

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**KIZILDERE JEOTERMAL ENERJİ SANTRALİNDE  
UYGULANABİLECEK FARKLI ÇEVİRİM MODELLERİ İLE  
SANTRAL GÜÇLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Ayşe Hilal KIVANÇ**

**Anabilim Dalı : Enerji Bilim ve Teknoloji**

**Programı : Enerji Bilim ve Teknoloji**

**HAZİRAN 2010**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**KIZILDERE JEOTERMAL ENERJİ SANTRALİNDE  
UYGULANABİLECEK FARKLI ÇEVİRİM MODELLERİ İLE  
SANTRAL GÜÇLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Ayşe Hilal KIVANÇ  
(301071005)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2010**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2010**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ümran SERPEN (İTÜ)  
Prof. Dr. Abdurrahman SATMAN (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN (İTÜ)  
Prof. Dr. Filiz BAYTAŞ (İTÜ)  
Yrd. Doç. Dr. Metin MIHÇAKAN (İTÜ)**

**HAZİRAN 2010**



## ÖNSÖZ

Hazırlamış olduğum bu yüksek lisans tezinde, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren değerli danışmanım Doç. Dr. Ümran SERPEN'e çok teşekkür ederim.

Eş danışmanım olarak katkılarından dolayı Prof. Dr. Abdurrahman SATMAN'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca, tezimin hazırlanma süreci boyunca her aşamada yanımda olan, en büyük desteğim Petrol ve Doğal Gaz Mühendisi Salih Melih ATEŞ'e çok teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her aşamasında desteğini yanımda hissettiğim sevgili aileme de çok teşekkür ederim.

Haziran 2010

Ayşe Hilal KIVANÇ

Petrol ve Doğal Gaz Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	v
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY .....	xv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. JEOTERMAL ENERJİ.....</b>	<b>3</b>
2.1 Jeotermal Enerji Tanımı .....	3
2.2 Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanları .....	4
2.3 Türkiye’deki Jeotermal Sahalar ve Kullanım Alanları.....	5
<b>3. JEOTERMAL ENERJİDEN ELEKTRİK ÜRETİMİ.....</b>	<b>7</b>
3.1 Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi Tarihçesi, Gelişimi.....	7
3.2 Jeotermal Enerji Santrali Modelleri, Gelişimi.....	7
3.2.1 Tek fazlı buhar için elektrik üretim sistemleri .....	8
3.2.2 İki fazlı buhar için elektrik üretim sistemleri.....	8
3.2.3 Binary (ikili) elektrik üretim sistemleri .....	10
3.2.4 Jeotermal kombine elektrik üretim sistemleri.....	11
<b>4. KIZILDERE JEOTERMAL ENERJİ SANTRALİ .....</b>	<b>13</b>
4.1 Kızıldere Jeotermal Saha Özellikleri.....	13
4.2 Kızıldere Jeotermal Enerji Santrali Özellikleri, İşletme Tarihi.....	15
<b>5. KIZILDERE JEOTERMAL SAHASI İÇİN TASARLANACAK SANTRAL MODELLERİ SİSTEM ANALİZLERİ, OPTİMİZASYON PARAMETRELERİ .....</b>	<b>21</b>
5.1 Hesaplarda Kullanılacak Kabuller ve Optimizasyon Parametreleri.....	22
5.1.1 Kullanılan sabitler .....	22
5.1.2 Optimizasyon parametreleri .....	22
5.2 Kızıldere Jeotermal Sahası İçin Uygulanacak Modellerde Kullanılacak Sistem Analizleri.....	23
5.2.1 Separatör analizi.....	23
5.2.2 Türbin- jeneratör analizi.....	25
5.2.3 Yoğuşturucu (kondansör) analizi .....	26
5.2.4 Akışkan içindeki yoğuşmayan gazları uzaklaştırma-jet ejektör pompa sistemi analizi .....	27
5.2.5 Soğutma kulesi analizi .....	29
5.2.6 Pompa analizi .....	31
5.2.7 Binary çevrimde kullanılacak ısı değiştiriciler, buharlaştırıcı ve ön ısıtıcı analizi .....	32
<b>6. KIZILDERE JEOTERMAL SAHASINDAN ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN TASARLANAN ÇEVİRİM MODELİ-1.....</b>	<b>37</b>
6.1 Çift Flaşlı Çevrim Modeli Sonuçları, Optimum Şartların Tayini .....	39

6.1.1 Türbin çıkış basıncı optimizasyonu.....	39
6.1.2 Seperatör basıncı optimizasyonu.....	41
6.2 Kızıldere Jeotermal Sahası İçin Uygulanan Çift Flaşlı Çevrim Modeli Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	44
<b>7. KIZILDERE JEOTERMAL SAHASINDAN ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN TASARLANAN ÇEVİRİM MODELİ-2.....</b>	<b>47</b>
7.1 Bottoming Binary Çevrim Modeli-1 Çalışması, Optimum Koşulların Tayini.....	48
7.1.1 Seperatör basıncı optimizasyonu.....	50
7.1.2 Organik türbin basınçları optimizasyonu .....	51
7.2 Kızıldere Jeotermal Sahası İçin Uygulanan Bottoming Binary Çevrim Modeli-1 Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	57
<b>8. KIZILDERE JEOTERMAL SAHASINDAN ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN TASARLANAN ÇEVİRİM MODELİ-3.....</b>	<b>61</b>
8.1 Bottoming Binary Çevrim Modeli-2 Çalışması, Optimum Koşulların Tayini.....	61
8.1.1 Seperatör basıncı optimizasyonu.....	63
8.1.2 Buhar türbini ve organik türbin çıkış basıncı optimizasyonu. ....	65
8.2 Bottoming Binary Çevrim Modeli-2 Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	70
<b>9. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....</b>	<b>73</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>79</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>81</b>

## KISALTMALAR ve SİMGELER

<b><math>c_b</math></b>	: jeotermal akışkanın ortalama özgül ısısı
<b><math>c_{cf}</math></b>	: sistemdeki akışkan
<b><math>C_{gf}</math></b>	: akışkanın kuyubaşı şartlarındaki özgül ısı değeri
<b><math>C_{p,gaz}</math></b>	: gazın sabit basınçta özgül ısısı
<b><math>C_{v,gaz}</math></b>	: gazın sabit hacimde özgül ısısı
<b><math>c_w</math></b>	: soğutucu akışkan (cooling water)
<b>EES</b>	: Engineering Equation Solver
<b>H</b>	: entalpi
<b><math>h_a</math></b>	: soğutma kulesine giren- çıkan ıslak hava entalpisi
<b>HP</b>	: yüksek basınç
<b>KD-1/22</b>	: Kızıldere Üretim Kuyusu-1/22
<b>LP</b>	: düşük basınç
<b>M</b>	: akışkan için kütleli akış debisi
<b><math>m_b</math></b>	: buharlaştırıcıya giren jeotermal akışkanın kütleli debisi
<b><math>m_v</math></b>	: soğutma kulesine giren- çıkan akışkanın buhar kütleli debisi
<b><math>m_{wf}</math></b>	: pompada sıkıştırılan akışkanın kütleli debisi
<b><math>M_{gas}</math></b>	: yoğuşmayan gazın moleküler kütlesi
<b>MTA</b>	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
<b>ORC</b>	: organik rankin çevrimi (Organic Rankine Cycle)
<b>P</b>	: basınç
<b><math>P_{atm}</math></b>	: atmosfer basıncı
<b><math>P_{cond}</math></b>	: yoğuşuk (kondens) basıncı
<b><math>P_{fan}</math></b>	: fanda harcanan güç
<b><math>P_{jet}</math></b>	: jet ejektör gücü
<b><math>P_{motorjet}</math></b>	: ejektör pompası elektrik gücü
<b><math>P_{motorfan}</math></b>	: fanda kaybedilen elektrik gücü
<b><math>P_{sep}</math></b>	: separatör basıncı
<b>Q</b>	: ısı
<b>R114</b>	: soğutucu madde ( $CCl_2F_2$ )
<b>R-1</b>	: Kızıldere re-enjeksiyon kuyusu-1
<b>Ru</b>	: evrensel gaz sabiti
<b>S</b>	: entropi
<b>T</b>	: sıcaklık
<b><math>T_a, T_c</math></b>	: jeotermal akışkanın ısı değiştiricilere giriş ve çıkış sıcaklığı
<b><math>T_{cond}</math></b>	: yoğuşuk (kondens) sıcaklığı
<b><math>T_{d0}</math></b>	: santralin kurulu olduğu bölgenin ortalama sıcaklığı
<b><math>T_{gf}</math></b>	: rezervuar şartlarındaki akışkan sıcaklığı
<b>TDS</b>	: toplam çözünmüş katı miktarı
<b>T-s</b>	: sıcaklık- entropi diagramı
<b><math>V_{air}</math></b>	: hacimsel hava debisi
<b><math>w_f</math></b>	: çalışma akışkanı (working fluid)
<b><math>W_p</math></b>	: pompa için harcanan güç
<b><math>W_{t1}</math></b>	: birinci türbin net gücü
<b><math>W_{t2}</math></b>	: ikinci türbin net gücü



$W_{te1}$	: birinci türbin net elektrik gücü
$W_{te2}$	: ikinci türbin net elektrik gücü
$W_{net}$	: çevrimden elde edilecek net güç
$W_{net\_elect}$	: çevrimden elde edilecek net elektrik gücü
$w_1$	: soğutma kulesine giren ıslak hava nemliliği
$w_2$	: soğutma kulesinden çıkan ıslak hava nemliliği
$\Delta T_p$	: dirsek noktası sıcaklığı (pinch point)
$X$	: kalite, kuruluk derecesi (quality)
$W_t$	: türbinden elde edilecek net güç
$W_{pe}$	: pompada harcanacak elektrik enerjisi
$W_{te}$	: jenaratörden elde edilecek elektrik enerjisi
$\eta_c$	: çevrim verimi
$\eta_{gen}$	: jenaratör verimi
$\eta_{jetpump}$	: ejektör pompa verimi
$\eta_p$	: pompa izantropik ve adiyabatik verimi
$\eta_t$	: türbin izantropik ve adiyabatik verimi
$\eta_u$	: jeotermal kaynağın kullanım verimi (ikinci yasa verimi)
$\eta_{fan}$	: fan verimi
$\eta_{motor,fan}$	: fan motoru verimi
$\eta_{motor,pump}$	: pompa motoru verimi
$\gamma$	: $C_{p,gaz} / C_{v,gaz}$
$\rho_{air,2}$	: soğutma kulesinden çıkan havanın yoğunluğu
$\Delta P$	: basınç farkı

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b>	: Jeotermal akışkanın sıcaklığına göre kullanım yerleri .....	4
<b>Çizelge 2.2</b>	: Türkiye’de jeotermal kaynağa bağlı elektrik üretim tesisleri.....	5
<b>Çizelge 3.1</b>	: Jeotermal rezervuar sıcaklığına göre değişen santral tipleri.....	12
<b>Çizelge 4.1</b>	: Kızıldere jeotermal sahası üretim kuyuları bilgileri .....	14
<b>Çizelge 4.2</b>	: Kızıldere jeotermal sahası yüzey donanımları özellikleri .....	17
<b>Çizelge 4.3</b>	: Çeşitli jeotermal sahalara ait jeotermal buhar içindeki yoğuşmayan gaz miktarları .....	18
<b>Çizelge 5.1</b>	: Model uygulamalarında kullanılan sabitler .....	22
<b>Çizelge 7.1</b>	: Bottoming binary çevrim modeli-1 sistem elemanları için tespit edilen optimum çalışma şartları .....	58
<b>Çizelge 8.1</b>	: Kızıldere sahasında uygulanan çevrim modeli-2 sistem elemanları için tespit edilen optimum çalışma şartları .....	70
<b>Çizelge 9.1</b>	: Uygulanan santral çevrim modellerinin mevcut saha üretim debilerine göre elde edilen sonuçları .....	75
<b>Çizelge 9.2</b>	: Kızıldere jeotermal sahası için uygulanan santral çevrim modellerine ait optimum çalışma şartları .....	76



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1	: Kuru buhar için kullanılan örnek elektrik üretim santrali .....	8
Şekil 3.2	: Tek flaşlı (single- flash) örnek elektrik üretim santrali .....	9
Şekil 3.3	: Çift flaşlı (double- flash) örnek elektrik üretim santrali .....	10
Şekil 3.4	: İkili (binary) çevrim örnek elektrik üretim santrali .....	11
Şekil 3.5	: Bileşik jeotermal santral örnek şeması (bottoming binary).....	12
Şekil 4.1	: Kızıldere jeotermal sahası buhar akış hatları diagramı. ....	14
Şekil 4.2	: Sahanın zamana bağlı üretim ve yük faktörü .....	15
Şekil 4.3	: Kızıldere jeotermal santrali, yüzey tesisleri .....	17
Şekil 5.1	: Siklon tip ayrıştırıcının (separatörün) şematik kesiti .....	24
Şekil 5.2	: Çift flaşlı çevrim modeli için T-s diagramı .....	24
Şekil 5.3	: Çift flaşlı çevrim modeli için basit bir türbin- jeneratör şeması .....	25
Şekil 5.4	: Yoğuşturucu çalışma mekanizması .....	27
Şekil 5.5	: Jet ejektör pompası şeması .....	28
Şekil 5.6	: Soğutma kulesi şeması .....	29
Şekil 5.7	: Pompa şeması .....	31
Şekil 5.8	: Bileşik çevrim (bottoming binary) modeli için ısı değiştirici şeması .....	33
Şekil 5.9	: Isı değiştiricilerde jeotermal akışkan ile çalışma akışkanı arasında gerçekleşen ısı transferi .....	34
Şekil 6.1	: Çift flaş modeli akış diagramı .....	38
Şekil 6.2	: Buhar türbini çıkış sıcaklığı değişimi .....	40
Şekil 6.3	: Separatör basıncı optimizasyonu .....	41
Şekil 6.4	: Türbin çıkış basıncına göre değişen güçler .....	42
Şekil 6.5	: Çift flaş modeline ait T-s diagramı.....	43
Şekil 6.6	: Çift flaş modeline ait P-h diagramı .....	44
Şekil 6.7	: Kızıldere jeotermal enerji santrali çift flaş modeli için optimize edilmiş saha şartları .....	45
Şekil 7.1	: Bottoming Binary modeli-1 akış diagramı .....	49
Şekil 7.2	: Separatör basıncı optimizasyonu .....	51
Şekil 7.3	: Bottoming binary model-1 buhar çevrimi T-s diagramı.....	53
Şekil 7.4	: Bottoming binary model-1 buhar çevrimi P-h diagramı .....	53
Şekil 7.5	: Bottoming binary çevrim modeli-1 birinci ünite n-pentan T-s diagramı .....	55
Şekil 7.6	: Bottoming binary çevrim modeli-1 birinci ünite n-pentan P-h diagramı .....	56
Şekil 7.7	: Bottoming binary çevrim modeli-1 ikinci ünite n-pentan T-s diagramı .....	56
Şekil 7.8	: Bottoming binary çevrim modeli-1 ikinci ünite n-pentan P-h diagramı .....	57
Şekil 7.9	: Bottoming binary çevrim modeli-1’de belirlenen optimum işletme şartları.....	59
Şekil 8.1	: Bottoming binary çevrim modeli-2 akış diagramı .....	62

<b>Şekil 8.2</b>	: Model-3 değişen seperatör-2 basınçlarına göre santral net gücü .....	64
<b>Şekil 8.3</b>	: Bottoming binary çevrim modeli-2 için buhar sistemi T-s diagramı .....	66
<b>Şekil 8.4</b>	: Bottoming binary çevrim modeli-2 için buhar sistemi P-h diagramı .....	66
<b>Şekil 8.5</b>	: Bottoming binary çevrim modeli-2 için binary çevrimi birinci ünite T-s diagramı .....	68
<b>Şekil 8.6</b>	: Bottoming binary çevrim modeli-2 için binary çevrimi birinci ünite P-h diagramı .....	68
<b>Şekil 8.7</b>	: Bottoming binary çevrim modeli-2 için binary çevrimi ikinci ünite T-s diagramı .....	69
<b>Şekil 8.8</b>	: Bottoming binary çevrim modeli-2 için binary çevrimi ikinci ünite P-h diagramı .....	69
<b>Şekil 8.9</b>	: Bottoming binary çevrim modeli-2’de belirlenen optimum işletme şartları .....	71

## **KIZILDERE JEOTERMAL ENERJİ SANTRALİNDE UYGULANABİLECEK FARKLI ÇEVİRİM MODELLERİ İLE SANTRAL GÜÇLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

### **ÖZET**

Hazırlanan bu çalışmanın amacı, ülkemizin en önemli jeotermal enerji sahası olan Kızıldere sahasından maksimum elektrik enerjinin elde edileceği en uygun santral modelinin tespit edilmesi ve bu modele göre optimum işletme şartlarının belirlenmesidir.

Öncelikle jeotermal enerji tanımından, kullanım alanlarından ve Türkiye'deki jeotermal sahalardan bahsedilmiştir. Devamında, jeotermal enerjiden, elektrik üretiminin tarihi gelişiminden ve jeotermal enerji santralleri teknolojilerinden bahsedilmiştir. Jeotermal kaynak tiplerine göre gelişen kuru buhar, tek flaş, çift flaş, binary ve kombine çevrim santralleri çalışma prensiplerine değinilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, Kızıldere jeotermal sahası ve santral özelliklerinden bahsedilmiştir. Santralin işletilmesi süreci, karşılaşılan problemler ele alınmış ve santral yüzey donanımları çalışma şartları açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, Kızıldere jeotermal sahası için tasarlanan santral modelleri için yapılan hesaplamalar, kabuller ve optimizasyon parametreleri açıklanmıştır.

Devam eden bölümlerde, Kızıldere sahası için tasarlanan üç farklı santral modeli hesaplamaları yer almaktadır. Bu modellerden ilki çift flaşlı model, ikincisi bottoming binary tip model-1 ve üçüncüsü ise bottoming binary tip model-2 olarak ifade edilmektedir. Her bir çevrim modeli Kızıldere jeotermal sahası için EES programında optimize edilmiştir.

Her üç model için de elde edilen sonuçlar son bölümde karşılaştırılmıştır. Buna göre, net üretim gücü 15 MWe olan santralin mevcut kuyubaşı entalpi değeri kullanılarak birinci, ikinci ve üçüncü modellerden elde edilen santral güçlerinin sırasıyla 21.7 MWe, 28.8 MWe, 29.3 MWe olacağı hesaplanmıştır.



# **APPLICABLE POWER CYCLE MODELS FOR KIZILDERE GEOTHERMAL POWER PLANT AND COMPARISON OF THEIR NET ELECTRICITY POWERS**

## **SUMMARY**

The purpose of this study is determining the most appropriate power plant model that will provide maximum energy out put from our country's the most significant geothermal field (Kızıldere) and to identify the optimum operating conditions.

First of all, geothermal energy, geothermal fields in Turkey and their uses are mentioned. Then, the historical development of power generation from geothermal energy and geothermal power plants technologies are discussed. Depending on the types of geothermal resources, dry steam, single flash, double flash, binary and combine power plant cycles working principles are explained.

In the fourth section of this study, characteristic features of Kızıldere geothermal field and current power plant specifications are explained. Operation of the plant, the problems encountered in the surface equipment and plant operating conditions are discussed.

In the fifth section, three different power plant types considered for the Kızıldere geothermal field. Model calculations on power plants that will be designed for Kızıldere geothermal field are carried out, assumptions and parameter optimization are conducted.

Three different models for Kızıldere field are introduced in the following sections. The first model is double flash, the second model is bottoming binary type-1 and the third model is bottoming binary type-2 model. Using the EES program, every cycle models are optimized for Kızıldere geothermal field.

The results obtained for all three models are compared in the last section. Results indicated that with the existing wellhead enthalpy for Kızıldere field. The first model plant, second and third would produce 21.7 MWe, 28.8 MWe and 29.3 MWe respectively. By the way, the existing Kızıldere power plant net power is just 15 MWe.





## 1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusu ile birlikte birincil enerji kaynaklarının gün geçtikçe azalması, fosil yakıtların sebep olduğu çevre sorunları ve sera etkileri yüzünden yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi gün geçtikçe artmaktadır. 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 başlanmış 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 sıvı ağırlıklı 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.

Türkiye'nin ilk jeotermal enerji santrali olan Kızıldere jeotermal enerji santrali, 1984 yılından günümüze kadar enerji üretimine devam etmektedir. Santral tek flaşlı santral modeline göre kurulmuş ve uzun yıllar kuyulara geri-basma (re-enjeksiyon) yapılmaması, azalan rezervuar basınçları nedeniyle üretilen suyun içerdiği yüksek orandaki CO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub> çökmesine sebep olması gibi problemler yüzünden sahadaki üretim oldukça azalmıştır.

Kızıldere jeotermal sahasıyla ilgili literatürde hem saha ve karşılaşılan sonuçların incelendiği hem de farklı çevrim modelleri ile ne kadar elektrik enerjisi üretimi yapılabileceği konusunda çalışmaları bulunmaktadır. Dağdaş'a göre, Kızıldere jeotermal sahası için ikili (binary) çevrim ile üretilebilecek en fazla elektrik enerjisi 18.2 MWe olarak hesaplanmıştır [3]. Parlaktuna ve diğerlerine göre, Kızıldere jeotermal sahasında % 90 olasılıkla 60 MWe elde edilebilecektir [4]. Bir başka

araştırmaya göre, Kızıldere jeotermal sahasından elektrik üretimi için uygulanabilecek santral modelleri içinde ikili (binary) sistemlerin uygunluğu üzerinde durulmuştur [5].

Hazırlanan bu çalışmanın amacı, ülkemizin en önemli jeotermal enerji sahası olan Kızıldere sahasının, gelişen santral teknolojilerini dikkate alarak, en uygun santral modelini tespit edip, elde edilecek net elektrik gücünü arttırabilmektir.

Çalışma kapsamında öncelikle Kızıldere jeotermal sahası ve mevcut santrali hakkında toplanan bilgiler sunulmaktadır. Kızıldere jeotermal sahası için uygulanabilecek üç ayrı santral modeli tespit edilmiş ve EES yazılımı kullanılarak hesaplamaları yapılmıştır. Uygulaması yapılan her üç model için santraldeki her sistem elemanına ait optimum işletme şartları tespit edilmiş ve bu optimum şartlarda elde edilecek net elektrik güçleri ile santral verimlilikleri karşılaştırılmıştır.

## 2. JEOTERMAL ENERJİ

### 2.1 Jeotermal Enerji Tanımı

Jeotermal enerji genel olarak, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş, basınç altındaki sıcak su, buhar, gaz veya sıcak kuru kayaç içinde yer alan ısı enerjisi olarak tanımlanmaktadır.

Jeotermal sistemler ısı kaynak, rezervuar ve ısıyı taşıyan akışkan olmak üzere üç ana unsurdan oluşmaktadırlar. Isı kaynağı yüksek sıcaklıklı (>600 °C) ve yüzeye 5-10 km yakınlarına kadar ulaşmış magmatik sokulumlar olabileceği gibi, yüzeyden derinde, daha düşük sıcaklıklı sistemlerde de olabilir. Derinlik arttıkça artan normal sıcaklık değerleri jeotermal gradyan olarak ifade edilir ve 2.5-3 °C/100 m değerindedir [6]. Rezervuar, ısıyı taşıyan sıvının dolaşımını sağlayan gözenekli kayaçtır. Jeotermal akışkan ise, rezervuarda sıcaklık ve basınç değerlerine göre, sıvı ya da buhar fazında bulunan, içinde çözülmüş kimyasalları ve bazı gazları (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) bulunduran meteorik sudur [6].

Jeotermal alanlarda, sıcak kayaç ve yüksek yeraltı suyu sıcaklığı normal alanlara göre daha sığ yerlerde bulunur. Bunun başlıca sebebi olarak üç ana neden sıralanmaktadır [6].

1. Mağmanın kabuğa doğru yükselmesi ve dolayısıyla ısıyı taşıması,
2. Kabuğun incelendiği yerlerde yüksek sıcaklık farkı sonucunda oluşan ısı akışı,
3. Yeraltı suyunun bir kaç kilometre derine inip ısındıktan sonra yüzeye doğru yükselmesi.

Hidrotermal sistemlerin üretim mekanizması sıvının ısı taşımasıdır. Isı taşınımı, sıvının ısı olarak genişlemesine sebep olur. Isınan düşük yoğunluklu sıvı yüzeye doğru yükselerek soğuk ve yoğunluğu yüksek meteorik su ile yer değiştirir. Doğal olarak, taşınım akım sisteminde, sıcaklık alt kısımlarda azalma, üst kısımlarda ise artma eğilimindedir [7].

Jeotermal kaynaklar, yüksek, orta ve düşük sıcaklıklı olarak sınıflandırılmaktadır. Rezervuar sıcaklığı 20-100 °C arasında olan sahalar düşük sıcaklıklı, 100-180 °C arasında olan sahalar orta sıcaklıklı, 180 °C'den yüksek olan sahalar ise yüksek sıcaklıklı olarak sınıflandırılmaktadır. Düşük ve orta sıcaklıklı sahalar daha fazla ısıtmacılık olmak üzere, endüstri, kağıt ve dokuma sanayinde, dericilikte, kimyasal madde üretiminde kullanılmaktadır. Ancak orta sıcaklıklı sahalardaki akışkanlardan elektrik üretimi için geliştirilmiş yeni teknolojiler bulunmaktadır. Yüksek entalpili jeotermal kaynaklar ise, elektrik üretiminin yanısıra entegre olarak diğer alanlarda da kullanılabilir. [8]

## 2.2 Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanları

Yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynakların (>180 °C) en önemli kullanım alanı elektrik üretimidir. Düşük ve orta sıcaklıklı jeotermal kaynaklar (<150 °C) çok farklı kullanım alanlarına sahiptir. Farklı sıcaklıklara göre jeotermal kaynakların kullanım alanları Çizelge 2.1 de gösterilmektedir.

**Çizelge 2.1:** Jeotermal akışkanın sıcaklığına göre kullanım yerleri.

°C	Jeotermal Akışkanın Kullanım Alanları
180	Yüksek konsantrasyon solüsyonunun buharlaşması, amonyum absorpsiyonu ile soğutma
170	Hidrojen sülfid yolu ile ağır su eldesi, diatomitlerin kurutulması
160	Kereste kurutulması, balık vb. yiyeceklerin kurutulması
150	Bayer's yöntemiyle alüminyum eldesi
140	Çiftlik ürünlerinin çabuk kurutulması (konservecilikte)
130	Şeker endüstrisi, tuz eldesi
120	Temiz su eldesi, tuzluluk oranlarının artırılması
110	Çimento kurutulması
100	Organik maddeleri kurutma, (yosun, et, sebze vb.) yün yıkama ve kurutma
90	Balık kurutma
80	Ev ve sera ısıtma
70	Soğutma
60	Kümes ve ahır ısıtma
50	Mantar yetiştirme, balneolojik banyolar
40	Toprak ısıtma
30	Yüzme havuzları, fermantasyon, damıtma, sağlık tesisleri
20	Balık çiftlikleri

### 2.3 Türkiye'deki jeotermal sahalar, kullanım alanları

Türkiye Alp- Himalaya orojenik kuşağı üzerinde olması, tektonik ve volkanik aktivitelerin çok olması nedeniyle jeotermal açıdan büyük bir potansiyele sahiptir. Ülkemizde aktif faylara ve volkanizmaya bağlı olarak başta Ege Bölgesi olmak üzere, Kuzeybatı, Orta Anadolu, Doğu ve Güney Anadolu Bölgelerinde altıyüzün üzerinde jeotermal kaynak bulunmaktadır [9].

Türkiye'deki jeotermal enerji kaynakları daha çok konut ısıtması, sera ısıtması ve kaplıca amaçlı kullanılmaktadır. Türkiye'deki jeotermal sahaların büyük bir kısmı doğrudan kullanıma uygun orta sıcaklıklı sahalardır. Ayrıca 15 adet yerleşim biriminde toplam 65000 konut eşdeğeri ısıtma yapılmaktadır [1]. Ülkemizde toplam 15 adet elektrik üretebilme potansiyeline sahip jeotermal saha olmasına rağmen mevcut durumda 4 adet sahadan fiili olarak üretim yapılmaktadır. Bunlar, Denizli-Kızıldere, Aydın-Salavatlı, Aydın-Germencik ve Çanakkale-Tuzla sahalarıdır. Çizelge 2.2'de ülkemizde jeotermal kaynağa bağlı elektrik üretim tesisleri belirtilmiştir.

