütle ve enerji korunumunun sağlanmasına dayanmaktadır. Ayrıca ısı değıştiricilerin iyi yalıtılmış olup, herhangi bir kayıp olmadan ısı transferinin sadece jeotermal akışkan ve çalışma sıvısı arasında gerçekleştiği kabul edilmektedir [2]. Bununla birlikte akışın sabit ve sürekli, sistem üzerine etki edecek potansiyel ve kinetik enerjilerin de ihmal edileceği kabul edilmiştir [8].

4. TÜRKİYE’DEKİ JEOTERMAL BİR KAYNAK İÇİN TASARLANAN SANTRAL MODELİ-1

Örnek jeotermal kaynak için tasarlanan santral modelinin ilki çift flaş (double flash) çevrim modelidir. Şekil 5’de uygulanan modelin yüzey tesisleri ve santral akış şeması yer almaktadır. Buna göre, üretilen çift fazlı jeotermal akışkan ilk separatörde sıvı ve buhar kısmı ayrıştırıldıktan sonra buhar fazı yüksek basınçlı türbinde genişlerken jeneratörde elektrik üretilmesi sağlanır. İlk separatörde ayrışan sıvı kısım ise ikincil separatöre gönderilerek tekrar sıvı ve buhar fazlarına ayrıştırılır. İkinci separatörden ayrışan buhar düşük basınçlı türbinde genişletilerek jeneratörde elektrik üretimi sağlanır.



Şekil 5. Çift Flaş Modeli Akış Diagramı [9].

Her iki türbin çıkışında genişleyen buhar tek bir noktada birleştirilerek aynı kondanser ve soğutma kulesi sistemine bağlanmıştır. Soğutma kulesinde sıcaklığı azaltılan akışkan pompa ile basınçlandırılarak yoğuşturucuya geri gönderilir. İkinci separatörde ayrıştırılan sıvı fazdaki jeotermal akışkan reenjeksiyon kuyusuna geri basılacaktır. Akışkan içinde bulunan yoğuşmayan gazların ayrışması için kondanserde jet-ejektör pompa sistemi kullanılmıştır.

4.1. Çift Flaş Modeli Optimum Çalışma Şartlarının Tayini

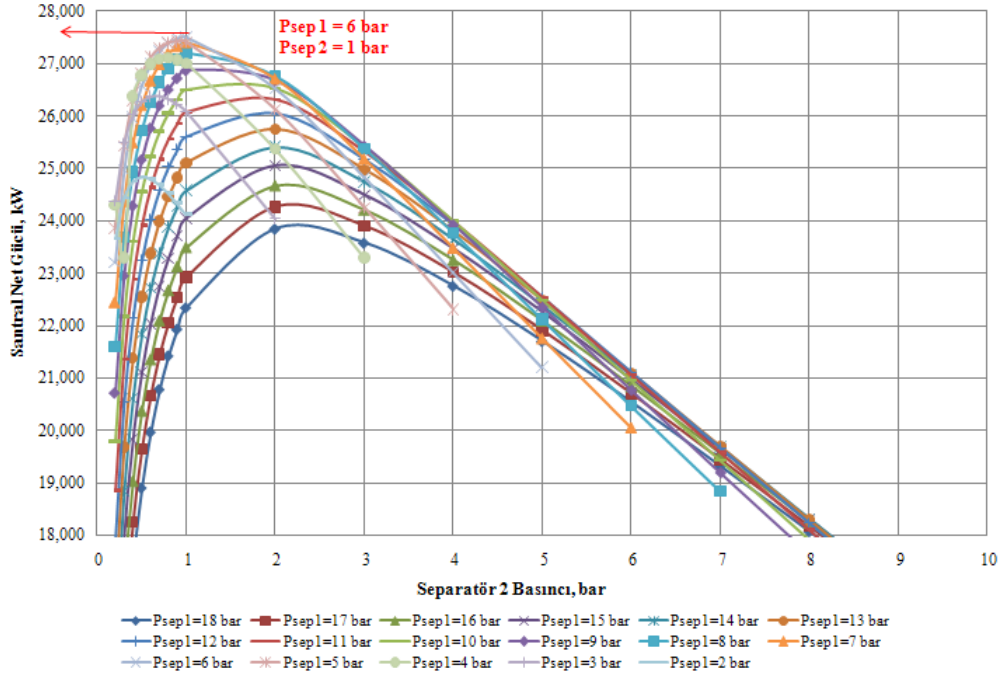
Model uygulaması yapılan çift flaşlı santral modelinin optimum çalışma şartlarının tayini için oluşturulan model üzerinde bir takım hesaplamalar yapılmıştır. Bunlar, türbin çıkış basıncı ve kullanılan separatörlerin çalışma basıncıdır.

4.1.1 Türbin Çıkış Basıncı Optimizasyonu

Modele göre, her iki türbinin bir kondansöre bağlı oluşturulmasının nedeni, türbin çıkışlarında atmosferik basınçların altına düşebilmeyi sağlayacak vakum basınçlarının elde edilebilmesi ve böylelikle buhar türbinlerinden daha fazla enerji elde edilmek istenmesidir. Türbin çıkış basıncının optimize edilmesinde bir diğer önemli faktör de kondansöre bağlı kullanılan jet-ejektör pompa sisteminin çalışma basınçlarında türbin çıkış basıncının tayin edilebilmesidir. Kullanılan jet-ejektör pompa sisteminin sorunsuz çalışabilmesi ve türbinlerden en fazla enerjinin elde edilebilmesi için türbin çıkış basınçlarının dolayısıyla yoğuşturucu basıncının 0.06 bar değerinin altına inmemesi gerektiği hesaplanmıştır. Türbin çıkış basınçlarının tayininde seçilecek basınç değerine karşılık gelecek sıcaklıkların da önemli olduğu bilinmektedir. Çevrimin soğutma sisteminde istenilen verime minimum güç harcayarak ulaşabilmek için, türbin çıkış sıcaklıklarının yüksek olmaması dolayısıyla türbin çıkış basınçlarının uygulanabilir en düşük basınç değerlerinde çalıştırılması gerekmektedir. Model hesaplamalarında bu değer her iki türbin için 0.06 bar basınç ve 36 °C sıcaklık değeri olacağı hesaplanmıştır.

