

**JEOTERMAL KAYNAKLI GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN
TERMODİNAMİK ANALİZİ**

Reşit YALÇINKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2012

ANKARA

**JEOTERMAL KAYNAKLI GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN
TERMODİNAMİK ANALİZİ**

Reşit YALÇINKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2012

ANKARA

Reşit YALÇINKAYA tarafından hazırlanan “JEOTERMAL KAYNAKLI GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

.....

Tez Danışmanı, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Zühtü UYSAL

.....

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, G. Ü.

Doç. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

.....

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, G. Ü.

Yrd. Doç. Dr. İbrahim ATILGAN

.....

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, G. Ü.

Tarih:/...../.....

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Reşit YALÇINKAYA

JEOTERMAL KAYNAKLI GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Reşit YALÇINKAYA

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2012

ÖZET

Bu çalışmada iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı, jeotermal enerji kaynaklı güç çevrimleri tasarlanmış ve çevrimlerin termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. İlk önce yeryüzünde türbin ile yoğunlaştırucudan meydana gelen basit bir güç üretim çevrimi öngörülmüş ve bu çevrimin farklı rezervuar koşullarında değişen termodinamik özellikleri incelenmiştir. Ardından bu çevrimin Ömerbeyli jeotermal sahasında bulunan bazı kuyulara ait rezervuar özelliklerindeki termodinamik analizi yapılmıştır. Daha sonra çevrime pompa ilave edildiğinde, çevrimin termodinamik analizindeki değişiklikler incelenmiştir. Son olarak tasarlanan ikili bir çevrimde karbon-dioksit ile birlikte farklı iş akışkanları denenerek, çevrimin termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Her bir çevrim sonucunda elde edilen veriler ile oluşturulan diyagramlar karşılaştırılarak incelemesi yapılmıştır.

Bilim Kodu :914.1.038

Anahtar Kelimeler :Jeotermal enerji, karbon-dioksit, güç çevrimi, termodinamik analiz

Sayfa Adedi :128

Tez Yöneticisi :Doç. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

**THERMODYNAMIC ANALYSIS OF GEOTHERMAL SOURCED POWER
PRODUCTION SYSTEM**

(M. Sc. Thesis)

Reşit YALÇINKAYA

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2012

ABSTRACT

In this study, carbon-dioxide is used as a working fluid, the energy source of geothermal power cycles are designed and thermodynamic analysis of cycles are carried out. At first a simple power generation cycle is designed with a turbine and condenser on the ground and changing thermodynamic properties in different reservoir conditions of this cycle are analysed. Then, thermodynamic analysis of this cycle is performed for some of the wells' reservoir properties in Ömerbeyli geothermal district. Later, a pump is added to this cycle and the changes on the thermodynamic analyse is examined. Finally, a thermodynamic analyse is done for a binary cycle design by using carbon-dioxide and different working fluids. As a result of each cycle data, the diagrams are created for comparing and analysing.