**Çizelge 2.2:** Türkiye'de jeotermal kaynağa bağlı elektrik üretim tesisleri [1,10]

Tesis Adı	Yeri	Kurulu Güç MWe	Mevcut Durum
Sarayköy JES	Denizli- Sarayköy	17.8	İşletmede
Dora1 JES	Aydın- Salavatlı	7.5	İşletmede
Kızıldere JES	Denizli- Sarayköy	7.5	İşletmede
Germencik JES	Aydın- Germencik	47.4	İşletmede
Tuzla JES	Çanakkale- Tuzla	7.5	İşletmede
Dora2 JES	Aydın- Salavatlı	11.1	2010
Maren JES	Aydın- Hıdırbeyli	15	2012
Umurlu JES	Aydın- Umurlu	5	İncelemede
Sanko JES	Manisa- Salihli	15	Başvuru
Toplam		133.8	
Toplam İşletmede		87.7	



### **3. JEOTERMAL ENERJİDEN ELEKTRİK ÜRETİMİ**

#### **3.1 Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi Tarihçesi, Gelişimi**

Jeotermal akışkanın kullanımı önceleri sadece ısınma, yemek pişirme amacıyla kullanılmasına rağmen, elektrik üretimi amaçlı ilk saha çalışmaları 1833 yılında İtalya'da başlamıştır. 1904 yılında yine İtalya Larderello sahasında ilk kez buhardan elektrik üretimi yapılmıştır [9]. Sonrasında bir çok ülkede jeotermal saha çalışmaları devam ederken, 1963 yılında Türkiye'de ilk jeotermal sondaj yapılmış ve 1968 yılında Kızıldere jeotermal sahasının keşfedilmiştir [9].

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 itibariyle jeotermal kaynaklı elektrik üretim tesisi kurulu gücü 87.7 MWe'dir [11].

Jeotermal enerjiden elektrik üretimi, enerjiyi taşıyan kaynak akışkanın hangi halde (fazda) bulunduğuna göre farklı çevrim modelleri sayesinde gerçekleştirilir.

Jeotermal sistemlerin kendine özgü doğası, diğer klasik enerji teknolojilerinden farklı konumda yer almalarını sağlamaktadır. Jeotermal sistemler, buldukları yere bağlı oldukları için oldukça karmaşıktırlar.

Orta ve düşük sıcaklık kaynaklı jeotermal sistemlerden elektrik üretimi sırasında, sıcaklık farklarının az olmasından dolayı hem verimlilikler düşecek, hem de sorunlarla karşı karşıya kalınacaktır. Jeotermal kaynaktan özellikle düşük sıcaklıklı kaynaktan güç üretiminde, hem pratik termodinamik verimi ideal sınırları içinde kalmak, hem de ekonomik bir proses tasarımı gerçekleştirmek adına yeni teknolojiler geliştirilmiştir [10].

#### **3.2 Jeotermal Enerji Santrali Modelleri, Gelişimi**

Jeotermal enerji santralleri tarihi gelişiminde, kaynağa bağlı olarak termodinamik çevrim teknolojisinde bir çok gelişim gözlemlenmiştir. Dünya jeotermal enerji

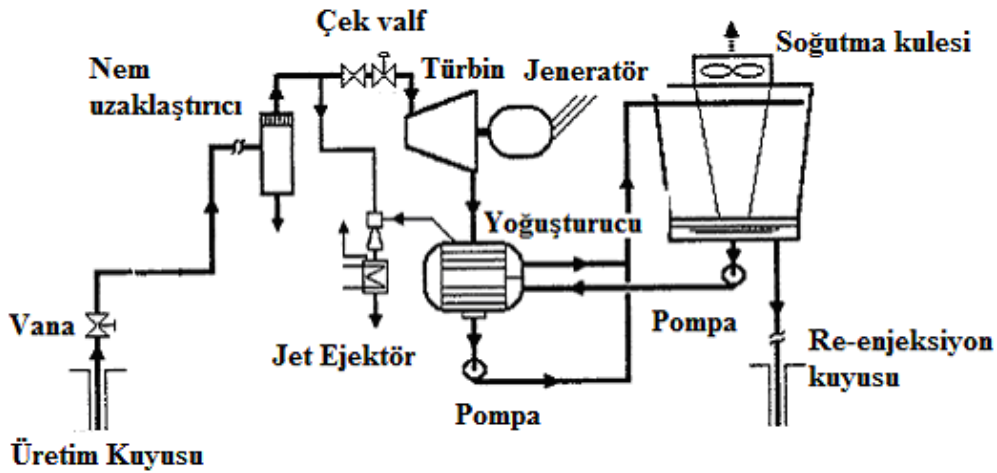


kaynaklarının çoğu çift fazlı, sıvı yoğun ve içinde çözünmemiş gaz miktarı ile çökelmeye sebep olan karbonatlı bileşimler barındıran özelliktedir.

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 ayrıştırıcı hem de ikili (binary) tip çevrim modelini kapsayan başka bir çevrim modeli de geliştirilmiş ya da kombine jeotermal enerji çevrimleri olarak ortaya çıkmıştır.

### 3.2.1 Tek Fazlı Buhar için Elektrik Üretim Sistemleri

En basit ve en ekonomik jeotermal sistemdir. Bu sistemlerde, jeotermal kuyudan çıkarılan akışkanın tamamı tek, buhar fazındadır. Kaynaktan çıkarılan buhar türbinden geçtikten sonra ya atmosfere atılır, ya da yoğuşturucudan geçirilerek re-enjeksiyon kuyusuna geri basılır. Kondansör sayesinde türbin çıkışında atmosfer basıncının altında bir basınç, yani vakum oluşturulur. Türbini terk eden buhar daha düşük sıcaklıkta, dolayısıyla daha düşük entalpidedir [9]. Böylece, türbinin giriş ve çıkışı arasındaki entalpi farkı artacağından elde edilecek güç de en fazla değere ulaşmış olacaktır.



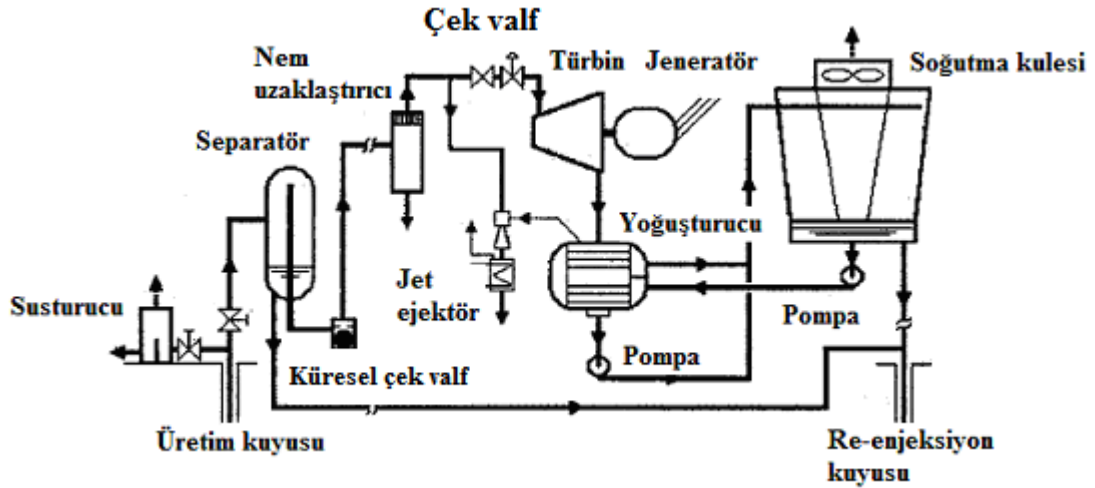
Şekil 3.1 : Kuru buhar için kullanılan örnek elektrik üretim santrali [2].

Şekil 3.1’de bir kuru buhar sahası için örnek bir jeotermal elektrik santralinin şematik çalışma mekanizması görülmektedir. Bu tür çevrimler Dünya’da kuru veya

doymuş buhar üretilen İtalya- Larderello başta olmak üzere, ABD- Geysers, Endonezya ve Japonya’da kullanılmaktadır [2].

### 3.2.2 İki Fazlı Akışkan için Elektrik Üretim Sistemleri

Suyun hakim olduğu jeotermal kaynaklarda sıvı-buhar karışım halinde bulunduğundan, buharın türbine gönderilmeden önce sudan ayrılması gerekmektedir. Bu sebepten, bu tür jeotermal akışkanlardan elektrik üretimi sırasında ayırıştırıcı (separator) kullanılmaktadır. Tek separatorlu ve iki separatorlu olan modelleri mevcuttur. Bir separatorün kullanıldığı sistemler Tek Flaşlı “Single Flash ” olarak anılırlar. Böyle bir jeotermal çevrimde akışkan separatorde ayırıştırıldıktan sonra buhar türbine, sıvı kısım ise formasyona geri basılmaktadır. Şekil 3.2’de örnek bir tek flaşlı jeotermal elektrik santralinin çalışma mekanizması görülmektedir.



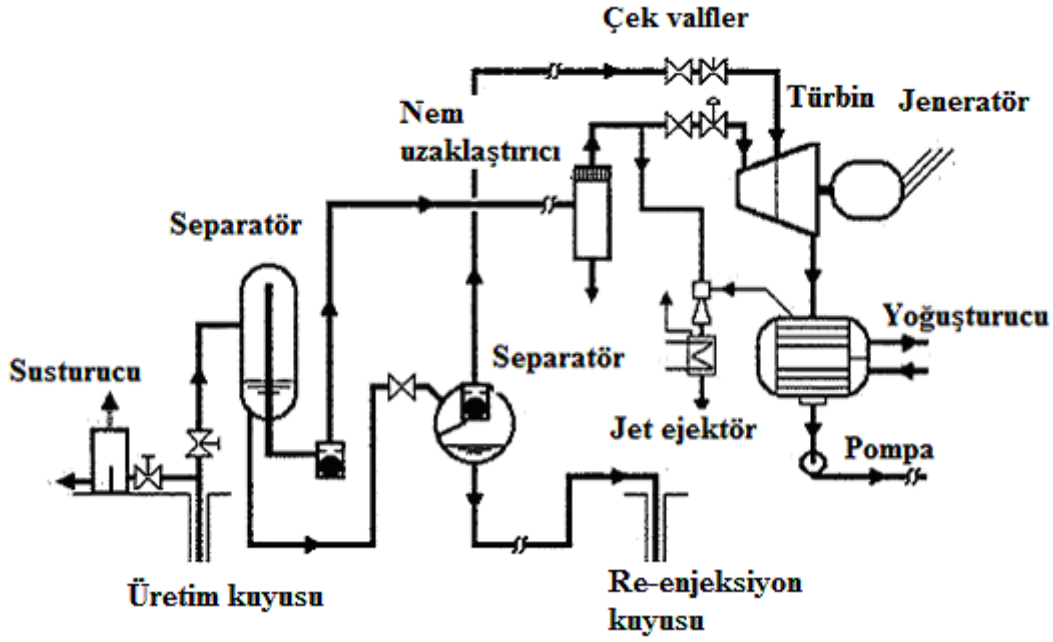
Şekil 3.2 : Tek flaşlı (single-flash) örnek elektrik üretim santrali [2].

Bu tür çevrimler başta Yeni Zellanda- Wairaki olmak üzere, Meksika- Cerro Prieto ve ülkemiz de Kızıldere dahil olmak üzere Dünya’daki pek çok jeotermal sahada elektrik üretiminde kullanılmaktadır [2].

İki fazlı akışkanlardan daha fazla enerji elde edebilmek için iki kademeli separasyon sistemiyle birlikte çifte 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 daha düşük basınçlı kademesine gönderilerek daha fazla elektrik enerjisi üretilir. Türbinin dışarı boşalım (egzost) kısmını atmosfer basıncının altında tutabilmek için, buhar içinde bulunan CO<sub>2</sub> , H<sub>2</sub>S gibi yoğuşmayan gazların ayrıştırılması gerekmektedir. Yoğuşmayan bu gazları ayırmak için kondansörde bir pompa ya da ejektör kullanılmalıdır [10]. Şekil 3.3’de çift flaşlı örnek bir jeotermal elektrik santralinin şematik çalışma mekanizması görülmektedir.

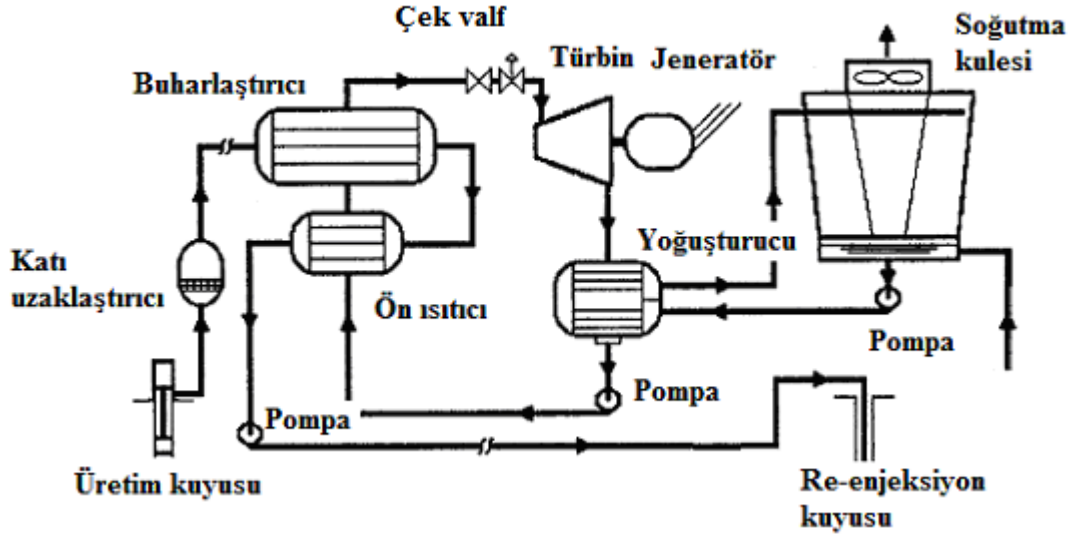


Şekil 3.3: Çift flaşlı (Double-flash) örnek elektrik üretim santrali [2].

### 3.2.3 Binary (İkili) Elektrik Üretim Sistemleri

Düşük sıcaklıklı (< 180 °C) ve sıvı ağırlıklı jeotermal kaynaklardan elektrik üretimi için, jeotermal akışkandan ikinci bir çalışma sıvısına ısı geçişinin bir ısı değiştiricide sağlanması ve ikinci sıvının da türbinde genişleşip yoğuşturucuda faz değiştirmesiyle ortaya çıkan ısıyı soğutma kulesinden atılması sonucu tamamlanan kapalı devre, bir Rankine çevrimidir [10].

İkili (binary) çevrimlerde ikincil akışkan olarak genellikle, n-pentan, izo-pentan, izo-bütan, R114 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.

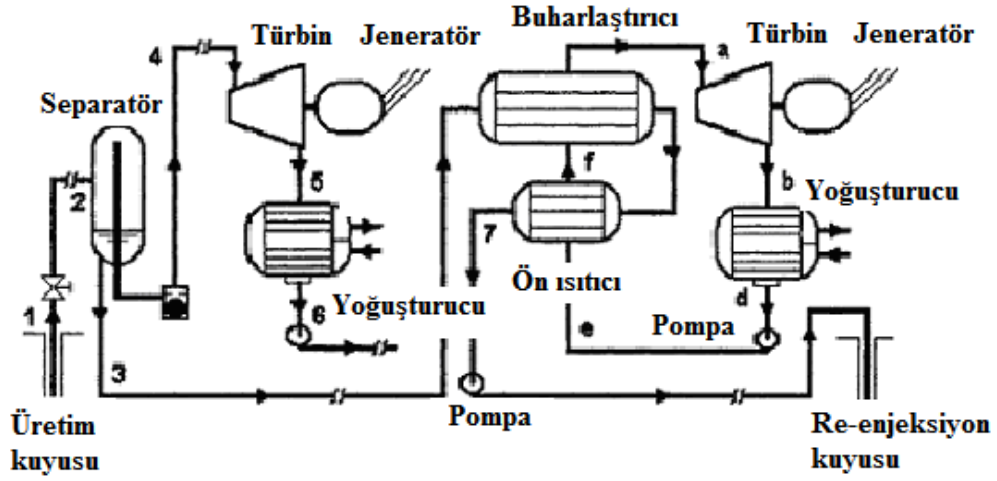


Şekil 3.4: İkili (binary) çevrim örnek elektrik üretim santrali [2].

Binary çevrimlerin yoğuşmayan gazlara karşı herhangi bir duyarlılığı olmayıp, performansları onlara bağlı değildir. Şekil 3.4’de basit bir binary jeotermal elektrik santrali şeması bulunmaktadır.

### 3.2.4 Jeotermal Kombine Elektrik Üretim Sistemleri

Jeotermal kaynaklardan diğer sistemlere göre daha fazla elektrik enerjisi üretebilmek için geliştirilmiş sistemlerdir. Genel olarak farklı tip çevrimlerin birbiriyle bileşik çakıştırılmasıyla oluşturulmuşlardır. Literatürde melez (hibrit) sistemler olarak da geçen bileşik jeotermal santrallerden en fazla kullanılanı, tek separatörlü buharlaştırıcı sistem ile ikili (binary) çevriminin tümlenmesiyle oluşturulan “Bottoming Binary Çevrimi” olarak adlandırılan çevrim modelidir. Şekil 3.5’de örnek şema üzerinde bileşik santral örneği görülmektedir.



**Şekil 3.5:** Bileşik jeotermal santral örnek şeması (Bottoming Binary) [2].

Şekil 3.5'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 ikinci akışkanın izlediği yolu ifade etmektedir. Buhar sistemindeki 6 numaralı yoğuşturucu çıkış noktasından ikili çevrime 7 noktasında, ön ısıtıcı da giriş yapmaktadır. 7 noktasındaki jeotermal akışkan ısısını ikincil akışkana aktardıktan sonra re-enjeksiyon kuyusuna geri basılacaktır. Jeotermal akışkanın ısısını alan ikinci akışkan ise ikili sistemde enerji üretimini sağlayacaktır.

Genel olarak rezervuar sıcaklığına bağlı kullanılan santral çevrim modelleri Çizelge 3.1' de belirtilmiştir [2].

**Çizelge 3.1:** Jeotermal rezervuar sıcaklığına göre değişen santral tipleri [2]

Santral Tipi	Rezervuar Sıcaklığı, (°C)	Kaynak Kullanım Verimliliği, (%)
Tek Separatörlü Buharlaştırma	200- 260	30- 35
Çift Separatörlü Buharlaştırma	240- 320	35- 45
Kuru Buhar	180- 300+	50- 65
Basit İkili (binary)	125- 165	25- 45

#### **4. KIZILDERE JEOTERMAL ENERJİ SANTRALİ**

Kızıldere jeotermal sahası, Denizli Sarayköy yakınlarında, Büyük Menderes nehrinin batı ucunda yer alır [12]. Saha 1960'lı yılların ortasında başlayan yerbilimi çalışmaları sonucunda 1968 yılında delinen KD-1 kuyusunda 196°C sıcaklıkta jeotermal akışkan bulunmasıyla keşfedilmiştir [13]. Sonraki yıllarda, saha geliştirme çalışmalarına devam edilmiştir. Santral kurulumu 1982 yılında başlamış, 1984 yılında işletmeye alınmıştır.

##### **4.1 Kızıldere Jeotermal Saha Özellikleri**

Kızıldere jeotermal sahası, rezervuar sıcaklığı 200- 242°C arasında olan sıvının hakim olduğu bir sistemdir. Kuyubaşlarında buhar oranı % 10-20 arasında değişir. Sahanın en belirgin özelliği yüksek oranda yoğuşmayan gaz içermesidir. Rezervuarda % 1- 3 oranında, üretilen buharda hacimce % 5, ağırlıkça % 10-21 oranında yoğuşmayan gaz bulunmaktadır. Bu gazların % 96-99'unu karbondioksit gazı (CO<sub>2</sub>) oluşturmaktadır. Yoğuşturucudan kompresörle alınan gazlar, sahada bulunan bir kuru buz üretim tesisine iletilmektedir [12].

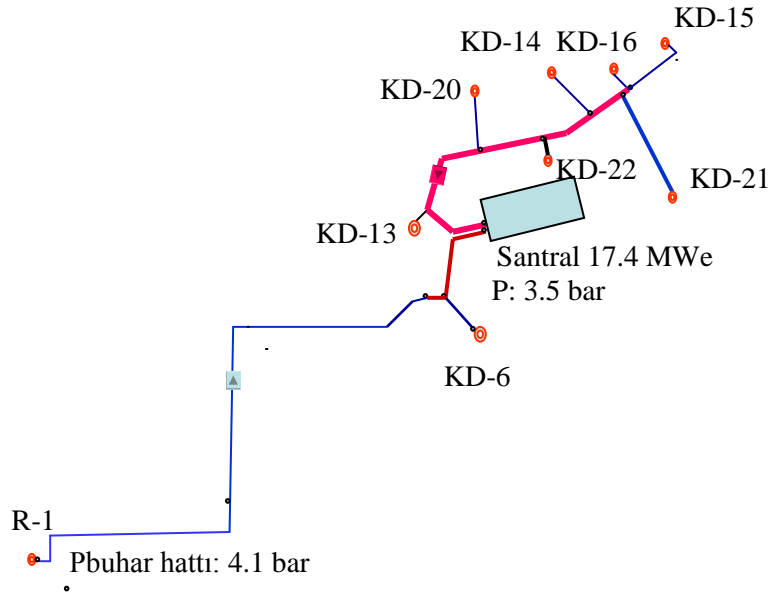
Bölgedeki jeolojik ve jeofizik incelemeler ile kuyu delme ve kuyu testi işlemleri MTA tarafından yapılmıştır. İlk üretim kuyusu KD-1 1968 yılında tamamlanmış ve 540 m derinlikte, 198 °C rezervuar sıcaklığında olan buhar üretmeye başlamıştır. Bunu izleyen 1968- 1973 yılları arasında toplam 16 adet kuyu delinmiştir. KD-13 kuyusundan beslenen 0.5 MWe gücünde bir prototip santral 1975 yılında MTA tarafından kurulmuştur [11]. Daha sonra 1997 yılında sıcaklığı 240 °C olan derin bir rezervuar keşfedilmiştir. Bu rezervuardaki akışkan ağırlıkça % 2.5 CO<sub>2</sub> içermektedir [13].

Kızıldere jeotermal sahasında delinen kuyulara ait bilgiler Çizelge 4.1'de verilmektedir. R1 kuyusu geri basma (re-enjeksiyon) amaçlı delinmesine rağmen, enjeksiyon yapılmadığı ve yüksek sıcaklıklı akışkan içerdiğinden, üretim kuyusu olarak kullanılmaya başlanmıştır [9].

**Çizelge 4.1:** Kızıldere jeotermal sahası üretim kuyuları bilgileri [9].

Kuyu No	Açılma Tarihi	Kuyubaşı Sıcaklığı	Kuyubaşı Basıncı	Derinlik	Toplam Debi	Separatör Basıncı	Separatör Sıcaklığı	Buhar Debisi	Su Debisi
		°C	MPa	m	kg/s	MPa	°C	kg/s	kg/s
KD-6	1970	193	1.327	851	21.46	0.438	147	2.02	19.44
KD-13	1971	193	1.327	760	19.62	0.438	147	1.85	17.77
KD-14	1970	194	1.376	597	16.28	0.45	148	1.56	14.72
KD-15	1971	194	1.376	510	32.93	0.438	147	3.22	29.72
KD-16	1975	196	1.425	666.5	49.02	0.45	148	4.86	44.16
KD-20	1986	193	1.327	810	23.91	0.438	147	2.25	21.66
KD-21	1985	181	1.033	898	15.84	0.438	147	1.12	14.72
KD-22	1985	193	1.327	888	30.85	0.404	144	3.08	27.77
R-1	1997	240	3.337	2261	72.93	0.65	162	12.38	60.55

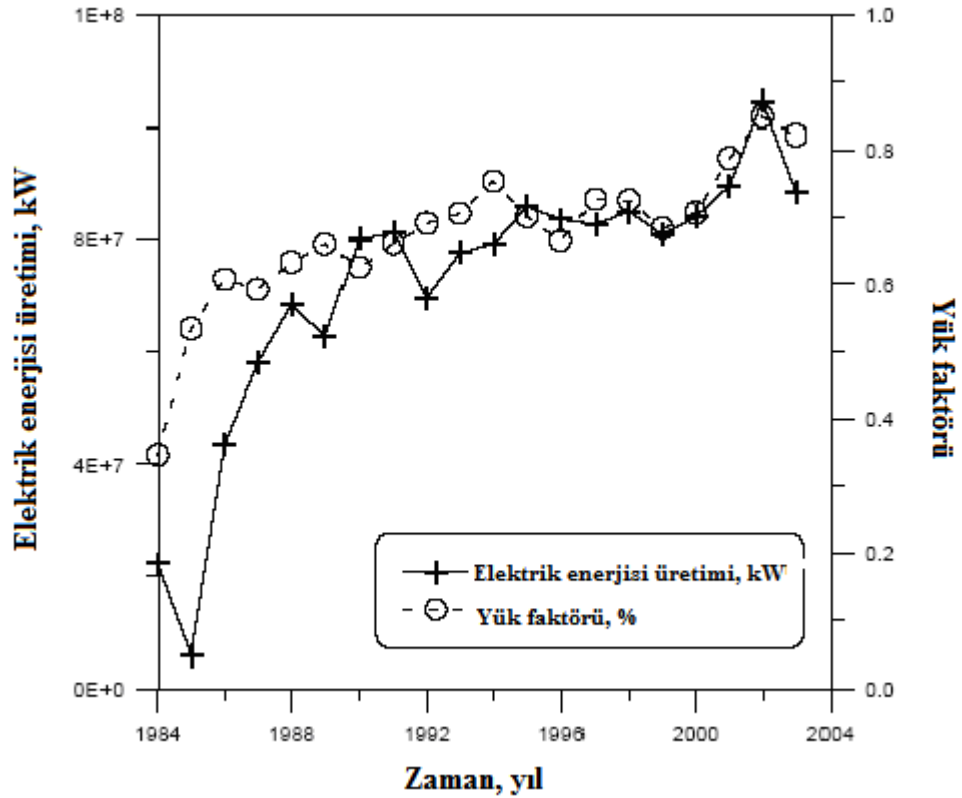
Mevcut durumda, üretim ve enjeksiyon kuyularının yerleşim planı, Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



**Şekil 4.1 :** Kızıldere jeotermal sahası buhar akış hatları diagramı [14].

## 4.2 Kızıldere Jeotermal Enerji Santrali Özellikleri, İşletme Tarihi

Kızıldere jeotermal santrali 1982 yılında kurulmaya başlanmış, 1984 yılında işletmeye alınmıştır. 1986 yılında delinen üç yeni üretim kuyusu ile toplamda dokuz adet kuyudan üretim yapmaya başlanmıştır. İzleyen yıllarda artan üretim, 1988 yılında ise en yüksek düzeye ulaşılmıştır [13]. 1991 yılında üretimi arttırmak için kuyularda asitleme yapılmıştır. Sonraki yıllarda işletim sorunları sebebiyle üretimde düşüşler yaşanmıştır. 1993 ve 1995 yılında üretimde artışlar görülmüştür [13]. Daha sonra işletme saatleri artmasına rağmen, üretimde düşüşler gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak, rezervuar basıncının zamanla düşmesi ve bundan dolayı üretimin düşmesi öne sürülebilir. Enerji üretimindeki en büyük sıçrama 2001 yılında R-1 kuyusunun da üretime katılmasıyla sağlanmıştır. Şekil 4.1'de Kızıldere sahasının zamana bağlı üretim miktarındaki değişim gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : Sahanın zamana bağlı üretim ve yük faktörü [13].



Kızıldere jeotermal santrali konvansiyonel tek flaş (single flash) üniteli olup, santral kurulu gücü 17.38 MWe, net üretim gücü ise, 15 MWe düzeyindedir. Santral yüzey donanımları ve elektrik santrali olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Her iki bölümü oluşturan ekipmanlar aşağıda sıralanmıştır.