4.1.2 Separatör Basıncı Optimizasyonu

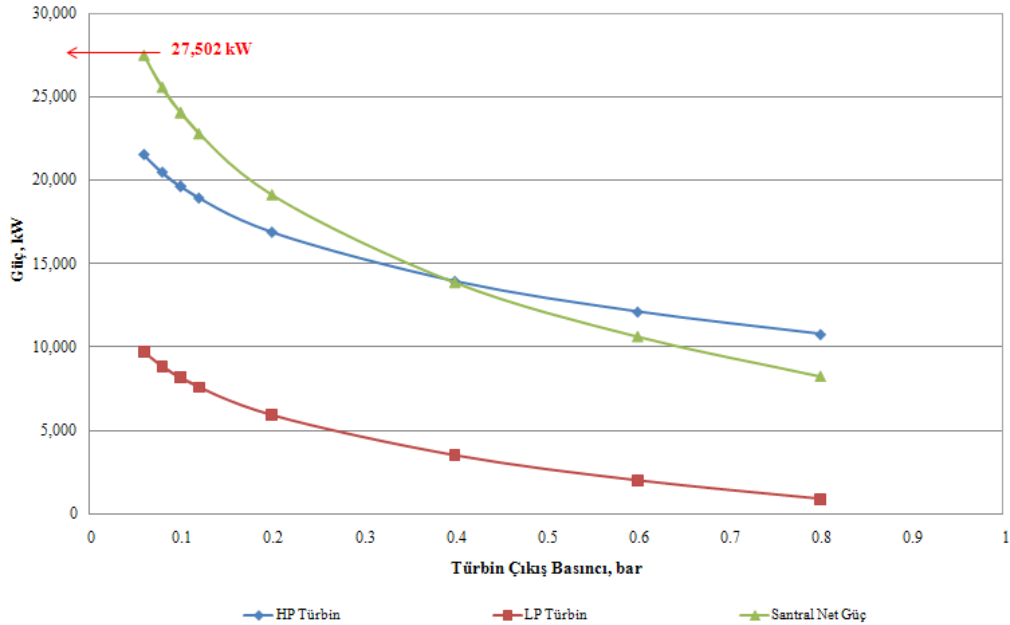
Optimize edilen bir diğer önemli parametre, separatör çalışma basınçlarıdır. Uygulamada kuyubaşı basınç değeri 19 bar olduğundan ilk separatör çalışma basıncı 18 bar- 2 bar buna bağlı olarak ikinci separatör basıncı 17 bar- 0.2 bar değer aralıklarında çalıştığı ön görülüp, seçilen basınç aralıklarında elde edilen net elektrik güçleri karşılaştırılmıştır. Şekil 6'da her iki separatör basınçlarının değişen değerlerine göre santralden elde edilecek net güçlerdeki değişim gösterilmektedir.



Şekil 6. Separatör Basıncı Optimizasyonu

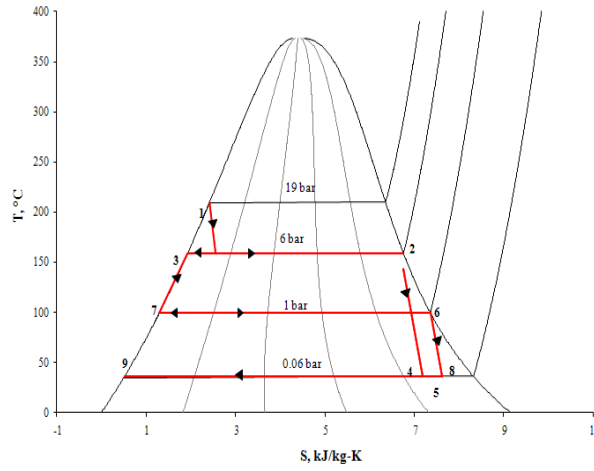
Şekil 6'da görüldüğü gibi, birinci separatör basıncının 6 bar, ikinci separatör basıncının da 1 bar olarak seçilmesiyle elde edilen net santral gücü 27,5 MWe olarak hesaplanmıştır. Artan separatör basınçları ile elde edilecek net santral gücünde azalma olacağı ve maksimum net santral gücünün elde edilmesini sağlayan separatör basınçlarının çift flaş santral modeli için optimum değerler olacağı tespit edilmiştir.

Şekil 7'de ise belirlenen optimum separatör basınçlarında, değişen türbin çıkış basıncına göre yüksek basınçlı türbin, düşük basınçlı türbin ve santralden elde edilecek net güç değerlerindeki değişim görülmektedir. Buna göre, modelde belirtilen santralden en fazla 27,5 MWe elde edilecektir.

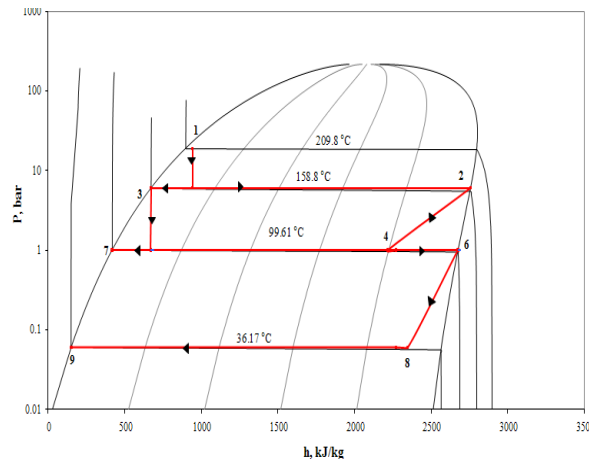


Şekil 7. Türbin Çıkış Basıncına Göre Değişen Güçler

Türbin çıkış basıncı ve her iki separatör basınçlarının optimize edildiği çift flaş sisteminde elde edilen sonuçlara göre sistemdeki termodinamik çevrime ait sıcaklık- entropi (T-s) ve basınç- entalpi (P-h) diagramları Şekil 8 ve Şekil 9'da belirtilmektedir.



