



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **ÜLKEMİZDEKİ ORTA ENTALPİLİ BİR JEOTERMAL KAYNAK İÇİN TASARLANAN SÜPERKRİTİK VE SUBKRİTİK BINARY ÇEVİRİM MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**AYŞE HİLAL KIVANÇ ATEŞ  
UMRAN SERPEN  
NTU JEOTERMAL DANIŞMANLIK**



# ÜLKEMİZDEKİ ORTA ENTALPİLİ BİR JEOTERMAL KAYNAK İÇİN TASARLANAN SÜPERKRİTİK VE SUBKRİTİK BINARY ÇEVİRİM MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

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

## ÖZET

Dünyada ve ülkemizdeki jeotermal kaynakların çoğu orta entalpilidir. Orta entalpili jeotermal kaynaklar için 2000'li yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan binary santral modelleri kaynak özelliklerine göre sürekli gelişim göstermektedir. Son yıllarda gelişen binary çevrim teknolojisinde özellikle 140°C-160°C sıcaklıklı jeotermal kaynaklardan enerji üretimini ve santral verimlerini arttırmak için binary çevrimlerde kullanılan ikincil akışkanların kritik sıcaklık ve basınç değerlerini kullanarak yeni çevrim modelleri tasarlanmaktadır.

Binary çevrimlerde ikincil akışkanlar genellikle kritik sıcaklık ve basınç değerlerinin altındaki şartlarda çalıştırılıp enerji üretimi sağlanıyordu ancak son yıllarda daha düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklardan enerji üretimini sağlamak adına ikincil akışkanlar kritik sıcaklık ve basınç değerlerinin üstünde kullanılmaya başlanmıştır.

Hazırlanan bu çalışmada ülkemizde bulunan orta entalpili bir jeotermal kaynak için süperkritik ve subkritik şartlarda tasarlanmış bir santral modelinin sonuçlarının karşılaştırılması yapılmaktadır. Aynı zamanda, bu model için farklı ikincil akışkanlar kullanılarak en verimli çevrim modelinin oluşturulması ve çalışma şartlarının optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçları tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Binary çevrim, Süperkritik, Subkritik, Jeotermal Enerji Santrali.

## ABSTRACT

Most of the geothermal resources in the world and our country are middle enthalpies. Binary power plants that are used to generate electricity especially for medium enthalpy geothermal sources that are used widely in the 2000's, and power plant models have been developed continuously depending on the geothermal resource specifications. Nowadays, developing binary cycle technology can provide more efficient geothermal power plant with especially temperature between 140°C and 160°C of sources using supercritical conditions of working fluids.

In general, the working fluids of binary cycles used to generate electricity of binary power plants working with its subcritical pressure and temperature values but, in recent years, they are run at supercritical conditions because of extracting more energy of middle or low temperature geothermal resources.

In this study, supercritic and subcritic geothermal power plant models are designed for one of the middle enthalpy geothermal resource in our country, and then, the results are compared. At the same time, the effects of different working fluids on power plant efficiencies and optimum working conditions of power plant are investigated and the results will presented.

**Key Words:** Binary cycle, Supercritic, Subcritic, Geothermal Power Plant.

## 1. GİRİŞ

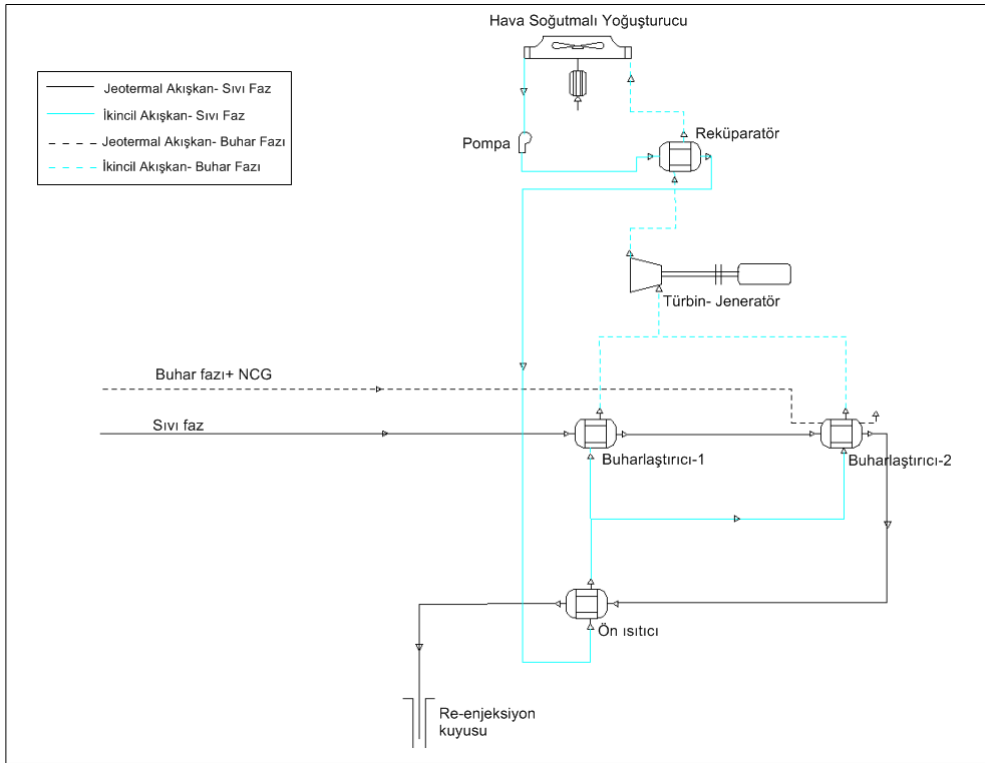
Jeotermal enerji santrali teknolojisinin gelişim tarihinde, 1980'li yıllarda ilk kez prototip olarak kullanımı başlayan binary santrallerin yaygın kullanımı ancak 2000'li yıllarda gerçekleşmiştir [1]. 2011 yılı jeotermal enerji istatistiklerine göre ise, dünyada 15 ülkede toplam 235 adet binary santral bulunmaktadır ve brüt kapasiteleri toplamı yaklaşık 708 MWe olarak belirtilmiştir [2].