Yüzey donanımları:

- ana vanalar, servis kontrol vanaları,
- separatörler
- buhar iletim hatları, re-enjeksiyon iletim hatları

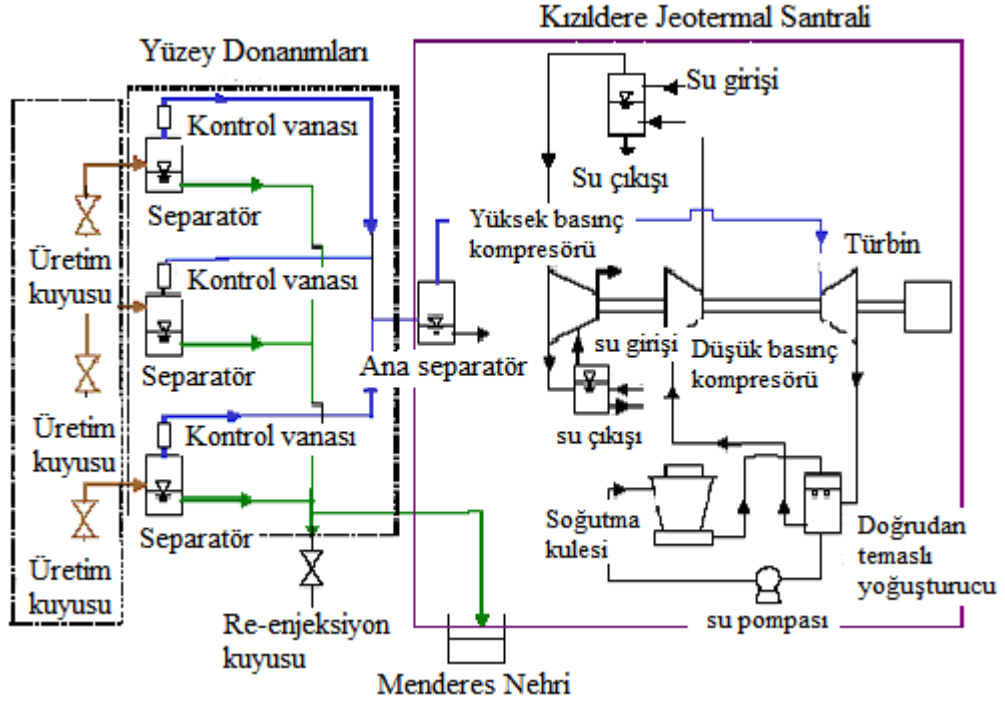
Elektrik santrali donanımları:

- ana nem separatörü
- buhar türbini
- yoğuşturucu, kompresör
- soğutma kulesi, kontrol vanaları, pompalar

Santraldeki türbin çift akışlı olup, çok kademeli türbin yüklerle karşı stabilite sağlaması için, tek bir shaft üzerine monte edilmiştir. Benzer şekilde jeneratör de aynı shaft üzerine bağlanmıştır. Türbin buhar giriş sıcaklığı 147 °C, basıncı 0.378 MPa ve buhar debisi 33 kg/s değerindedir. Genleşen buhar basıncı türbin çıkışında 0.01019 MPa değerine düşerek yoğuşturucuya geçer. Kondansör doğrudan temaslı tip olup, ısı transfer katsayısı yüksektir. Soğutma kulesinde kullanılan soğutma suyu kütle debisi 2.375 kg/s'dir [13].

Kızıldere jeotermal enerji santrali toplam 9 adet kuyudan elde edilen buhardan elektrik üretmektedir. Kuyubasında 13- 15 bar basınçta olan sıcak su ve buhar karışımı kuyubaşlarındaki ikili separatörden geçirilerek buhar kısmı sıvıdan tamamen ayrıştırılır. Her bir kuyudan gelen jeotermal akışkandan ayrıştırılan buhar, ana nem separatörüne buhar nakil hatları ile taşınır. Taşınan buhar, türbinde iş yaptıktan sonra yoğuşturucuya dökülür. Burada yoğuşmayan gazlar çift kompresör ile sistemden ayrıştırılır; yoğuşan su ise damlacıklar halinde soğutma kulesine aktarılır.

Fan ile soğutma kulesine giren soğuk hava ile kondenserde yoğuşan sıcak jeotermal akışkanın sıcaklığı azaltılır. Diğer taraftan soğutma kulesindeki kütle dengesinin sağlanabilmesi için dışarıdan ilâve edilen su Menderes Nehri'nden tedarik edilip, tasfiye ünitesinde arıtılarak kullanılmaktadır [9]. Soğutma kulesinden sıcaklığı azalmış olarak çıkan akışkan, pompa ile basınçlandırılarak kondensere geri döner.



Şekil 4.3 : Kızıldere jeotermal santrali, yüzey tesisleri [13].

Şekil 4.3'de Kızıldere jeotermal santralinin yüzey donanımları ve santral bölümleri gösterilmektedir. Yüzey donanımları ve santral genel özellikleri de Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.2: Kızıldere jeotermal sahası yüzey donanımları özellikleri [12,13].

Tanım	Birim	Büyükük
Rezervuar sıcaklığı	°C	200-242
Optimum kuyubaşı basıncı	MPa	1.6
Kuyubaşı işletme basıncı	MPa	1.28-1.58
Kuyubaşı sıcaklığı	°C	180-200
Toplam debi	t/st	1155
Kuyubaşı buhar oranı	%	10-12
Separatör basıncı	MPa	0.438-0.650
Separatör sıcaklığı	°C	145-148

**Çizelge 4.2** (devam) Kızıldere jeotermal sahası yüzey donanımları özellikleri [12,13]

Türbin giriş basıncı	MPa	0.45
Türbin giriş sıcaklığı	°C	148
Türbin çıkış basıncı	MPa	0.1019
Türbin çıkış sıcaklığı	°C	51
Kondensör giriş sıcaklığı	°C	28
Kondensör çıkış sıcaklığı	°C	39
Türbin çıkışındaki buhar nemliliği	%	85
Toplam çözünmüş katı miktarı (TDS)	ppm	2500-3200
Buhardaki ağırlıkça yoğuşmayan gaz miktarı	%	10-21
CO <sub>2</sub> miktarı	%	96-99
H <sub>2</sub> S miktarı	ppm	100-200
Kompresör tüketimi	MWe	2.38
Santralin kurulu gücü	MWe	17.38
Santralin net üretim gücü	MWe	15

Kızıldere jeotermal sahasının üretimine etki eden en önemli özelliği yüksek oranda yoğuşmayan gaz içeriğidir. Türbinden elde edilen güç miktarını sınırlandıran problemlerden biri jeotermal akışkan içindeki yüksek yoğuşmayan gaz miktarıdır. Yüksek CO<sub>2</sub> içeriği, düşen rezervuar basınçları ile CaCO<sub>3</sub> çökelmelerine sebep olmaktadır. Bu durum Kızıldere jeotermal sahasının üretilebilirliğinin büyük oranda düşmesine sebep olmaktadır [13,14].

Kızıldere jeotermal buharı içinde ağırlıkça % 10-21 oranında CO<sub>2</sub> bulunmaktadır. Bu oran, Dünya'daki önemli jeotermal kaynaklardaki yoğuşmayan gaz oranlarıyla karşılaştırılırsa, oldukça yüksektir. Çizelge 4.3'de çeşitli jeotermal sahalara ait yoğuşmayan gaz miktarları gösterilmektedir.

**Çizelge 4.3:** Çeşitli jeotermal sahalara ait jeotermal buhar içindeki yoğuşmayan gaz miktarları [12].

Saha	Yoğuşmayan gaz oranı
	(% ağırlık)
Kızıldere (Türkiye)	10-21
Lardarello (İtalya)	10
Broadlands-Ohaaki (Yeni Zelanda)	3-6
Geysers (ABD)	1
Wairakei (Yeni Zelanda)	0.2

Jeotermal güç santrallerinde yüksek yoğuşmayan gaz oranlarının yarattığı problemlerden bazıları aşağıda sıralanmıştır [12].

- Yoğuşmayan gazların kondenserde birikmesiyle basıncın yükselmesi, dolayısıyla türbinden elde edilecek gücün azalması.
- Türbinden geçen buhar debisinin bir kısmını düşük özgül enerjiye sahip yoğuşmayan gazların oluşturması nedeniyle türbinden daha az güç elde edilmesi.
- Bu gazların kondenserde uzaklaştırmak için kullanılan gaz alma sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin ve işletme masraflarının yüksek olması.
- CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S gibi korozif gazların suda çözünmesi, buhar ve yoğuşuk ile temas ederek ekipman ve borularda korozyona sebep olmaları.
- CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S gazlarının atmosfere atılmasıyla yarattıkları çevresel etkiler.
- Türbinde kirlilik (fouling).

Kızıldere jeotermal akışkanında ciddi düzeyde bir kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) çökmesi problemi bulunmakta olup, özellikle santralin işletmeye alındığı ilk iki yılda, büyük basınç kayıplarına sebep olmuştur [13]. Sahadaki bu ciddi basınç kayıplarının asıl sebebi, sahayı basınç anlamında canlı tutan CO<sub>2</sub> açığa çıkmasıdır. Böylesi basınç kayıplarının önüne geçilmesi için gerekli olan geri basma (re-enjeksiyon) ne yazık ki yapılmamıştır. Kızıldere jeotermal santrali 1984 yılında işletmeye alınmasına rağmen geri basma (re-enjeksiyon) işlemi ancak 2001 yılında başlatılmıştır. Düşen üretimi giderebilmek için, daha sonraki yıllarda yeni kuyular delinmeye başlanmıştır [13].



## **5. KIZILDERE SAHASI İÇİN TASARLANACAK SANTRAL MODELLERİ SİSTEM ANALİZLERİ, OPTİMİZASYON PARAMETRELERİ**

Kızıldere jeotermal santrali için tasarlanan çevrim modellerine ait yüzey tesislerinin her biri ayrı bir sistem elemanı olarak ele alınmış ve EES programında bu analizler yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

EES kısaltması ile kullanılan “Engineering Equation Solver” programı basit anlamıyla mühendislik denklemlerinin, çoğunlukla termodinamik problemlerinin çözümü için geliştirilmiş bir denklem çözme programıdır. Aynı zamanda differansiyel denklemlerin ve kompleks değişkenler içeren denklemlerin çözümünü basitçe yapılmasını sağlar. Ayrıca, optimizasyon, lineer ve lineer olmayan regrasyon, grafik çizimi ve animasyon ekleme uygulamaları da yapılabilmektedir. Nümerik problem çözümleri ile EES yazılımındaki hesaplama yöntemleri arasında temelde iki fark bulunmaktadır. Bunlardan ilki, EES programında yapılan tanımlamalar ve denklem gruplarının çözümleri aynı anda yapılabilmektedir. Bu özellik kullanıcının işlemini basitleştirdiği gibi her zaman optimum verimle çalışan bir çözüm sağlamış olacaktır. İkinci önemli fark, EES yazılımı mühendislik hesaplamaları için oldukça yararlı olan birçok matematik ve termodinamik özellik fonksiyonlarının oluşturulabilmesini sağlar. Örneğin içerdiği buhar tabloları, termodinamik problemlerin çözümünde bilinen iki değişkene göre basit ve hızlı bir şekilde bilinmeyen termodinamik özelliklerin hesaplamalarını yapabilmektedir. Benzer özellik bir çok organik soğutucu, amonyak, metan, CO<sub>2</sub> ve farklı birçok akışkan ile, hava ve gazlar için de yapılabilmektedir. Ayrıca EES yazılımı, özellikle bir veya birden çok parametreye bağlı tasarım problemlerinin çözümü için de kullanışlı bir yazılımdır. Çözümleme kısmında içerdiği parametrik tablo ile istenen değişkenler üzerinde optimizasyon yapılabilmektedir. Tablodaki değişkenlere bağlı da grafik oluşturulabilmektedir.

## 5.1 Hesaplamalarda Kullanılacak Kabuller ve Optimizasyon Parametreleri

### 5.1.1 Kullanılan sabitler

Kızıldere jeotermal enerji sahasından elektrik üretimi için uygulanacak çevrim modellerini hesaplarken bazı değerler sabit tutulmuş ve her üç model için de aynı kabul edilmiştir. Modellerde kullanılan sabit değerler; rezervuar şartları, kuyubaşı basınç ve sıcaklık değerleri, kuyubaşı şartlarında jeotermal akışkanın buhar oranı, buhardaki yoğuşmayan gaz miktarı, toplam akış debisi, santralin kurulu olduğu Denizli iline ait hava sıcaklığı ve nemlilik değerleri, türbin, jeneratör, pompa ve soğutma kulesi fan verimlilikleri şeklinde sıralanmaktadır.

Çizelge 5.1’de hesaplamalarda kabul edilen sabit değerler belirtilmiştir.

**Çizelge 5.1:** Model uygulamalarında kullanılan sabitler [3,12,13,15]

	Birim	Değer
Rezervuar sıcaklığı	°C	200-240
Kuyubaşı basıncı	bar	14-16
Kuyubaşı sıcaklığı	°C	185-205
Toplam üretilen debi	ton/st	1155
Kuyubaşı buhar oranı	%	11
Buhardaki ağırlıkça yoğuşmayan gaz miktarı	%	15
Yoğuşmayan gazların tamamı		CO <sub>2</sub>
Buhar türbini verimi	%	80
Organik türbin verimi	%	85
Jeneratör verimi	%	95
Pompa verimi	%	80
Pompa motor verimi	%	90
Soğutma kulesi fan verimi	%	50
Denizli ili atmosfer basıncı	bar	0.959
Denizli ili aylık ortalama hava sıcaklığı	°C	16
Denizli ili aylık ortalama bağıl nem miktarı	%	61
Soğutma kulesinden çıkan hava nemliliği (bağıl)	%	90

### 5.1.2 Optimizasyon parametreleri

Uygulanan santral modellerin her birinde optimize edilen parametreler, öncelikle separatör basınçları, yoğuşturucu basınçları ve türbin çıkış basınçlarıdır. Ayrıca, bileşik (kombine) tasarlanmış çevrim modellerinde, yoğuşturucu sıcaklıkları ve basınçları birlikte optimize edilmiştir. Belirlenen optimum çalışma şartlarında, değişen akış debisine göre üretilebilecek net elektrik gücü hesaplamaları yapılmıştır.

## 5.2 Kızıldere Jeotermal Sahası İçin Dikkate Alınan Modellerde Uygulanacak Sistem Analizleri

### 5.2.1 Separatör analizi

Kızıldere sahası için en uygun jeotermal enerji santrali belirleme çalışmasında, tüm modellerde kullanılacak separatör, endüstride yaygın olarak kullanılan Webre tipi siklon ayırıştırıcılarıdır. Şekil 5.1’de basit bir şematik kesiti görünen olan bu 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.

Separatöre giren çift fazlı akışkanın buhar kalitesini hesaplamak için denklem 5.1 kullanılmaktadır [16].

$$x_1 = \frac{(h_1 - h_3)}{(h_2 - h_3)} \quad (5.1)$$

Burada  $x_1$  ; çift fazlı akışkan için buhar kalitesi (quality)

$h_1$  ; çift fazlı akışkanın entalpisi, {kJ/kg}

$h_2$  ; separatör basıncında doymuş buhar entalpisi, {kJ/kg}

$h_3$  ; separatör basıncında doymuş sıvı entalpisi, {kJ/kg}

ifade etmektedir.

Separatörde basınç düşümü ile flaş edilen çift fazlı akışkan doymuş sıvı ve buhar fazlarına ayrıldıktan sonra buhar akış debisi ve sıvı akış debileri Denklem 5.2 ve Denklem 5.3 kullanılarak hesaplanabilmektedir [16].

$$m_2 = x_1 m_1 \quad (5.2)$$

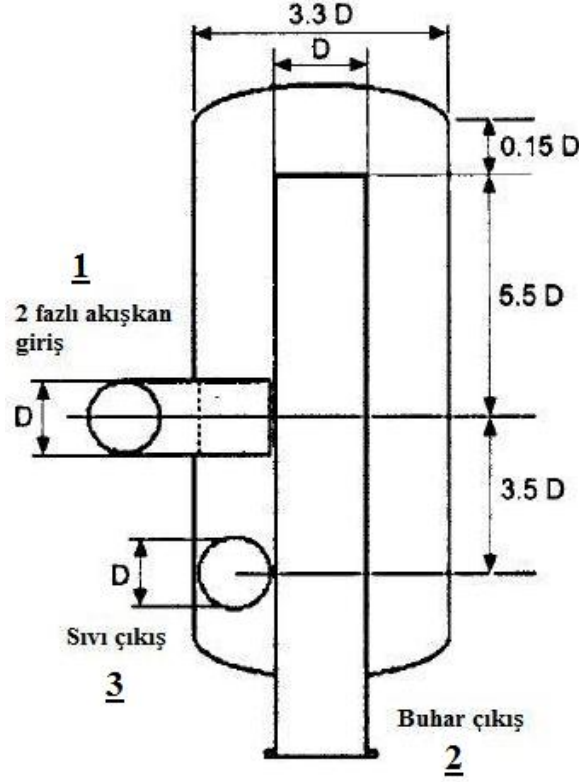
$$m_3 = (1 - x_1) m_1 \quad (5.3)$$

Burada  $m_1$  ; çift fazlı akışkan için kütleli akış debisi, {kg/s}

$m_2$  ; separatör çıkışı buharın kütleli debisi, {kg/s}

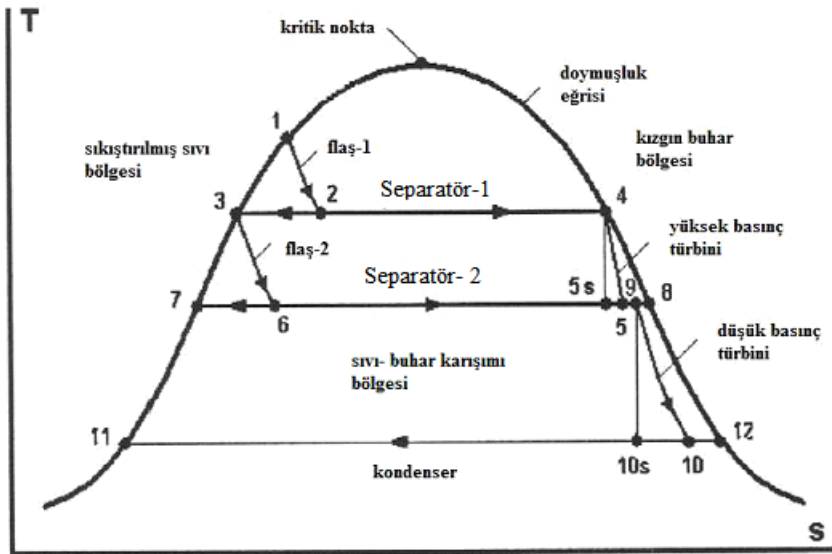
$m_3$  ; separatör çıkışı sıvının kütleli debisi, {kg/s}





Şekil 5.1 : Siklon tip ayrıştırıcının (separatörün) şematik kesiti [2].

Çift flaşlı çevrimler için separatör, türbin, kondenserde yapılacak hesaplamalarda temel alınacak termodinamik modelin genel şeması Şekil 5.2’de verilen T-s diagramında gösterilmektedir [2]. Şekil 5.2 ile belirtilene benzer şekilde uygulanan modele özgü çizilen T-s diagramları ise, ilerleyen bölümlerde belirtilecektir.

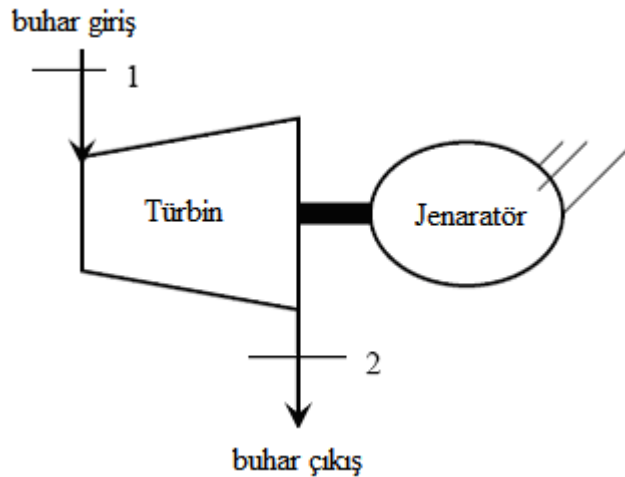


Şekil 5.2 : Çift flaşlı çevrim modeli için T-s diagramı [2].

Şekil 5.2’de 1 noktası ile ifade edilen başlangıç şartlarında birinci separatöre giren jeotermal akışkan buradaki basınç düşümü ile sıvı ve buhar fazlarına ayrışır. 4 noktasında doymuş buhar olarak birinci buhar türbinine giriş yapar, 3 noktasındaki sıvı fazdaki akışkan ikinci separatöre iletilir. Birinci separatörde ayrıştırılan buhar 4 noktasında birinci türbinde girerek 5 noktasına kadar genişletme enerjisi elde edilir. 6 noktasında ikinci separatöre giren jeotermal akışkan ise benzer şekilde iki faza ayrıştırılır. İkinci separatörde ayrışan buhar 8 noktasında düşük basınçlı türbine girer, 7 noktasında ayrışan sıvı ise re-enjeksiyon kuyusuna geri basılmaktadır. 9 noktasından 10 noktasına kadar ikinci türbinde genişletme enerjisi elde edilir. Türbin çıkışındaki çürük buhar yoğuşturucuya girerek tamamı sıvı faza geçene kadar sabit sıcaklık ile 10 noktasından 11 noktasına doğru ilerler. Şekil 5.2’de belirtilen 5s ve 10s noktaları her iki türbin için izantropik genişletme noktalarıdır. Fakat türbin verimlilik değerleri % 80 kabul edildiği için türbinlerdeki gerçek genişletme noktaları 5 ve 10 olarak ifade edilen noktalardır.

### 5.2.2 Türbin- jeneratör analizi

Genel termodinamik sistemlerde kabul edilen sürekli, adiyabatik şartı türbindeki genişletme prosesinde de geçerli olup, potansiyel ve kinetik enerji terimleri ihmal edilirse, türbinden elde edilecek güç Denklem 5.4’de belirtildiği şekilde hesaplanabilecektir. Şekil 5.3’de bir türbin-jeneratör şeması görülmektedir [17].



Şekil 5.3 : Çift flaşlı çevrim modeli için basit bir türbin-jeneratör şeması [17].

$$\dot{W}_t = m_2(h_1 - h_2) = m_2\eta_t(h_1 - h_{2s}) \quad (5.4)$$

Denklemden;  $\dot{W}_t$  ; türbinden elde edilecek güç, {kW}

$\eta_t$  ; buhar türbini izantropik verimlilik

$h_{2s}$  ; türbinde izantropik genişleme entalpisi, {kJ/kg}

$h_1$  ve  $h_2$  ; sırasıyla türbine giriş ve çıkış entalpileri, {kJ/kg}

olarak belirtilmektedir.

Türbinden elde edilebilecek maksimum iş değeri, izantropik ve adyabatik genişleme ile yani tersinir süreçte oluşacaktır. Şekil 5.2’de her iki türbin için belirtilen 4-5s ve 5-10s süreçleri türbinlerdeki izantropik genişleme süreçlerini ifade etmektedir. İzantropik türbin verimi Denklem 5.5’de belirtildiği şekilde hesaplanabilmektedir.

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2s})} \quad (5.5)$$

Türbinde üretilen bu güç ile jeneratörde elde edilecek elektrik enerjisi gücü hesaplaması Denklem 5.6’da belirtilmiştir.

$$\dot{W}_{te} = \eta_{gen} \dot{W}_t \quad (5.6)$$

Denklemde,  $\dot{W}_{te}$  ; jeneratörden elde edilecek elektrik enerjisini, {kW}

$\eta_{gen}$  ; jeneratör verimi

ifade etmektedir.

### 5.2.3 Yoğuşturucu (kondansör) analizi

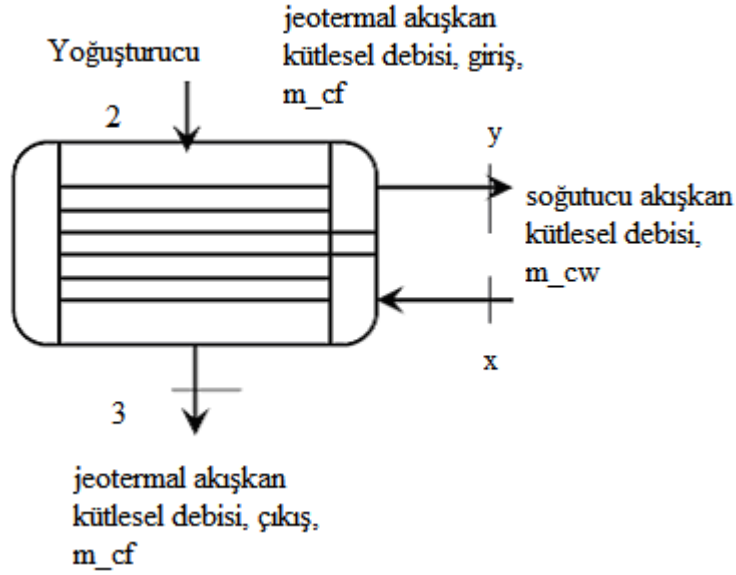
Şekil 5.4’de belirtilen yoğuşturucu çalışma prensibi genel olarak, hava ya da soğutucu akışkan olarak soğutma kulesinden tedarik edilen sıvı ile türbin çıkışındaki yüksek sıcaklıktaki akışkanın sıcaklığını düşürmek ve akışkanın tamamını yoğuşturmak esasına dayanmaktadır [12,18].

Termodinamiğin 1. yasasına göre enerji ve kütle korunum denklemleri yoğuşturucuya giren ve çıkan akışkanlara göre yazılırsa, Denklem 5.7, Denklem 5.8, Denklem 5.9 ve Denklem 5.10 elde edilmektedir [12,18].

$$Q = m_{cf}(h_2 - h_3) \quad (5.7)$$

$$m_{cw}(h_y - h_x) = m_{cf}(h_2 - h_3) \quad (5.8)$$

$$m_{cw} c (T_y - T_x) = m_{cf} (h_2 - h_3) \quad (5.9)$$



Şekil 5.4 : Yoğuşturucu çalışma mekanizması [17].

$$m_{cw} = \frac{m_{cf} (h_2 - h_3)}{c(T_y - T_x)} \quad (5.10)$$

Buna göre,  $Q$  ; yoğuşturucuda takas edilen ısı miktarı, {kJ}

$m_{cw}$  ; soğutucu akışkan kütleli debisi, {kg/sn}

$m_{cf}$  ; sistemdeki akışkanın kütleli debisi, {kg/sn}

$h_2$  ve  $h_3$ ; sırasıyla yoğuşturucuya giren- çıkan sistem akışkan entalpileri, {kJ/kg}

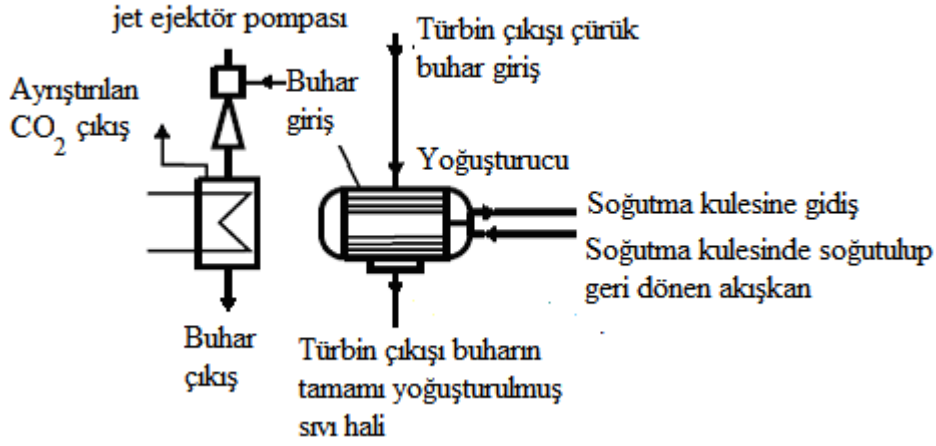
$h_x$  ve  $h_y$ ; sırasıyla yoğuşturucuya giren- çıkan soğutucu akışkan entalpileri, {kJ/kg}

$T_x$  ve  $T_y$ ; sırasıyla yoğuşturucuya giren- çıkan soğutucu akışkan sıcaklıkları, {°C} ifade edilir.

