

# YÜKSEK ENTALPİLİ JEOTERMAL SAHALAR İÇİN UYGUN SANTRAL ARAŞTIRMASI

**Ayşe Hilal KIVANÇ ATEŞ**  
**Umran SERPEN**

## ÖZET

Jeotermal santrallerin kurulumu 1900'lü yılların başında atmosferik buhar türbini kullanımı ile başlamış, sonrasında kaynak özelliklerine göre çeşitli prosesler ile gelişimine devam etmiştir. Geçen asrın sonuna doğru yaygın olarak kullanılmaya başlanan binary santraller, özellikle orta entalpili jeotermal kaynaklardan elektrik üretmek için kullanılan santral modelleridir.

Bir jeotermal kaynak elektrik üretimi için kullanılacaksa, tasarlanacak santral modeli sadece sıcaklığına değil, kaynağın jeolojik, jeokimyasal, jeofizik özelliklerine de bağlı olarak değişmektedir. Dünyada ve ülkemizdeki jeotermal suların çoğunda çözünmüş halde silika ve kalsit bulunmaktadır. Bu mineraller, gerek kaynaktan üretim sırasında gerekse tekrar basma işlemi sırasındaki basınç, pH ve sıcaklık değişimine bağlı olarak, çözüldüden ayrılarak çökeltme meydana getirmektedirler. Santral işletmesinde çökeltme problemi ile karşılaşmamak için uygun işletme şartlarının belirlenmesi oldukça önemlidir.

Hazırlanan bu çalışmada ülkemizdeki bir jeotermal kaynağın jeokimyasal özellikleri ve bu kaynak için tasarlanacak santral modelinde dikkate alınacak, geri basma ve işletme şartlarının kimyası ele alınacaktır. Aynı zamanda, tasarlanan "double flash ve binary" çevrimlerinin birleşimi ile oluşturulan "kombine santral" ile elde edilen sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılacak, tartışılacak ve sunulacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Silika çökeltmesi, Binary çevrim, Kombine çevrim, santral optimizasyonu.

## ABSTRACT

The installation of geothermal power plants begun with using atmospheric steam turbines in the early 1900s and was followed by the development of various processes according to the source properties and technology of those days. Binary power plants that are used to generate electricity especially for medium enthalpy geothermal sources, started to be used widely in the 1990's.

A geothermal power plant model designed to be used for power generation depends on the variations of not only the temperature, but also, geological, geochemical, and physical features of resources. Most of the geothermal waters in the world and in our country include dissolved silica and calcite. These minerals precipitate from the solution depending on the changes of temperature and pressure during production and re-injection processes. Determining the appropriate operating conditions is very important to avoid the problem of precipitation during the operation of power plants.

In this study, we will explain that geochemical characteristics for one of the geothermal resource in our country. Then, chemical conditions for operation and re-injection processes will be discussed. Furthermore, results obtained from the studies on "combined power plants" that are created by a combination of "double flash, and binary" cycles will be compared and discussed with the ones obtained in previous studies.

**Key Words:** Silica Precipitation, Binary cycle, Combined cycle, Power Plant Optimization

## 1. GİRİŞ

Jeotermal kaynaklardan elektrik üretimi Dünya’da 1900’lü yıllarında başında İtalya’da başlamış, son 15 yıl içinde gelişen güç çevrimi teknolojileri ile birçok ülke ile birlikte Türkiye’de de gelişimine devam etmiştir.

Özellikle, geliştirilen ikili güç çevrimi sistemleri (binary santraller) ve kombine sistemler (buhar+binary sistem) orta entalpili birçok sahanın elektrik üretimi amacı ile kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Jeotermal kaynaklardan elektrik üretimini etkileyen birçok faktör olmakla birlikte, bunlardan bazıları, sahanın jeolojik ve fiziksel yapısı, üretilen akışkanın sıcaklığı ile jeokimyasal yapısı şeklinde sayılabilir. Genel olarak akışkan karakteristiklerine en uygun güç çevrimi, santralin sadeliğini ve yüksek güvenilirliğini korurken, maksimum üretimi sağlamalıdır [1]. Bu sebeple, jeotermal güç çevrimi tasarımlarında öncelikli olarak çalışılan sahanın ve üretilen akışkanın karakteristik özellikleri, sonrasında ise uygulanabilir işletme şartlarının belirlenmesi önem taşımaktadır. Aynı zamanda rezervuarın sürdürülebilirliğini ve çevreye olan zararlı etkilerin önlenmesini sağlayacak geri basma şartlarının uygulanması da oldukça önemli bir parametredir.

Jeotermal akışkanlar çözünmüş mineraller ve yoğunlaşmayan gazlar içermektedir. Rezervuar içinde jeotermal akışkan ile termodinamik açıdan denge halinde olan bu mineraller, üretim sırasında mevcut rezervuar koşulları değiştiği için denge hali bozularak bazıları çökeltme eğilimine girerler [2]. Jeotermal sahalarda en fazla çökelen mineraller kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ve silikadır ( $\text{SiO}_2$ ). Jeotermal enerji üretim sistemlerinde yaşanabilecek mineral çökeltmesi, hem kuyu içi hem de yüzey ekipmanlarında akışı engelleyici daralmalar meydana gelmesine sebep olur. Aynı zamanda geri basma kuyularında tıkanmalara, kabuklaşma dolayısı ile ısı değiştiricilerinin ve buhar içindeki çökteller ile türbin kanatlarında birikerek enerji üretim verimini düşmesine sebep olmaktadır [2].

Hazırlanan bu çalışmada, Türkiye’deki yüksek entalpili bir jeotermal kaynak için uygun santral modelleri, kaynağın jeokimyasal yapısı ile ele alınarak elde edilecek elektrik güçlerinin karşılaştırılması yapılacaktır. Geliştirilen iki yeni kombine güç çevrimi modeli ile aynı kaynak için daha önce tasarlanmış olan buhar çevrimi ve ikili tip güç çevrimi sonuçları karşılaştırılarak en uygun işletme şartlarının belirlenmesine yönelik öneriler sunulacaktır.

## 2. JEOTERMAL GÜÇ ÇEVİRİMİ TASARIMLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Bir jeotermal kaynak için tasarlanacak santral modeli öncelikle kaynağın karakteristik yapısına göre ele alınmalıdır. Ülkemizdeki jeotermal akışkanların çoğu orta entalpili, yüksek çözünmüş katı miktarı ile sodalı (bikarbonat) sular şeklinde tanımlanmaktadır. Ayrıca, akışkan ağırlıkça %1,5 ile % 2,5 arasında değişen yoğunlaşmayan gazlar (NCG) içermektedirler [1]. Bu gazların yoğunluğu da  $\text{CO}_2$ ’dir. Özellikle jeotermal kaynak için tasarlanacak buhar güç sistemlerinde (flash/ double flash) buhar içinde bulunan  $\text{CO}_2$  gazını tamamen ayırmak için ilave sistemler kullanılması gerekmektedir. Jeotermal akışkan içindeki yoğunlaşmayan gazları ayırtmak için genellikle jet ejektör, vakum pompası, kompresör, hibrit ve reboiler sistemleri kullanılmaktadır [4]. Türbinden elde edilecek gücü doğrudan etkilediği için NCG’nin tamamını sistemden uzaklaştırmak oldukça önemlidir. İkili çevrimlerde (binary/ ORC) buhar içinde çözünmüş halde bulunan  $\text{CO}_2$  sistem içinde, atmosfer basıncından daha yüksek basınç değerlerinde tutulduğu için de, her hangi bir noktada birikme, kabuklaşma meydana getirmeyecektir [1]. Kombine tip güç çevrimlerinde ise, buhar çevriminde türbin çıkışındaki çürük buhar içindeki  $\text{CO}_2$  gazı ikili çevrime aktarıldığında ısı değiştiricilerde ısı takası yapıldıktan sonra serbest gaz olarak atmosfere verilecek ve kalan akışkan da geri basma kuyusuna gönderilecektir [5].