Binary (ikili) santrallerde kullanılan ikincil akışkanın özellikleri ve çalışma şartları, çevrimden elde edilecek gücün ve santral verimliliğinin üzerinde doğrudan etkilidir. Binary jeotermal santrallerinde kullanılan çalışma akışkanı kritik sıcaklık ve basınç değerlerinin altında kullanılıyorsa subkritik (kritik şartlar altında), eğer kritik sıcaklık ve basınç değerlerinin üzerinde kullanılıyor ise de süperkritik (kritik şartlar üzerinde) çevrim modeli olarak adlandırılmaktadır.

Hazırlanan bu çalışmada ülkemizde bulunan orta entalpili bir jeotermal kaynak için tek kademeli bir binary santral modeli oluşturulmuştur. Aynı model farklı ikincil akışkanlar kullanılarak subkritik ve süperkritik şartlarda optimize edilmiş ve elde edilen güç değerleri ile santral verimlilikleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sırasında model tasarımı EES yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur [3].

## 2. MODEL TASARIMI VE METHOD

Ülkemizdeki orta entalpili bir jeotermal kaynak için tasarlanan binary santral modeli tek kademeli olarak oluşturulmuştur. Üretim kuyularından çift fazda gelen jeotermal akışkan öncelikle separatörde sıvı ve buhar fazları ayrıştırılmış, sonrasında enerjisinin tamamını seçilen ikincil akışkana aktararak güç üretimi gerçekleştirilmiştir. Modelde kullanılan hava soğutmalı yoğuşturucudaki güç kayıplarını azaltmak ve elde edilen net güç değerini yükseltmek adına sistemde reküparatör kullanılmıştır. Şekil 1'de tasarlanan santral modelinin proses akış diagramı görülmektedir.



Şekil 1. Binary santral modeli akış diagramı.

Santral modeli proses akış diagramına göre, separatörden ayrılan sıvı fazdaki jeotermal akışkan öncelikle birinci buharlaştırıcıya, sonrasında ikincil buharlaştırıcıya aktarılmaktadır. Her iki buharlaştırıcı tek bir ön ısıtıcıya bağlıdır. Buhar fazı ise içeriğindeki NCG ile birlikte doğrudan ikinci buharlaştırıcıya aktarılmaktadır. Isısını ikincil akışkana aktaran jeotermal akışkan uygun sıcaklıkta reenjeksiyon kuyusuna geri basılmaktadır. Buhar içeriğinde çözünmüş halde bulunan CO<sub>2</sub>, ikinci buharlaştırıcıda faz değişimi sonrasında tamamı serbest gaz olarak sistemden ayrıştırılmaktadır.

Çalışmada, farklı ikincil akışkanlar için yapılan tüm hesaplamalarda kullanılan bazı değerler sabit kabul edilmiştir. Tablo-1’de kullanılan sabitler ve yapılan kabuller yer almaktadır.

**Tablo 1.** Model uygulamalarında kullanılan sabitler ve kabuller.

	Birim	Değer
Separatör sıcaklığı	°C	155
Separatör basıncı	bar	7
Toplam debi	ton/s	500
Sıvı/ Buhar (+NCG) oranı	%	95/5
Yoğuşmayan gazların tamamı		CO <sub>2</sub>
Organik türbin verimi	%	85
Jeneratör verimi	%	98
Pompa verimi	%	80
Yoğuşturucu fan verimi	%	80
Bölgenin atmosfer basıncı	bar	1.01
Bölgenin aylık ortalama hava sıcaklığı	°C	17
Bölgenin aylık ortalama bağıl nem miktarı	%	61
Yoğuşturucudan ısınarak çıkan hava sıcaklığı	°C	28
Yoğuşturucudan çıkan havanın nemliliği (bağıl)	%	90
Reenjeksiyon sıcaklığı	°C	80

Tablo-1’de belirtildiği üzere modelde kullanılan jeotermal akışkan %5 buhar+NCG içermektedir. Bu karışımda sadece buhar fazının %3, buhar fazı içinde çözünmüş halde bulunan CO<sub>2</sub>’nin ise %2 oranında olduğu kabul edilmiştir.