Şekil 8. Çift Flaş Modeline ait T-s Diagram

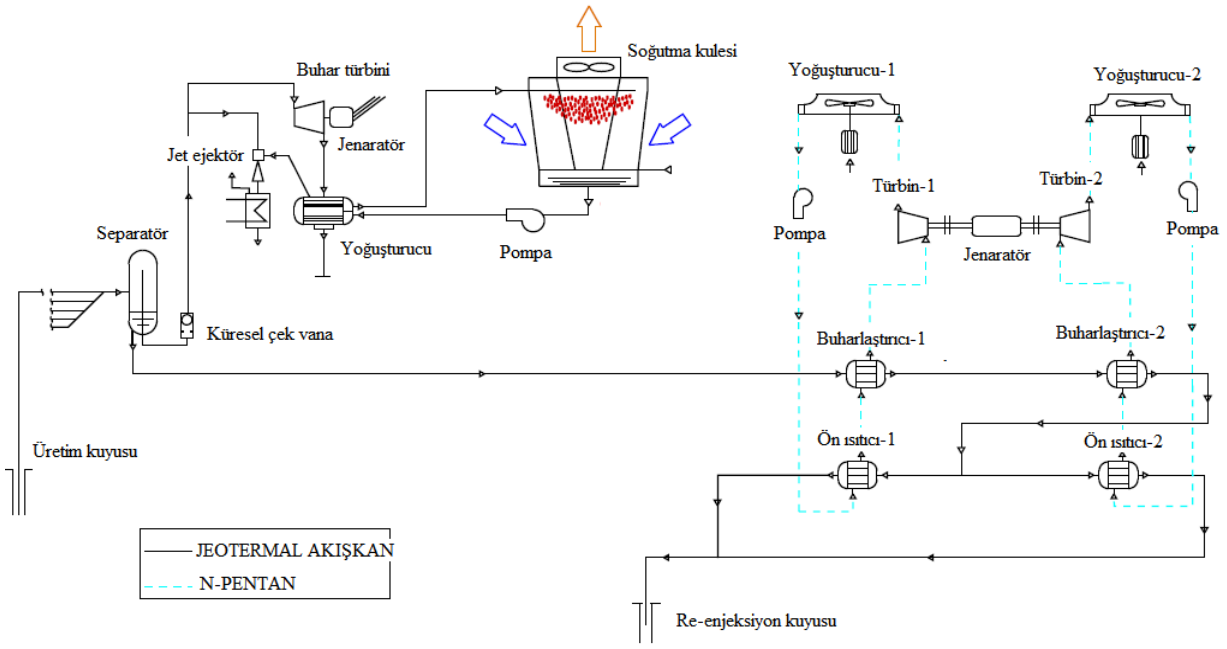


Şekil 9. Çift Flaş Modeline Ait P-h Diagramı

Kabul edilen kuyubaşı basınç ve entalpi değerine göre tasarlanan çift flaş çevrim modelinde, optimum çalışma şartları sonucunda 27.5 MWe net elektrik gücü % 10 çevrim verimliliği elde edilmektedir.

5. TÜRKİYE'DEKİ JEOTERMAL BİR KAYNAK İÇİN TASARLANAN SANTRAL MODELİ-2

Çalışmada kullanılan jeotermal kaynak için uygulanabilecek bir diğer model "bottoming binary" tip santral modelidir. Bottoming binary tip santral modeli, tek flaşlı buhar çevrimi ve ona bağlı organik rankin çevriminden oluşmuş entegre bir modeldir. İkincil akışkana ısı aktarımı prensibine dayalı kapalı devre rankin çevrimi olarak da tanımlanan ikili (binary) çevrimlerde kullanılan çalışma sıvısı genellikle, su buharından çok yüksek molekül ağırlığa sahip hidrokarbonlar olmaktadır. Buradaki çalışmada ikincil akışkan olarak n-pentan kullanılmıştır. Şekil 10'da tasarlanan Bottoming Binary tip santral modelinin akış diagramı görülmektedir.



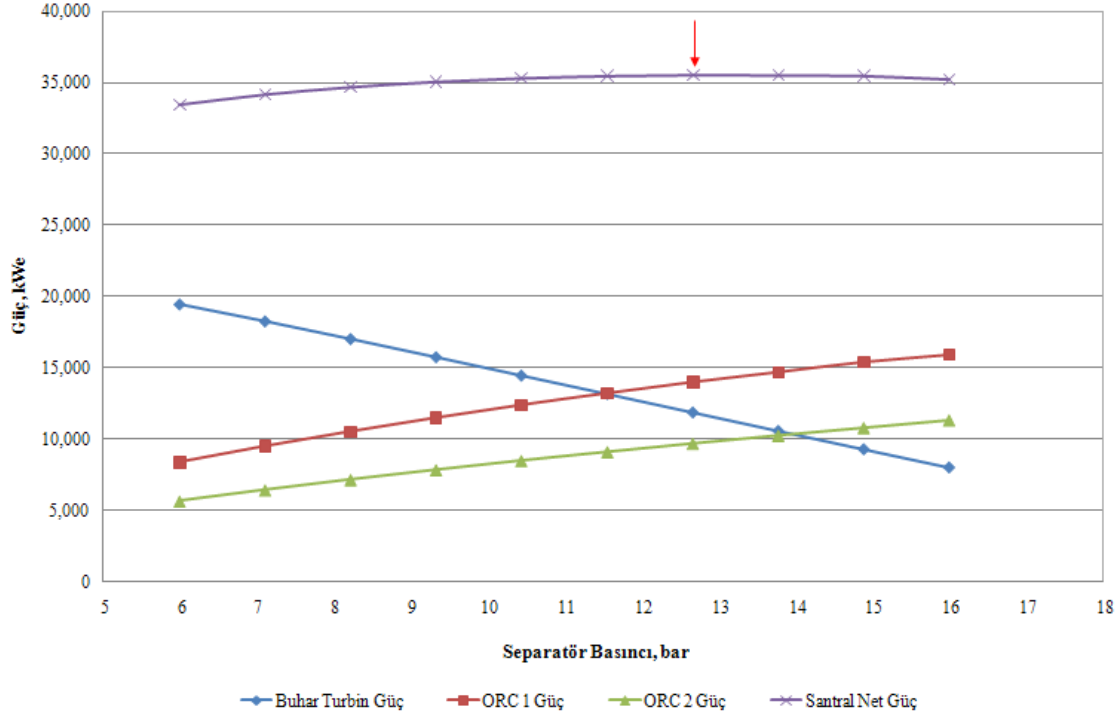
Şekil 10. Bottoming Binary Tip Çevrim Modeli Akış Diagramı [9]