Jeotermal akışkanların jeokimyasal özellikleri ise bir başka önemli tasarım faktörü olarak değerlendirilmelidir. Jeotermal sular içinde yüksek miktarda bulunan kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ve silika ( $\text{SiO}_2$ ) mineralleri, rezervuardan kuyuya doğru akış sırasında ve yüzey ekipmanlarında çökme şartları meydana geldiğinde önemli sorunlar yaşanabilmektedir. Devam eden bölümde detaylı olarak açıklanacak olan silika çökmesinin yaşanmamasını sağlayacak uygun işletme şartlarının santral tasarımlarında dikkate alınması gerekmektedir.

Bir diğer faktör ise sahanın bulunduğu bölgeye ait hava şartlarıdır. Özellikle ikili tip santrallerde (binary/ ORC) yeterli miktarda soğutma suyu bulunmadığı için, yoğunlaştırıcı soğutma akışkanı olarak dış hava kullanılmaktadır [6]. Bu yüzden hava sıcaklığı, atmosfer basıncı ve bağıl nem gibi meteorolojik veriler de santral performansını etkileyen bir diğer faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında tasarlanan tüm santral modellerinde hava sıcaklığı, atmosfer basıncı ve bağıl nem miktarı sahanın bulunduğu bölgeye ait aylık ortalama meteorolojik değerler şeklinde kullanılmıştır.

Güç çevrimi tasarımlarında bir diğer etken ise kullanılan yüzey ekipmanlarının verimlilik değerleridir. Özellikle türbin ve jeneratör verimlilikleri, yoğunlaştırıcılarda kullanılan fan ve pompaların verimlilikleri santralden elde edilecek toplam net iş üzerinde doğrudan etkindir. Günümüzün gelişen santral teknolojilerinde özellikle binary çevrimlerde kullanılan organik türbin verimlilik değerleri %86- %87 değerlerine kadar çıkabilmektedir. Aynı zamanda yoğunlaştırıcı ve soğutma sistemi ekipmanlarından fan ve pompa verimlilik değerleri de, net iş üzerinde daha az parazitik yük oluşumunu sağlayacak şekilde %80 değerlerine kadar çıkabilmektedir.

### 3. JEOTERMAL SULARIN JEOKİMYASI VE GÜÇ ÇEVİMLERİNE ETKİSİ

Jeotermal sular içinde bulunan minerallerin doymuşlukları sıcaklık, tuzluluk ve ortamın pH değişimine bağlı olarak değişmektedir. Jeotermal sularda yüksek oranda bulunan silika, rezervuar şartlarında kuvars formunda su içinde dengededir. Yüzeyde ise amorf silika formunda denge şartları kontrol altında tutulmaktadır [7]. Jeotermal akışkanın kuyudan yükselip atmosfere kadar ulaşması sırasında hem buharın ayrılması, hem de soğuma sonucunda kuvars çözünürlüğü azalır. Böylece rezervuar şartlarında silika aşırı doymuş hale gelecektir. Bu aşırı doymuşluk amorf silika çözünürlüğünün altına düşünce çökme başlar [2]. Tuzluluğun yüksek olduğu jeotermal sularda amorf silikanın çökmesi artar ve yüzeylerde daha fazla tutunarak sert bir çökelti oluşturur [2]. Aynı zamanda, pH değeri 7'nin üzerinde olduğunda silika çökmesi daha hızlı oluşabilecektir [7].

Özellikle tekli ve ikili buhar güç çevrimlerinde (flash, double flash ) yaşanan silika çökmesi problemini önlemek için tasarımda uygun işletme şartlarının dikkate alınması gerekmektedir. Aynı zamanda atık jeotermal suların geri basma işlemine rezervuar sıcaklığına, akışkan bileşimine ve tekrar basılma yeri koşullarına bağlı olarak değerlendirilip silika çökmesi engellenebilir [2].

Hazırlanan bu çalışmada ele alınan jeotermal kaynak için tasarlanan modellerin hepsi için geri basma sıcaklığı  $80^{\circ}\text{C}$  seçilmiştir. Ele alınan yüksek entalpili jeotermal kaynak için seçilen bu geri basma sıcaklığı mevcut durumda gerçekleştirilen işletme şartlarına göre silika çökmesinin oluşmadığı uygun şartları sağlamaktadır. Tasarım sırasında ele alınan akışkan jeokimyası, santralin işletilmesi ve performans testleri sırasında da sürekli takip edilmesi gereken önemli bir parametredir. Santralin performansını artırma amacı ile işletme sırasında değiştirilen bazı parametreler, özellikle akışkan basıncı ve debileri gibi kontrol edilebilir parametreler üzerinde değişiklik yapılması santral performansını etkileyecektir [6]. Aynı zamanda değişen işletme şartlarına göre, akışkanın mineral doymuşlukları, hangi yüzey ekipmanında çökme meydana getirebileceğine dair testlerin de tekrarlanması gerekmektedir. Santralin herhangi bir zamandaki performansının, performans testi ile belirlenmiş başlangıç performansı ile karşılaştırılması, sistem bileşenlerinin performans etkilerini takip etmek ve gerekli tedbirlerin alınmasında önemlidir [6].

#### 4. TÜRKİYE'DEKİ YÜKSEK ENTALPİLİ BİR KAYNAK İÇİN TASARLANAN MODELLER

Hazırlanan bu çalışmada ele alınan jeotermal kaynak, yüksek entalpili, sıvı yoğun, buharında ağırlıkça % 15 gibi yüksek oranda yoğuşmayan gaz bulunan bir kaynaktır. Uzun yıllardan beri işletilen ve tek flash güç sistemine göre tasarlanmış bir santral modeline sahiptir.

Ele alınan jeotermal kaynağın geçmiş üretimlerinde  $\text{CaCO}_3$  ile birlikte çok az miktarda silikanın koruma borularında çökeldiği tespit edilmiştir. Ancak geri basma işlemi sırasında silika çökmesi daha önemli hale gelerek konu ile ilgili çeşitli testler ve modeller geliştirilmiştir [2]. Mineral çökmesi ile ilgili kaynak için yapılan geçmiş yıllara ait testlere göre, rezervuarda 290-310 mg/l derişiminde kuvars olarak bulunan silika, separatör ve savakta buhar ve gaz kaybına uğradığı için derişimi 345-398 mg/l kadar çıkmıştır [2]. Polimerleşme separatörden sonra 145 °C'de başlayıp kaynama sıcaklığına düşünce amorf silika formuna dönüşmektedir. Amorf silikanın aşırı doymuş hale geleceği noktada çökme başlayacaktır [2]. Aşırı doymuş suyun sıcaklığının daha da düşmesi ile silika içeriği rezervuardaki seviyesine düştüğünden tekrar basma sırasında sorun yaşanmayabilir. Ama bu aşamada geri basma işleminden önce suyun çökme havuzlarında dinlendirilip çökmesi sağlanmalıdır [2].

Jeotermal kaynak için geçmiş yıllarda yapılan testler ve geri basma modellemeleri sonuçları bu çalışma kapsamında tasarlanan modellerde dikkate alınmıştır. Ancak, ele alınan kaynak uzun yıllar işletildiği ve bazı rezervuar koşulları değiştiği için suyun jeokimyasal yapısının da değişmiş olabileceği, bu yüzden yeni örneklerle testlerin tekrar değerlendirilmesi gerektiği bilinmektedir. Bu sebeple, hazırlanan bu çalışmada, mevcut durumda gerçekleştirilen geri basma sıcaklık değerlerine yakın sıcaklıklar seçilerek hesaplamalar yapılmış ve sonuçları tartışılmıştır.

Daha önce aynı kaynak için tasarlanmış santral modellerinde kullanılan bazı değerler bu çalışmadaki modeller için de aynı kabul edilmiştir. Örneğin, santralin kurulu olduğu bölgeye ait meteorolojik şartlar, jeotermal kaynağa ait sıcaklık, kuyubaşı basınç, entalpi ve üretim debileri tüm modellerde aynı kabul edilmiştir. Devam eden modellerin hepsi 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 <sub>2</sub>
Bölgenin atmosfer basıncı	bar	0.959
Bölgenin aylık ortalama hava sıcaklığı	°C	16
Bölgenin aylık ortalama bağıl nem miktarı	%	61
Soğutma kulesinden çıkan hava nemliliği (bağıl)	%	90

Ele alınan jeotermal kaynaktan çift fazlı üretim yapıldığından her modelde Webre tipi siklon seperatör kullanımı tasarlanmıştır. Aynı zamanda, flash çevrimlerinde, buhar içinde yer alan yüksek oranda NCG olan CO<sub>2</sub> türbin öncesi sistemden tamamen uzaklaştırmak için jet ejektör kullanılmıştır [5].