Süperkritik binary çevrimde kullanılacak ikincil akışkanın belirlenmesi için jeotermal kaynağın sıcaklığı temel parametredir. Tablo-2’de bazı ikincil akışkanların EES yazılımında kullanılan kritik sıcaklık ve basınç değerleri yer almaktadır. Buna göre 155°C olan jeotermal akışkan için n-pentan ve iso-pentan dışındaki tüm akışkanların seçilebileceği görülmektedir. Bu çalışmada, süperkritik modeller için ikincil akışkan olarak iso-Bütan ve R-134a akışkanları seçilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Subkritik binary çevrim için ise, ikincil akışkan olarak n-bütan ve n-pentan seçilip sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tasarlanan binary santralde uygun ikincil akışkan belirlendikten sonra, bazı parametreler üzerinde optimizasyon yapılmıştır. Subkritik ve süperkritik şartlarda farklı olan bu parametrelerden en önemlileri ısı değiştiriciler için belirlenen pinch sıcaklık değerleridir. Pinch sıcaklığını tarif etmek gerekirse, genel olarak, ısı değiştiricilerde ısı veren jeotermal akışkan sıcaklığı ile ısı alan ikincil akışkan sıcaklığı arasındaki en düşük sıcaklık değeridir. Bir bakıma ısı takası sırasında soğuk akışkan ile sıcak akışkanın birbirine en yaklaştığı nokta da denilebilir. Bu sıcaklık değeri ne kadar düşük olursa, sıcak akışkandan soğuk akışkana aktarılan ısı miktarı o kadar fazla olacaktır [4]. Subkritik modellerde buharlaştırıcı ve ön ısıtıcı için pinch sıcaklığı 5°C-8°C arasında, süperkritik modellerde ise 5°C-30°C arasında seçilip optimize edilmiştir. Yoğuşturucuda ise subkritik ve süperkritik modellerin her ikisinde de pinch sıcaklıklarının 10°C ve üzerinde olacağı, ayrıca akışkanın tam doymuş halde sıvı fazda

yoğuşturucudan ayrılacağı kabulü üzerinde optimizasyon yapılarak en uygun türbin çıkış basıncı belirlenmiştir [5].

**Tablo 2.** EES yazılımına göre kullanılabilir ikincil akışkan kritik sıcaklık ve basınç değerleri.

İkincil Akışkan	Kritik Sıcaklık, °C	Kritik Basınç, bar
Propan	96.68	42.47
n-Bütan	152	37.96
iso-Bütan	134.7	36.4
n-Pentan	196.5	33.64
iso-Pentan	187.2	33.7
R134a	101	40.59
R32	78.11	57.84

Bir diğer optimizasyon parametresi türbin giriş basıncı için belirlenmiştir. Süperkritik şartlarda türbin giriş basıncı için, seçilen ikincil akışkanın kritik basınç değerinin 1.1 ile 1.5 katı arasındaki değerler seçilip optimize edilmiştir. Benzer şekilde, subkritik şartlar için ise, kritik basınç değerinin 0.9 katı ve altındaki değerler seçilmiştir.

Tüm bu seçilen parametrelere göre, belirlenen optimizasyon sınır şartlarında değişen 20 farklı değer için EES yazılımında oluşturulan model çalıştırılmış ve kütle/enerji dengesinin sağlanması ve en yüksek verimlilikte enerji elde edilmesine kadar optimizasyon tekrarlanmıştır. Tablo-3'de optimizasyon parametreleri ve sınır değerleri özet halinde sunulmaktadır.

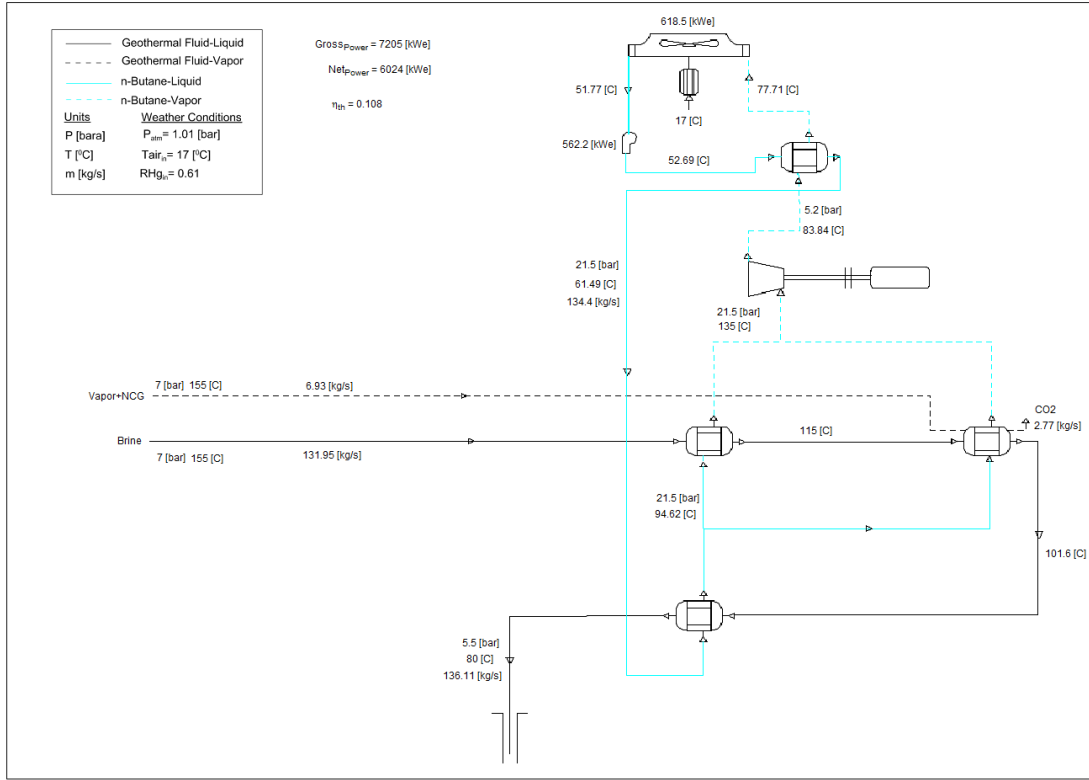
**Tablo 3.** Hesaplamalarda kullanılan optimizasyon parametreleri ve sınır değerleri.