Şekil 10'da belirtildiği gibi, üretilen jeotermal akışkan öncelikle tek flaş buhar çevrimine girmektedir. Separatörde iki faza ayrıştırılan jeotermal akışkan buharı türbinde genişletilerek elektrik enerjisi elde edilmektedir. Separatörde ayrıştırılan sıvı fazdaki jeotermal akışkan ise doğrudan binary çevrime iletilmektedir. Buhar çevriminden gelen sıvı fazdaki jeotermal akışkan (brine) ikili (binary) çevrimde buharlaştırıcı (vaporizer) ve ön ısıtıcıya (preheater) girerek sahip olduğu ısı enerjisini seçilen ikincil akışkana aktarır. Gerçekleşen ısı takası n-pentanın buhar fazına geçişine kadar devam etmektedir [6,8]. Doymuş buhar fazındaki n-pentan organik türbine girerek genişler ve türbinde iş üretilmesi sağlanır. Türbinden çıkan n-pentanı yoğurtmak ve sıcaklığını düşürmek için hava soğutmalı kondansör kullanılmaktadır. Kondansörden çıkan n-pentan pompa ile sıkıştırılıp basınçlandırılır ve ön ısıtıcıya gönderilerek çevrimin tamamlanması sağlanmaktadır. Ayrıca, her iki buharlaştırıcıdan çıkan akışkan bir hat üzerinde toplanarak re-enjeksiyon kuyusuna geri basılmaktadır. Şekil 10'da gösterildiği şekilde tasarlanan modelde, daha fazla enerji açığa çıkması için çift binary sistem kullanılmıştır. Buhar çevriminden gelen akışkan ikiye ayrılarak benzer özellikteki iki binary çevrime girmektedir. İki ayrı binary çevrimdeki organik türbinler aynı shaft üzerinden tek bir jeneratöre bağlanmıştır [9].

5.1. Bottoming Binary Santral Modeli Optimum Çalışma Şartlarının Tayini

5.1.1 Separatör Basıncı Optimizasyonu

Buhar çevrimi separatör çıkışından organik rankin çevrimine aktarılan jeotermal akışkan ısını n-pentan'a maksimum düzeyde aktarabilmek için separatör çıkış basıncı ve sıcaklığı bu model için oldukça önemli bir parametredir. Bu sebepten, değişen separatör basınçlarına göre ayrıştırılan jeotermal akışkanın organik rankin çevrimine giriş sıcaklık değerleri karşılaştırılarak optimum güç değerlerini sağlayacak optimum basınç değeri bulunmaya çalışılmıştır. Sabit kabul edilen kuyubaşı basınç ve entalpi değerlerinde separatör basıncı 16 bar ve 6 bar aralığında seçilerek separatör çıkış sıcaklık değerleri ve buhar türbininden elde edilecek güç değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 11'de değişen separatör basınçlarına göre türbinlerden elde edilecek güç değerleri ve santral net güç değerindeki değişim gösterilmektedir. Buna göre, separatör basıncı arttıkça buhar türbin gücü hızlı bir şekilde azalmakta, tam tersi olarak organik türbinlerden elde edilen güç değerlerinde artış görülmektedir.



Şekil 11. Separatör Basıncı Optimizasyonu

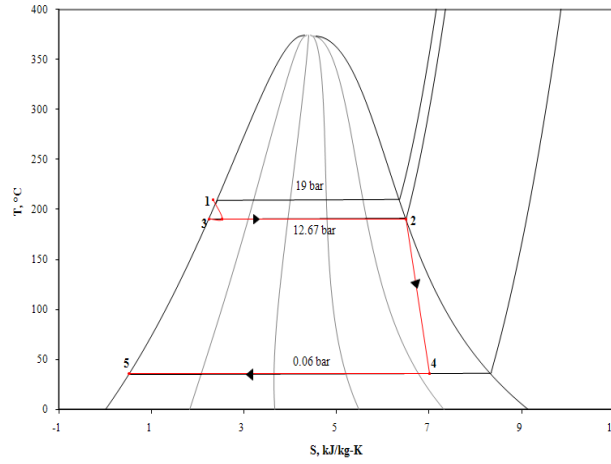
Şekil 11'de görüldüğü gibi net santral gücünün en yüksek değeri olan yaklaşık 35,5 MWe değerini sağlayan separatör basıncının 12,67 bar olduğu hesaplanmıştır. Separatörden ayrılan sıvı fazdaki jeotermal akışkan 190,4 °C sıcaklık ile binary çevrime girmektedir.