#### 5.2.4 Akışkan içindeki yoğuşmayan gazları uzaklaştırma- jet ejektör pompası sistemi analizi

Kondanserde biriken yoğuşmayan gazları, türbinden elde edilecek elektrik gücünde kayıp yaşanmaması için ayırmak gerekmektedir. Kızıldere jeotermal akışkanı da yüksek oranda yoğuşmayan gaz olan CO<sub>2</sub> içerdiğinden tasarlanan modelde, kondanserden gazın tamamını ayırıştırmak için jet-ejektör kullanılmıştır. Şekil 5.5’de

şeması görünen jet ejektörde CO<sub>2</sub> ayırıştırmak için elektrik pompası kullanıldığından, pompa için gerekli olan elektrik gücü Denklem 5.11'e göre hesaplanmaktadır [16].



Şekil 5.5 : Jet ejektör pompası şeması [2].

$$P_{jet} = \left( \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \frac{m_g R T_{cond}}{\eta_{jetpump} M_{gas}} \left[ \left( \frac{P_{cond}}{P_{atm}} \right)^{1-(1/\gamma)} - 1 \right] \quad (5.11)$$

Burada;  $P_{jet}$  ; jet ejektör gücü, {kW}

$\gamma$  ;  $C_{p, gaz} / C_{v, gaz}$

$C_{p, gaz}$  ; gazın sabit basınçta özgül ısısı, {kJ/ kg-K}

$C_{v, gaz}$  ; gazın sabit hacimde özgül ısısı, {kJ/ kg-K}

$m_g$  ; gazın kütesel akış debisi, {kg/sn}

$R$  ; evrensel gaz sabiti, 8.314 {kJ/kmol K}

$T_{cond}$  ; yoğuşuk (kondens) sıcaklığı, {K}

$M_{gas}$  ; yoğuşmayan gazın moleküler kütlesi, {kg/kmol}

$P_{atm}$  ; atmosfer basıncı, {bar}

$P_{cond}$  ; yoğuşuk (kondens) basıncı, {bar}

$\eta_{jetpump}$  ; ejektör pompa verimi

olarak tanımlanmıştır [16]. Jet- ejektör çalıştırmak için motorda harcanan elektrik gücü ise; Denklem 5.12'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{motorjet} = P_{jet} / \eta_{motor - jetpump} \quad (5.12)$$

### 5.2.5 Soğutma kulesi analizi

Soğutma kulesi, kondanserde yoğuşan akışkanın sıcaklığını azaltmak için kullanılan bir sistemdir. Hava ve su soğutmalı tipleri bulunmaktadır. Hazırlanan bu çalışmada Şekil 5.6’de görüldüğü gibi hava soğutmalı tip soğutma kulesi sistemi kullanılmıştır.

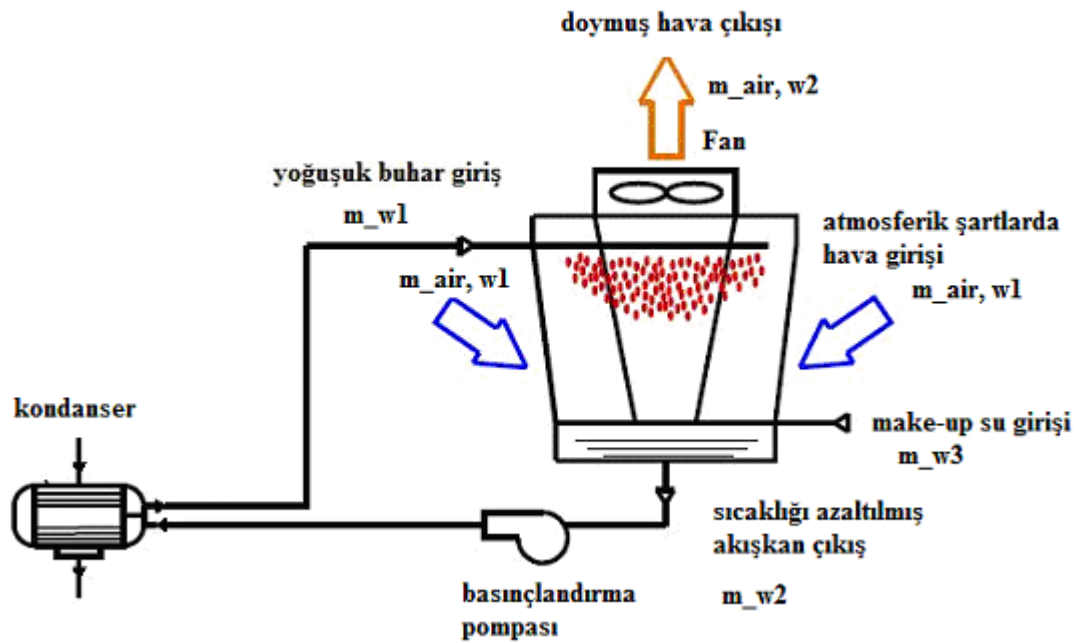
Soğutma kulesi analizinde termodinamiğin 1. yasası olan enerji ve kütle korunumu ilkelerinden yararlanır. Buna göre, yoğuşuk halde kondanserden soğutma kulesine gönderilen akışkanın kütleli debisi, soğutma işlemi sonrasında kondansere geri döndüğünde herhangi bir kütle ve enerji kaybı olmayacağı kabul edilmiştir.

$$m_{w1} = m_{w2} \quad (5.13)$$

Yoğuşuk içindeki sıvı ve buhar kısımların kütleli debilerini ayrı ayrı belirtmek gerekirse, kütleli debi Denklem 5.14’deki gibi yazılabilmektedir [18].

$$m_{bw1} + m_{v1} + m_{w3} = m_{bw2} + m_{v2} \quad (5.14)$$

Denklem 5.13 Denklem 5.14’den çıkartılırsa,



Şekil 5.6 : Soğutma kulesi şeması [2].

$$m_{w3} = m_{w2} - m_{w1} \quad (5.15)$$

havanın spesifik nemlilik değerleriyle birlikte değerlendirilecek olursa,

$$m_{w3} = m_{air}(w_2 - w_1) \quad (5.16)$$

şeklinde yazılmaktadır.

Enerji denge denklemi ise;

$$m_{air}(h_{a1} + w_1 h_{v1}) + m_{w1} h_{w1} + m_{w3} h_{w3} = m_{air}(h_{a2} + w_2 h_{v2}) + m_{w2} h_{w2} \quad (5.17)$$

şeklinde yazılmaktadır.

Denklemlere göre;

$m_{w1}$  ve  $m_{w2}$  ; soğutma kulesine giren- çıkan akışkanın sıvı kütleli debisi, {kg/sn}

$m_{w2}$  ve  $m_{w1}$  ; soğutma kulesine giren- çıkan akışkanın buhar kütleli debisi, {kg/sn}

$m_{w3}$  ; yardımcı akışkan (make-up suyu) kütleli debisi, {kg/sn}

$w_1$  ve  $w_2$  ; soğutma kulesine giren- çıkan ıslak hava nemliliği, {%}

$h_{a1}$  ve  $h_{a2}$  ; soğutma kulesine giren- çıkan ıslak hava entalpileri, {kJ/kg}

$h_{w1}$  ve  $h_{w2}$  ; soğutma kulesine giren- çıkan akışkanın entalpileri {kJ/kg}

$h_{w3}$  ; yardımcı akışkan (make-up suyu) entalpisi, {kJ/kg}

şeklinde ifade edilmektedir [17].

Soğutma için gerekli olan toplam havanın kütleli debisi Denklem 5.18'de gibi hesaplanmıştır [18].

$$m_{total} = m_{air} + m_{v1} = m_{air}(1 + w_1) \quad (5.18)$$

Soğutma kulesindeki fanda harcanan güç aşağıdaki denklemler ile belirtilmiştir [15].

$$P_{fan} = \frac{V_{air} \Delta P}{\eta_{fan}} \quad (5.19)$$

$$V_{air} = \frac{m_{air}}{\rho_{air,2}} \quad (5.20)$$

$$P_{motor, fan} = \frac{P_{fan}}{\eta_{motor, fan}} \quad (5.21)$$

Buna göre;  $P_{fan}$  ; Fanda harcanan güç, {kW}

$V_{air}$  ; hacimsel hava debisi, {m<sup>3</sup>/sn}

$\rho_{air,2}$  ; soğutma kulesinden çıkan havanın yoğunluğu, {kg/m<sup>3</sup>}

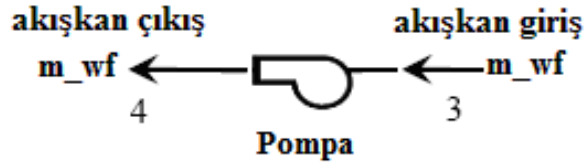
$\Delta P$  ; basınç farkı, {kPa}

$\eta_{fan}$  ve  $\eta_{motor, fan}$  ; fan ve fanı çalıştıran motorun verimlilikleri, {%}

olarak ifade edilmiştir.

### 5.2.6 Pompa analizi

Soğutma kulesinden çıkan akışkanın kondansere tekrar basınçlandırarak gönderilmesini sağlamak amacıyla pompa kullanılmaktadır. Şekil 5.7’de şeması görünen pompadaki enerji kaybı Denklem 5.22’de belirtilmiştir [17].



Şekil 5.7 : Pompa şeması [17].

$$\dot{W}_p = m_{wf}(h_4 - h_3) = m_{wf}(h_{4s} - h_3)/\eta_p \quad (5.22)$$

Denklemde,  $\dot{W}_p$  ; pompa için harcanan güç, {kW}

$m_{wf}$  ; pompada sıkıştırılan akışkanın kütleli debisi, {kg/s}

$h_3$  ve  $h_4$  ; pompaya giren ve çıkan akışkanın entalpileri, {kJ/kg}

$h_{4s}$  ; ideal şartlarda pompa çıkışı akışkan entalpisi, {kJ/kg}

$\eta_p$  ; izantropik pompa verimi, {%} olarak ifade edilmiştir.

İzantropik pompa verimi Denklem 5.23’deki gibi hesaplanmaktadır [16].

$$\eta_p = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} \quad (5.23)$$

Pompada harcanan elektrik gücü ise, Denklem 5.24’de belirtildiği şekilde hesaplanmıştır [15].

$$\dot{W}_{pe} = \frac{\dot{W}_p}{\eta_{motor, pump}} \quad (5.24)$$

burada,  $\eta_{motor, pump}$  ; pompa motorunun verimini (%) ifade etmektedir.



Kızıldere jeotermal enerji santrali için alternatif olarak çalışılan çevrim modellerinden elde edilecek net güç, çevrim verimliliği ve kaynağın kullanım verimliliği hesaplamaları da Denklem 5.25'den itibaren aşağıda belirtilmiştir [16].

Çevrimden elde edilen net güç;

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{t1} + \dot{W}_{t2} - P_{motorjet} - P_{motor_fan} - \dot{W}_{pe} \quad (5.25)$$

Çevrimden elde edilen net elektrik gücü;

$$\dot{W}_{net\_elect} = \dot{W}_{te1} + \dot{W}_{te2} - P_{motorjet} - P_{motor_fan} - \dot{W}_{pe} \quad (5.26)$$

Uygulanan çevrim modeller için santral verimliliği;

$$\eta^c = \frac{\dot{W}_{net}}{m_1 C_{gf} (T_{gf} - T_{d0})} \quad (5.27)$$

Denklem 5.27'e göre,

$C_{gf}$  ; akışkanın kuyubaşı şartlarındaki özgül ısı değeri, {kJ/kg-K}

$T_{gf}$  ; rezervuar şartlarındaki akışkan sıcaklığı, {K}

$T_{d0}$  ; santralin kurulu olduğu bölgenin ortalama sıcaklığı, {K}

olarak ifade edilmektedir.

Uygulanan çevrim modeline göre, jeotermal kaynağın kullanım verimliliği;

$$\eta^u = \frac{\dot{W}_{net}}{m_1 C_{gf} [T_{gf} - T_{d0} - T_0 \ln (T_{gf} / T_{d0})]} \quad (5.28)$$

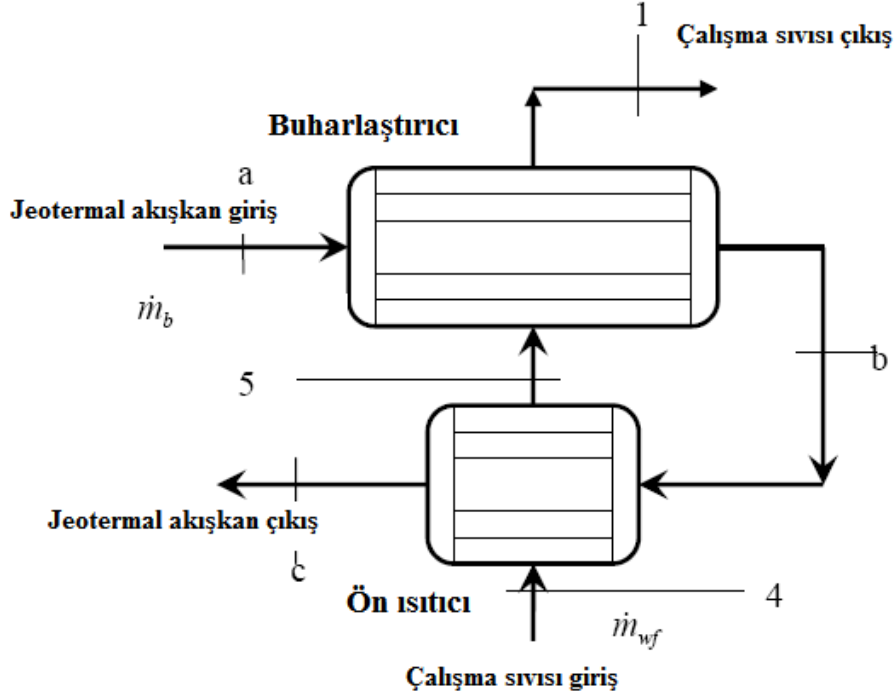
Denklem 5.28'de kullanılan  $T_0$  ; jeotermal akışkanın rezervuar sıcaklığıdır, {°C}

## 5.2.7 Binary Çevrimde Kullanılan Isı Değiştiriciler; Buharlaştırıcı ve Ön Isıtıcı

### Analizi

Isı değiştiriciler, binary çevrim modellerinin en önemli sistem elemanlarıdır. Şekil 5.8'de genel görünümü verilen 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 değiştirciler 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 [17]. Buna göre enerji ve kütle korunumu Denklem 5.29 ve Denklem 5.30’da belirtildiği şekilde yazılmaktadır.



**şekil 5.8 :** Bileşik evrim (Bottoming Binary) modeli için ısı değiştirci şeması [17].

$$\dot{m}_b (h_a - h_b) = \dot{m}_{wf} (h_1 - h_4) \quad (5.29)$$

Jeotermal akışkan, az miktarda çözünmemiş gaz veya katı madde içeriyorsa, Denklem 5.30’daki şekilde geliştirilmiştir [17].

$$\dot{m}_b \bar{c}_b (T_a - T_c) = \dot{m}_{wf} (h_1 - h_4) \quad (5.30)$$

Denklem 5.29 ve Denklem 5.30’a göre,

$\dot{m}_b$  ; jeotermal akışkanın kütlesel debisi, {kg/sn}

$\dot{m}_{wf}$  ; çalışma sıvısının kütlesel debisi, {kg/sn}

$h_a$  ve  $h_b$  ; jeotermal akışkanın buharlaştırıcıya giriş ve çıkış entalpileri, {kJ/kg}

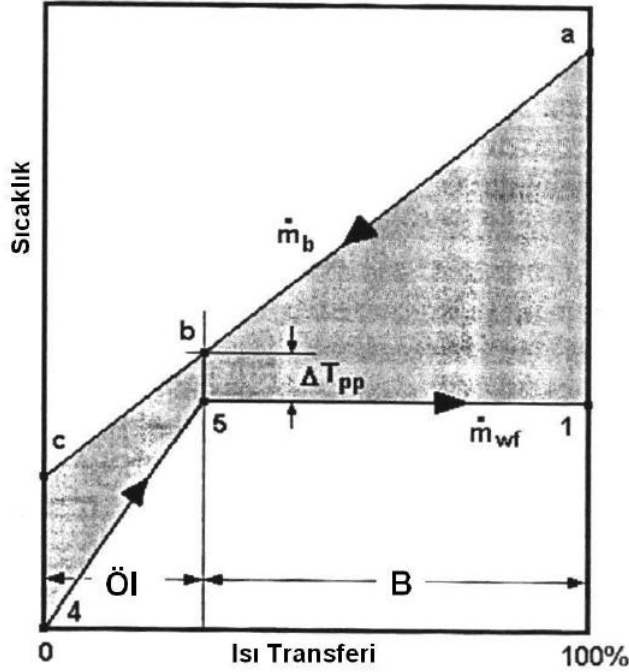
$h_1$  ve  $h_4$  ; çalışma sıvısının ısı değiştircilere giriş ve çıkış entalpileri, {kJ/kg}

$c_b$  ; jeotermal akışkanın ortalama özgül ısı, {kJ/kg-K}

$T_a$  ve  $T_c$  ; jeotermal akışkanın ısı değiştiricilere giriş ve çıkış sıcaklığı, {K}

olarak ifade edilmektedir.

Buharlaştırıcı ve ön ısıtıcıdaki ısı transferi Şekil 5.9’de gösterilmiştir. Buna göre, şekildeki yatay eksen, jeotermal akışkandan çalışma akışkanına aktarılan ısı enerjisinin yüzde değerini göstermektedir.



**Şekil 5.9 :** Isı değiştiricilerde jeotermal akışkan ile çalışma akışkanı arasında gerçekleşen ısı transferi [17].

Ön ısıtıcıdaki jeotermal akışkan, kaynama noktasına kadar (5 noktası) ısıtılmakta olup, 5-1 arasında ise buharlaştırıcıda tamamen buharlaşana kadar mevcut ısıyı çalışma akışkanına aktarımı gerçekleşmektedir. Isı transferi sırasında, jeotermal akışkan ile çalışma akışkanı sıcaklıklarının birbirine en yakın olduğu nokta dirsek noktası sıcaklığı (pinch-point,  $\Delta T_{pp}$ ) olarak ifade edilmektedir [2]. Dirsek noktası, ısı değiştiricinin imalatına göre belirli olan bir sıcaklık değeridir [17].

$$\text{Ön ısıtıcı için: } \dot{m}_b c_b (T_b - T_c) = \dot{m}_{wf} (h_5 - h_4) \quad (5.31)$$

$$\text{Buharlaştırıcı için: } \dot{m}_b c_b (T_a - T_b) = \dot{m}_{wf} (h_1 - h_5) \quad (5.32)$$

Kızıldere için tasarlanan bottoming binary santral çevrim modelinde, çalışma akışkanı olarak, n-pentan kullanılmıştır.

Kullanılan kombine çevrim modellerinde santralde üretilecek net elektrik gücü, buhar çevriminde elde edilen net güç ve binary çevrimden elde edilecek net gücün toplamı şeklinde olacaktır. Çevrimin verimi ve jeotermal kaynağın kullanım verimlilikleri ise, Denklem 5.27 ve Denklem 5.28 ile hesaplanabilmektedir.



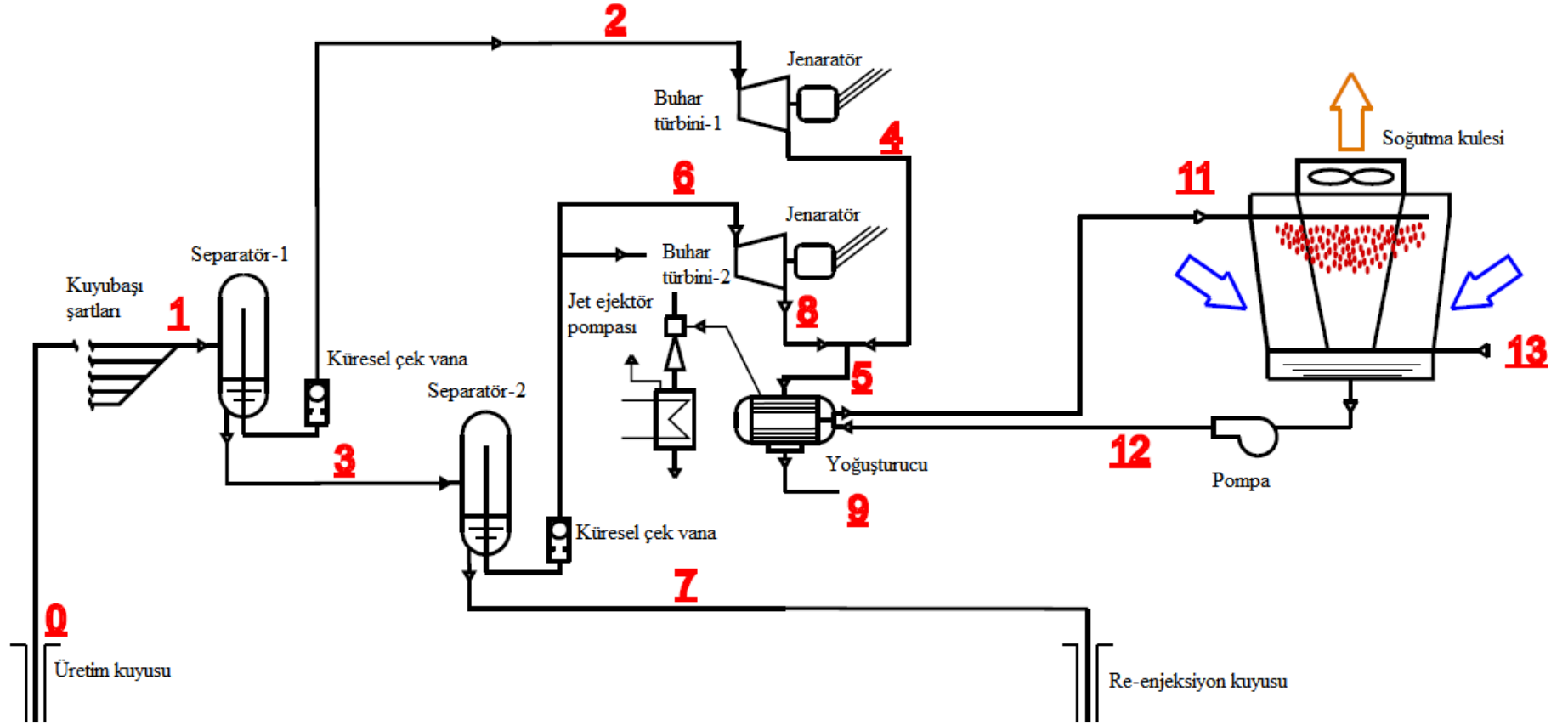
## **6. KIZILDERE JEOTERMAL SAHASINDAN ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN TASARLANAN ÇEVİRİM MODELİ-1**

Kızıldere jeotermal santrali 1984 yılında işletilmeye başlanmasından bugüne kadar geçen 26 sene süresince, çoğu işletme kaynaklı sebeplerden, mevcut kuyuların üretimi ciddi anlamda azalmış bir kaynaktır. Bu sebepten, öncelikli olarak 2001 yılında sahada re-enjeksiyon operasyonuna başlanmıştır. Halihazırda yeni delinecek kuyular için rezerv değerlendirmeleri de devam etmektedir. Türkiye'nin ilk jeotermal kaynaklı enerji santrali olma özelliği taşıyan Kızıldere jeotermal santrali, mevcut kuyu bilgileri ve rezerv özelliklerine göre farklı tip çevrim modellerinde değerlendirilmiştir.

Jeotermal santraller, sadece santral olarak değil, bağlı oldukları jeotermal rezervuarlarla da beraber değerlendirilmesi gerekmektedir [13]. Bu yüzden, hazırlanan bu çalışmada Kızıldere jeotermal rezervuar yapısına en uygun ve günümüz jeotermal santral teknolojisini kullanarak uygulanabilecek çevrim modelleri değerlendirilmiştir.

Kızıldere jeotermal santrali için mevcut üretim kuyu bilgilerini kullanarak, farklı üç santral modeli EES programında değerlendirilmiştir. Bu modellerden biri çift flaş çevrim modeli, ikincisi, tek flaşlı sistem ile binary çevrimin entegre edildiği kombine (bottoming binary) çevrim modeli, üçüncüsü ise, çift flaş ile binary çevrimin entegre edildiği tip bottoming binary çevrim olarak ifade edilen modeldir. Seçilen parametreler ile kurulan modeller üzerinde üretilen net elektrik güçleri ve optimum çalışma şartları tespit edilmiştir.

Kızıldere jeotermal sahasından elektrik üretimi için tasarlanan santral çevrim modelinden ilki çift flaş çevrim modelidir. Şekil 6.1'de uygulanan modelin yüzey tesisleri ve santral akış şeması gösterilmektedir. Buna göre, çift fazlı jeotermal akışkan 1 noktasında, ilk separatörde sıvı ve buhar kısmı ayrıştıktan sonra, buhar 2 yolunu takip ederek yüksek basınç türbininde genişletirilip jeneratörde elektrik üretimi gerçekleştirilir.



Şekil 6.1 : Çift flaş modeli akış diagramı.

Birincil separatörden ayrılan sıvı kısım ise ikincil separatöre aktarılır (3 noktası). İkincil separatörden ayrılan buhar 6 noktasında düşük basınçlı türbinde genişerek elektrik üretimi sağlanır.

Her iki türbinde genişen buhar 5 noktasında birleşerek tek bir kondansere bağlanır. Kondansörde tamamı yoğuşturulup 11 yolunu izleyerek soğutma kulesine giriş yapacaktır. Soğutma kulesinde sıcaklığı azaltılan akışkan 12 noktasında pompa ile basınçlandırılarak yoğuşturucuya geri gönderilir. 13 noktası ise soğutma kulesi için gereken yardımcı akışkan (make-up water) giriş noktasıdır. İkinci separatör sıvı çıkışı 7 noktasında re-enjeksiyon kuyusuna geri basılacaktır. Akışkan içinde bulunan yoğuşmayan gazların ayrışması için kondanserde jet-ejektör kullanılmıştır. Şekil 6.1'de ifade edilen her bir çözüm adımı için hesaplamalar EES (Engineering Equation Solver) programında çözümlenmiştir. Kızıldere jeotermal sahası için uygulanan çift flaşlı çevrim modeli hesaplamalarında, separatör analizi, türbin-jeneratör analizi, kondanser-soğutma kulesi analizleri aşağıda bahsedileceği şekilde uygulanmış olup, EES programında çözümlenmiştir.

### **6.1 Çift Flaşlı Çevrim Modeli Çalışması, Optimum Koşulların Tayini**

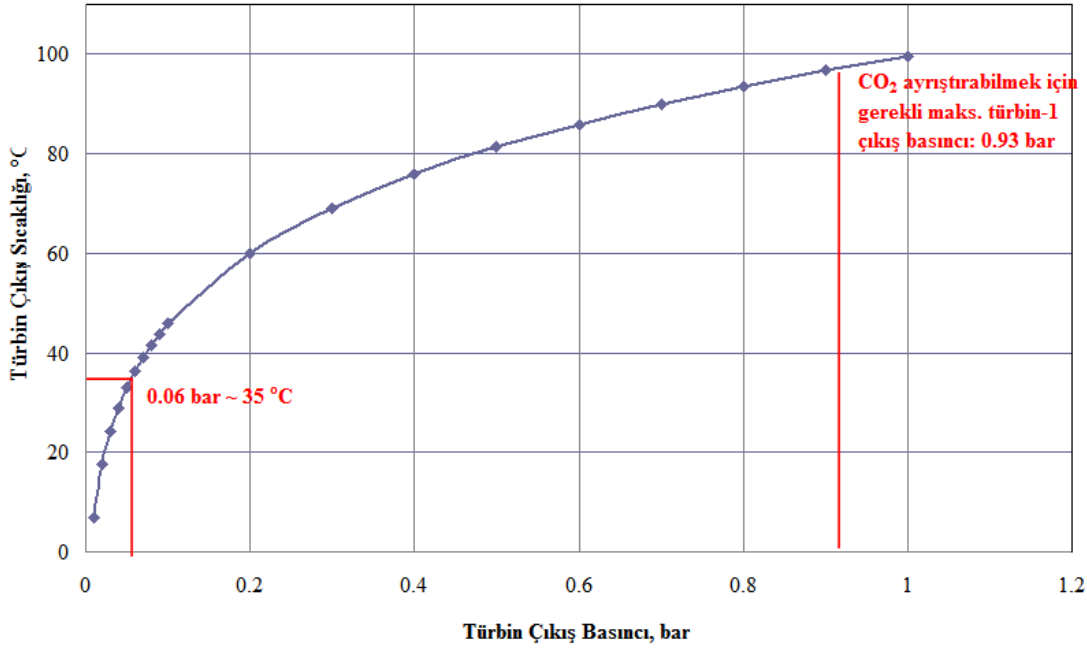
Kızıldere jeotermal sahası için EES programında oluşturulan çift flaşlı santral çevrim modeli hesaplamalarında kuyubaşı sıcaklığı 200°C ve kuyubaşı basıncı 16 bar kabul edilmiştir. Modele göre, her iki türbinin bir kondansöre bağlı oluşturulmasının nedeni, türbin çıkışlarında atmosferik basınçların altına düşebilmeyi sağlayacak vakum basınçlarının elde edilebilmesi ve böylelikle buhar türbinlerinden daha fazla enerji elde edilmek istenmesidir. Yapılan hesaplamalarda, kondanser basınçlarına göre türbin çıkış sıcaklıkları hesaplanmıştır. Soğutma kulesinden gelen akışkanın kondansöre giriş ve çıkış sıcaklık değerleri mevcut santraldeki gibi sırasıyla 28°C ve 39°C olarak seçildiğinden, oluşturulan modelde de türbin çıkış sıcaklıklarının etkisi araştırılmıştır.