Parametre	Subkritik Şartlar	Süperkritik Şartlar
Buharlaştırıcı ve ön ısıtıcı pinch sıcaklığı	5°C- 8°C	5°C- 30°C
Yoğuşturucu pinch sıcaklığı	≥ 10°C	≥ 10°C
Türbin giriş basıncı	≤ 0.9*P <sub>krt</sub>	1.1*P <sub>krt</sub> ≤ P <sub>tg</sub> ≤ 1.5*P <sub>krt</sub>

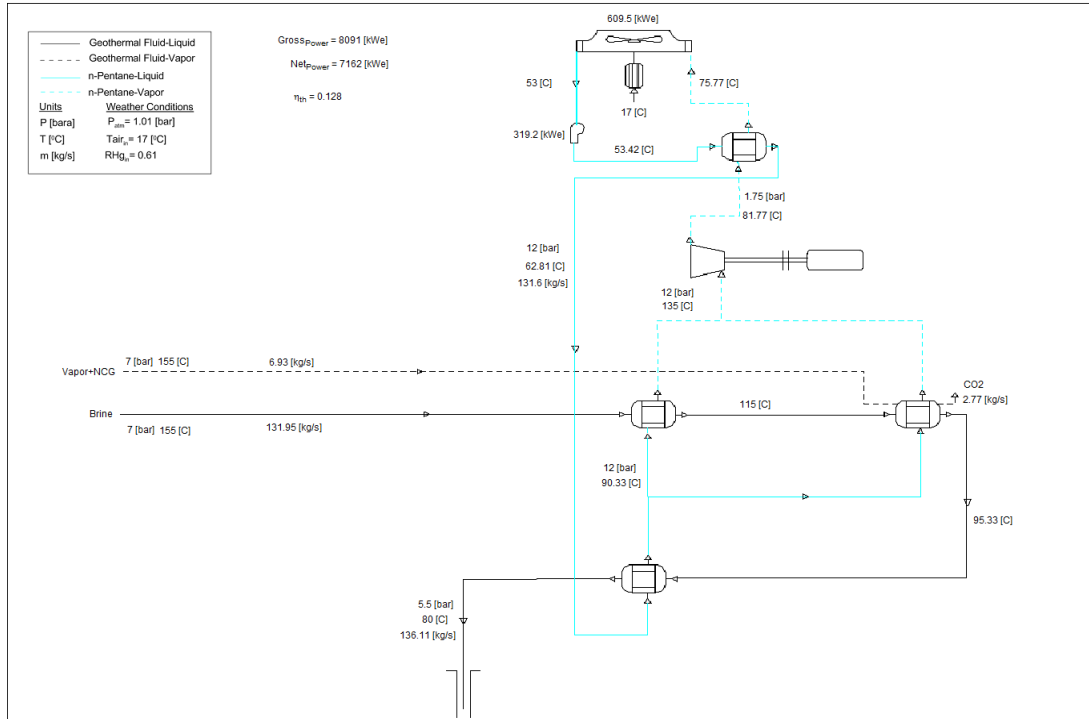
*P<sub>krt</sub>: kritik basınç; P<sub>tg</sub>: türbin giriş basıncı*

### 3. SUBKRİTİK MODEL SONUÇLARI

Şekil 1'de akış diagramı verilen binary santral modeli subkritik şartlarda n-bütan ve n-pentan akışkanları seçilerek ve Tablo-1 ile Tablo-3'de verilen sabitler ile parametreler kullanılarak optimize edilmiştir. Şekil 2'de n-bütan kullanılıp optimize edilmiş modelin kütle ve enerji denge diagramı görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 3'de ise, n-pentan kullanılarak optimize edilmiş modele ait kütle ve enerji denge diagramı yer almaktadır. Buna göre; n-bütan kullanılan santralden 7.205 MWe brüt, 6.024 MWe net güç elde edilmiştir ve santral verimi % 10.8 hesaplanmıştır. N-pentan kullanılan modelden ise 8.091 MWe brüt, 7.162 MWe net güç elde edilmiş ve % 12.8 santral verimi hesaplanmıştır.