5.1.2 Organik Türbin Çıkış Basıncı Optimizasyonu

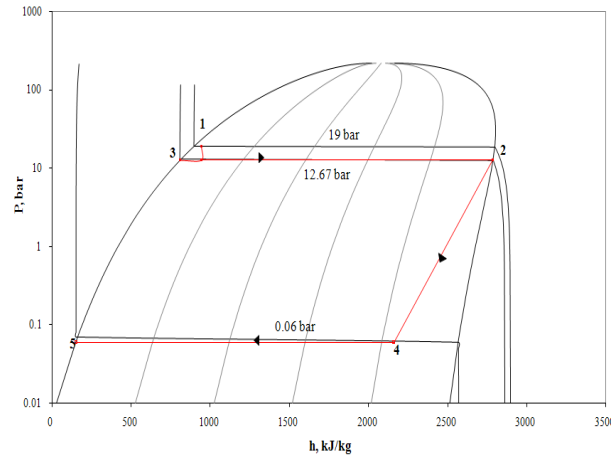
İkili (binary) çevrimlerde kullanılan organik türbinlerin çıkış basıncı, n-pentan için yoğuşma noktası basıncı olarak seçilecektir. Sistemdeki her iki organik türbinin bağlı olduğu hava soğutmalı kondansörlerden çıkış sıcaklıkları n-pentanın tamamının yoğuşmasını sağlayacak sıcaklık değeri olan 38 °C alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre, n-pentanın tamamının yoğuşmasını sağlayacak türbin çıkış basınç değerlerinin her iki organik türbin için 1.09 bar olacağı hesaplanmıştır.

Optimize edilen iki parametre sonuçlarına göre tasarlanan bottoming binary santral modelinden elde edilecek net santral gücü 35,5 MWe; santral verimliliği ise %12 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 12 ve Şekil 13'de modelin buhar çevrimi kısmına ait sıcaklık- entropi (T-s) ve basınç- entalpi (P-h) diagramları görülmektedir.

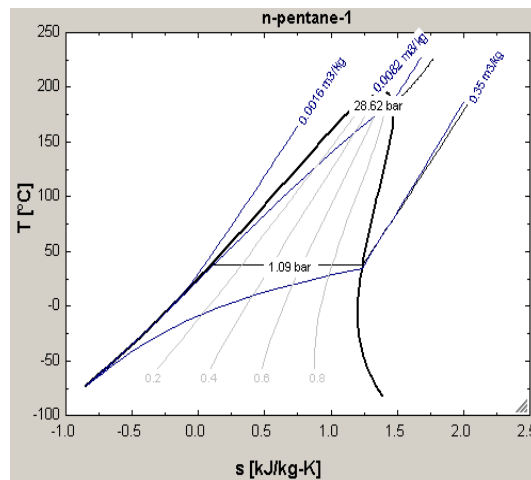


Şekil 12. Buhar Sistemi T-s Diagram

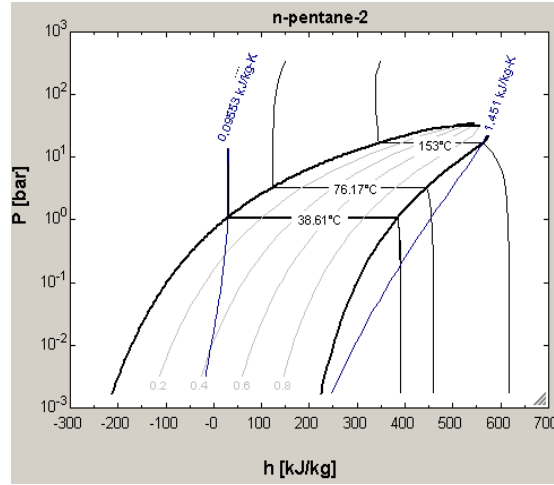


Şekil 13. Buhar Sistemi P-h Diagram

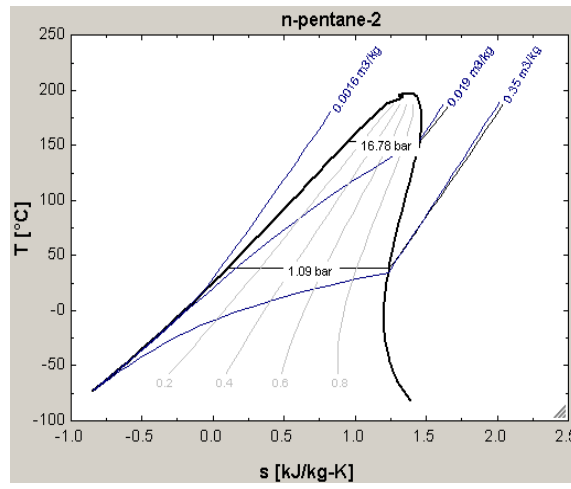
Binary çevrimdeki n-pentan'a ait termodinamik çevrim sıcaklık- entropi (T-s) ile basınç- entalpi (P-h) diagramları da her iki ünite için oluşturulmuştur. Birinci ünite n-pentan termodinamik çevrim diagramları Şekil 14 ve Şekil 15'de; ikinci ünite n-pentan termodinamik çevrim diagramları ise Şekil 16 ve Şekil 17'de belirtilmektedir.



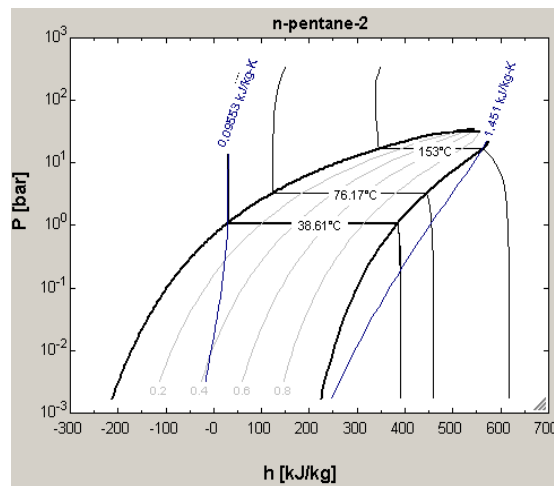
Şekil 14. Birinci Ünite n-pentan T-s Diagramı