Science Code	:914.1.038
Key Words	:Geothermal energy, carbon-dioxide, power cycle, thermodynamic analysis
Page Number	:128
Adviser	:Assoc. Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında yakın ilgi ve desteğini gördüğüm, karşılaştığım sorunların çözümünde sonuç odaklı yönlendirmeleri ile benden yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Atilla BIYIKOĞLU'na, çalışmamın başından sonuna kadar sarsılmaz inançlarını bir an olsun kaybetmeden maddi, manevi destekleri ile yanımda olan aileme, çalışmamda engin tecrübelerinden yararlandığım teyzem Mak. Müh. Z. Pınar BAŞLAMIŞLI POLAT ile eniştem Mak. Müh. Gökarp POLAT'a, program kodlamalarındaki yardımlarından ötürü Burak YEŞİLÖREN'e, çalışmamın başından sonuna kadar manevi desteği ile yanımda olan Cemil ERKÜRK'e tüm özveri ve sabırları için ayrı ayrı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xiv
RESİMLER LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI ve JEOTERMAL ENERJİ.....	3
2.1. Sera Gazı Emisyonları ve Yenilenebilir Enerjiye Olan İhtiyaç.....	3
2.2. Jeotermal Enerjinin Tanımı ve Tarihi.....	8
2.3. Jeotermal Enerji Kaynağının Mevcut Uygulama Yöntemleri.....	15
2.3.1. Kuru buhar santralleri.....	17
2.3.2. Flaşlı buhar santralleri.....	18
2.3.3. İkili çevrim kullanılan santraller.....	19
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	21
3.1. Jeotermal Akışkan Olarak Karbon-dioksitin Kullanımı.....	21
3.2. Karbon-dioksitin Yeraltında Depolanması.....	24
4. GÜÇ ÇEVİRİMİ TASARIMI.....	29
4.1. Farklı Rezervuar Koşullarındaki Basit CO ₂ Güç Çevrimi.....	29
4.2. Ömerbeyli Jeotermal Sahasında Bulunan Kuyuların Verilerine Göre Hesaplanan Basit CO ₂ Güç Çevrimi.....	37
4.3. Pompalı CO ₂ Güç Çevrimi.....	41

	Sayfa
4.4. İkili (Binary) CO ₂ Güç Çevrimi.....	45
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	50
5.1. Farklı Rezervuar Koşullarında Basit CO ₂ Güç Çevrimi	50
5.2. Ömerbeyli Jeotermal Sahasında Bulunan Kuyuların Verilerine Göre Hesaplanan Basit CO ₂ Güç Çevrimi.....	62
5.3. Pompalı CO ₂ Güç Çevrimi	71
5.4. İkili (Binary) CO ₂ Güç Çevrimi.....	75
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	81
EKLER	84
EK-1. Farklı rezervuar koşulları için her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri	85
EK-2. Farklı rezervuar koşulları için her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları	96
EK-3. Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar	107
EK-4. İkili (Binary) güç çevrimi için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon- dioksitin ve diğer iş akışkanının termodinamik özellikleri	118
EK-5. İkili (Binary) güç çevrimi için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları	120
EK-6 Engineering Equation Solver programındaki hesaplamalar için yazılan kodlar	125
ÖZGEÇMİŞ	128

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. 2007-2035 yılları arasında, rüzgar ve hidroelektrik kaynaklar hariç, Dünyadaki yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimlerinin oranları (milyar kWh) [EIA, 2010].....	4
Şekil 2.2. 2007-2035 yılları arasında Dünya'daki enerji kaynaklı karbon dioksit emisyonlarının değerleri (milyar metrik ton) [EIA, 2010].....	5
Şekil 2.3. 1990-2030 yılları arasında yakıt tipine göre dünyadaki enerji ile ilgili karbondioksit emisyonları [EIA, 2009].....	6
Şekil 2.4. 1990-2035 yılları arasında Dünya'daki enerji tüketimi değerleri (katrilyon Btu) [EIA, 2010].....	6
Şekil 2.5. Dünya genelinde yakıt türüne göre pazarlanan enerji kullanımı (katrilyon Btu) [EIA, 2011].....	7
Şekil 2.6. Yerkabuğu içerisindeki derinlik-sıcaklık eğrisi [Lund ve ark., 2004].....	10
Şekil 2.7. Yerkürenin iç kısımları [Lund ve ark., 2004].....	11
Şekil 2.8. Jeotermal sıcaklıklar [Lund ve ark., 2004].....	15
Şekil 2.9. Gelişmiş Jeotermal Sistemler	16
Şekil 2.10. Jeotermal enerji kaynaklı Kuru Buhar Santralleri.....	17
Şekil 2.11. Jeotermal enerji kaynaklı Flaşlı Buhar Santralleri.....	18
Şekil 2.12. Jeotermal enerji kaynaklı İkili Çevrimin kullanıldığı Santraller.....	20
Şekil 4.1. Jeotermal enerji kaynaklı Basit CO ₂ Güç Çevrimi.....	30
Şekil 4.2. Jeotermal enerji kaynaklı Pompalı CO ₂ Güç Çevrimi.....	42
Şekil 4.3. Jeotermal enerji kaynaklı İkili (Binary) CO ₂ Güç Çevrimi.....	46
Şekil 5.1a. 3 numaralı rezervuarın özelliklerine göre hesaplanan çevrimin T-s diyagramı [Bıyıkoglu ve Yalçınkaya, 2012].....	51
Şekil 5.1b. 3 numaralı rezervuarın özelliklerine göre hesaplanan çevrimin P-h diyagramı [Bıyıkoglu ve Yalçınkaya, 2012].....	52