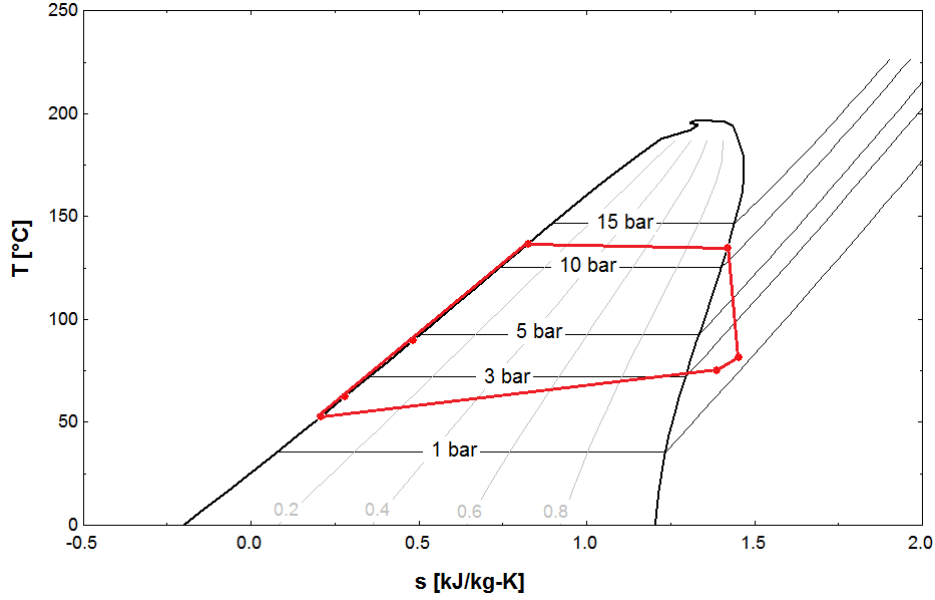


Şekil 2. n-bütan kullanılarak oluşturulmuş santral modeli enerji ve kütle denge diagramı.

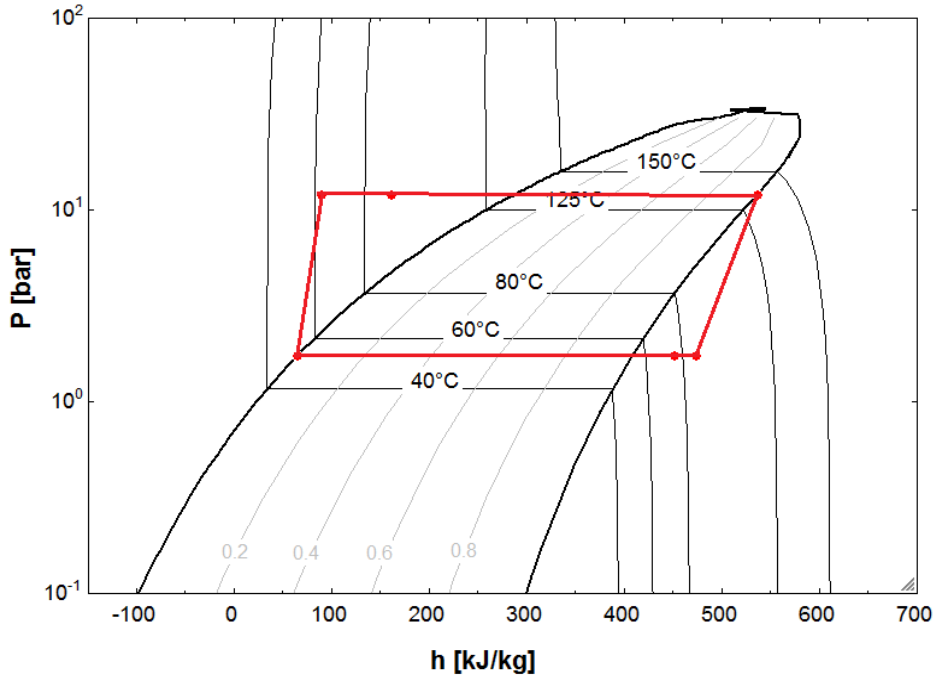


Şekil 3. n-pentan kullanılarak oluşturulmuş santral modeli enerji ve kütle denge diagramı.

Elde edilen net güç değerleri ve verimlilikler karşılaştırıldığında, seçilen jeotermal kaynak için tasarlanan binary santral modelinin subkritik şartlarda çalıştırmak istendiğinde, ikincil akışkan olarak n-pentan kullanılması daha iyi sonuç elde edilmesini sağlamıştır. N-pentan kullanılarak elde edilen modele ait T-s ve P-h diagramları Şekil 4 ve Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 4. n-pentan kullanılarak oluşturulmuş santral modeli T-s diagramı.