Modellerde yer alan türbin jeneratör sistemlerinin analizinde, türbinin genleşme prosesinin sürekli, adiyabatik şartlarda gerçekleştiği, aynı zamanda potansiyel ve kinetik enerji kayıplarının olmadığı kabul edilmiştir. Türbinden elde edilebilecek maksimum iş değeri, izantropik ve adiyabatik genleşme ile, diğer bir deyişle, tersinir süreçte oluşacaktır [5].

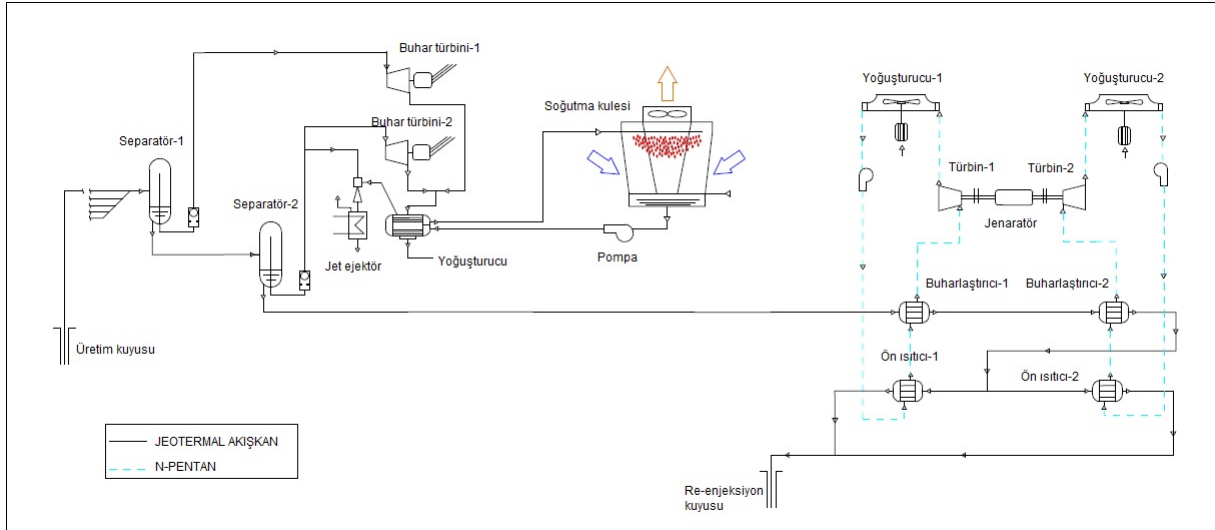
Flash ve binary sistemlerde kullanılan yoğuşturucu ve soğutma sistemlerinin analizi de, sistemden elde edilecek toplam iş üzerinde oldukça önemli bir parametredir. Flash sistemlerde tasarlanan buhar

türbinlerinden daha fazla güç elde edebilmek amacıyla türbin çıkışları doğrudan yoğuşturucu ve soğutma kulesi sistemine bağlanmıştır. Böylelikle, türbin çıkışlarında vakum basınçları oluşturulabilecek ve yüksek iş değerleri elde edilebilecektir [5]. Kondanser basıncı optimizasyonunda bir diğer parametre, buhar içindeki CO<sub>2</sub> tamamını sistemden uzaklaştırabilecek jet ejektör basıncının da sağlanabilmesidir. Yapılan literatür araştırmasına göre bu tip sistemler için kullanılan optimum kondanser sıcaklık değeri aralığı olan 46<sup>0</sup>C- 50<sup>0</sup>C sıcaklıkları sağlayan basınç değerleri 100 mbar- 140 mbar olarak seçilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tasarlanan binary sistemlerdeki ısı değıştircilerin analizinde jeotermal akışkan ile kullanılan ikincil akışkan arasında yaşanan kütle ve enerji dengesinin sabit, ısı değıştircilerin tamamen yalıtılmış olduğu, kinetik ve potansiyel enerji kayıplarının olmadığı kabul edilmiştir. Isı takasının tamamı, jeotermal akışkan ile ikincil akışkan olarak seçilen n-pentan arasında gerçekleşmektedir [5].

#### 4.1. Kombine Model-1

Bu çalışmada ele alınan yüksek entalpili jeotermal kaynak için tasarlanan kombine modellerden ilki double flash ve binary çevrimlerden oluşan kombine çevrim modelidir. Şekil 1’de uygulanan modelin yüzey tesisleri ve santral akış şeması yer almaktadır.



Şekil 1. Kombine model-1 akış diagramı

Şekil 1’de belirtildiği gibi, üretilen çift fazlı jeotermal akışkan öncelikle double flash buhar çevrimine girmektedir. Separatör-1’de yüksek basınçta sıvı ve buhar faza ayrıştırılır. Separatör-2’de ise daha düşük basınçta tekrar flash edildikten sonra sıvı kısım binary çevrime aktarılır. Buhar çevriminde her iki türbin tek bir yoğuşturucu ve soğutma kulesi sistemine bağlanmıştır. Ayrıca, buhar içindeki CO<sub>2</sub> tamamını uzaklaştırmak için jet ejektör sistemi kullanılmıştır. Yoğuşturucuda oluşturulan vakum basınçları ile hem CO<sub>2</sub> uzaklaştırılması, hem de buhar türbinlerinden en fazla gücün elde edilmesi amaçlanmıştır.

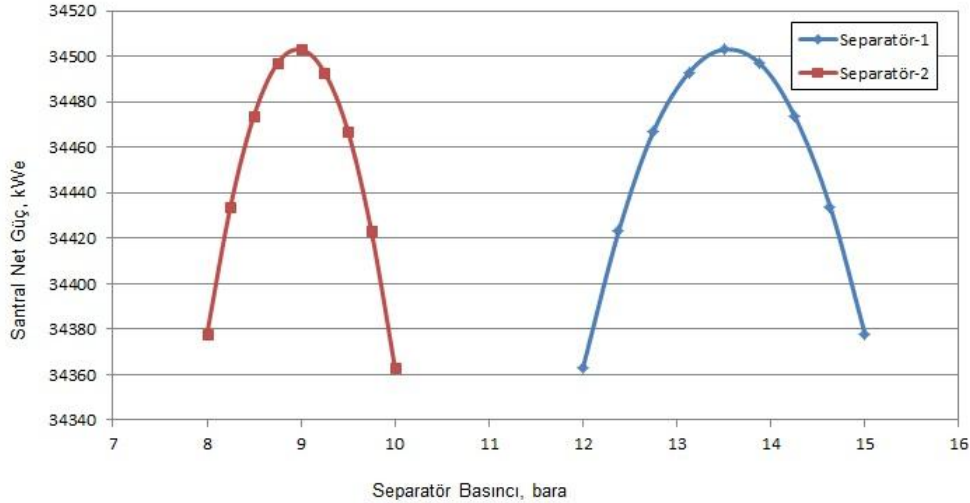
Buhar çevriminden gelen sıvı fazdaki jeotermal akışkan (brine) ikili (binary) çevrimde ısı değıştircilerine girerek sahip olduğu enerjiyi seçilen ikincil akışkana aktarır. Bu çalışmada ikincil akışkan olarak n-pentan kullanılmıştır. Gerçekleşen ısı takası n-pentanın buhar fazına geçişine kadar devam etmektedir [5]. Doymuş buhar fazındaki n-pentan organik türbine girerek genleşir ve türbinde iş üretilmesi sağlanır. Türbinden çıkan n-pentani yoğuşturmak için hava soğutmalı kondanser kullanılmaktadır. Kondanserden çıkan sıvı n-pentani pompa ile sıkıştırılıp basınçlandırılır ve ön ısıtıcıya gönderilerek, kapalı çevrimin tamamlanması sağlanmaktadır. Her iki buharlaştırıcıdan çıkan akışkanın tamamı tek hat üzerinde toplanarak re-enjeksiyon kuyusuna geri basılmaktadır. Şekil 1’de gösterildiği şekilde tasarlanan modelde, iki seviyeli binary sistem kullanılmıştır. Buhar çevriminden gelen akışkan

sahip olduğu enerjinin bir kısmını ilk seviye binary çevrimde ikincil akışkana aktarır. Sonrasında, aynı orandaki kalan enerjisini de ikinci seviye çevrimde aynı ikincil akışkana aktardıktan sonra, geri basma kuyusundan rezervuara tekrar basılmaktadır. Her iki seviyedeki organik türbinler aynı shaft üzerinden tek bir jeneratöre bağlanmıştır [5].