Şekil	Sayfa
Şekil 5.2.	3 numaralı referans rezervuar koşuluyla karşılaştırmalı olarak diğer bütün çevrimlerin çalışma alanını ifade eden T-s diyagramı [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]52
Şekil 5.3.	Rezervuar durumu 1-2-3-4 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar derinliklerinde birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....53
Şekil 5.4.	Rezervuar durumu 3-5-6 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar sıcaklıklarında birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri.....54
Şekil 5.5.	Rezervuar durumu 3-7-8-9-10-11 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kuyular arası mesafelerde birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....54
Şekil 5.6.	Rezervuar durumu 3-12-13-14-15-16 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar alanlarında birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....55
Şekil 5.7.	Rezervuar durumu 3-17-18 için hesaplanan çevrimlerin, farklı geçirgenlik oranlarında birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....56
Şekil 5.8.	Rezervuar durumu 3-19-20 için hesaplanan çevrimlerin, farklı çevre sıcaklıklarında birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....56
Şekil 5.9.	Rezervuar durumu 3-21-22 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kuyu çaplarında ve kütleli debilerde türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....57
Şekil 5.10.	Rezervuar durumu 1-2-3-4 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar derinliklerinde birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağız basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....58

Şekil	Sayfa
Şekil 5.11. Rezervuar durumu 3-5-6 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar sıcaklıklarında birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağzı basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....	58
Şekil 5.12. Rezervuar durumu 3-7-8-9-10-11 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kuyular arası mesafelerde birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağzı basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....	59
Şekil 5.13. Rezervuar durumu 3-12-13-14-15-16 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar alanlarında birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağzı basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....	60
Şekil 5.14. Rezervuar durumu 3-17-18 için hesaplanan çevrimlerin, farklı geçirgenlik oranlarında birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağzı basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....	60
Şekil 5.15. Rezervuar durumu 3-19-20 için hesaplanan çevrimlerin, farklı çevre sıcaklıklarında birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağzı basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....	61
Şekil 5.16. Rezervuar durumu 3-21-22 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kuyu çaplarında ve kütleli debilerde çevrimin birinci ve ikinci kanununa göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....	62
Şekil 5.17a. ÖB-7 kuyusunun verilerine göre hesaplanan güç çevriminin T-s diyagramı.....	63
Şekil 5.17b. ÖB-7 kuyusunun verilerine göre hesaplanan güç çevriminin P-h diyagramı.....	64
Şekil 5.18a. ÖB-8 kuyusunun verilerine göre hesaplanan güç çevriminin T-s diyagramı.....	64
Şekil 5.18b. ÖB-8 kuyusunun verilerine göre hesaplanan güç çevriminin P-h diyagramı.....	65
Şekil 5.19a. Atrens ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimin T-s diyagramı.....	65