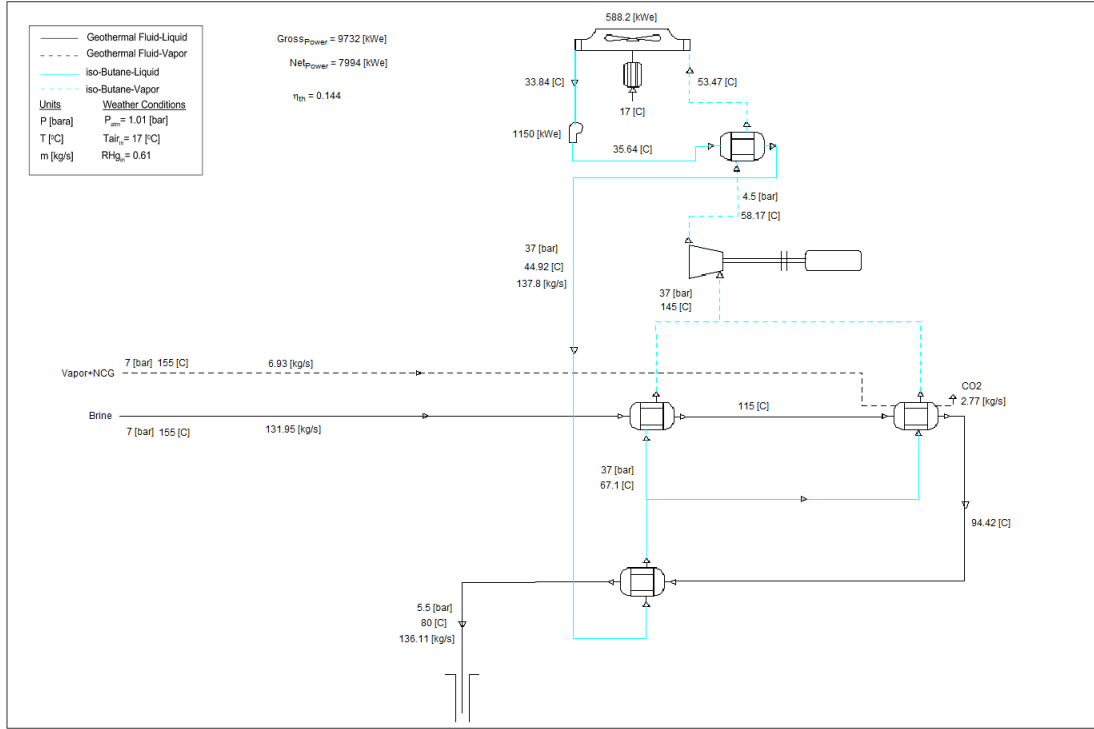


Şekil 5. n-pentan kullanılarak oluşturulmuş santral modeli P-h diagramı

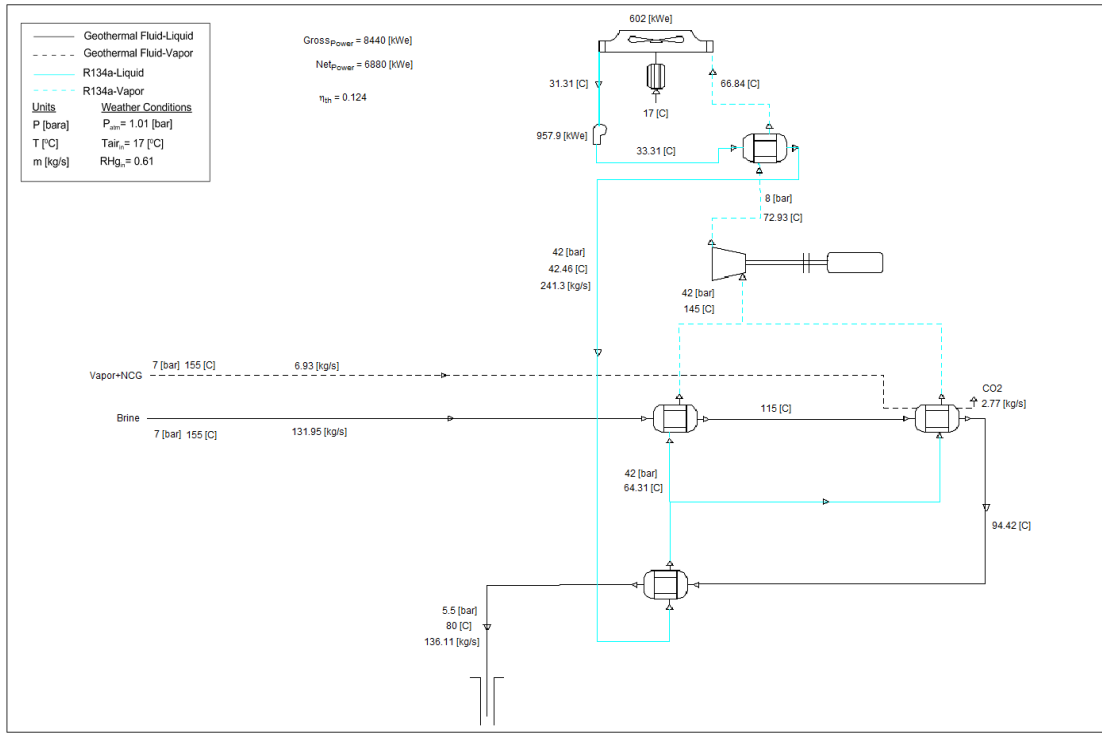


#### 4. SÜPERKRİTİK MODEL SONUÇLARI

Şekil 1’de akış diagramı verilen binary santral modeli süperkritik şartlarda iso-bütan ve R134a akışkanları seçilerek ve Tablo-1 ile Tablo-3’de verilen sabitler ile parametreler kullanılarak optimize edilmiştir. Şekil 6’da iso-bütan kullanılıp optimize edilmiş modelin kütle ve enerji denge diagramı görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 7’de ise, R134a kullanılarak optimize edilmiş modele ait kütle ve enerji denge diagramı yer almaktadır. Buna göre; iso-bütan kullanılan santralden 9.732 MWe brüt, 7.994 MWe net güç elde edilmiştir ve santral verimi % 14.4 hesaplanmıştır. R134a kullanılan modelden ise 8.440 MWe brüt, 6.880 MWe net güç elde edilmiş ve % 12.4 santral verimi hesaplanmıştır.