#### **6.1.1 Türbin çıkış basıncı optimizasyonu**

Türbin çıkış basınç değerinin diğer bir deyişle yoğuşturucu basıncının tayini ile ilgili bir diğer kısıtlama, yoğuşturucuda bulunan jet ejektör sisteminin çalışmasını sağlayan basınç aralığında değerlerin seçilebilmesidir. CO<sub>2</sub> ayırıştırma için kullanılan jet ejektör pompasının işletme açısından sorunsuz çalışabilmesi için kondansör basıncının 0.06 bar basınç değerinin altına inmemesi ve 0.93 bar basınç



değerinin üzerine çıkmaması gerektiği görülmüştür. Bununla birlikte 0.06 bar basınç değeri türbin çıkış sıcaklığının yaklaşık 35 °C olmasını sağlamaktadır.



**Şekil 6.2 :** Buhar türbini çıkış sıcaklığı değişimi.

Şekil 6.2 değişen türbin çıkış basınçlarına göre türbin çıkış sıcaklık değerlerindeki değişimi göstermektedir. Şekle göre, artan türbin çıkış basınçları, çıkış sıcaklıklarının da artmasına neden olmaktadır. Soğutma sisteminde istenilen verimin minimum güç harcamayarak yapılabilmesi için türbin çıkış sıcaklık değerinin 35 °C olmasını sağlayan kondanser basıncının 0.06 bar olması gerektiği tespit edilmiştir. Türbin çıkış basıncı yani bağlı olduğu kondanser basıncı ne kadar yüksek olursa, türbin çıkış sıcaklığı o kadar fazla olacaktır. Türbin çıkışından yüksek sıcaklık ile çıkan buharı yoğuşturmak için kondanser ve soğutma kulesi sisteminde daha fazla havaya ihtiyaç duyulacak, dolayısıyla soğutma kulesinde daha yüksek fan güçleri harcanacaktır. Bu yüzden, soğutma kulesine giriş sıcaklık değerine yakın ve işletme anlamında sorun yaratmayacak sıcaklık değeri olan 35 °C sıcaklık optimum türbin çıkış değeri olarak, bu sıcaklığı sağlayan 0.06 bar basınç değeri ise optimum türbin çıkış basıncı, optimum kondanser basıncı olacaktır.

Devam eden bölümlerde geçen diğer santral modellerinde de buhar türbini için aynı sonuçlar kullanılacaktır.

Türbin çıkış sıcaklıklarının ve basınçlarının belirlenmesinden sonra, her iki separatör basıncı optimize edilmiştir.

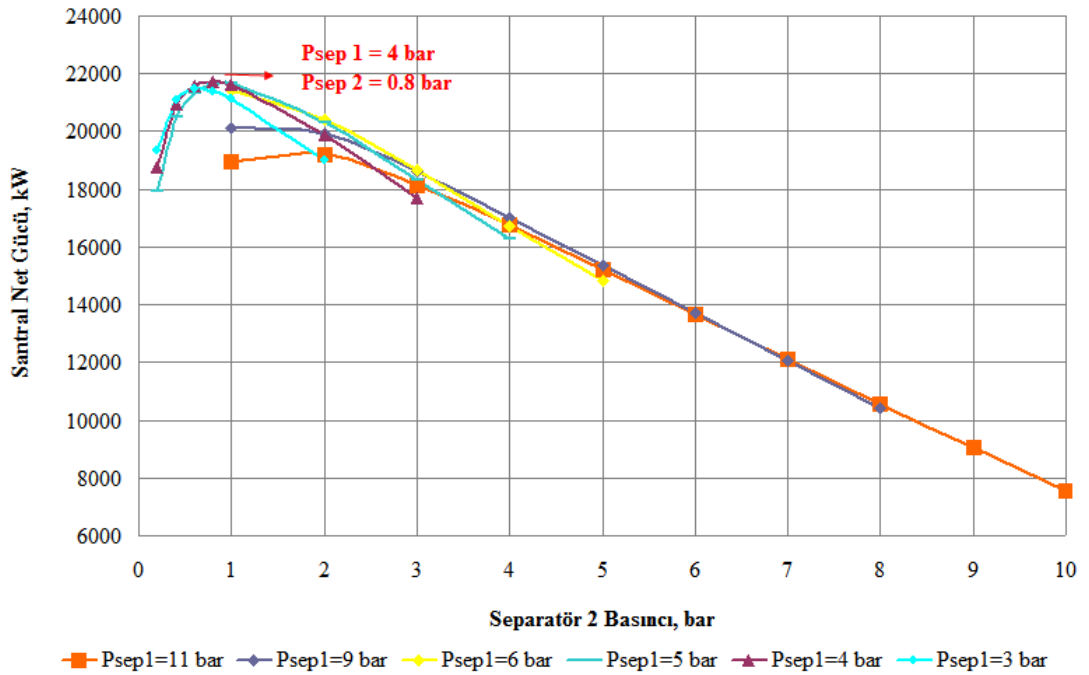
### 6.1.2 Separatör basıncı optimizasyonu

Hazırlanan çalışmada, separatör basınçları üzerinde optimizasyon yapılmış ve belirlenen separatör basınçlarında santralden elde edilen net elektrik gücü ve verimliliklerin nasıl değiştiği karşılaştırılmıştır.

Dolayısıyla, santralden elde edilebilecek maksimum net elektrik gücünü sağlayan basınç değeri, optimum separatör basıncı olarak tayin edilecektir.

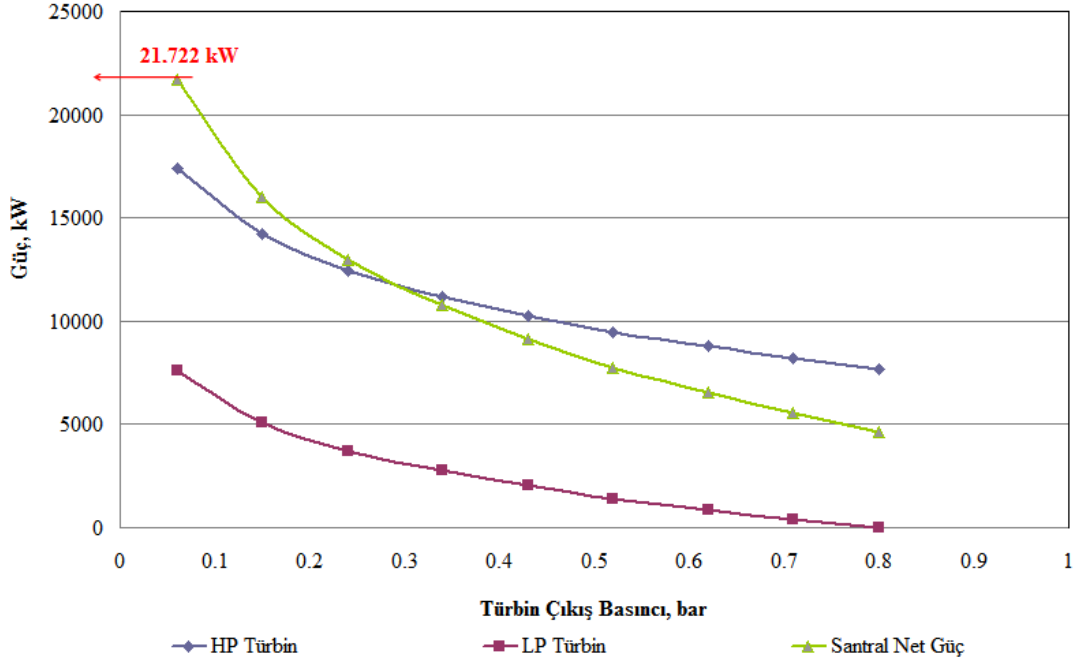
Çift flaş çevrim modelinde her iki separatörün basınç değerinin optimuma yaklaşması, her ikisi için de belirli basınç aralıklarında sonuçları karşılaştırarak sağlanmıştır.

Kuyubaşı basıncı 16 bar olduğundan ilk separatör basıncı 15 bar- 2 bar aralığında, ilk separatör basıncına bağlı olarak da ikinci separatör basıncı 14- 0.2 bar aralığında seçilerek santralden elde edilecek net güçler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, birinci separatör basıncının 4 bar, ikinci separatör basıncının ise 0.8 bar olduğu çözüm bizi en yüksek santral gücüne ulaştırmaktadır. Dolayısı ile, birinci separatör basıncı optimum değeri 4 bar, ikinci separatör basıncı optimum değeri ise 0.8 bar olarak tespit edilmiştir. Şekil 6.3'de her iki separatör basınçlarının değişen değerlerine göre santralden elde edilecek net güç değerlerindeki değişim gösterilmektedir.



Şekil 6.3 : Separatör basıncı optimizasyonu.

Şekil 6.4'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 21722 kW elde edilecektir.



Şekil 6.4 : Türbin çıkış basıncına göre değişen güçler.

Şekle bakıldığında açık şekilde görülmektedir ki, her iki türbin çıkış basınçları azalırken, türbinlerden elde edilecek net güç değerleri artış göstermektedir. Türbin çıkış basınç değerleri optimize edilen 0.06 bar ile 0.8 bar aralığında seçilmiş ve buna göre türbin çıkış güçleri grafiğe işlenmiştir. Birincil türbinde daha fazla basınç farkı yaratıldığı için ikinci türbine göre daha fazla enerji üretmektedir. Santral net gücündeki değişim ise benzer şekilde her iki türbin çıkış basınçları arttıkça üstsel bir azalış göstermektedir. Net santral gücünü maksimum yapan optimum türbin çıkış basıncı seçilen minimum basınç değeri olan 0.06 bar olarak hesaplanmıştır.

Yapılan optimizasyon sonuçlarının tamamı değerlendirildiğinde modelin sonuçlarını aşağıda belirtildiği şekilde özetlemek mümkün olacaktır.

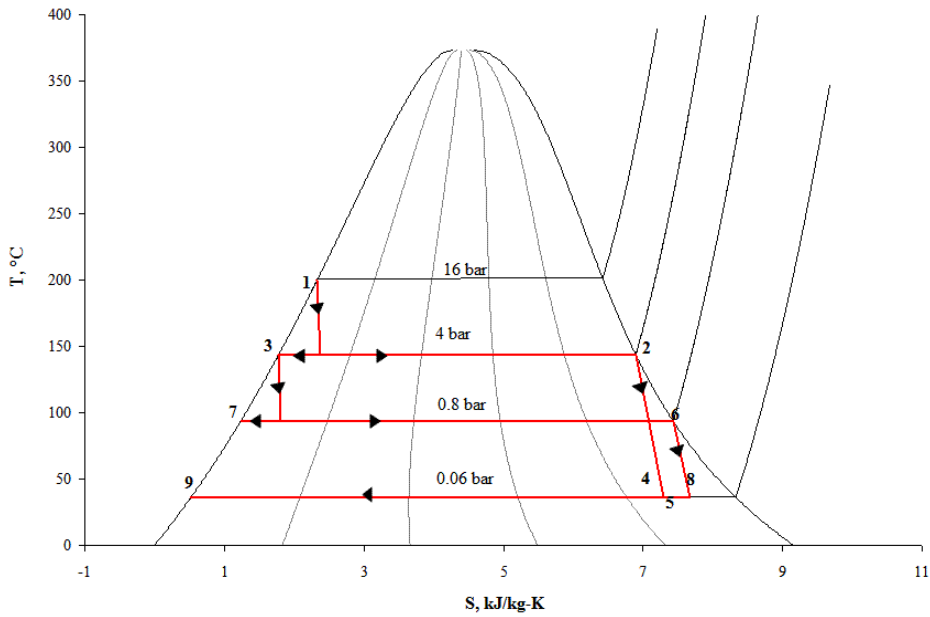
Çift fazlı jeotermal akışkan kuyubasında 16 bar basınç ve 200 °C sıcaklık ile ilk siklon tip separatöre girer ve optimum basınç değeri olan 4 bar basınç ve 143.6°C sıcaklık ile sıvı ve buhar fazına ayrıştırılır.

Jeotermal akışkanın toplam üretim debisi ortalama 1155 ton/st (321 kg/sn) olarak alınmıştır. Birincil separatörde 4 bar basınç değerinde ayrıştırılan buhar, 37.2 kg/sn kütleli debi ve 143.6°C sıcaklık ile ilk türbine girer. Buhar, birinci türbinde 0.06 bar basınçta genişletilerek 17408 kWe elektrik gücü elde edilir.

İlk separatörde ayrıştırılan ve sıcaklığı 143.6°C olan akışkan ikinci separatöre aktarılır. İkincil separatörde 0.8 bar basınçta ayrışan buhar düşük basınç türbininde 0.06 bar basınçta genişletilerek 7591 kWe elektrik enerjisi elde edilmektedir.

Şekil 6.1’de belirtilen 5 noktasında, her iki türbin çıkışı birleştirilerek yoğuşturucu ve soğutma kulesi sistemine bağlanmıştır. Kullanılan yoğuşturucuya bağlı jet ejektör sistemi ile buhar içinde yoğuşmayan CO<sub>2</sub> gazı ayrıştırılmaktadır. 9.58 kg/sn CO<sub>2</sub> gazı 348 kWe pompa gücü ile jet ejektörde tamamen ayrılmaktadır.

Elde edilen optimum şartlara göre modele ait termodinamik çevrimin sıcaklık-entropi (T-s) diagramı Şekil 6.5’de gösterilmektedir.



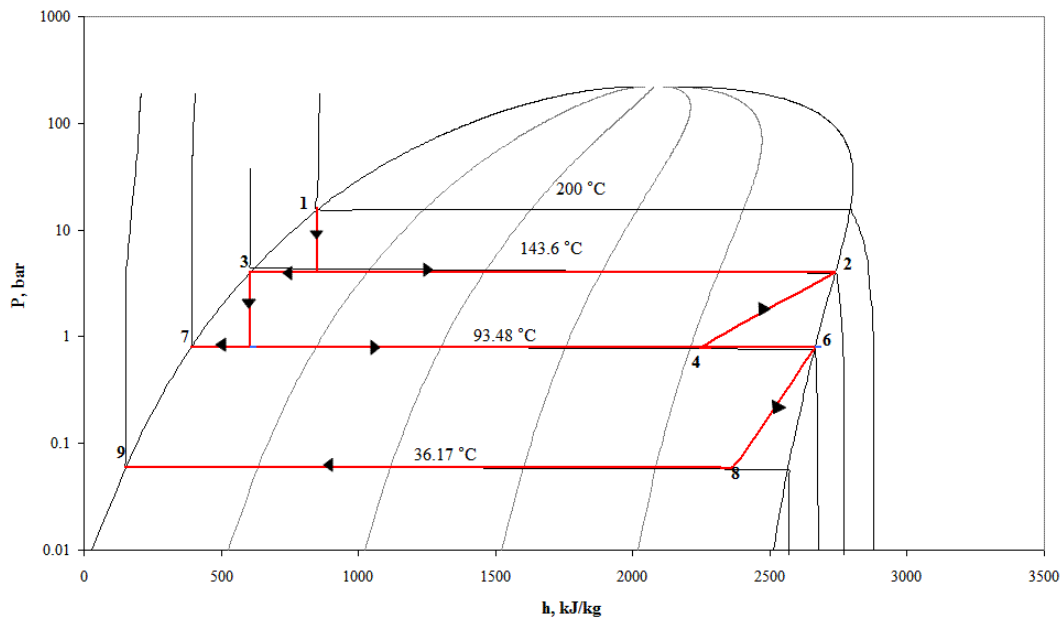
**Şekil 6.5 :** Çift flaş modeline ait T-s diagramı.

Santral çevrim modelinde kullanılan soğutma sistemi, hava soğutmalı soğutma kulesi ve yoğuşturucudan oluşmaktadır. Türbinlerden çıkan akışkan 0.06 bar basınçlı yoğuşturucu ile tamamen yoğuşturularak 39 °C sıcaklıklı akışkan soğutma kulesine girer. Soğutma kulesinde sıcaklığı 28 °C’e kadar soğutularak kondansöre tekrar giriş

yapmaktadır. % 61 nemlilikle soğutma kulesine giren 1253 kg/sn hava, jeotermal akışkan sıcaklığını düşürerek, % 90 nemlilik ve 36 °C sıcaklık ile kuleden dışarı çıkacaktır. Soğutma kulesindeki fan için 2576 kWe ve kuleden çıkan akışkanın kondansöre dönüşü sırasında kullanılan pompa için de 354 kWe elektrik gücü harcanmaktadır.

İkincil separatörde ayrılan sıvı kısım re-enjeksiyon kuyusuna geri basılarak sistem tamamlanmaktadır.

Uygulanan bu modele ait basınç-entalpi (P-h) diagramı Şekil 6.6'da gösterilmektedir.



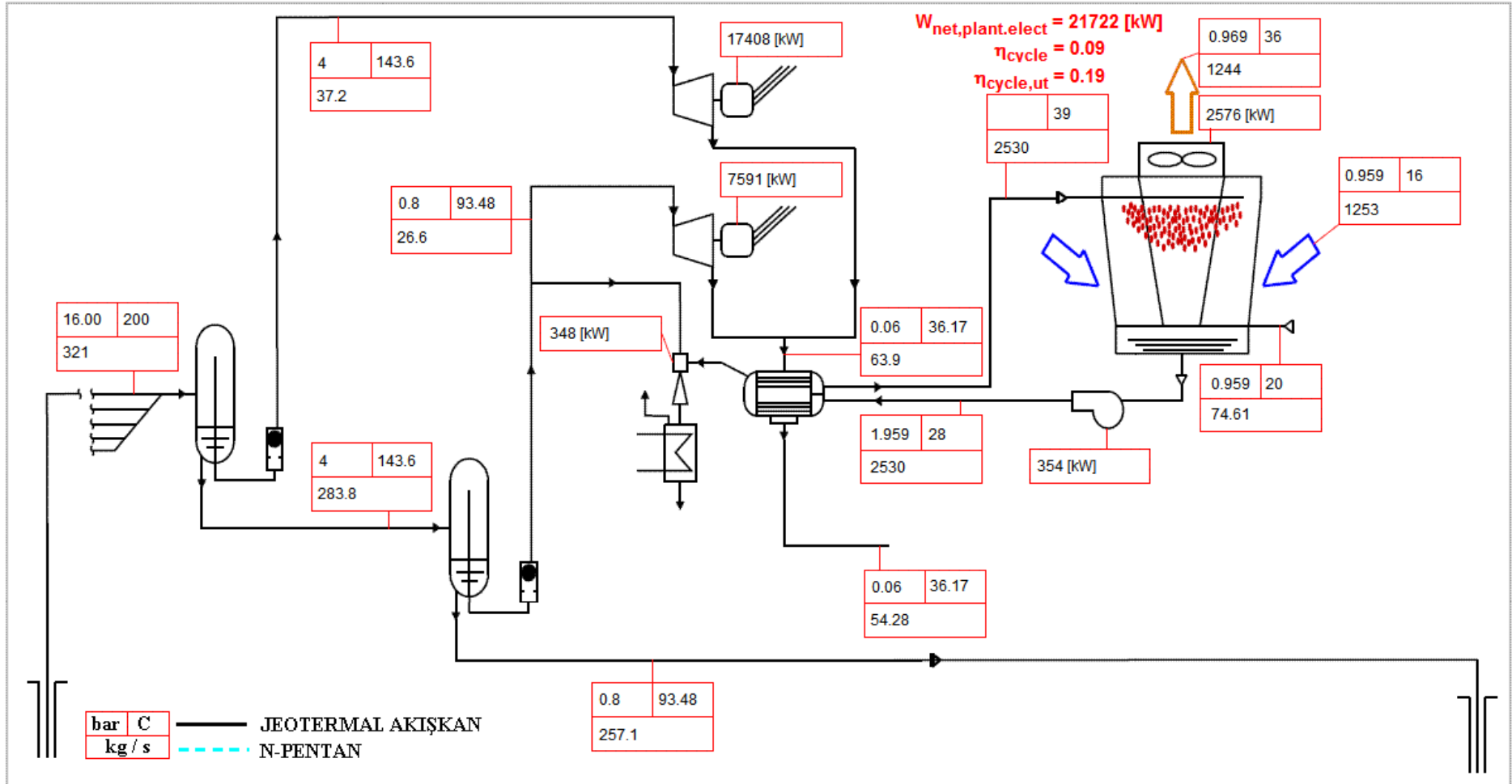
Şekil 6.6 : Çift flaş modeline ait P-h diagramı.

## 6.2 Kızıldere Jeotermal Sahası İçin Uygulanan Çift Flaşlı Çevrim

### Modeli Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kızıldere jeotermal enerji sahasının çift flaşlı santral modeline göre tasarlanması ve bu santral tipine göre, yüzey tesislerinin optimum işletme şartlarında, üretim debisinin 321 kg/sn (mevcut durum) olduğu durum için santralden elde edilecek maksimum net güç yaklaşık 22 MWe olacaktır. Buna göre, çevrim verimi % 9, ikinci yasa verimi ise % 19 olarak hesaplanmıştır.

Belirlenen optimum işletme şartlarında, santralin yüzey tesislerinde Şekil 6.1'de belirtilen her bir çözüm adımı için elde edilecek değerler, Şekil 6.7'de görülmektedir.



Şekil 6.7 : Kızıldere jeotermal enerji santrali çift flaş modeli için optimize edilmiş santral şartları.



## 7. KIZILDERE JEOTERMAL SAHASINDAN ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN TASARLANAN ÇEVİRİM MODELİ-2

Kızıldere jeotermal sahası için tasarlanan bir diğer çevrim modeli, bottoming binary tip kombine çevrim modelidir. Bir önceki bölümde açıklanan çift flaşlı (double-flash) santral çevrim modelinden farklı olarak seçilen bileşik (kombine) çevrim 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) çevrimler, özellikle orta rezervuar sıcaklığına sahip jeotermal kaynaklardan elektrik üretilmesi amacıyla geliştirilmiş santral çevrim modellerindedir.

Bu bölümde Kızıldere jeotermal kaynağına uygulanacak bileşik (kombine) çevrim modeli, tek separatörlü buhar çevrimi ve binary çevrimin entegre edildiği, “bottoming binary” çevrim modelidir.

Bu tip çevrimlerde ikili (binary) olan kısımda ikincil çalışma sıvısı, su buharından çok yüksek molekül ağırlığa sahip hidrokarbonlardır. Genellikle, n-pentan, iso-bütan, iso-pentan, R114 gibi ikincil akışkanlar kullanılmaktadır [2,17]. Kullanılan bu çalışma sıvıları, su buharına göre oldukça düşük sıcaklıklarda kaynama noktasına ulaşabildiği için türbin çıkışlarındaki basınç ve sıcaklık kayıplarında bile termodinamik bölge olarak kızgın buhar bölgesinde kalabilmektedirler. Dolayısıyla, orta sıcaklıklı jeotermal kaynaklardan elektrik üretiminde bu tür akışkanların kullanıldığı çevrim modelleri, buhar çevriminden daha fazla olmaktadır [17].

İkili çevrimlerin bir diğer avantajı, çalışma sıvılarının molekül ağırlıklarının yüksek olması sebebiyle düşük yoğunluk sıcaklıklarının buhara göre daha fazla olması ve bunun sonucu olarak çevrimde kullanılacak türbin boyutlarının buhar türbinlerine göre daha küçük olması da gösterilmektedir [17].

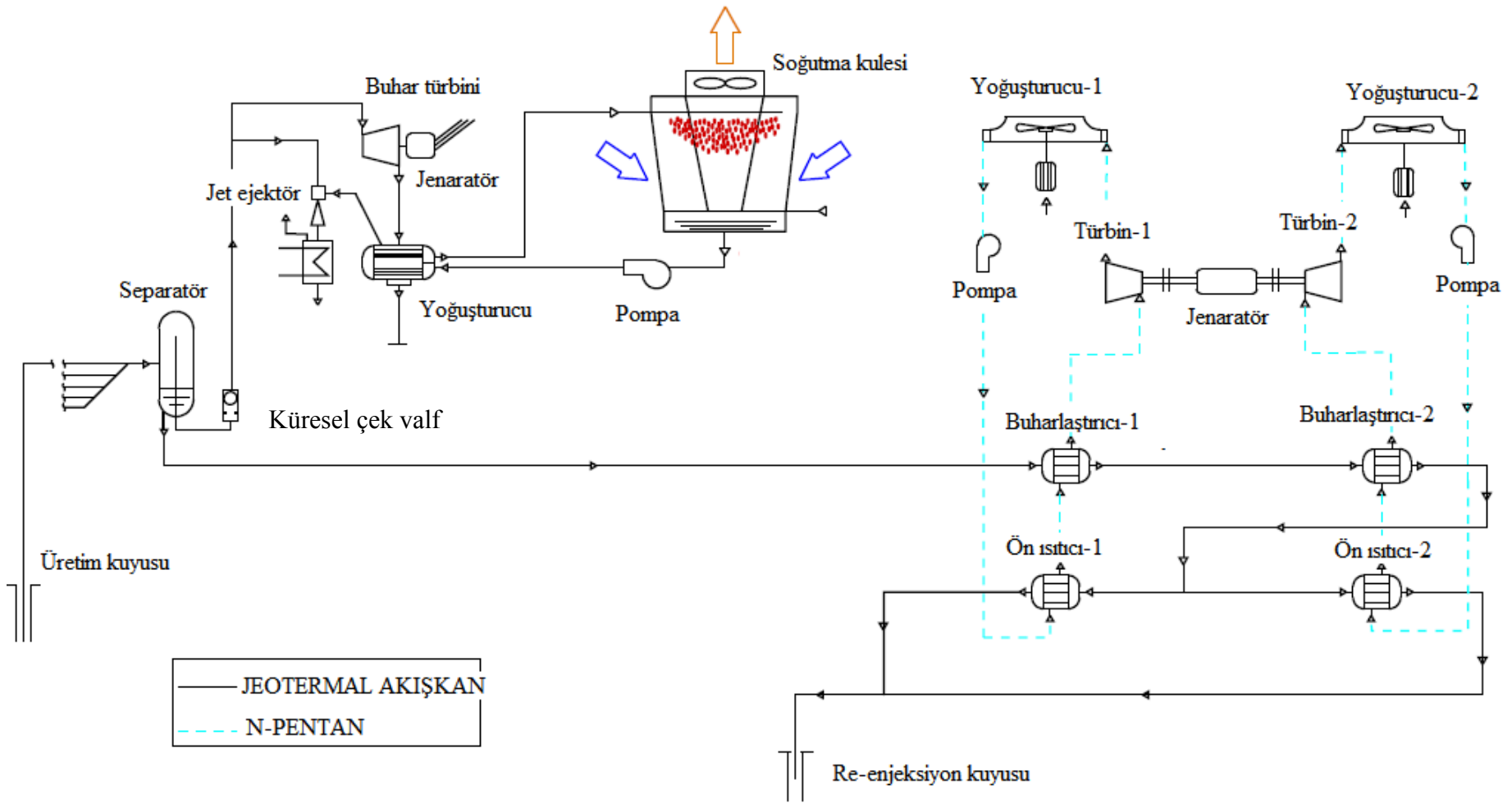


## 7.1. Bottoming Binary Çevrim Modeli-1 Çalışması, Optimum Koşulların Tayini

Bu bölümde kullanılacak olan çevrim modeli Şekil 7.1’de gösterilmiştir [19]. Buna göre; üretilen jeotermal akışkan öncelikle buhar çevriminde separasyondan geçirilerek sıvı ve buhar fazlarına ayrıştırılır. Ayrıştırılan buhar türbinde genişleşerek iş üretilir, türbin çıkışı kondansör ve soğutma kulesi sistemine bağlıdır. Türbin sonrası akışkanın tamamı kondanserde yoğunlaştırılır ve hava soğutmalı bir soğutma kulesi vasıtasıyla sıcaklığı düşürülerek yoğunlaştırıya geri dönmektedir.