Hazırlanan bu modele göre, optimum çalışma şartlarının tayini ve en yüksek güç değerini elde edebilmek için, yüzey ekipmanları üzerinde optimizasyonlar yapılmıştır. Bu noktada ele alınabilecek ve santralden elde edilebilecek net güç değerini doğrudan etkileyen parametrelerden ilki kullanılan separatörlerin çalışma basınçlarıdır.

Kombine model-1'de kullanılan iki separatör için belirli çalışma basıncı değerleri seçilerek santralden elde edilen net güçler karşılaştırılmıştır. Separatör-1 için 15 bara- 12 bara değer aralığı; separatör-2 için ise 10 bara- 8 bara çalışma basıncı aralıkları seçilerek elde edilen sonuçlar Şekil-2'de gösterilmektedir.

Şekil-2'de görüldüğü gibi, birinci separatör basıncının 13,5 bara, ikinci separatör basıncının da 9 bara olarak seçilmesiyle elde edilen net santral gücü 34,5 MWe olarak hesaplanmıştır. Artan separatör basınçları ile elde edilecek net santral gücünde azalma olacağı ve maksimum net gücün elde edilmesini sağlayan separatör basınçlarının kombine model-1 için optimum değerler olacağı tespit edilmiştir.



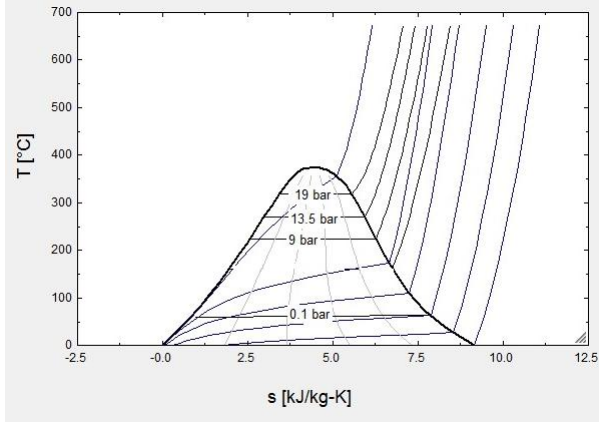
Şekil 2. Separatör basıncı optimizasyonu

Separatör basınçlarının optimum çalışma şartlarının tayini yapıldıktan sonra buhar türbin çıkışları ve yoğuşturucu çalışma basınçlarının optimize edilmesi gerekmektedir.

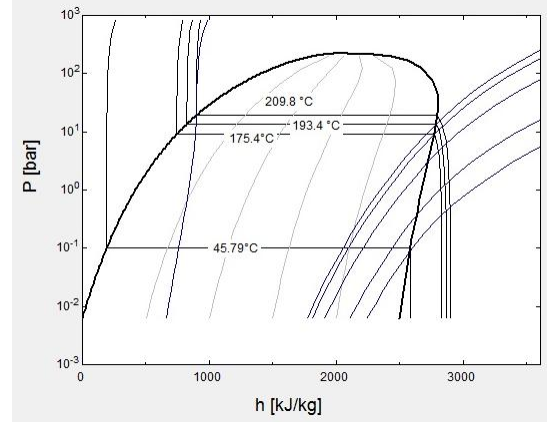
Kombine model-1'de kullanılan buhar türbinleri bağlı olduğu kondenser basınçlarına göre iş üretebilmektedir. Bu yüzden, kondenser çalışma basıncı türbin çıkışları için vakum basınçlarını sağlamalı, aynı zamanda ise buhar içindeki CO<sub>2</sub>'in tamamını uzaklaştırabilecek jet ejektör sistemini sorunsuz çalışabilmesini sağlamalıdır. Hazırlanan bu çalışmada yoğuşturucu basıncı 100 mbar seçilmiştir. Buna göre kombine model-1'in double flash bölümünden elde edilen net güç 16,37 MWe olarak hesaplanmıştır.

Tasarlanan modelin binary kısmında ise, organik türbinlerin çıkış basıncı n-pentan için yoğuşma noktası basıncı olarak seçilecektir [5]. Sistemdeki her iki organik türbinin bağlı olduğu hava soğutmalı kondansörlerden çıkış sıcaklıkları n-pentanın tamamının yoğuşmasını sağlayacak sıcaklık değeri olan 37 °C alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre, n-pentanın tamamının yoğuşmasını sağlayacak türbin çıkış basınç değerlerinin her iki organik türbin için 1,05 bara olacağı hesaplanmıştır. Buna göre, modelin iki seviyeli binary bölümünden elde edilecek net güç değeri 18,13 MWe olmaktadır.

Optimize edilen model sonuçlarına göre santralden elde edilebilecek maksimum net güç 34,5 MWe; santral verimliliği ise % 13 olarak hesaplanmıştır. Şekil-3 ve Şekil-4'de sırası ile kombine modelin buhar çevrimi bölümüne ait sıcaklık-entropi (T-s) ve basınç-entalpi (P-h) diagramları görülmektedir.

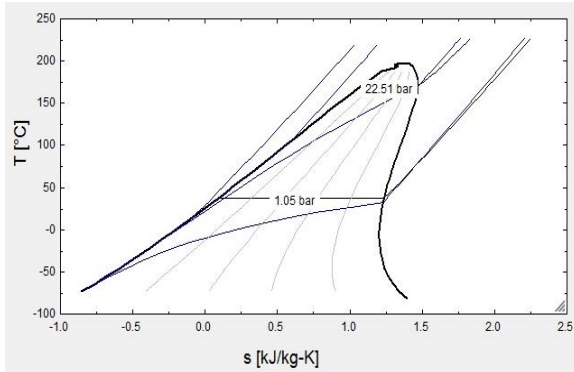


Şekil 3. Buhar sistemi T-s diagramı

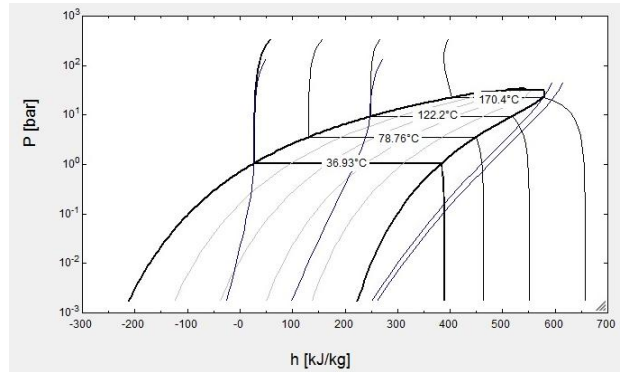


Şekil 4. Buhar sistemi P-h diagramı

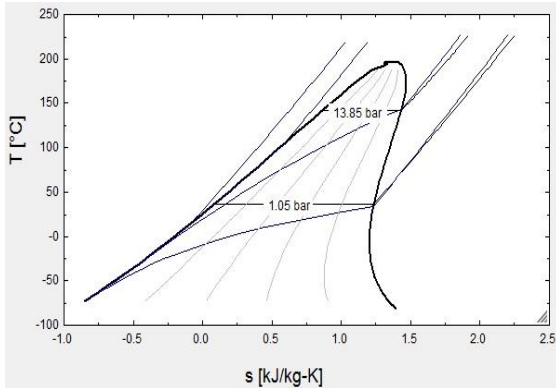
Modelin binary kısmına ait termodinamik çevrim diagramları ise her iki seviyedeki ikincil akışkan için hazırlanmıştır. Şekil-5 ve Şekil-6 sırası ile ilk seviye binary çevrime ait n-pentan için sıcaklık-entropi (T-s) ve basınç-entalpi (P-h) değişimini göstermektedir. Benzer şekilde, ikinci seviye binary çevrime ait n-pentan için sıcaklık-entropi (T-s) ve basınç-entalpi (P-h) değişimi, Şekil-7 ve Şekil-8'de sırası ile belirtilmiştir.