Şekil 15. Birinci Unite n-pentan P-h Diagram



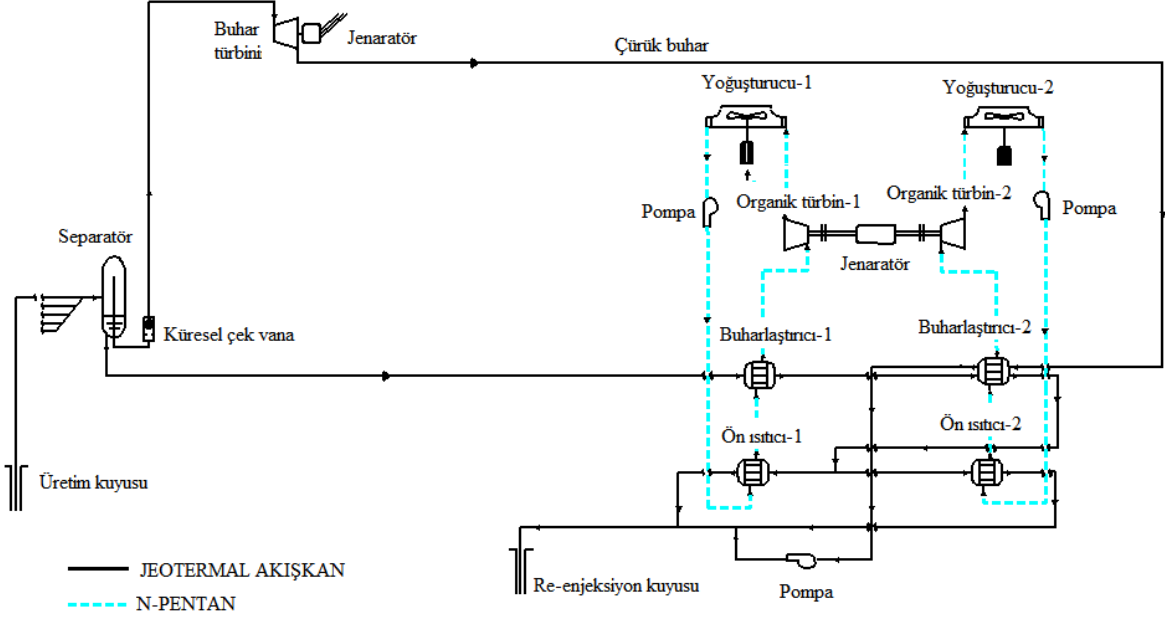
Şekil 16. İkinci Unite n-pentan T-s Diagram



Şekil 17. İkinci Unite n-pentan P-h Diagram

6. TÜRKİYE’DEKİ JEOTERMAL BİR KAYNAK İÇİN TASARLANAN SANTRAL MODELİ-3

Belirlenen tüm kabuller geçerli olmak kaydıyla jeotermal kaynak üzerinde uygulanabilecek bir diğer santral modeli de kombine santral modelidir. Tasarlanan bu modelde amaç, sistemin geneli düşünüldüğünde, bir önceki bölümde elde edilen düşük buhar çevrimi enerjilerinin arttırılabilmesini sağlamaktır. Bunun için, bottoming binary modelinden farklı olarak, buhar çevriminde türbinden çıkan çürük buhar yoğuşturucu ve soğutma kulesi sistemine girmeden, doğrudan ikili çevrimdeki ikincil ünite buharlaştırıcıya gönderilmekte ve sahip olduğu enerjiyi soğutma sisteminde kaybetmeden, n-pentan’a aktarılması sağlanmaktadır. Burada amaç, jeotermal akışkandan daha fazla enerjinin n-pentana aktarılması olarak santralde daha fazla güç elde edilmesini sağlamaktır. Şekil 18’de tasarlanan kombine tip santral modelinin akış diagramı görülmektedir.



Şekil 18. Kombine Tip Çevrim Modeli Akış Diagramı [9].

Buhar çevrimindeki atmosferik türbinden çıkan çürük buhar ikili çevrimde ikinci ünite buharlaştırıcıya, separatörde ayrıştırılan sıvı fazdaki jeotermal akışkan ise birinci ünite buharlaştırıcıya gönderilerek sahip oldukları enerjiyi n-pentan’a aktarmaları sağlanmaktadır. Ön ısıtıcı ve buharlaştırıcı sisteminde tamamı buhar faza geçen n-pentan organik türbinlerde genişletilerek hava soğutmalı yoğuşturuculara aktarılır. Her bir yoğuşturucuda n-pentanın tamamının yoğuşması için gerekli sıcaklık ve basınç değerlerinde, elde edilen doymuş n-pentan pompalar kullanılarak ön ısıtıcılara gönderilir. Böylece, kapalı çevrimlerini tamamlamış olmaktadır. Buharlaştırıcıda ısı takası gerçekleştikten sonra buhar içindeki yoğuşmayan gaz olan CO₂ tamamı serbest gaz olarak sistemden ayrıştırılarak açığa çıkan sıvı re-enjeksiyon sistemine dahil edilecektir [9].

6.1. Kombine Santral Modeli Optimum Çalışma Şartlarının Tayini

6.1.1 Separatör Basıncı Optimizasyonu

Diğer modellerdeki gibi kombine santral modeli için de separatör basıncının tayini kuyubaşı basınç değerine bağlı olarak 16 bar ile 4 bar arasında oluşturulan model sonuçları, elde edilen net elektrik güçleri karşılaştırılarak optimum separatör basıncı belirlenmiştir. Şekil 19’da elde edilen sonuçlar görülmektedir.