Separatörde iki faza ayrılan jeotermal akışkan ikili (binary) çevrime aktarılır. Binary çevrimde çalışma sıvısı olarak n-pentan kullanılmıştır. Buhar çevriminden gelen jeotermal akışkan (brine) ikili (binary) çevrimde buharlaştırıcı (vaporizer) ve ön ısıtıcıya (preheater) girerek sahip olduğu ısı enerjisini seçilen ikincil akışkana aktarır. Separatör çıkışından binary çevrime aktarılan jeotermal akışkan buharlaştırıcıya girdiğinde, gerçekleşen ısı takası n-pentanın buhar fazına geçişine kadar devam etmektedir [12,17]. Doymuş buhar fazındaki n-pentan organik türbine girerek genişler ve türbinde iş üretilmesi sağlanır. Türbinden çıkan n-pentanı yoğunlaştırmak 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 7.1’de 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. EES programında hazırlanan model, her bir sistem elemanı için çözümlenmiş, belirlenen kabuller ve mevcut saha bilgileri kullanılarak seçilen parametreler üzerinde optimizasyonlar yapılmıştır.



Şekil 7.1 : Bottoming Binary modeli-1 akış diagramı.

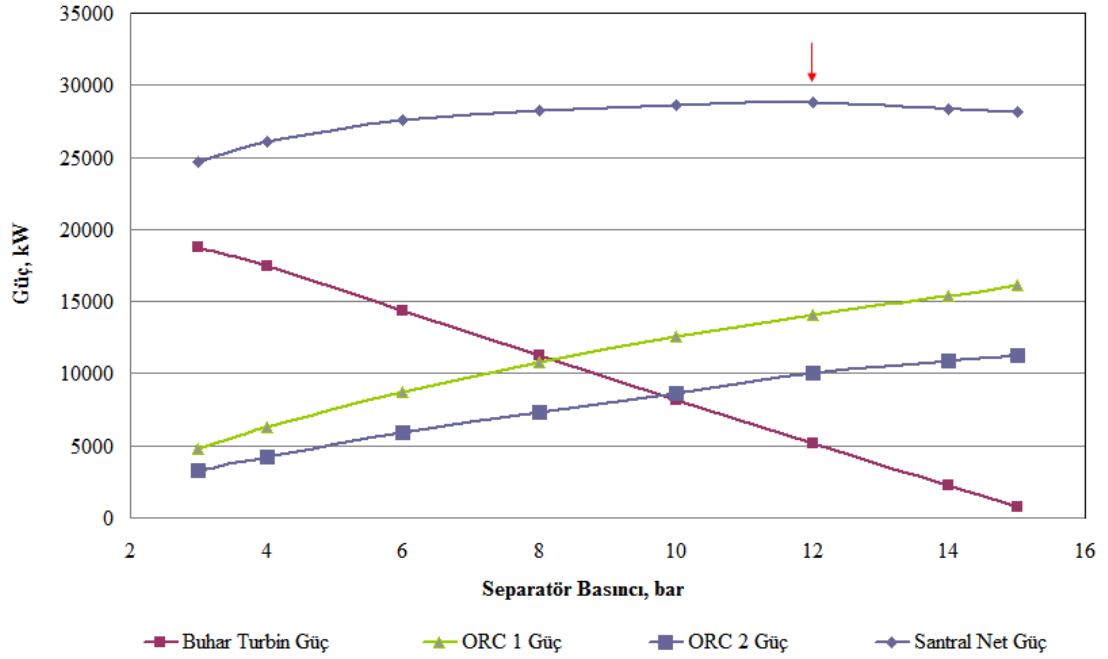
### 7.1.1 Separatör basıncı optimizasyonu

Bottoming binary-1 olarak tanımlanan model 2'ye göre, bir önceki modele benzer şekilde öncelikle buhar çevriminde kullanılan separatör basıncı optimize edilmeye çalışılmıştır. Buhar çevrimi separatör çıkışından organik rankine çevrimine aktarılan jeotermal akışkan ısısını 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 basıncı (16 bar) ve kuyubaşı sıcaklık (200°C) değerlerinde separatör basıncı 15 bar ve 3 bar aralığında seçilerek separatör çıkış sıcaklık değerleri ve buhar türbininden elde edilecek güç değerleri karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, separatör çıkış basınç değerleri arttıkça buhar türbininden elde edilecek güç azalmaktadır. Bununla birlikte, separatör basıncının artması rankin çevriminde buhar çevriminin aksine elde edilecek güç değerlerinde artışa sebep olmaktadır. Bunun sebebi, yüksek separatör basıncı ile iki faza ayrılan jeotermal akışkanın sahip olduğu yüksek kütleli debi ile organik rankin çevrimine girmesi ve daha yüksek sıcaklıklara sahip olan akışkandan n-pentana daha fazla ısı transferi sağlanabilmesidir. Dolayısıyla, bottoming binary çevrim modelinde santralden en fazla gücü elde edebilmek için, sistemin bütünü değerlendirilmelidir.

Şekil 7.2'de değişen separatör basınçlarına göre türbinlerden elde edilecek güç değerleri ve santral net güç değerindeki değişimler gösterilmektedir. Buna göre, separatör basıncı arttıkça buhar türbin gücü hızlı bir şekilde azalmakta, tam tersi olarak organik türbinlerden elde edilen güç değerlerinde artış görülmektedir. Sistem bütünü değerlendirildiğinde ise, santral net gücünde parabolik bir artım görülmekte ve kuyubaşı basınç değerlerine yakın separatör basınçlarına gelindiğinde elde edilecek güç değerlerinde çok fazla değişiklik görülmediği, gittikçe sabit değerler aldığı sonucu elde edilmiştir. Şekil 7.2'de görüldüğü gibi net santral gücünün en yüksek değeri olan yaklaşık 29 MWe değerini sağlayan separatör basıncının 12 bar olduğu hesaplanmıştır.



**Şekil 7.2 : Separatör basıncı optimizasyonu**

Model-2 için optimum separatör basıncı 12 bar olarak tespit edilmiş olup, bu basınç değerinde buhar türbininden 5.1 MWe güç elde edilmekte ve separatörden çıkan jeotermal akışkan 188 °C ile binary çevrime girmektedir.

### 7.1.2 Organik türbin basınçları optimizasyonu

Model-1’de bahsedildiği gibi Model-2 için de buhar çevrimi yoğuşturucu giriş sıcaklık değeri 35 °C olarak seçilmiş ve buna göre yoğuşturucuya bağlı buhar türbin çıkışı 0.06 bar vakum basıncı kabul edilmiştir. 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. Yoğuşma sıcaklığına karşılık gelen yoğuşma noktası basınçları da yapılan hesaplamalarla belirlenmiştir.

Organik türbin çıkış basınçları optimizasyonu aslında separatör çıkış sıcaklığına bağlı olarak binary çevrime giren akışkan sıcaklığına bağlı değişen ve kondansör sonrasında 38 °C olması kısıtına göre hesaplanmıştır.

Buhar çevriminden binary çevrime aktarılan jeotermal akışkan her bir binary çevrimde türbine giriş sıcaklık değerlerindeki değişime göre, türbin çıkış basıncı optimize edilmeye çalışılmıştır.

Separatörden 12 bar ile iki faza ayrılan jeotermal akışkan, 188 °C ile ilk binary çevrime girmektedir. Isı değiştiricilerde ısısını n-pentan'a aktararak ve sıcaklığında ortalama 5 °C bir kayıp ile birinci ünite organik türbine giriş yapacağı kabul edilmiştir. 183 °C ve bu sıcaklık değerine karşılık n-pentanın doymuş buhar basıncı değeri olan 27.56 bar basınç ile organik türbine giriş yapacaktır. Türbin çıkışının bağlı olduğu hava soğutmalı kondansör çıkışında n-pentanın yoğuşma sıcaklığı olan 38 °C sıcaklık değerini elde edebilmek için türbin çıkış basıncının 1.12 bar olması gerektiği hesaplanmıştır. Benzer çözüm yaklaşımı ikinci ünite organik türbini için de yapılırsa, çıkış basıncının 1.09 bar olacağı hesaplanmıştır.

Optimum separatör basıncı ve organik türbin çıkış basınç ve sıcaklık değerlerinin tespit edilmesinden sonra sistem bütün olarak değerlendirildiğinde aşağıdaki şekilde özetlemek mümkün olacaktır.

Kızıldere jeotermal sahası için EES programında oluşturulan bottoming binary santral çevrim modeli-1'de, kuyubaşı sıcaklığı 200°C ve kuyubaşı basıncı 16 bar kabul edilmiştir.

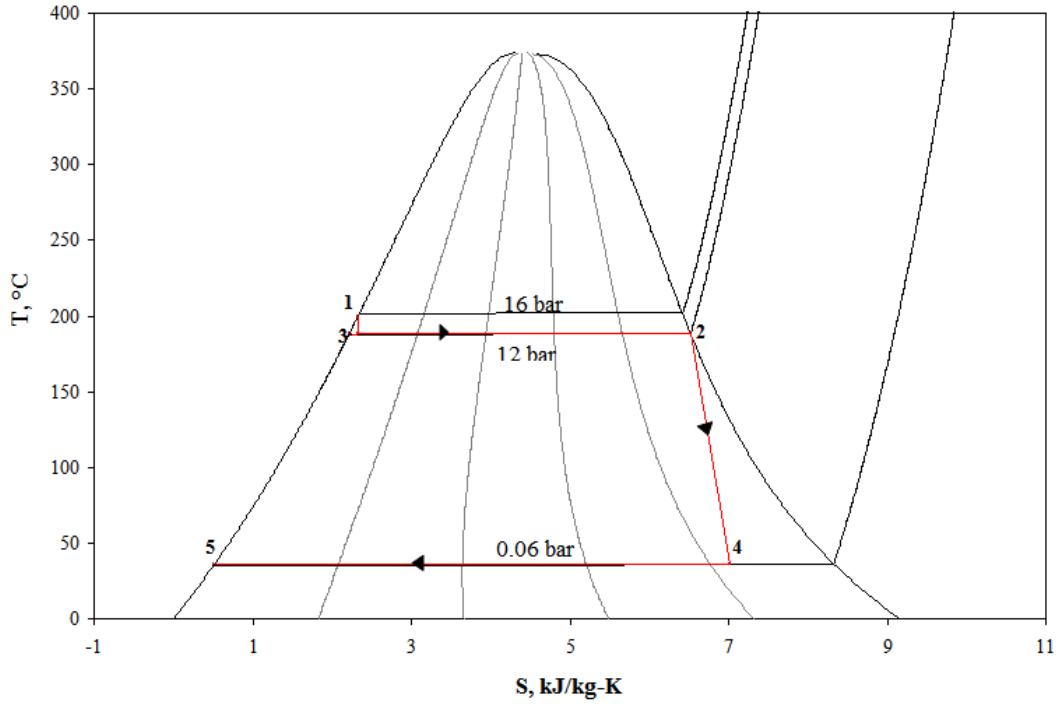
Bir önceki bölümde belirtilen çevrim analizine benzer şekilde, çift fazlı jeotermal akışkan kuyubaşında siklon tip separatörde tespit edilen optimum basınçta flaş edilmiştir. Hesaplama sonuçlarına göre jeotermal akışkan optimum separatör basıncı olan 12 bar basınç değerinde sıvı ve buhar fazlarına ayrıştırılır.

Üretim debisi 1155 ton/st (321 kg/sn) olan jeotermal akışkan 12 bar basınçta separatörde iki faza ayrıştırılır. Elde edilen 8.69 kg/sn kütleli debiye sahip buhar 188 °C sıcaklık ile buhar türbinine girer. Buhar, türbinde 0.06 bar basınçta genişletilerek 5132 kWe net elektrik gücü elde edilir.

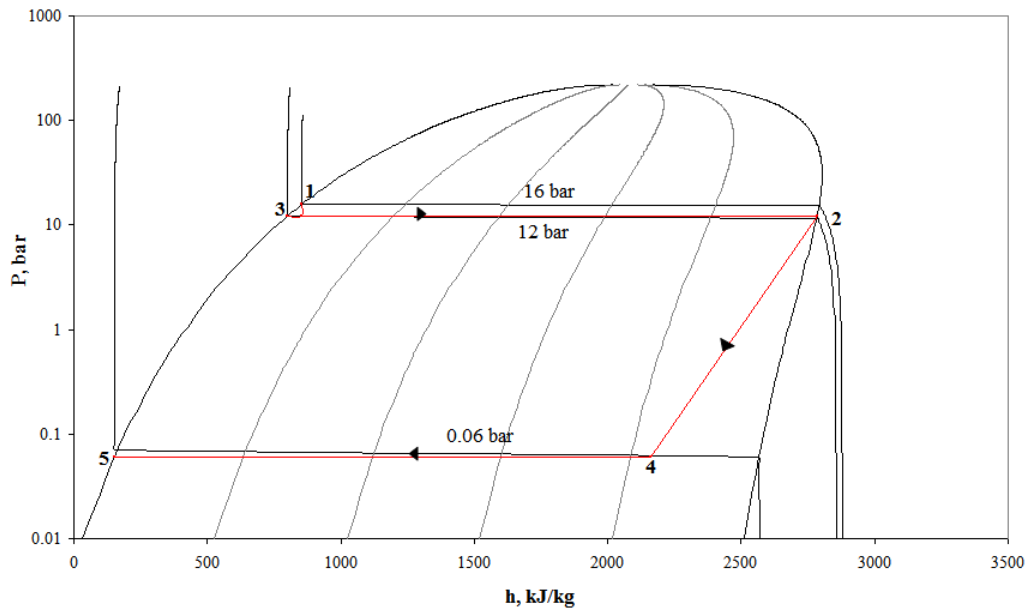
Buhar türbininden çıkan ve sıcaklığı 36.17 °C düşmüş olan akışkanın tamamını yoğuşturmak ve buhar içindeki çözünmeyen gazları (CO<sub>2</sub>) ayrıştırmak için yoğuşturucuya aktarılır. Yoğuşturucuya bağlı olan jet ejektörde, yaklaşık 1.3 kg/sn kütleli debili CO<sub>2</sub>'in tamamı sistemden uzaklaştırılmış ve bunun için 47.39 kWe pompa gücü kullanılmıştır.

Yoğuşturucudan çıkan akışkanın ve 0.06 bar basınç ve 39 °C sıcaklık ile soğutma kulesine girerek hava soğutma sistemi ile 28 °C sıcaklığa kadar düşeceği ve pompa ile sıkıştırılarak tekrar yoğuşturucuya geri döneceği tasarlanmıştır. Soğutma kulesinde, sıcak gelen akışkanın 28 °C kadar soğutabilmesi için % 61 nemlilikle

160 m<sup>3</sup>/sn debili hava gerektiği hesaplanmıştır. Kuledeki bu soğutma işlemi için gereken fan gücü, 329.1 kWe olarak hesaplanmıştır. Soğutma kulesinden çıkan akışkanın yoğuşturucuya gönderilmesi için gerekli olan pompadaki güç kaybı ise, 45.23 kWe olarak hesaplanmıştır. Şekil 7.3'de modelin buhar sistemine ait sıcaklık-entropi (T-s) diagramı ve Şekil 7.4'de ise basınç-entalpi (P-h) diagramı görülmektedir.



Şekil 7.3 : Bottoming binary model-1 buhar sistemi T-s diagramı.



Şekil 7.4 : Bottoming binary model-1 buhar sistemi P-h diagramı.

Separatörde ayrışan akışkan binary çevrime gönderilir. 188 °C ve 12 bar basınçtaki akışkan binary çevrimdeki ısı değiştiricilere aktarılır.

Buharlaştıricılarda, jeotermal akışkan ile çalışma akışkanı olarak kullanılan n-pentan arasında ısı transferi gerçekleşir ve n-pentan buhar faza geçene kadar ısı transferi devam etmektedir. Birinci buharlaştıricıda, organik akışkan buhar faza geçtikten sonra, jeotermal akışkan ikinci binary ünitesindeki buharlaştırmaya geçerek aynı şekilde buharlaştırma işlemine devam etmektedirler [17]. Her iki ünitedeki buharlaştıricıların görevi, kapalı çevrimde hareket edecek organik akışkanın buhar fazına geçmesini sağlayacak ısıyı jeotermal akışkandan sağlayarak, ısı transferini sağlamaktır [17]. Buharlaştıricıda n-pentanın tamamı buharlaşana kadar ısı transferi devam ettikten sonra jeotermal akışkan 156.3 °C ile ikinci buharlaştıricıya giriş yapmaktadır. Her iki ünitenin buharlaştıricılarından geçen jeotermal akışkan iki kola ayrılarak her bir ünitedeki ön ısıtıcıya giriş yapar.

Sistemdeki bir diğer ısı değiştirici olan ön ısıtıcıların görevi ise, organik akışkana ön ısıtma yapmaktır. Organik akışkan olan n-pentan termodinamik olarak doymuşluk eğrisindeki sıvı- buhar karışımı sıcaklığına kadar ısınma işlemi devam edecektir [17]. Her iki ünitedeki buharlaştıricılardan çıkan jeotermal akışkan, birinci ve ikinci ünite ön ısıtıcılarına 123.9 °C sıcaklık ile giriş yapacaktır.

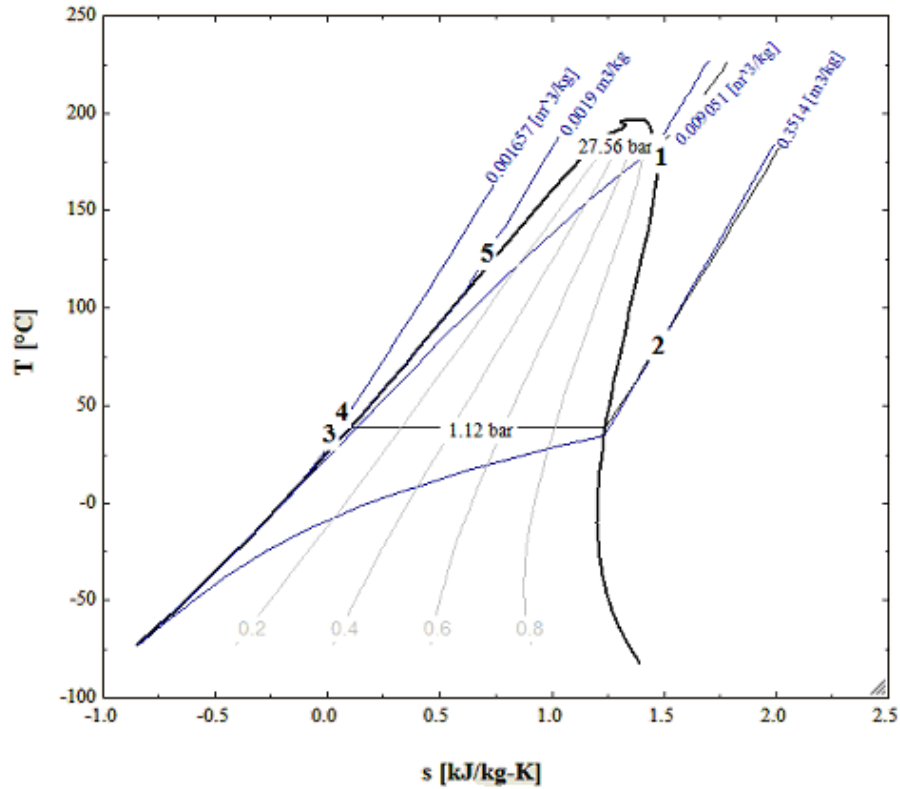
Her iki ünite, organik türbinlere giriş sıcaklık ve basıncına göre çıkış basıncı optimize edilmiştir. Buna göre, birinci üniteki buharlaştıricıdan çıkan n-pentan, 27.56 bar basınç ve 183 °C sıcaklık ile türbine giriş yapacaktır. İkinci binary çevrim ünitesinde ise, buharlaştıricıdan çıkan n-pentan, 17.97 bar optimum basınç ve 157 °C sıcaklık ile türbine giriş yapacaktır. Türbin çıkış basınçları da benzer şekilde, program üzerinde optimize edilmiş olup birinci ve ikinci ünite organik türbin çıkışlarının sırasıyla 1.12 bar ve 1.09 bar basınç değerinde olacağı hesaplanmıştır. Buna göre, birinci ünite organik türbinden 14.10 MWe net güç, ikinci ünite organik türbinden ise 10.03 MWe net elektrik gücü elde edilecektir. Organik türbinden çıkan n-pentan hava soğutmalı kondansere girerek, tamamının yoğuşup, sıcaklığı düşene kadar hava ile ısı transferi devam edecektir. Birinci ünite türbinden 79 °C sıcaklıkta çıkan n-pentan hava soğutmalı kondanserde sıcaklığı 38.86 °C kadar düşürülmektedir. Benzer şekilde ikinci ünite türbin çıkış sıcaklığı 77 °C olan akışkan 38.04 °C sıcaklık ile kondansörden çıkmaktadır.

Soğutma işlemi için gereken fanadaki parazitik kayıplar birinci ve ikinci ünite kondansör için sırasıyla, 1041 kWe ve 1293 kWe olarak hesaplanmıştır.

Kondansörden çıkan organik akışkanın basınçlandırılıp tekrar ön ısıtıcıya gönderilmesi için gereken pompadaki enerji kaybı birinci ünite 809 kWe, ikinci ünite 528 kWe olmaktadır.

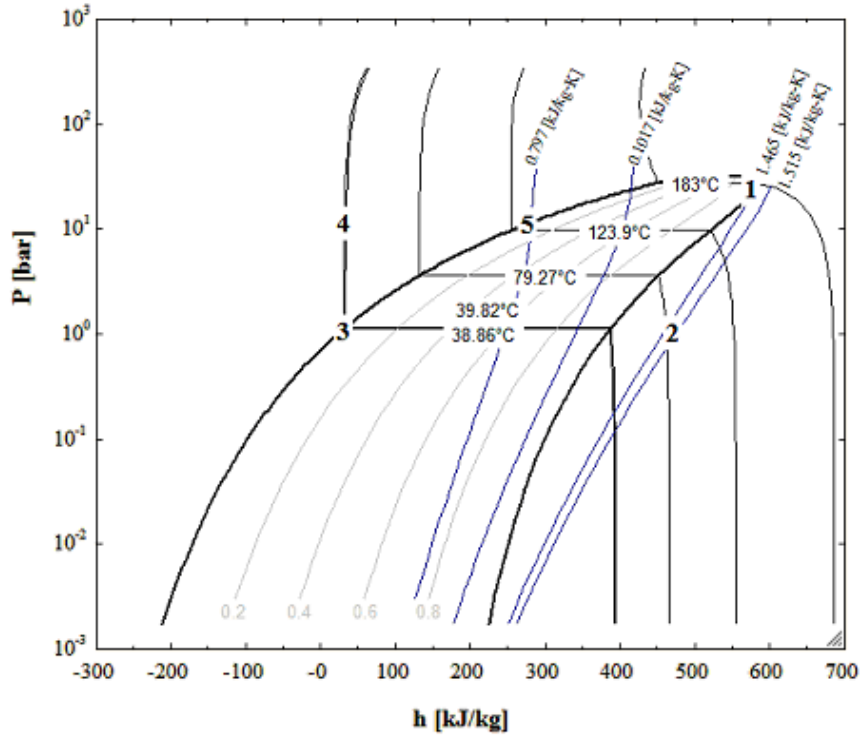
Pompa ile basınçlandırılan n-pentan ön ısıtıcıya gelerek kapalı çevrimini tamamlamış olmaktadır. Sistemde buharlaştırıcı ve ön ısıtıcıya girip sıcaklığı azalmış her iki üniteden gelen jeotermal akışkan ise, bir noktada birleşerek re-enjeksiyon kuyusuna 80°C sıcaklık ile geri basılmaktadır. Akışkan içinde çözülmüş halde bulunan silikanın basınç ve sıcaklık düşüşü ile jeotermal akışkan için de serbest hale geçerek çökmemesi için re-enjeksiyon sıcaklığının tüm modellerde 80°C altında olmamasına dikkat edilmiştir. EES programında modelin çözümü yapılırken, re-enjeksiyon sıcaklığı minimum 80°C olması kısıtı konulmuştur.

Uygulanan bu modele ait binary çevrimlerin her biri için n-pentana ait sıcaklık-entropi (T-s) ve basınç-entalpi (P-h) diagramları EES programında oluşturulmuştur. Buna göre birinci ünite binary çevrime ait T-s diagramı Şekil 7.5'de P-h diagramı ise Şekil 7.6'da gösterilmektedir.



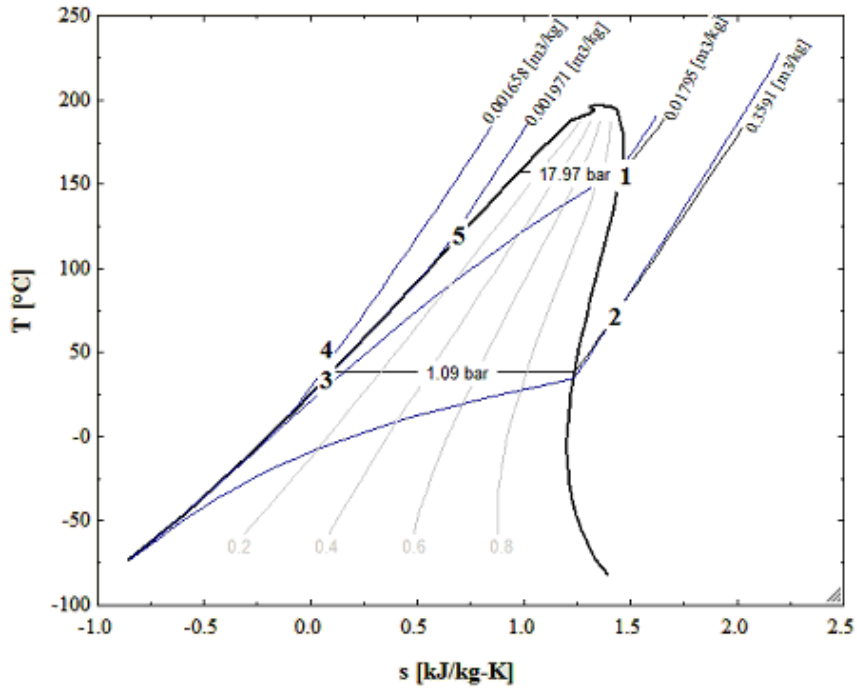
Şekil 7.5 : Bottoming binary çevrim modeli-1 birinci ünite n-pentan T-s diagramı.