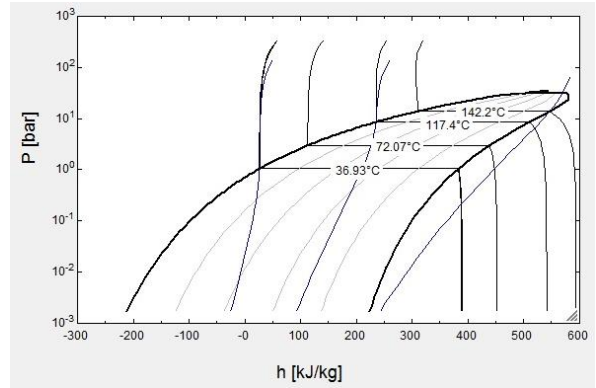
Şekil 5. Birinci seviye n-pentan T-s diagramı



Şekil 6. Birinci seviye n-pentan P-h diagramı



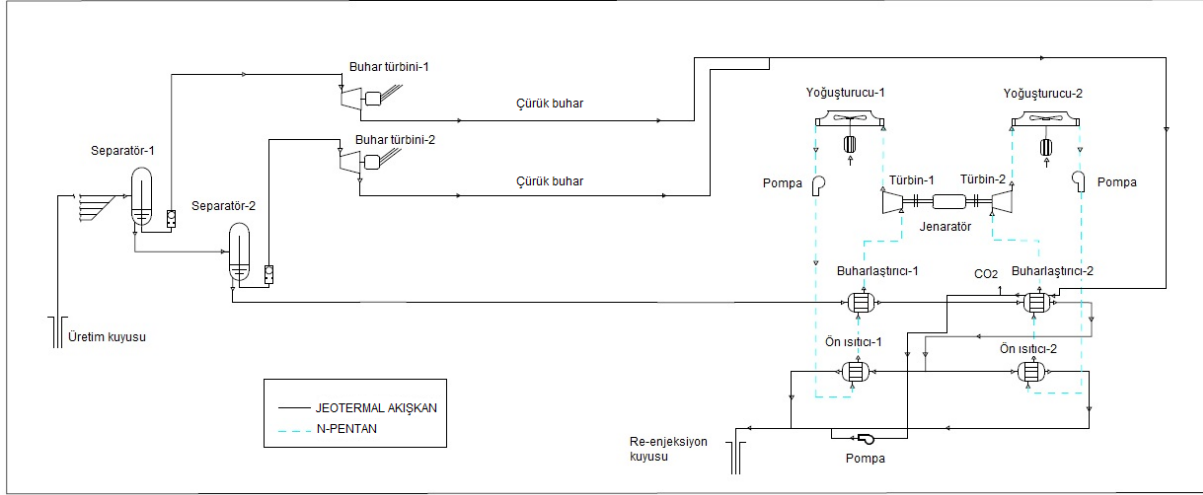
Şekil 7. İkinci seviye n-pentan T-s diagramı



Şekil 8. İkinci seviye n-pentan P-h diagramı

#### 4.2. Kombine Model-2

Bu çalışmada ele alınan yüksek entalpili jeotermal kaynak için tasarlanan kombine modellerden ikincisi de double flash ve binary çevrimlerden oluşan kombine çevrim modelidir. Ancak ilk modelden farklı olarak buhar çevrimi kısmında yer alan türbinler atmosferik türbin seçilmiştir ve türbin çıkışındaki çürük buhar doğrudan binary sisteme iletilmektedir. Şekil 9'da uygulanan modelin yüzey tesisleri ve santral akış şeması yer almaktadır.



**Şekil 9.** Kombine model-2 akış diagramı

Tasarlanan bu modelde, Şekil-9'da görüldüğü gibi buhar çevrimi bölümündeki parazitik yükleri azaltma ve binary çevrimden daha fazla güç elde etmek amacı ile buhar türbinleri atmosferik türbin seçilmiştir. Ayrıca, türbin çıkışlarındaki çürük buhar tek bir hat ile birleşerek binary çevrimin ikinci buharlaştırıcısına gönderilmektedir. Bu şekildeki tasarımın bir diğer avantajı ise, buhar içindeki CO<sub>2</sub> uzaklaştırmak için ekstra bir sistem kullanılmasına gerek olmamasıdır. Atmosferik türbinlerden çıkan çürük buhar ve çözülmüş haldeki CO<sub>2</sub>, Buharlaştırıcı-2'de ısısını n-pentana aktardıktan sonra tamamı serbest gaz olarak sistemden ayrışır ve açığa çıkan sıvı re-enjeksiyon sistemine iletilmektedir [5].

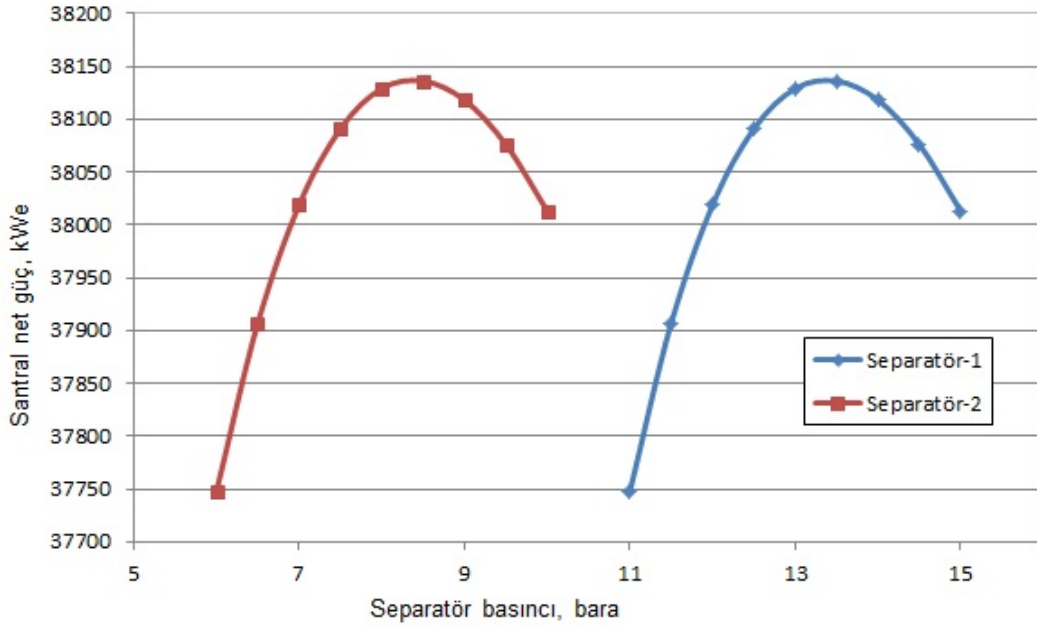
Hazırlanan bu modele ait optimum separator basınçlarını belirlemek için bir önceki modele benzer şekilde seçilen basınç aralıklarında elde edilen santral net güçleri karşılaştırılmıştır.

Modelde kuyubaşı basıncı 19 bara olduğu için yüksek basınçlı separator için 15 bara ile 11 bara değer aralığında, düşük basınçlı separator için ise 10 bara ile 6 bara değer aralıkları seçilmiş ve her 0.5 bara'lık basınç azalımı için model simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Değişen separator basınçlarına göre santralden elde edilen net güçlerdeki değişim Şekil-10'da belirtilmiştir. Buna göre, net gücü maksimum yapan separator basınçları optimum separator çalışma basıncı olarak tayin edilmiştir. Bu değerler yüksek ve düşük basınçlı separatorlar için sırası ile 13,5 bara ve 8,5 bara olarak hesaplanmıştır.

Modelde kullanılan buhar türbinleri atmosferik türbin olduğundan, çıkış basınçları doğrudan atmosfer basıncı olarak alınmıştır. Buna göre, santralin buhar çevrimi bölümünden elde edilen net güç değeri 10,64 MWe olmaktadır.