Şekil 19. Separatör Basıncı Optimizasyonu

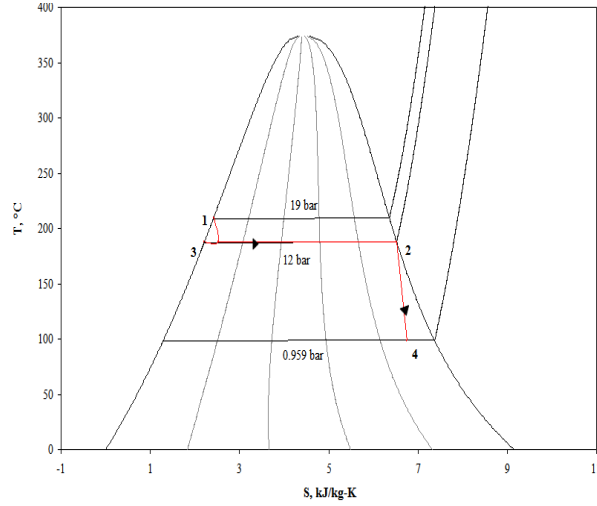
Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, separatör basıncının artmasıyla birlikte buhar türbin gücünde ve ikinci rankin çevriminden elde edilecek güçte azalma, birinci rankin çevriminden elde edilecek güçte ise bir artış olduğu görülmektedir. Sistemin geneli değerlendirildiğinde, net santral gücündeki değişimin optimum separatör basıncında en yüksek değere ulaştığı, daha sonra azalma gösterdiği görülmektedir. Santral net gücünün en yüksek değere ulaşmasını sağlayan separatör basıncının 12 bar olduğu hesaplanmıştır. Optimum separatör şartlarında santralden elde edilebilecek net güç 37 MWe olacağı hesaplanmıştır.

6.1.2 Buhar Türbini ve Organik Türbin Çıkış Basıncı Optimizasyonu

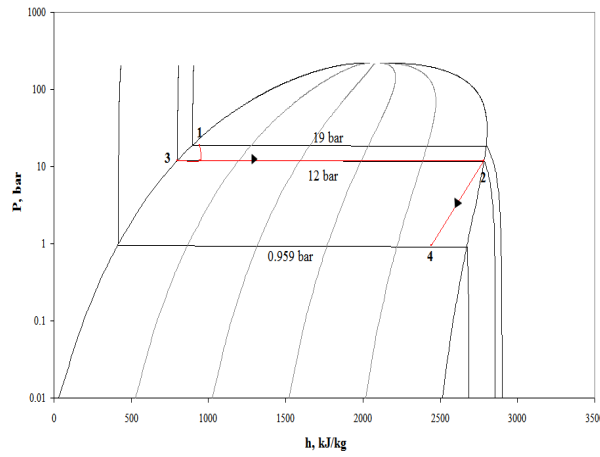
Kombine sistemin buhar çevriminde kullanılan türbin atmosferik türbin olduğundan çıkış basıncı doğrudan bölgenin atmosfer basıncı alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Organik türbinlerin çıkış basıncı da Bottoming Binary sistemde olduğu gibi n-pentan'ın tamamının buharlaşmasını sağlayacak 38 °C sıcaklığın elde edileceği 1,09 bar değeri optimum türbin çıkış basınçları olarak tespit edilmiştir.

Optimize edilen iki parametre sonuçlarına göre tasarlanan kombine santral modelinden elde edilecek net santral gücü 37 MWe; santral verimliliği ise %13 olarak hesaplanmıştır.

Kombine çevrimin buhar sistemine ait sıcaklık- entropi (T-s) ile basınç- entalpi (P-h) diagramları Şekil 20 ve Şekil 21'de sırasıyla belirtilmiştir.

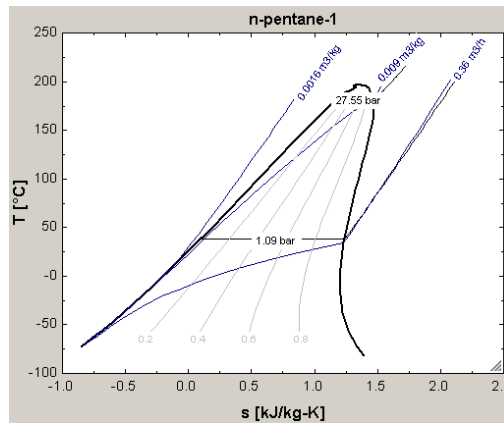


Şekil 20. Buhar Sistemi T-s Diagram

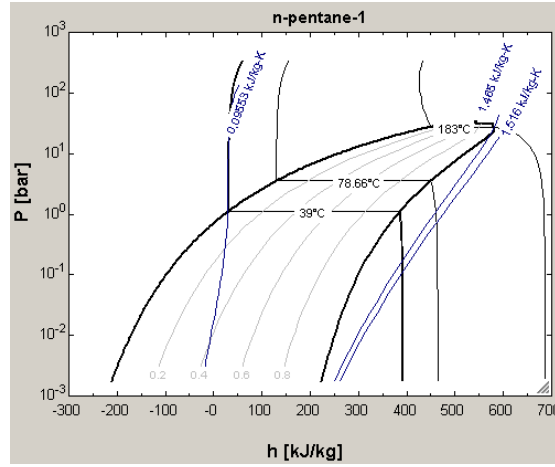


Şekil 21. Buhar Sistemi P-h Diagram

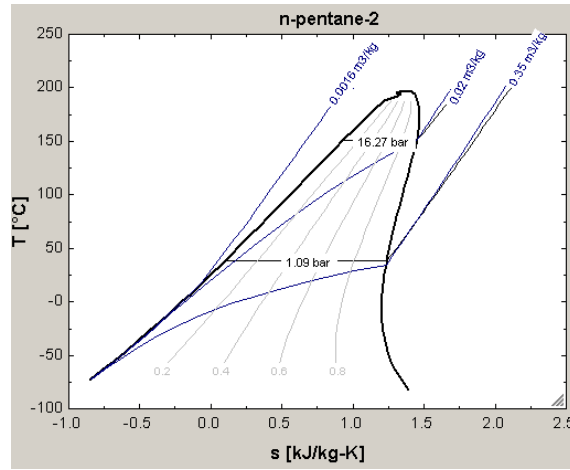
Kombine çevrimdeki n-pentan'a ait termodinamik çevrim sıcaklık- entropi (T-s) ile basınç- entalpi (P-h) diagramları da her iki unite için oluşturulmuştur. Birinci ünite n-pentan termodinamik çevrim diagramları Şekil 22 ve Şekil 23'de; ikinci unite n-pentan termodinamik çevrim diagramları ise Şekil 24 ve Şekil 25'de belirtilmektedir.