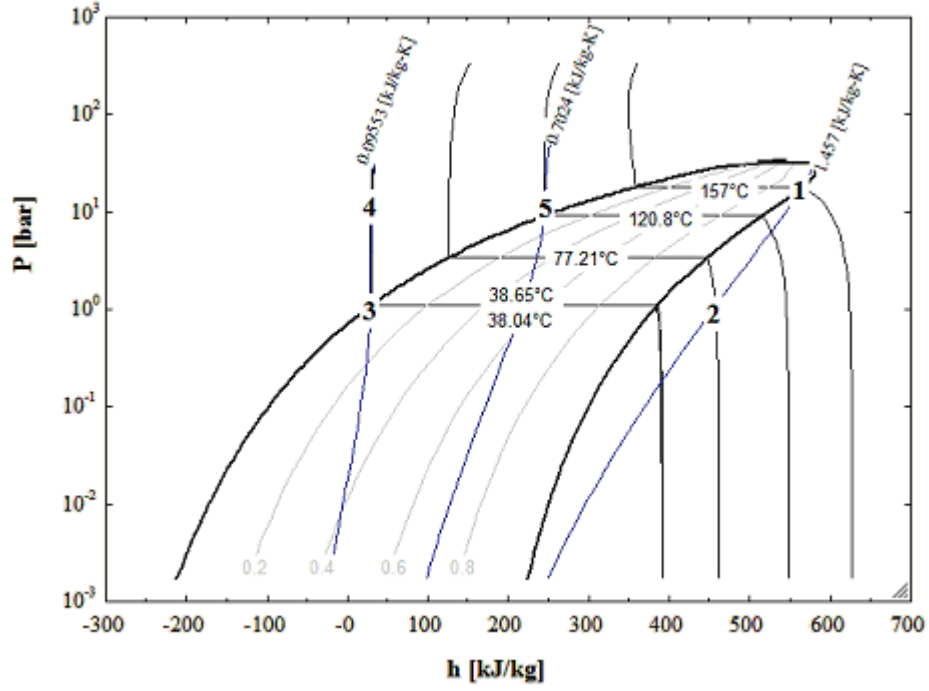


Şekil 7.6 : Bottoming binary çevrim modeli-1 birinci ünite n-pentan P-h diagramı.

Benzer şekilde ikinci ünite binary çevrime ait T-s ve P-h diagramları sırasıyla Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de belirtilmektedir.



Şekil 7.7 : Bottoming binary çevrim modeli-1 ikinci ünite n-pentan T-s diagramı.



Şekil 7.8 : Bottoming binary çevrim modeli-1 ikinci ünite n-pentan P-h diagramı.

## 7.2. Kızıldere Jeotermal Sahası İçin Uygulanan Bottoming Binary Çevrim Modeli-1 Sonuçlarının Değerlendirilmesi

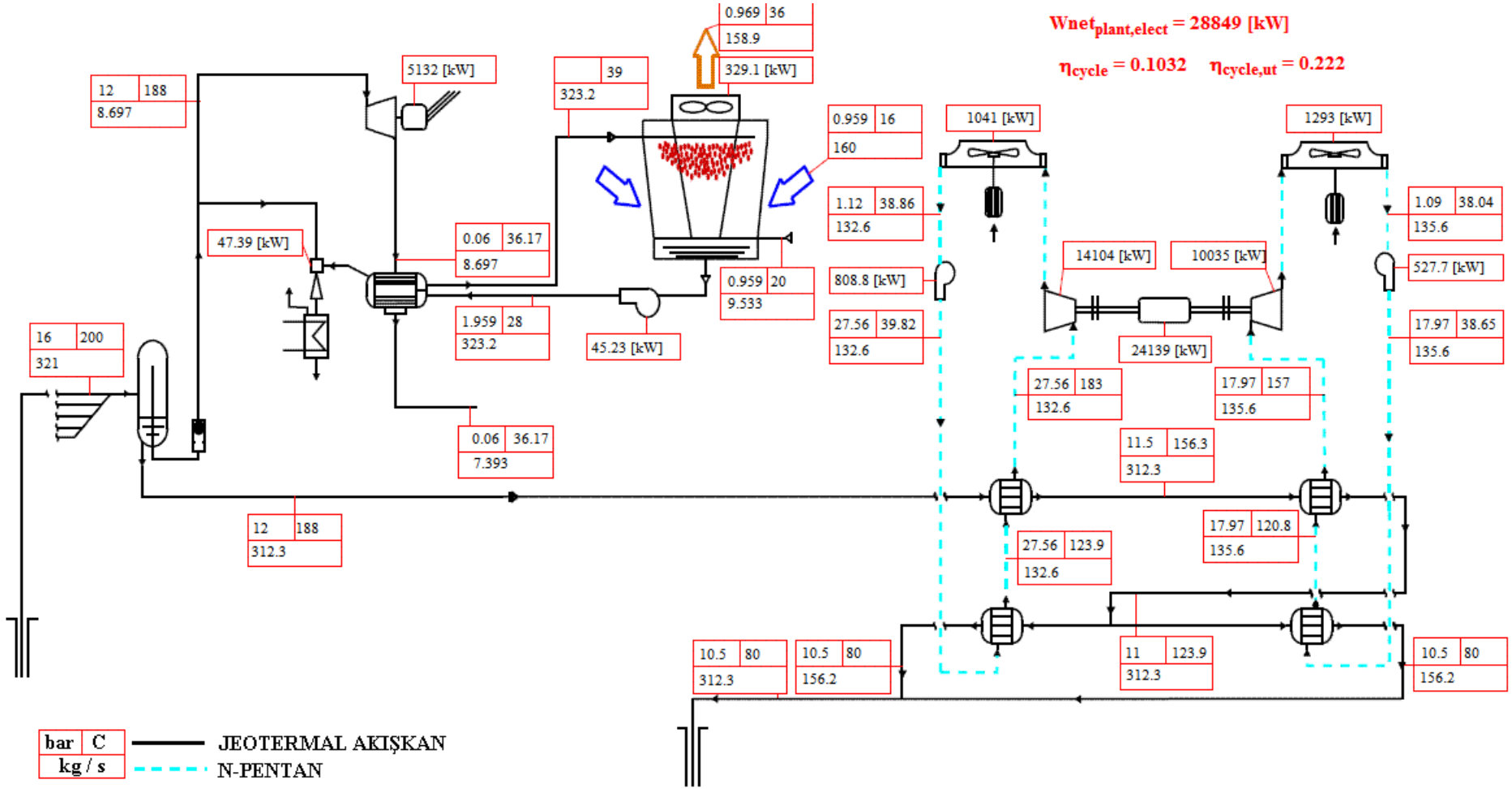
Bileşik (kombine) çevrimde tüm sistem elemanları için seçilen değer aralıklarında optimum çalışma şartları tespit edilmiş ve çevrimden elde edilecek maksimum güç değerleri belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucu belirlenen optimum çalışma şartları Çizelge 7.1’de gösterilmiştir.

Buna göre, Kızıldere jeotermal sahası için tasarlanan bottoming binary bileşik çevrim modelinde mevcut toplam üretim debisi 1155 ton/st (321 kg/sn) için santralden elde edilebilecek net elektrik gücü, 29 MWe olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 7.1:** Bottoming binary çevrim modeli-1 sistem elemanları için tespit edilen optimum çalışma şartları

Kombine Çevrim Sistem Elemanları	Hesaplanan Optimum Çalışma Şartları	
	Değer	Birim
Separatör basıncı	12.00	bar
Buhar türbini çıkış basıncı	0.06	bar
Buharlaştırıcı-1 çıkış basıncı	27.56	bar
Buharlaştırıcı-2 çıkış basıncı	17.97	bar
Buharlaştırıcı-1 çıkış sıcaklığı	183	°C
Buharlaştırıcı-2 çıkış sıcaklığı	157	°C
Organik türbin-1 çıkış basıncı	1.12	bar
Organik türbin-2 çıkış basıncı	1.09	bar

Şekil 7.9’da ise, optimum çalışma şartlarında bottoming binary çevrim modeli-1 için mevcut üretim debilerine göre elektrik üretimi sağlayacak santralin EES programında tasarlanan model sonuçları görülmektedir.



Şekil 7.9 : Bottoming binary çevrim modeli-1’de belirlenen optimum işletme şartları.



## **8. KIZILDERE JEOTERMAL SAHASINDAN ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN TASARLANAN ÇEVİRİM MODELİ-3**

Kızıldere jeotermal sahasından elektrik üretimi için tasarlanan son model bottoming binary-2 modelidir. Genel olarak tek flaş ve binary çevrimlerinin birleşmesiyle oluşturulmuş olmasından kaynaklı bottoming binary çevrimi olarak adlandırılmasına rağmen bir önceki bölümde açıklanan model-2'den çok farklı özellikleri taşımaktadır.

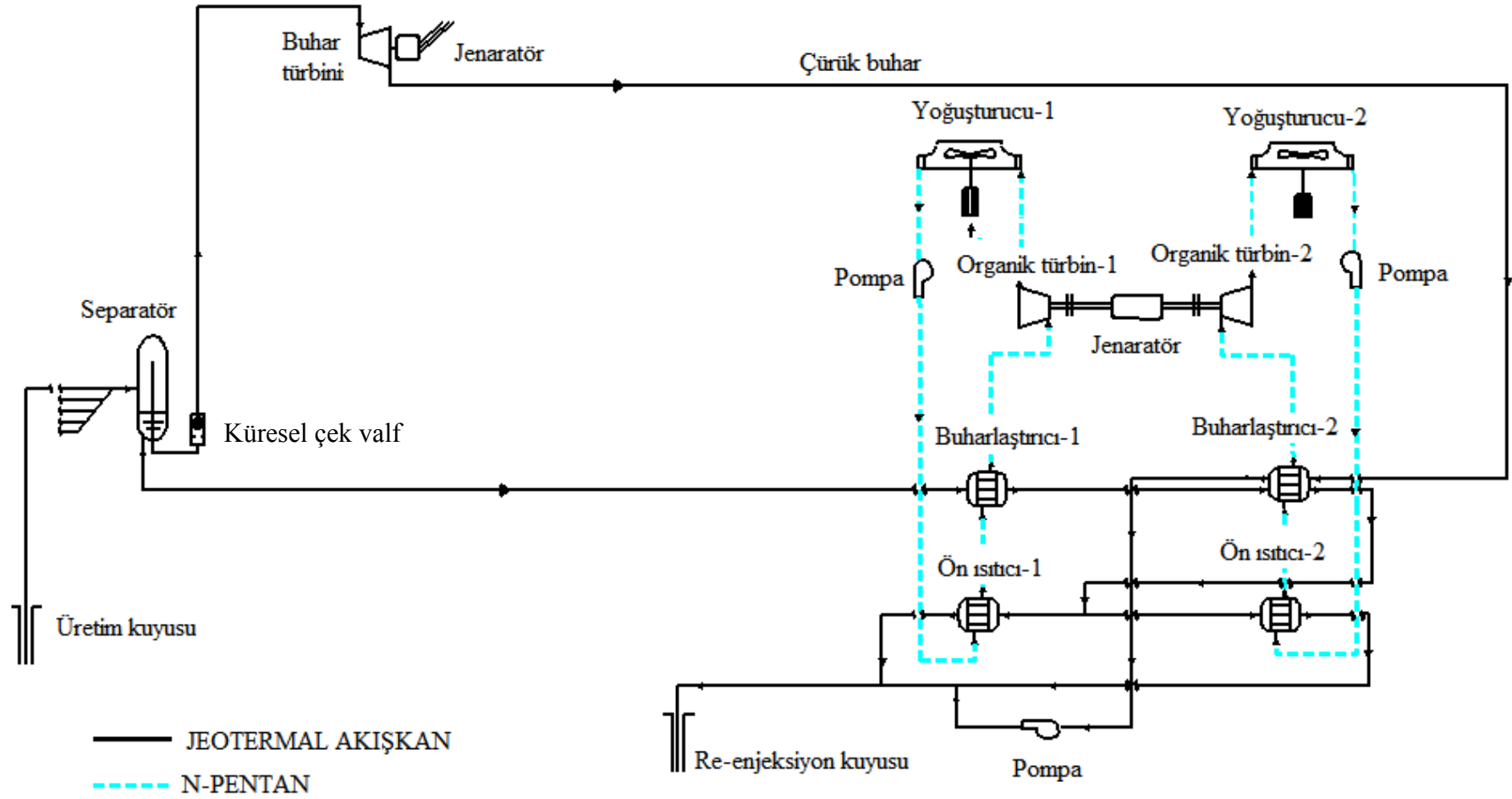
Tasarlanan bu modelde amaç, sistemin geneli düşünüldüğünde, bir önceki bölümde elde edilen düşük buhar çevrimi enerjilerinin arttırılabilmesini sağlamaktır.

Buna göre oluşturulan modele ait akış diagramı Şekil 8.1'de gösterilmektedir. Önceki bölümlere benzer şekilde, sistem elemanlarının her biri üzerindeki işlem adımları yinelenmiş ve seçilen değer aralıklarında optimum işletme şartlarının tespit edilmesi çalışmaları yapılmıştır.

Hesaplamalar yapılırken diğer modeller için kullanılan sabit değerler ve kabuller geçerli olmaktadır.

### **8.1 Bottoming Binary Çevrim Modeli-2 Çalışması, Optimum Koşulların Tayini**

Bottoming binary-2 olarak ifade edilen ve Şekil 8.1'de santral akış şeması gösterilen modele göre, üretilen jeotermal akışkan öncelikle separatöre girerek sıvı ve buhar fazlarına ayrılması sağlanır. Separasyonda elde edilen buhar türbine aktarılarak enerji elde edilmesi sağlanır. Separatörde ayrışan akışkan ise doğrudan ikili (binary) çevrime aktarılmaktadır. Bir önceki bölümde açıklanan model-2'den farklı olarak, buhar türbini çıkışı yoğuşturucu ve soğutma kulesinden oluşan bir soğutma sistemine bağlı değildir. Buhar türbini çıkışındaki çürük buhar, doğrudan ikili (binary) çevrimin ikinci buharlaştırıcısına gönderilerek, sahip olduğu enerjinin n-pentana aktarılması sağlanır. Burada amaç, jeotermal akışkandan daha fazla enerjinin n-pentana aktarılarak santralde daha fazla güç elde edilmesini sağlamaktır.



Şekil 8.1 : Bottoming binary çevrim modeli-2 akış diagramı.

Separatörde ayrışan sıvı ise, ikili (binary) çevrimin birinci buharlaştırıcısına aktarılır. İkili (binary) çevrimin her bir rankin döngüsünde jeotermal akışkanın izlediği yol model-2'deki gibi olacaktır. İkili çevrimde buharlaştırıcı-1'den buharlaştırıcı-2'e geçerek, her iki buharlaştırıcıdan çıkan akışkan iki kola ayrılarak her bir ön ısıtıcıya gönderilmektedir. Buharlaştırıcılarda tamamı buhar haline geçen n-pentan organik türbinlere girerek enerji elde edilmesi sağlanacaktır. Organik türbin çıkışları hava soğutmalı yoğuşturuculara bağlıdır. 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.

Buhar türbini çıkışı ikinci buharlaştırıcıya gönderilen çürük buhar ise, tüm ısını n-pentana aktardıktan sonra re-enjeksiyon kuyusuna geri basılacaktır. Re-enjeksiyon kuyusuna geri basma işleminden önce, yoğuşturulan buharın basıncı, geri basma sisteminde binary çevrimde kullanılan jeotermal akışkan basıncı ile eş basınç değerine getirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, geri basma sırasında pompa ile basınçlandırılmıştır. Ayrıca, geri basma işlemi gerçekleştirilirken çözünmüş halde bulunan silikanın jeotermal akışkan içinde serbest hale geçerek çökme problemi yaşatmaması için, geri basma sıcaklıklarının 80 °C ve üzerinde olmasına ayrıca dikkat edilmektedir.

Şekil 8.1'de belirtildiği akış yönünde modelin çözümü EES programında hazırlanmış ve diğer modellerdeki gibi öncelikle separatör basıncından başlamak üzere tespit edilen parametreler üzerinde optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

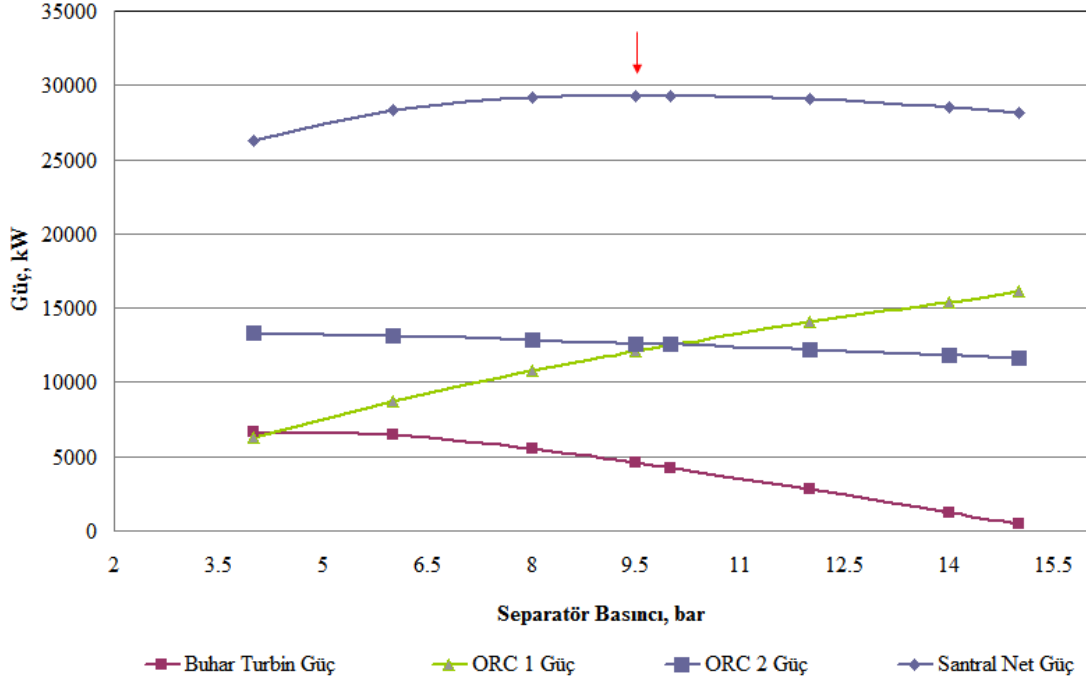
### **8.1.1 Separatör basıncı optimizasyonu**

Model-3 için separatör basıncı optimizasyonunda, diğer modellerdeki gibi kuyubaşı basıncı 16 bar ve kuyubaşı sıcaklığı 200°C olduğu kabul edilip, iki separatör için de değişen basınç değerlerine göre türbinlerden elde edilecek güç değerleri karşılaştırılmıştır.

Buna göre, separatör basıncı 14 bar ile 4 bar basınç aralığında seçilmiş ve belirlenen bu basınç aralığındaki birbirinden farklı yirmi basınç değerine göre sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Separatör basıncının değişen değerlerine göre buhar sisteminden, binary çevrimden ve sistemin genelinden elde edilecek net güçlerin karşılaştırması Şekil 8.2’de gösterilmektedir.



**Şekil 8.2 :** Model-3 değişen separatör basıncına göre santral net gücündeki değişim

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. Bunun sebebi, artan separatör basınçları ile daha fazla akışkan ikili (binary) sisteme aktarılmış ve ilk çevrimden elde edilen güç değeri de buna göre artış göstermiştir. İkinci rankin çevriminden elde edilecek güçteki azalma ise, separatörde artan basınçlarla elde edilecek buhar kütleli debisinin azalması ve dolayısıyla ikinci rankin çevriminde çürük buhardan daha az ısının n-pentana aktarımı söz konusudur. 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 9.5 bar olduğu hesaplanmıştır. Optimum separatör şartlarında santralden elde edilebilecek net güç yaklaşık 30 MWe olacağı hesaplanmıştır.

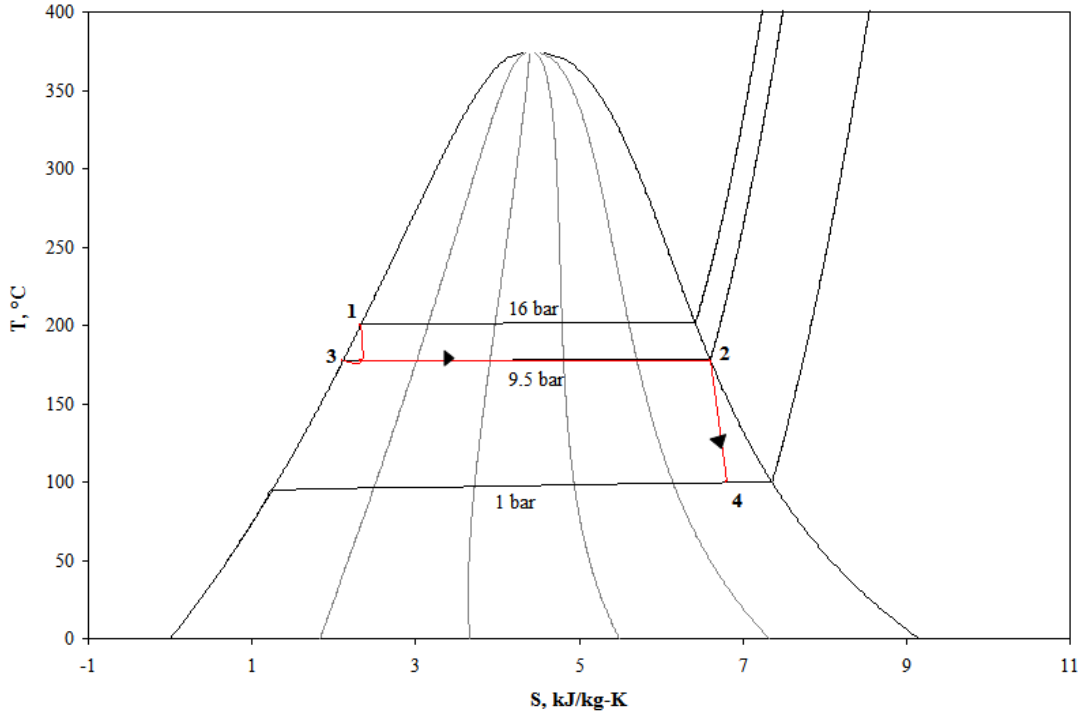
### 8.1.2 Buhar türbini ve organik türbin çıkış basıncı optimizasyonu

Model 3 için buhar sisteminde kullanılacak türbin, atmosferik bir türbin olup herhangi bir yoğuşturucu ve soğutma kulesi sistemine bağlı değildir. Bu yüzden buhar türbin çıkışı üzerinde herhangi bir optimizasyon yapılmadan doğrudan atmosfer basıncı, türbin çıkış basıncı olarak kabul edilip hesaplamalar yapılmıştır.

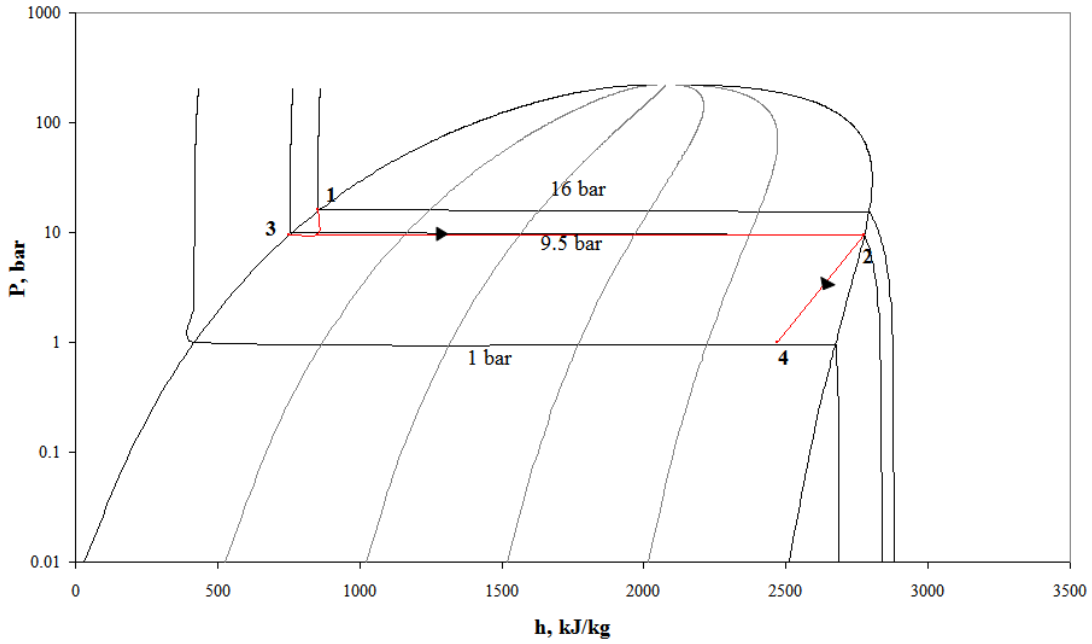
Organik türbin çıkış basınçları ise bir önceki bölümde ifade edildiği şekilde n-pentanın türbin çıkışı buharlaştırıcıda tamamının buharlaşması için gerekli olan 38 °C sıcaklık değerini sağlayacak basınç, optimum basınç değeri olacaktır. Buna göre, her iki rankin çevriminde buharlaştırıcı sonrası sıcaklık değerinin 38 °C olmasını sağlayan türbin çıkış basıncı 1.12 bar olarak tespit edilmiştir.

Model-3 için hesaplanan optimum türbin çıkış basınç değerleri ve separatör basıncına göre çalışmadan elde edilecek sonuçları özetlemek gerekirse, separatörden 9.5 bar ve 178 °C ile ayrılan buhar atmosferik türbine gönderilerek 4581 kWe elektrik enerjisi elde edilmektedir. Buhar türbini çıkışında 100 °C sıcaklık ve 15.77 kg/sn debiye sahip çürük buhar ve yoğuşmayan gaz karışımı doğrudan ikili (binary) çevrimde ikinci buharlaştırıcıya gönderilerek ısısını n-pentana aktarılması sağlanır. Buharlaştırıcıda ısı takası gerçekleştikten sonra buhar içindeki yoğuşmayan gaz olan CO<sub>2</sub> tamamı (2.36 kg/sn) serbest gaz olarak sistemden ayrıştırılarak açığa çıkan sıvı re-enjeksiyon sistemine dahil edilecektir. Akışkanın re-enjeksiyon kuyusuna geri basımı için pompa kullanılarak basıncı geri basma basıncı olarak hesaplanan 8 bar basınç değerine kadar yükseltilmiştir. Basınçlandırma için gereken kayıp pompa gücü ise yaklaşık 10 kWe değerindedir.

Buhar sistemine ait T-s ve P-h diagramları Şekil 8.3 ve Şekil 8.4'de belirtilmiştir.



**Şekil 8.3 :** Bottoming binary model-2 buhar sistemi T-s diagramı



**Şekil 8.4 :** Bottoming binary model-2 buhar sistemi P-h diagramı

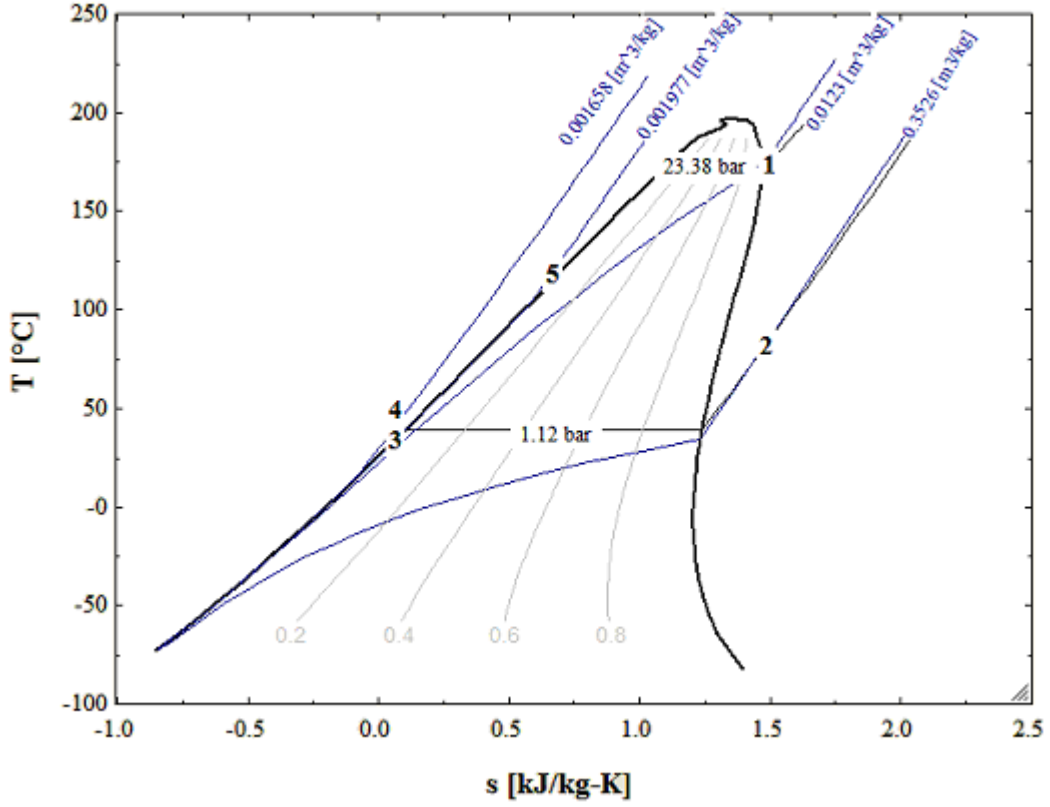
Separatörden ayrılan 9.5 bar ve 178 °C sıcaklıklı jeotermal akışkan ise doğrudan ikili (binary) sistemde birinci buharlaştırıcıya gönderilir. Burada ısısının bir kısmını n-pentana aktarır ve 9 bar basınç 149 °C sıcaklık ile ikinci buharlaştırıcıya geçer. Her iki buharlaştırıcıda jeotermal akışkanın ısısını alan n-pentan doymuş buhar fazında

organik türbinlere giriş yapar. Birinci buharlaştırıcıdan 172.7 °C sıcaklık ve 23.38 bar basınç ile organik türbine giriş yapan n-pentan, 1.12 bar türbin basıncında genişletilerek 12.1 MWe elektrik enerjisi elde edilir. Benzer şekilde, ikinci buharlaştırıcıdan 143.9 °C sıcaklık ve 14.27 bar basınç ile organik türbine giriş yapan n-pentan, 1.12 bar türbin basıncında genişletilerek 12.6 MWe elektrik enerjisi elde edilir.