Modelin binary kısmında yer alan organik türbinlerin çıkış basıncı bir önceki modele benzer şekilde n-pentanin yoğuşma sıcaklığını sağlayacak basınç değeri olan 1,05 bara değeri seçilmiştir. Buna göre santralin binary kısmından elde edilen net güç değeri de 27,49 MWe olmaktadır.

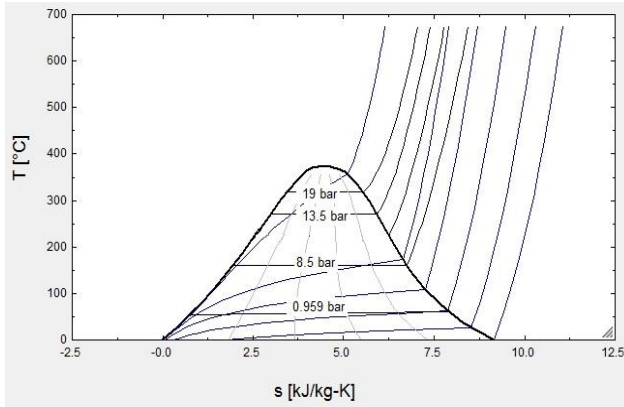




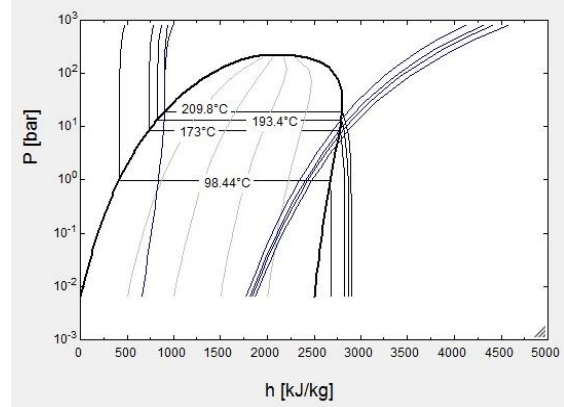
Şekil 10. Separatör basıncı optimizasyonu

Optimize edilen model sonuçlarına göre santralden elde edilebilecek maksimum net güç 38,13 MWe; santral verimliliği ise % 14 olarak hesaplanmıştır.

Şekil-11 ve Şekil-12'de sırası ile kombine modelin buhar çevrimi bölümüne ait sıcaklık-entropi (T-s) ve basınç-entalpi (P-h) diagramları görülmektedir.

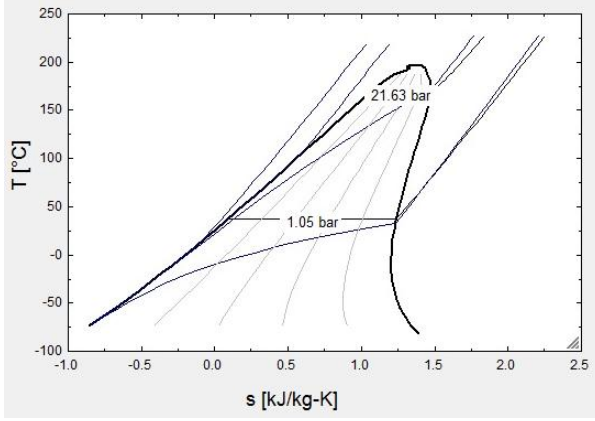


Şekil 11. Buhar sistemi T-s diagramı

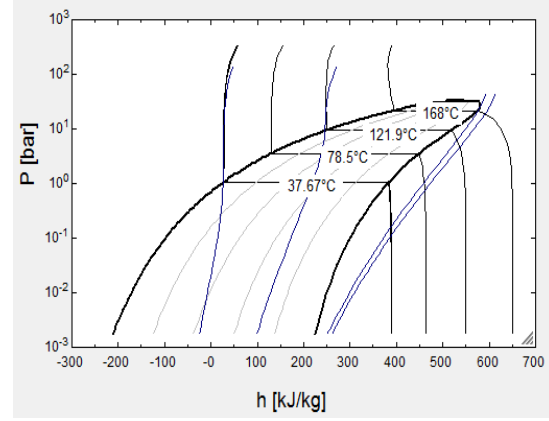


Şekil 12. Buhar sistemi P-h diagramı

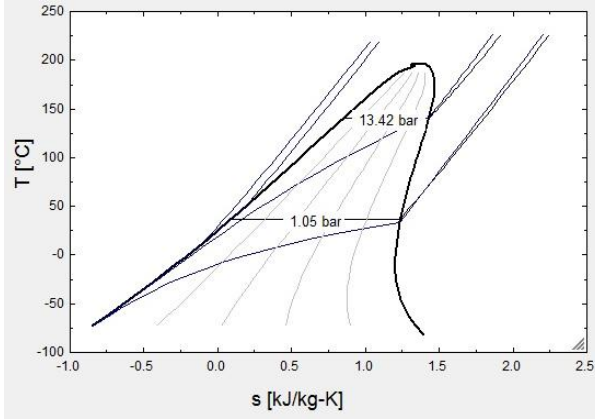
Modelin binary kısmına ait termodinamik çevrim diagramları ise her iki seviyedeki ikincil akışkan için hazırlanmıştır. Şekil-13 ve Şekil-14 sırası ile ilk seviye binary çevrime ait n-pentan için sıcaklık-entropi (T-s) ve basınç-entalpi (P-h) değişimini göstermektedir. Benzer şekilde, ikinci seviye binary çevrime ait n-pentan için sıcaklık-entropi (T-s) ve basınç-entalpi (P-h) değişimi, Şekil-15 ve Şekil-16'da sırası ile belirtilmiştir.



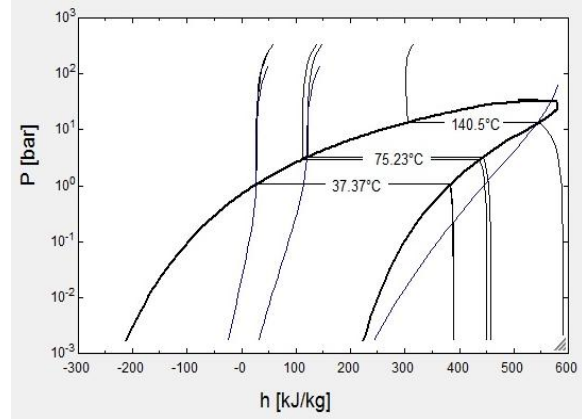
Şekil 13. Birinci seviye n-pentan T-s diagram



Şekil 14. Birinci seviye n-pentan P-h diagram



Şekil 15. İkinci seviye n-pentan T-s diagram



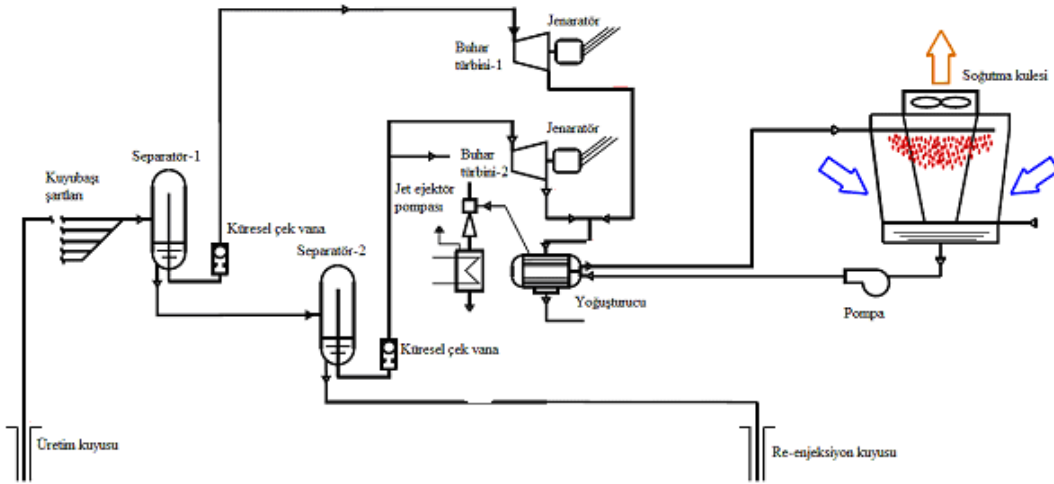
Şekil 16. İkinci seviye n-pentan P-h diagram

## 5. ÇALIŞILAN JEOTERMAL KAYNAK İÇİN DAHA ÖNCE TASARLANAN MODEL SONUÇLARI

Aynı jeotermal kaynak için daha önce tasarlanmış farklı tipte 3 adet santral modeli bulunmaktadır. Bu modeller, double flash, bottoming binary ve tel flash ile binary çevrimlerinden oluşan kombine tip güç çevrimi modelleridir. Ele alınan bu modeller, Tablo-1'de belirtilen sabitler kullanılarak aynı jeotermal kaynak için hesaplanmış ve sonuçları aşağıda belirtilmiştir.