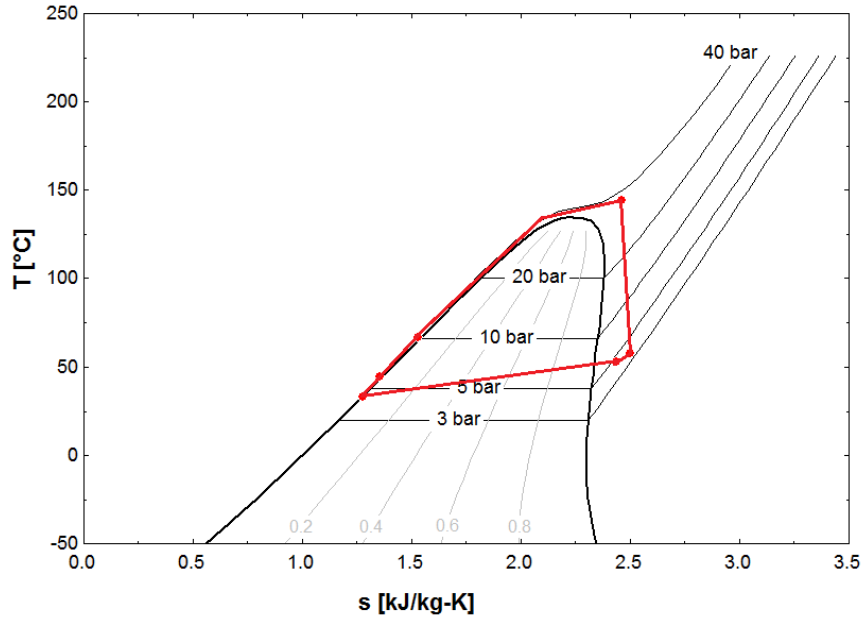


Şekil 6. iso-bütan kullanılarak oluşturulmuş santral modeli enerji ve kütle denge diagramı.

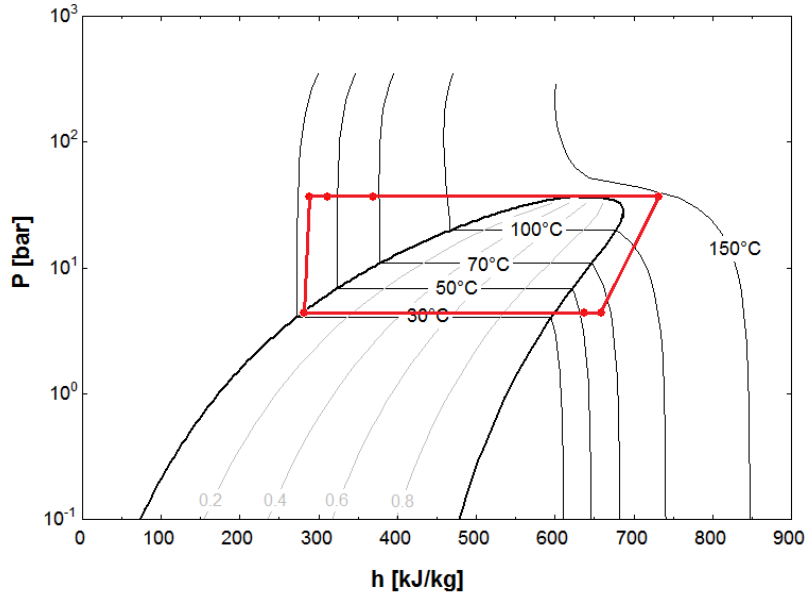


Şekil 7. R134a kullanılarak oluşturulmuş santral modeli enerji ve kütle denge diagramı.

Elde edilen net güç değerleri ve verimlilikler karşılaştırıldığında, seçilen jeotermal kaynak için tasarlanan binary santral modelinin süperkritik şartlarda çalıştırmak istendiğinde, ikincil akışkan olarak iso-bütan kullanılması daha iyi sonuç elde edilmesini sağlamıştır. iso-bütan kullanılarak elde edilen modele ait T-s ve P-h diagramları Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8. iso-bütan kullanılarak oluşturulmuş santral modeli T-s diagramı.



Şekil 9. iso-bütan kullanılarak oluşturulmuş santral modeli P-h diagramı.

## 5. KARŞILAŞTIRMA VE SONUÇLAR

Hazırlanan bu çalışmada ülkemizdeki orta entalpili bir jeotermal kaynak için tek kademeli binary tip bir santral modeli oluşturulmuş ve bu model farklı ikincil akışkanlar kullanılarak subkritik ve süperkritik çalışma şartlarında sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Subkritik şartlar için model n-bütan ve n-pentan ikincil akışkanları ile çalıştırılmış ve optimize edilmiştir. Buna göre, subkritik şartlar için n-pentan ikincil akışkanı ile santralden daha yüksek net güç ve verim elde edilmiştir.