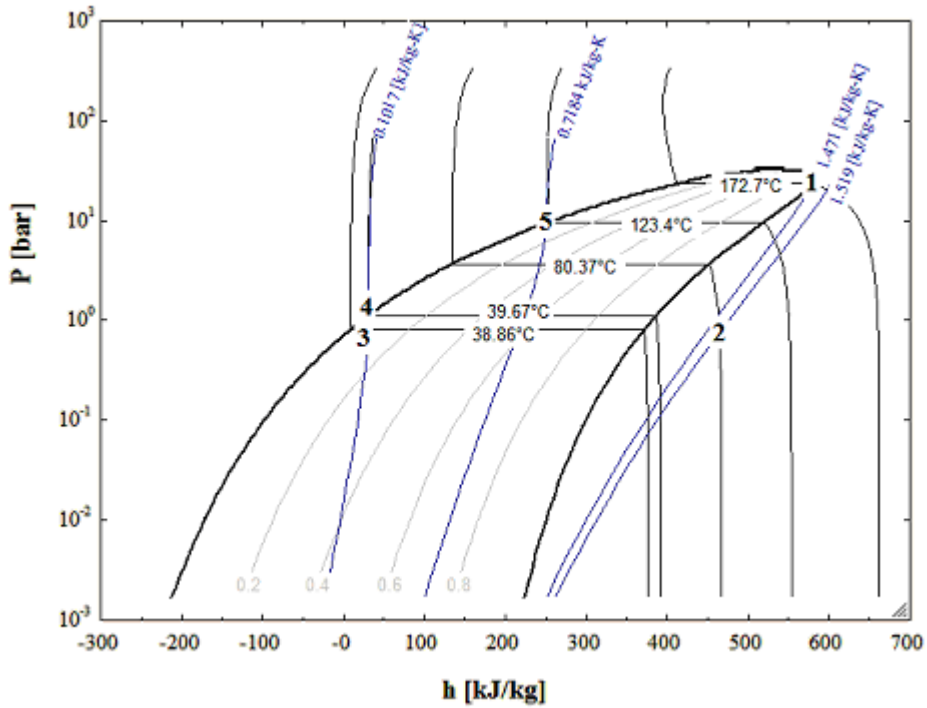
Organik türbinlerden çıkan n-pentan kondansörlerde sıcaklığı düşürülerek pompa ile ön ısıtıcılara gönderilir ve çevrimin tamamlanması sağlanır. Buna göre, her iki türbin çıkışından kondansöre aktarılan n-pentan birinci kondansör çıkışında 80 °C sıcaklıktan 38.86 °C sıcaklığa, ikinci kondansör çıkışında 74 °C sıcaklıktan 38.86 °C sıcaklığa düşmesi sağlanmıştır. Bu sıcaklık düşümünü sağlayan fan gücü birinci üniteye 922 kWe, ikinci üniteye ise 1762 kWe olacaktır. Ayrıca sıcaklığı azaltılmış n-pentanın ön ısıtıcılara gönderilmesini sağlayan pompalardaki güç kayıpları birinci ve ikinci üniteye sırasıyla, 601 kWe ve 574 kWe olacaktır.

Her iki buharlaştırıcı ve ön ısıtıcıdan geçip atık olarak kalan jeotermal akışkan ise, bir noktada birleştirilerek 80°C sıcaklık ve 8 bar basınç ile re-enjeksiyon kuyusuna geri basılmaktadır.

Uygulanan bu modele ait binary çevrimlerin her biri için n-pentana ait T-s ve P-h diagramları EES programında oluşturulmuştur. Buna göre birinci ünite binary çevrime ait sıcaklık-entropi (T-s) diagramı Şekil 8.5’de basınç-entalpi (P-h) diagramı ise Şekil 8.6’da gösterilmektedir.

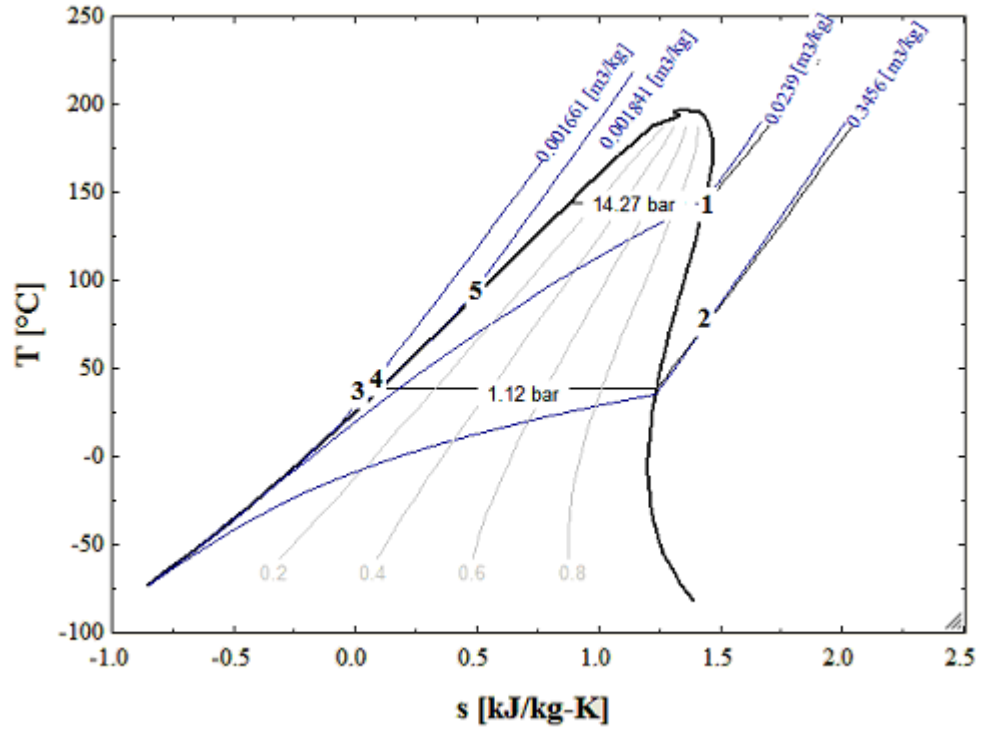


Şekil 8.5 : Bottoming binary model-2 binary çevrimi birinci ünite T-s diagramı

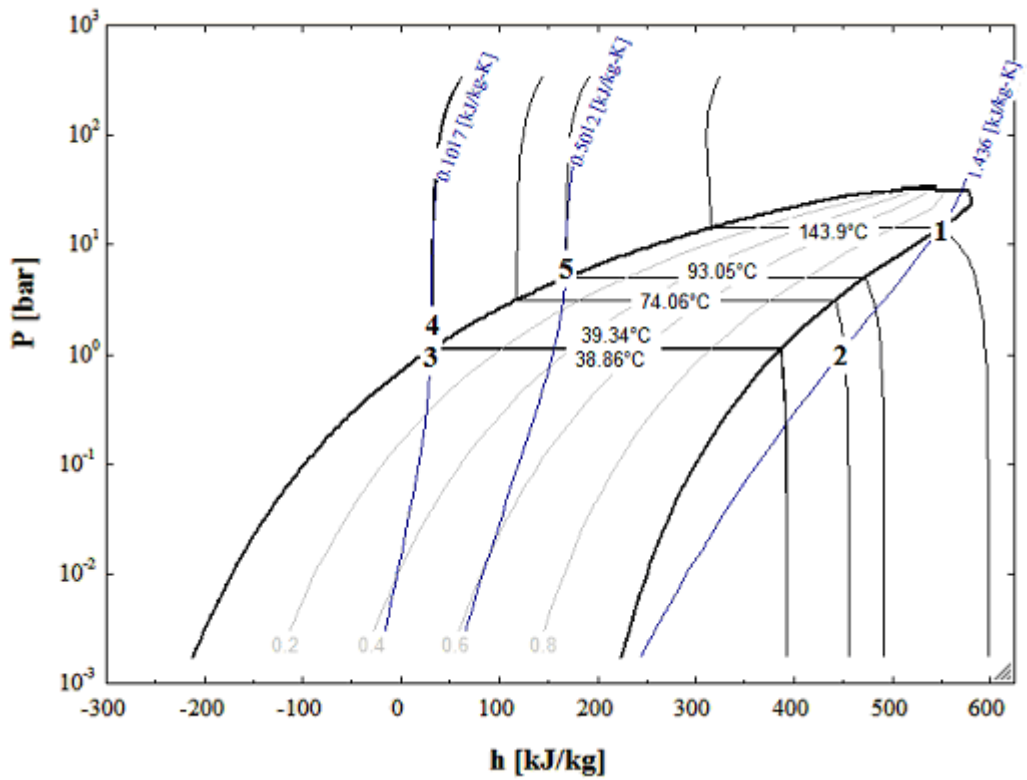


Şekil 8.6 : Bottoming binary model-2 binary çevrimi birinci ünite P-h diagramı

Benzer şekilde ikinci ünite binary çevrim için optimize edilmiş değerlere göre oluşan T-s ve P-h grafiği de sırasıyla Şekil 8.7 ve Şekil 8.8'da belirtilmiştir.



Şekil 8.7 : Bottoming binary model-2 binary çevrimi ikinci ünite T-s diagramı



Şekil 8.8 : Bottoming binary model-2 binary çevrimi ikinci ünite P-h diagramı

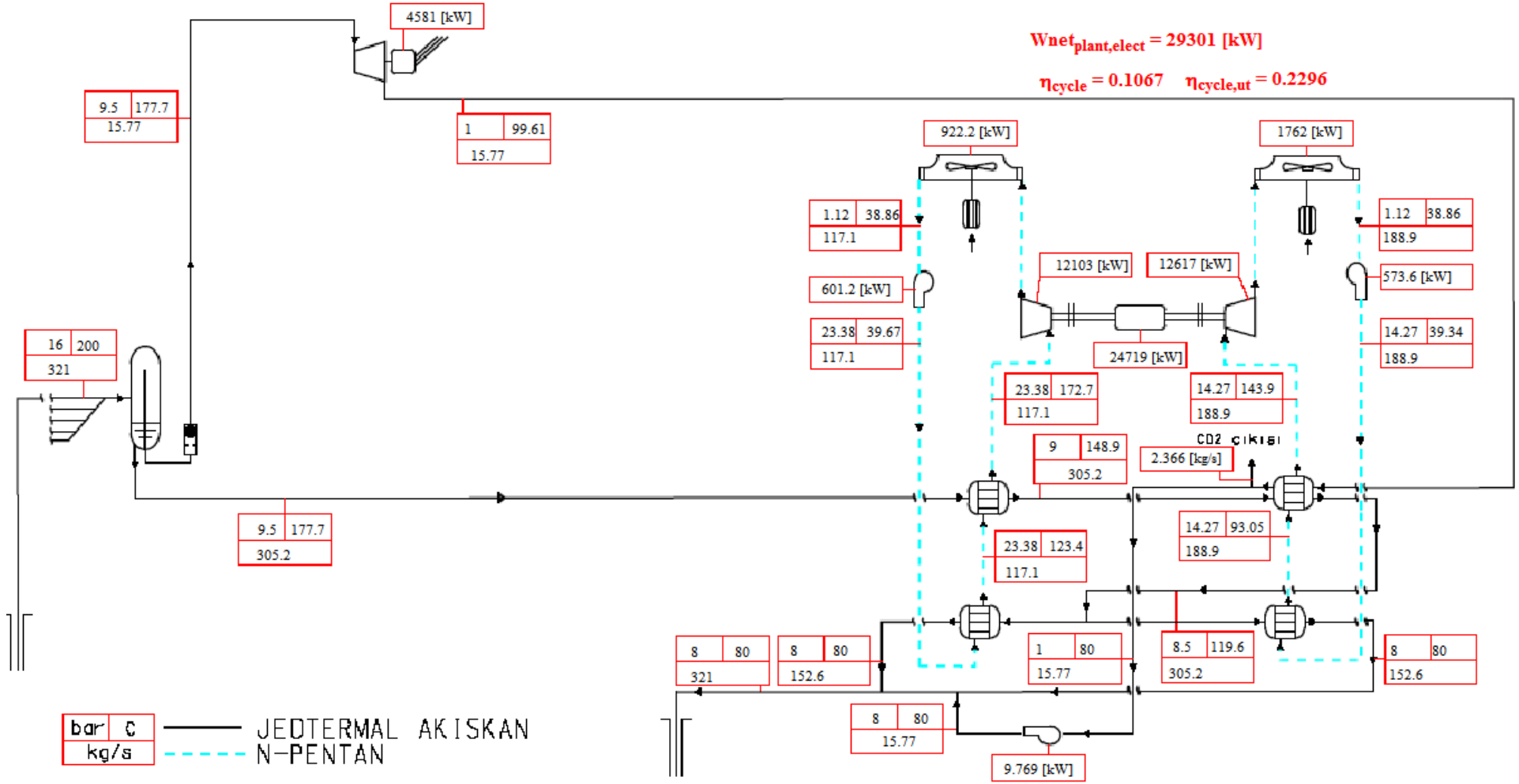
## 8.2 Bottoming Binary Çevrim Modeli-2 Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kızıldere jeotermal sahası için model olarak oluşturulan bottoming binary çevrimi-2'de, yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen optimum çalışma şartları Çizelge 8.1'de özet olarak belirtilmiştir.

**Çizelge 8.1:** Kızıldere sahasında uygulanan çevrim modeli-2 sistem elemanları için tespit edilen optimum çalışma şartları

Kombine Çevrim Sistem Elemanları	Hesaplanan Optimum Çalışma Şartları	
	Değer	Birim
Separatör basıncı-1	9.5	bar
Buhar türbini çıkış basınçları	1	bar
Buharlaştırıcı-1 çıkış basıncı	23.38	bar
Buharlaştırıcı-2 çıkış basıncı	14.27	bar
Buharlaştırıcı-1 çıkış sıcaklığı	173	°C
Buharlaştırıcı-2 çıkış sıcaklığı	144	°C
Organik türbin-1 çıkış basıncı	1.12	bar
Organik türbin-2 çıkış basıncı	1.12	bar

Şekil 8.9 mevcut üretim debilerinde (1155 ton/st) ve optimum çalışma şartlarında elde edilecek sonuçları, EES programında oluşturulan akış diagramı üzerinde görülmektedir.



Şekil 8.9 : Bottoming binary çevrim modeli-2’de belirlenen optimum işletme şartları





## 9. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Kızıldere jeotermal sahası, 1968 yılında keşfedilmiş ve 1984 yılında kurulan santral ile günümüze kadar elektrik üretimine devam etmiş Türkiye'nin en önemli jeotermal enerji sahasıdır [12]. Kızıldere jeotermal sahası, rezervuar sıcaklığı 200- 242 °C arasında olan sıvının hakim olduğu bir sistemdir. Bilinen diğer jeotermal kaynaklarımızdan en büyük farkı, içerisinde yüksek oranda yoğunlaşmış gaz bulundurmasıdır. Bu oran, rezervuarda % 1-2.5, üretilen buharda hacimce % 5 ve ağırlıkça % 10-21 olarak bilinmektedir [12].

Kızıldere jeotermal santrali, tek flaşlı çevrim modeline göre tasarlanmıştır ve net üretim gücü, 15 MWe'dir. Santralin işletme geçmişine bakıldığında, uzun yıllar geri basma (re-enjeksiyon) yapılmamasından kaynaklı üretilebilirliklerin oldukça düşmüş olduğu görülmektedir [13]. Ayrıca jeotermal akışkanın yüksek oranda CO<sub>2</sub> içermesi, sahanın basıncının düşmesi ile CaCO<sub>3</sub> (kalsit) çökmesine, üretim çaplarının düşmesine, üretilebilirliğin azalmasına yol açmaktadır.

Kızıldere jeotermal sahası üzerinde halihazırda var olan santralden üretim devam etmekte olup, sahanın azalan üretimi arttırmak için yeni kuyular delme projeksiyonu geliştirilmektedir. Sahada var olan 242 °C sıcaklıklı akışkanı kullanarak yeni açılacak kuyuların üretimleriyle 60 MWe kapasiteli yeni bir santral kurulumu hedeflenmektedir [14].

Hazırlanan bu çalışmanın amacı, geliştirilen yeni santral teknolojilerini kullanarak ülkemizin en önemli jeotermal sahalarından biri olan Kızıldere sahasından elektrik üretim verimliliğini arttırmaktır. Bunun için sırasıyla Kızıldere jeotermal sahası hakkında bilgi verilmiş, jeotermal enerjiden elektrik üretim teknolojileri anlatılmış, bu teknolojiler içinden Kızıldere jeotermal sahasında kullanılacak 3 farklı santral modeli seçilmiştir. Seçilen santral modelleri EES programında tasarlanmıştır. Oluşturulan modellerde yüzey tesisleri ve santral elemanlarının her birine ait optimum işletme şartlarının belirlenmesi için hesaplamalar yapılmıştır. Tespit edilen

optimum santral işletme şartlarına göre, tasarlanan santral modellerinden elde edilebilecek net elektrik güçleri ve verimlilikleri karşılaştırılmıştır.

Kızıldere jeotermal sahası için kullanılabilir üç farklı santral modeli tanımlanmıştır. Bu modellerden ilki çift flaşlı çevrim modeli, ikincisi bottoming binary tip çevrim modeli-1 ve sonuncusu bottoming binary tip çevrim modeli-2 olarak tanımlanmıştır. Seçilen üç farklı santral modeli EES programında oluşturulduktan sonra, kuyubaşı sıcaklığı 200 °C ve kuyubaşı basıncı 16 bar değerleri sabit kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Sahanın bulunduğu bölgeye ait hava sıcaklığı ve nemlilikler, yıllık ortalama değerler olarak kullanılmıştır. Buna göre hava sıcaklığı 16 °C ve havanın bağıl nemliliği % 61 olarak alınmıştır. Ayrıca, sistemlerde kullanılan türbinler, jeneratör, pompa ve soğutma kulesi fan verimlilikleri için belirtilen değerler her modelde aynı kabul edilmiştir. Bununla birlikte uygulanan her çevrim modeli için üretilen jeotermal buhardaki yoğuşmayan gazların tamamı CO<sub>2</sub> ve buhar içindeki ağırlıkça oranı % 15 olarak kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Ayrıca, her modelde tasarlanan re-enjeksiyon sıcaklığı en az 80 °C olarak kabul edilmiştir. 80 °C altındaki re-enjeksiyon sıcaklıklarında santralden daha fazla güç elde edilmesine rağmen, jeotermal akışkan içindeki silikanın serbest hale geçerek çökmesi sorunu yaşanabilmektedir. Bu yüzden, tüm modellerin tasarımında re-enjeksiyon sıcaklığı kısıtı 80 °C olarak kabul edilmiştir.

Kızıldere jeotermal sahası için seçilen santral çevrim modellerinin uygulamasında, her bir sistem için optimum çalışma şartlarının tespiti yapılmıştır. Optimum çalışma şartlarının hesaplamalarında, EES programında oluşturulan model üzerinde, optimize edilecek parametreler için farklı değerler verilerek, en yüksek santral net gücünü sağlayacak sonuç aranmaktadır. Her bir sistem parametresi için hesaplanan optimum değerler sonucunda elde edilen santral net güçleri ve verimliliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Kızıldere jeotermal sahası için uygulanan model sonuçlarını gösteren Çizelge 9.1'de belirtilen çevrim numaralandırması; Model-1 çift flaş santral modelini, Model-2 bottoming binary çevrim modeli-1'i, Model-3 ise, bottoming binary çevrim modeli-2'i ifade etmektedir.

Çizelge 9.2'de uygulanan üç farklı çevrim modelinin optimum çalışma şartları belirtilmiştir.

Optimum çalışma şartları sağlandığında model çözümleri mevcut durumdaki toplam üretim debisi esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Kızıldere jeotermal sahasında toplam 9 adet kuyudan ortalama 1155 ton/st (321 kg/sn) üretim yapılmaktadır.

**Çizelge 9.1:** Uygulanan santral çevrim modellerinin mevcut saha üretim debilerine göre elde edilen sonuçları.

Çevrim Modelleri	Üretilen Net Santral Gücü	Çevrim verimi	Kaynak Kullanım Verimi
	MWe		
Model-1	21.72	0.09	0.19
Model-2	28.85	0.10	0.22
Model-3	29.30	0.11	0.23

**Çizelge 9.2:** Kızıldere jeotermal sahası için uygulanan çevrim modellerine ait optimum çalışma şartları.

Çevrim Modelleri	Separatör1 Basıncı	Separatör2 Basıncı	Buhar Türbini-1 Çıkış Basıncı	Buhar Türbini-2 Çıkış Basıncı	Buharlaştırıcı-1 Çıkış Basıncı	Buharlaştırıcı-2 Çıkış Basıncı	Buharlaştırıcı-1 Çıkış Sıcaklığı	Buharlaştırıcı-2 Çıkış Sıcaklığı	Organik Türbin-1 Çıkış Basıncı	Organik Türbin-2 Çıkış Basıncı
	bar	bar	bar	bar	bar	bar	°C	°C	bar	bar
Model-1	4.00	0.80	0.06	0.06						
Model-2	12.00	0	0.06	0	27.56	17.97	183	157	1.12	1.09
Model-3	9.5	0	1.00	0	23.38	14.27	172.7	143.9	1.12	1.12

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, tüm çevrim modelleri için, üretilen net santral gücü ve yüksek verimliliklere model-3 ile yapılan uygulamadan elde edildiği görülmektedir. Mevcut durumda, Kızıldere jeotermal santrali 321 kg/sn debi ile 15 MWe üretilirken, aynı üretim miktarları ile, en verimli çalışan model-3 ile 29.3 MWe elektrik enerjisi elde edilmektedir.

Sonuç olarak, Kızıldere jeotermal sahası için, dördüncü bölümde belirtilen koşullar sabit kalmak şartı ile, seçilebilecek en verimli santral modeli model-3 ile ifade edilen bottoming binary çevrim modeli-2'dir. Aynı zamanda, model-3 sonuçlarına çok yakın sonuçlar elde edilen model-2'de çalışılan bu saha için aynı şekilde verimli ve uygulanabilir bir santral model çözümü olabilmektedir.

26 yıldır işletilmeye devam eden ülkemizin ilk jeotermal santrali olan Kızıldere jeotermal santrali düşük separatör basınçlarında (3.5- 4.5 bar) tek flaşlı çevrim modeli ile toplam 15 MWe net güç ile üretimine devam etmektedir. 1960'lı yılların jeotermal santral teknolojileriyle işletilen Kızıldere santrali için, günümüzün gelişen jeotermal santral teknolojileri ile çözümünde daha verimli sonuçlar elde edilmiştir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Durak, S.**, 2009. Jeotermal Enerjiye İlişkin Yasal Düzenleme ve Destekler EPDK, Ankara.
- [2] **DiPippo, R.**, 2005. Geothermal Power Plants Principles, Applications and Case Studies, Elsevier, Dortmund, Massachusetts.
- [3] **Dağdaş, A., Öztürk R., Bekdemir, Ş.**, 2005. Thermodynamic Evaluation of Denizli Kızıldere Geothermal Power Plant and its Performance Improvement, Energy Conversion & Management 46, p: 245-256 Elsevier.
- [4] **Parlaktuna, M., diğerleri.**, 2007. Denizli- Kızıldere Jeotermal Sahası Elektrik Enerjisi Üretim Potansiyeli Üzerine Bir Çalışma, TMMOB Jeotermal Enerji Semineri, Makina Mühendisleri Odası Seminer Bildirisi.
- [5] **Yıldırım, M., Aydoğdu, Ö.**, 2007. Türkiye’de Binary Cycle (Çift Akışkanlı), Yöntemle Elektrik Üretimine Uygun Jeotermal Sahalar, TMMOB Jeotermal Enerji Semineri, Makina Mühendisleri Odası Seminer Bildirisi.
- [6] **Url-1** <<http://www.eie.gov.tr>>, alındığı tarih 12.03.2010
- [7] **Url-2** <<http://www.maden.org.tr>>, alındığı tarih 16.03.2010
- [8] **Madencilik Özel İhtisas Komisyonu**, 1996. Madencilik Alt Komisyonu, Jeotermal Enerji Çalışma Grubu,. Rapor, T.C Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, Yayın no: DPT: 2441-ÖİK: 497
- [9] **Atalay, Ö.**, 2004. Jeotermal Sistemlerin Ekserji Analizi- Kızıldere Örneği: Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [10] **Serpen, Ü.**, 2010. Jeotermal Güç Santralleri Ders Notları, İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Müh. Bölümü, İstanbul.
- [11] **Url-3** <<http://www.geothermal-energy.org>>, alındığı tarih 20.05.2010
- [12] **Gökçen, G., Özcan, N. Y.**, 2008. Yoğuşmayan Gazların Jeotermal Santral Performansına Etkisi: Kızıldere Jeotermal Santrali, Jeotermal Enerji Semineri, Makina Mühendisleri Odası Seminer Bildirisi.



- [13] **Serpen, Ü., Türkmen, N.**, 2008. Kızıldere Jeotermal Santralinin 23 Yıllık Performansının Değerlendirilmesi, Jeotermal Enerji Semineri, Makina Mühendisleri Odası Seminer Bildirisi.
- [14] **Akbaş, R.**, 2009. Zorlu Petrogas, kişisel görüşme, İstanbul.
- [15] **Yerli, B.**, 2010. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, kişisel görüşme, İstanbul
- [16] **Radmehr, B.**, 2005. Preliminary Design of a Proposed Geothermal Power Plant in Nw- Sabalan Area, Azerbaijan- Iran, The United Nations University, Geothermal Training Programme, Reykjavik, Iceland.
- [17] **Durmuş, T.**, 2006. Salavatlı Jeotermal Santralinin Ekserji Analizi Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Enerji Enstitüsü
- [18] **Holman, J. P.**, 1988. Thermodynamics, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- [19] **Ege Mühendislik**, 2005. ORMAT Technical Data Report, İstanbul

## ÖZGEÇMİŞ

Ayşe Hilal Kıvanç 1983 yılında Edirne’de doğmuş, ilk ve orta öğrenimini Edirne’de tamamlamıştır. 2000 yılında Edirne Fen Lisesinden mezun olduktan sonra aynı yıl içinde İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği bölümünü kazanmıştır. 2005 yılında bölüm ikincisi olarak mezun olduktan sonra aynı yıl Fiogaz San. Tic. A.Ş şirketinde yurt dışı satın alma ve lojistik biriminde çalışmaya başlamıştır. 2006 yılında mevcut işinden ayrılarak Zorlu Enerji Grubu şirketlerinden Trakya Bölgesi Doğal Gaz Dağıtım A.Ş şirketinde proje- etüt bölümünde çalışmaya başlamıştır. Halen aynı bölümde proje uzmanı olarak çalışmalarına devam etmektedir. 2007 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Enerji Bilim ve Teknoloji yüksek lisans programına başlamış ve halen aynı bölümde öğrenimine devam etmektedir.