### 5.1. Double Flash modeli

Ele alınan jeotermal kaynak için daha önce yapılmış çalışmalardan ilki double flash güç çevrimi modelidir. Şekil 17'de genel akış diagramı bulunan modelde, üretim kuyusundan gelen çift fazlı akışkan iki kademedeki separator kullanılarak sıvı ve buhar fazlarına ayrıştırılır. Buhar, türbinde genişletilerek iş üretilir, sıvı kısım ise doğrudan geri basma kuyusuna gönderilmektedir.



**Şekil 17.** Çift flaş modeli akış diagramı [5]

Şekil 17'de görüldüğü gibi yeni tasarlanan kombine model-1'e benzer şekilde her iki türbin tek bir yoğuşturucu ve soğutma kulesi sistemine bağlıdır. Aynı zamanda CO<sub>2</sub> uzaklaştırma için jet ejektör kullanılmaktadır.

Tablo-1'de belirtilen sabitler kullanılarak yapılan model simülasyonuna göre, separator-1 için optimum çalışma basıncı 6 bara, separator-2 için optimum çalışma basıncı 1 bara olarak hesaplanmıştır. İkinci separator'den çıkan yaklaşık 100 °C'deki sıvı doğrudan re-enjeksiyon kuyusuna gönderilmektedir.

Kondanser basıncı 100 mbar için santral modelinden elde edilen net güç değeri 25,7 MWe, santral verimliliği ise %9 olarak hesaplanmıştır.

## 5.2. Bottoming Binary modeli

Ele alınan jeotermal kaynak için daha önce yapılmış çalışmalardan bir diğeri bottoming binary tip güç çevrimi modelidir. Şekil 18'de akış diagramı görünen modele göre, iki fazlı akışkan tek flash sisteminde buhar ve sıvı kısma ayrıştırıldıktan sonra, buhar türbinde genişletilerek iş üretilir, sıvı kısım ise çevrimin binary kısmına iletilerek enerjisi ikincil akışkana aktarılarak daha fazla enerji elde edilmesi sağlanmaktadır. Bu modelde ikincil akışkan olarak n-pentan kullanılmıştır ve binary bölümde iki seviyeli organik rankin çevrimi bulunmaktadır.

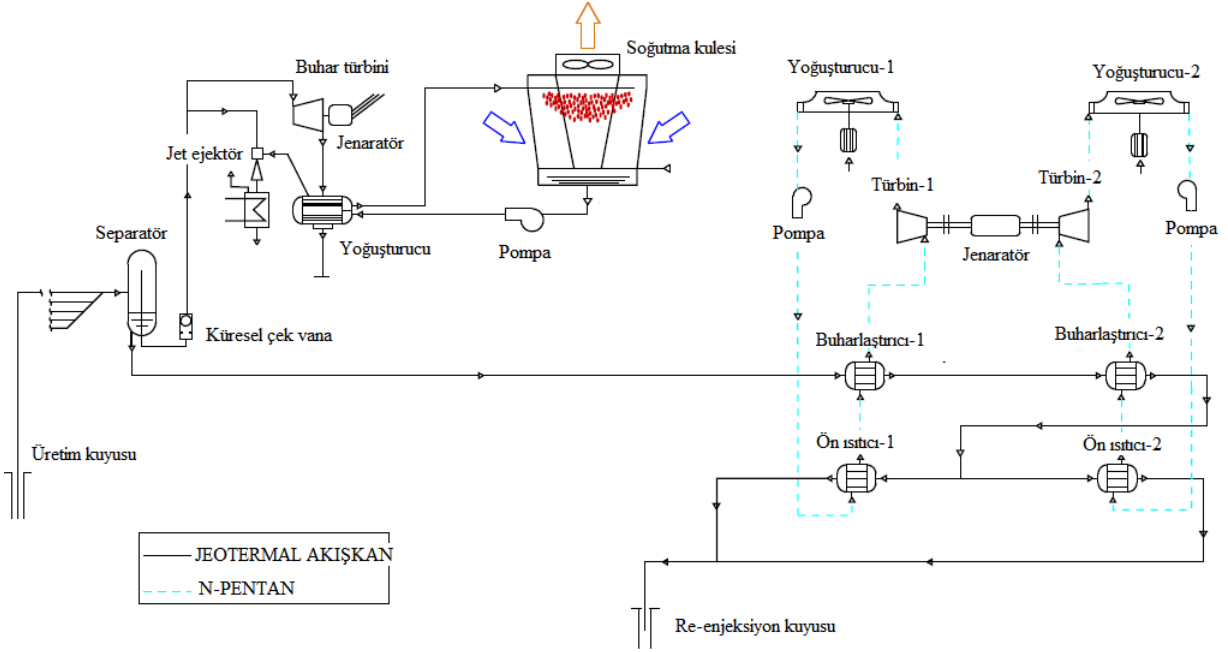
Tablo-1'deki sabitler kullanılarak yapılan model simülasyonuna göre separator için optimum çalışma basıncı 13 bara olarak hesaplanmıştır.

Aynı zamanda organik türbinler için çalışma basıncı n-pentanın yoğuşma basıncı olan 1.05 bara, buhar kısmındaki kondanser çalışma basıncı da 100 mbar alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda modelden elde edilen net güç değeri 34,2 MWe, santral verimliliği ise % 12 olmaktadır.

## 5.3. Tek Flash Kombine model

Ele alınan jeotermal kaynak için daha önce yapılmış santral modellerinden biri de tek flash kombine model güç çevrimidir. Şekil 19'da akış diagramı görünen modele göre, yeni tasarlanan kombine model-2'e benzer şekilde buhar çevrimi kısmında kondanser ve soğutma kulesi kullanılmadan türbin çıkışı çürük buhar binary çevrimin ikinci seviye buharlaştırıcısına iletilmektedir. Böylece ele alınan bir önceki modele göre daha fazla güç elde edilmesi amaçlanmıştır [5].

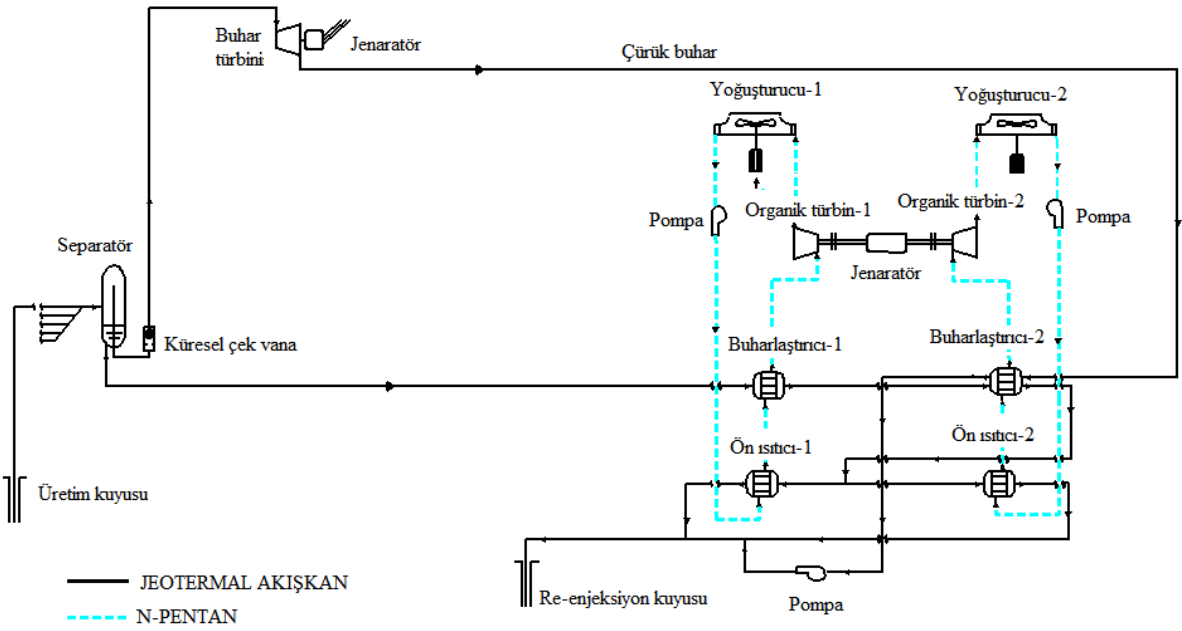
Tablo-1'deki sabit değerler kullanılarak yapılan hesaplamalarda, separatör basıncı 15 bara ile 5,5 bara