Süperkritik şartlar için ise model iso-bütan ve R134a ikincil akışkanları ile çalıştırılmış ve optimize edilmiştir. Buna göre, süperkritik şartlar için iso-bütan ikincil akışkanı ile santralden daha yüksek net güç ve verim elde edilmiştir.

Sonuçların hepsi karşılaştırmalı olarak Tablo 4'de sunulmaktadır.

Tablo 4. Subkritik ve süperkritik model sonuçlarının karşılaştırması.

	İkincil Akışkan	Brüt Güç, Mwe	Net Güç, Mwe	Parazitik Yükler, Mwe	Parazitik Yük Oranı, %	Termal Verim, %
Subkritik şartlar	n-bütan	7.205	6.024	1.181	0.16	10.8
	n-pentan	8.091	7.162	0.929	0.11	12.8
Süperkritik şartlar	iso-bütan	9.732	7.994	1.738	0.18	14.4
	R134a	8.440	6.880	1.560	0.18	12.4

Tablo 4’de görüldüğü gibi, tüm sonuçlar karşılaştırıldığında, bu model için en verimli şartların iso-bütan akışkanı ile süperkritik şartlarda elde edilebileceği söylenebilir. Sonrasında ise en iyi sonucu subkritik şartlarda n-pentan akışkanı ile elde etmek mümkündür.

Diğer taraftan parazitik yüklerin beklenildiği üzere süperkritik şartlarda subkritik şartlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Aslında literatürde, süperkritik şartlarda çok daha yüksek oranda parazitik yükler elde edilmektedir [5]. Ancak, bu çalışmada Tablo 3’de belirtilen optimizasyon şartlarına göre kritik basıncın en fazla 1.5 katına kadar çıkmıştır. Bu oran daha da yükseltilebilir türbinden elde edilecek gücü arttırmak mümkün olabilmektedir ancak aynı zamanda yoğunlaştırıcı sonrası basınçlandırma pompasındaki güç kaybını çok yükselteceğinden ve sistemdeki malzemelerin basınç sınıfını da arttıracığı için maliyet açısından da yüksek sonuçlar elde edilebileceği öngörülerek optimum türbin giriş basınç oranı en fazla kritik basıncın 1.5 katı olacak şekilde sınırlandırılmıştır.

Hesaplamalardan elde edilen sonuçlar termodinamik açıdan değerlendirilmiştir. Ekonomik açıdan bakıldığında süperkritik şartlarda kullanılacak türbin ve ısı takasçılarının yüksek maliyetli olabilme olasılığına göre tercih edilmeyebilir ancak ayrı bir çalışma ile ekonomik açıdan da değerlendirme sonucu kesin sonuca varılması gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] KIVANÇ ATEŞ, A.H., SERPEN, Ü., “Yüksek Entalpili Jeotermal Sahalar için Uygun Santral Araştırması”, Jeotermal Enerji Semineri, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Seminer Bildirisi, 2013.
- [2] DAGDAS, A., AKKOYUNLU, M.T., BASARAN, T., “ Performance Analysis of Supercritical Binary Geothermal Power Plants”, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Mechanical Engineering Article ID 326689, 15 Nov. 2014.
- [3] EES (Engineering Equation Solver) Commercial Version 6.883.
- [4] DIPIPO, R., “Geothermal Power Plants Principles, Applications and Case Studies”, Elsevier, Dartmouth, Massachusetts, 2005.
- [5] AUGUSTINE, C., FIELD, R., DIPIPO, R., GIGLIUCCI, G., FASTELLI, I., TESTER, J., “ Modeling and Analysis of Sub- and Supercritical Binary Rankine Cycles for Low-to Mid-Temperature Geothermal Resources”, GRC Transactions, Vol. 33, 2009.

## ÖZGEÇMİŞ

### Ayşe Hilal KIVANÇ ATEŞ

1983 Edirne doğumludur. 2005 yılında İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Müh. lisans programını ve 2010 yılında İTÜ Enerji Bilimi ve Teknoloji ABD yüksek lisans programını tamamlamıştır. Mezun olduktan sonra Fiogaz San.Tic. A.Ş firmasında yurt dışı satın alma ve proje mühendisi olarak; 2006-2012 yılları arasında Zorlu Enerji Grubu’nda kıdemli proje uzmanı olarak çalışmıştır. Halen NTU Jeotermal Danışmanlık San.Tic. Ltd.Şti’de petrol mühendisi olarak çalışmaktadır.

### Umran SERPEN

1945 İzmir doğumludur. 1967 yılında İTÜ Petrol Müh. Böl.’den mezun olduktan sonra 1974 yılına kadar TPAO ve MTA’da petrol ve jeotermal sahalarda çalışmıştır. 1974 yılından 1987 yılına kadar ELECTROCONSULT adlı bir İtalyan mühendislik ve danışmanlık şirketinde El Salvador, Guatemala, Meksika, Nikaragua, Kosta Rika, Arjantin, Sili, Etiyopya, Kenya, Filipinler, Rusya ve İtalya gibi ülkelerin çeşitli jeotermal projelerin çeşitli aşamalarında danışmanlık yapmıştır. 1987-2012 yılları arasında İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Müh. Böl.’de Öğr. Gör. Doç. Dr. olarak çalışmış halen NTU Jeotermal Danışmanlık San. Tic. Ltd. Şti.’de çalışmaktadır.