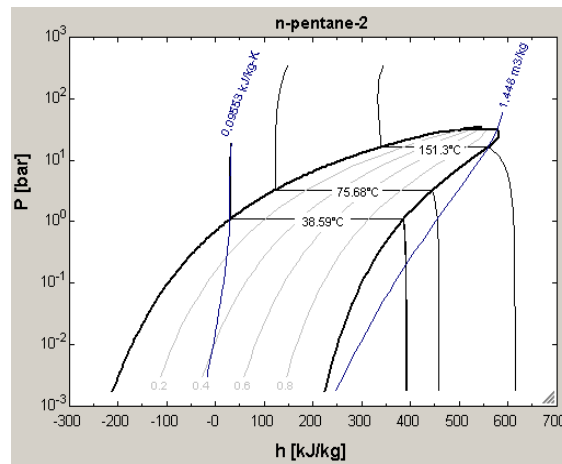
Şekil 22. Birinci Unite n-pentan T-s Diagram



Şekil 23. Birinci Unite n-pentan P-h Diagram



Şekil 24. İkinci Unite n-pentan T-s Diagram



Şekil 25. İkinci Unite n-pentan P-h Diagram

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Hazırlanan bu çalışmanın amacı, geliştirilen yeni santral teknolojilerini kullanarak ülkemizdeki jeotermal kaynaklardan biri için tasarlanan farklı model sonuçlarının karşılaştırılmasıdır. Bunun için öncelikle jeotermal santral teknolojilerinden kısaca bahsedilerek saha ve modeller için yapılan kabuller ve analizler açıklanmıştır. Bahsi geçen santral teknolojileri içinden üç tanesi modellenerek, seçilen jeotermal saha özelliklerine sahip bir kaynaktan elde edilebilecek net elektrik güçleri karşılaştırılmıştır. Oluşturulan modellerde yüzey tesisleri ve santral elemanlarına ait optimum işletme şartlarının belirlenmesi için hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, jeotermal akışkan özellikleri, üretim değerleri ve kabul edilen diğer tüm şartlar sabit kalmak şartı ile Çift Flaş, Bottoming Binary ve Kombine santral modellerinden elde edilen net elektrik güçleri sırasıyla, 27,5 MWe, 35,5 MWe ve 37 MWe olacağı hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre, bu tip bir jeotermal kaynaktan elektrik enerjisi üretiminde en fazla enerjinin kombine santral modelinde elde edilebileceği belirlenmiş, ayrıca santral için optimum işletme şartları da tespit edilebilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] DURAK, S., 2009. Jeotermal Enerjiye İlişkin Yasal Düzenleme ve Destekler, EPDK, Ankara.
- [2] DiPIPPPO, R., 2005. Geothermal Power Plants Principles, Applications and Case Studies, Elsevier, Dartmouth, Massachusetts.
- [3] ATALAY, Ö., 2004. Jeotermal Sistemlerin Ekserji Analizi- Kızıldere Örneği Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [4] Url-1 <<http://www.geothermal-energy.org>>, alındığı tarih 20.05.2010
- [5] SERPEN, Ü., 2010. Jeotermal Güç Santralleri Ders Notları, İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Müh. Bölümü, İstanbul.
- [6] GÖKÇEN, G., ÖZCAN, N. Y., 2008. Yoğuşmayan Gazların Jeotermal Santral Performansına Etkisi: Kızıldere Jeotermal Santrali, Jeotermal Enerji Semineri, Makina Mühendisleri Odası Seminer Bildirisi.
- [7] HOLMAN, J. P., 1988. Thermodynamics, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- [8] DURMUŞ, T., 2006. Salavatlı Jeotermal Santralinin Ekserji Analizi Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [9] KIVANÇ, A.H., 2010. Kızıldere Jeotermal Enerji Santralinde Uygulanabilecek Farklı Çevrim Modelleri İle Santral Güçlerinin Karşılaştırılması Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Enerji Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Ayşe Hilal KIVANÇ

1983 Edirne doğumludur. 2005 yılında İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Müh. lisans programını ve 2010 yılında İTÜ Enerji Bilimi ve Teknoloji ABD yüksek lisans programını tamamlamıştır. Mezun olduktan sonra Fiogaz San. Tic. A.Ş firmasında yurt dışı satın alma ve proje mühendisi olarak başladığı çalışma hayatına 2006 yılından itibaren Zorlu Enerji Grubu şirketlerinden Trakya Bölgesi Doğal Gaz Dağıtım A.Ş'de kıdemli proje uzmanı olarak görev almaktadır. Doğal gaz boru hattı tasarımı, şebeke optimizasyonu ve proje planlama konuları üzerinde çalışmaktadır.

Umran SERPEN

1945 yılı İzmir doğumludur. 1967 yılında İTÜ Petrol Müh. Böl.'den mezun olduktan sonra 1974 yılına kadar TPAO ve MTA'da petrol ve jeotermal sahalarda çalışmıştır. 1974 yılından 1987 yılına kadar ELECTROCONSULT adlı bir İtalyan mühendislik ve danışmanlık şirketinde El Salvador, Guatemala, Meksika, Nikaragua, Kosta Rika, Arjantin, Sili, Etiyopya, Kenya, Filipinler, Rusya ve İtalya gibi ülkelerin çeşitli jeotermal projelerin çeşitli aşamalarında danışmanlık yapmıştır. 1987 yılından itibaren İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Müh. Böl.'de Öğr. Gör. Doç. Dr. olarak çalışmaktadır.