**Şekil 18.** Bottoming Binary tip çevrim modeli akış diagramı [5]

basınç aralığında her 0,5 bara'lık değişime göre simülasyon yapılmış ve sonuçlara göre en fazla net santral gücünün elde edilmesini sağlayan 10 bara basınç değeri, optimum separatör basıncı olarak belirlenmiştir.

Aynı zamanda organik türbinler için çalışma basıncı n-pentanin yoğuşma basıncı olan 1.05 bara, alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda modelden elde edilen net güç değeri 37,2 MWe, santral verimliliği ise % 13 olmaktadır.



**Şekil 19.** Tek Flash Kombine tip çevrim modeli akış diagramı [5]

## 6. MODEL SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Hazırlanan bu çalışmada Türkiye’de bulunan yüksek entalpili bir jeotermal kaynak için farklı güç çevrimi modellerinin sonuçlarına göre kabul edilen şartlarda en uygun modelin geliştirilebilmesi amaçlanmıştır.

Buna göre, aynı sabitler kullanılarak iki yeni kombine güç çevrimi modeli oluşturulmuş, ayrıca, daha önceden yapılan üç farklı güç çevrimi modeline göre de değerlendirilmiştir. Elde edilen beş santral modeli sonuçları Tablo 2’de belirtilmiştir.

**Tablo 2.** Santral modeli sonuçları

Güç Çevrim Modeli	Elde Edilen Net Güç, MWe	Verimlilik, %
Double Flash	25.70	9,4
Bottoming Binary	34.20	12,6
Tek Flash Kombine Model	37.20	13,8
Kombine Model-1	34.50	12,8
Kombine Model-2	38.13	14,1

Elde edilen sonuçlara göre Kombine Model-2 olarak adlandırılan ve yeni tasarlanan güç çevrimi modelinin seçilen kaynak için en verimli santral modeli olduğu ve en fazla net güç değerinin elde edildiği görülmektedir. Bunun yanında Double Flash modeli hesaplaması yapılan diğer güç çevrimi modellerine göre en düşük sonuçların elde edildiği model olarak görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında ekonomik analiz yapılmamıştır. Ancak çıkan sonuçları değerlendirirken açıkça görünen birkaç konu üzerinde açıklama yapılabilir. Örneğin, Bottoming Binary ile Kombine Model-1 olarak adlandırılan güç çevrim modellerinin sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Kullanılan santral ekipmanları dikkate alınır, Kombine Model-1 olarak adlandırılan tasarımda, Bottoming Binary tasarımına ilave olarak bir separatör ve buhar türbini sistemi daha eklenerek daha düşük basınç değerlerinde flash edilen akışkandan daha fazla buharın ayrıştırılması amaçlanmıştır. Ancak aradaki 300 kWe güç artışının getirisi, ilave kullanılan ekipman ve bunların işletilmesi sırasında harcanabilecek maliyetleri karşılayabilmesi veya avantaj sağlaması tartışılabilir bir konudur. Benzer şekilde düşünce ile Kombine Model-2 olarak adlandırılan güç çevrim modeli yüzey ekipmanlarının maliyeti kendisine en yakın sonuçlar alınan Tek Flash Kombine Model ekipman ve işletme maliyetlerine göre daha düşük olması beklenebilir.

## 7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Hazırlanan bu çalışmanın amacı, Türkiye’de bulunan yüksek entalpili bir jeotermal kaynak için gelişen güç çevrimi teknolojilerini uygulamak, aynı zamanda, kaynağın karakteristik özellikleri de dikkate alınarak uygun işletme şartlarının belirlenmesidir. Bunun için öncelikle santral tasarımlarını etkileyen faktörler üzerinde açıklamalar yapılmış, sonrasında ise jeotermal suların jeokimyasal özelliklerinin güç çevrimi tasarımları üzerinde nasıl bir etkinlik gösterdiği belirtilmiştir. Devam eden bölümlerde, ele alınan jeotermal kaynak özellikleri açıklanarak tasarlanan iki yeni kombine çevrim modeli detaylandırılmıştır. Sonrasında, aynı kaynak için kabul edilen şartlar sabit kalmak üzere daha önce yapılmış üç ayrı santral modelinden elde edilen sonuçlar açıklanmış ve tüm sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tasarlanan her bir model için işletme koşullarının belirlenmesi adına bir takım simülasyonlar yapılmış ve optimum değerler elde edilmiştir. Buna göre; üretim değerleri ve diğer tüm şartlar sabit kalmak koşuluyla modellerden elde edilen net güç değerleri ve verimlilikler Tablo 2’de görülmektedir. Kombine Model-2 olarak adlandırılan güç çevrim modeli diğerlerine göre, bu tip bir jeotermal

kaynaktan elektrik enerjisi üretiminde en fazla enerjinin elde edilebileceği santral modeli olarak belirlenmiştir.

Genellikle orta ve düşük entalpili jeotermal kaynaklar için kullanılan binary güç çevrimi teknolojisinin yüksek entalpili jeotermal kaynaklar için kullanılmasının, uygun şartlarda optimize edildiğinde oldukça avantajlı sonuçları olduğu görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Batscha, D., “Türkiye’nin Batısındaki Jeotermal Sahalar için Jeotermal Güç Santrallerinin Karşılaştırılması”, Tesisat Mühendisliği, Sayı 126, sayfa 68, Kasım/ Aralık 2011.
- [2] Serpen, U., “Kızıldere Jeotermal Rezervuarının Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi” İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği ABD Doktora tezi, 2000.
- [3] Gökçen, G., Yıldırım Özcan, N., “ Yoğuşmayan Gazların Jeotermal Santral Performansına Etkisi: Kızıldere Jeotermal Santrali”, Jeotermal Enerji Semineri, 8. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Seminer Bildirisi, 2007.
- [4] Yıldırım Özcan, N., “Modelling, Simulation and Optimization of Flashed- Steam Geothermal Power Plants from the Point of View of Noncondensable Gas Removal Systems ”, İzmir İleri teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü Doktora tezi, 2000.
- [5] Kıvanç, A.H., Serpen U., “Jeotermal Santrallerin Karşılaştırılması” Jeotermal Enerji Semineri, 10. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Seminer Bildirisi, 2011.
- [6] Toksoy, M., Serpen, U., Aksoy, N., “Jeotermal Santrallerde Performans Gözlemi” Jeotermal Enerji Semineri, 8. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Seminer Bildirisi, 2007.
- [7] DiPippo, R., “Geothermal Power Plants Principles, Applications and Case Studies”, Elsevier, Dartmouth, Massachusetts, 2005.

## ÖZGEÇMİŞ

### Ayşe Hilal KIVANÇ ATEŞ

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; 2006-2012 yılları arasında Zorlu Enerji Grubu’nda kıdemli proje uzmanı olarak çalışmıştır. Halen NTU Jeotermal Danışmanlık San. Tic. Ltd. Şti’de rezervuar mühendisi olarak 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. 1987-2011 yılları arasında İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Müh. Böl.’de öğretim üyesi olarak çalışmış halen NTU Jeotermal Danışmanlık San. Tic. Ltd. Şti’de çalışmaktadır.