Şekil	Sayfa
Şekil 5.19b. Atrens ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimin P-h diyagramı.....	66
Şekil 5.20a. Gurgenci ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki Rankine çevrimin T-s diyagramı.....	66
Şekil 5.20b. Gurgenci ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki Rankine çevrimin P-h diyagramı.....	67
Şekil 5.21a. Gurgenci ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki Brayton çevrimin T-s diyagramı [Yalçınkaya ve Bıyıkoglu, 2012 ^b].....	67
Şekil 5.21b. Gurgenci ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki Brayton çevrimin P-h diyagramı [Yalçınkaya ve Bıyıkoglu, 2012 ^b].....	68
Şekil 5.22. ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularına ait rezervuar koşullarındaki çevrimler ile Atrens ve ark. ile Gurgenci ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimlerin birinci ve ikinci kanun verimleri ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri.....	68
Şekil 5.23. ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularına ait rezervuar koşullarındaki çevrimler ile Atrens ve ark. ile Gurgenci ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimlerin birinci ve ikinci kanun verimleri ile rezervuardan çekilen ısı enerjisine göre değişen termodinamik özellikleri.....	70
Şekil 5.24a. Pompasız CO ₂ Güç Çevriminin T-s diyagramı.....	72
Şekil 5.24b. Pompasız CO ₂ Güç Çevriminin P-h diyagramı.....	72
Şekil 5.25a. Pompalı CO ₂ Güç Çevriminin T-s diyagramı.....	73
Şekil 5.25b. T-s diyagramında 1 ve 6 noktalarının yakınlaştırılmış görünümü....	73
Şekil 5.25c. Pompalı CO ₂ Güç Çevriminin P-h diyagramı.....	74
Şekil 5.26. Net iş, birinci ve ikinci kanun verimlerinin pompasız ve pompalı CO ₂ güç çevrimleri için aldığı değerler.....	74
Şekil 5.27. İkili çevrimde karbon-dioksit ile birlikte kullanılan iş akışkanlarına göre çevrimin ısı akısında meydana gelen değişim.....	76
Şekil 5.28. İkili çevrimde karbon-dioksit ile birlikte kullanılan iş akışkanlarına göre çevrimde üretilen işte meydana gelen değişim.....	77

Şekil	Sayfa
Şekil 5.29.	İkili çevrimde karbon-dioksit ile birlikte kullanılan iş akışkanlarına göre çevrimde üretilen entropide meydana gelen değişim.....78
Şekil 5.30.	İkili çevrimde karbon-dioksit ile birlikte kullanılan iş akışkanlarına göre çevrimin birinci ve ikinci kanununa ait veriminde meydana gelen değişim.....79

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. 1990-2035 yılları arasında Dünya genelinde enerji kaynaklı karbon dioksit emisyonlarının bölgelere göre dağılımı (milyar metrik ton) [EIA, 2010].....	5
Çizelge 2.2. 2008-2035 yılları arasında OECD üyesi olan ve olmayan ülkelerdeki yenilenebilir enerji kaynağına göre elektrik üretimleri (milyar kWh) [EIA, 2011].....	8
Çizelge 2.3. Jeotermal kaynak tipleri [Lund ve ark., 2004].....	14
Çizelge 3.1. 4 km. derinliğe ve 30 MPa enjeksiyon basıncına sahip bir Sıcak Kuru Kayaç rezervuarında kritik üstü karbon-dioksit ile suyun termodinamik özellikleri [Brown, 2000].....	21
Çizelge 4.1. Termodinamik analizi yapılan rezervuarların özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....	31
Çizelge 4.2. Atrens ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki karbon dioksitin Termodinamik özellikleri.....	38
Çizelge 4.3. Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan basit CO ₂ Rankine çevriminin termodinamik özellikleri [Yalçinkaya ve Bıyıkoglu, 2012 ^b].....	38
Çizelge 4.4. Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan kompresörsüz CO ₂ Brayton çevriminin termodinamik özellikleri [Yalçinkaya ve Bıyıkoglu, 2012 ^b].....	39
Çizelge 4.5. Ömerbeyli jeotermal sahasında bulunan bazı kuyulara ait özellikler [Doğdu N., 2006].....	40
Çizelge 4.6. Ömerbeyli jeotermal sahasındaki ÖB-7 kuyusunun verilerine göre çevrimdeki karbon-dioksitin Termodinamik özellikleri.....	40
Çizelge 4.7. Ömerbeyli jeotermal sahasındaki ÖB-8 kuyusunun verilerine göre çevrimdeki karbon-dioksitin Termodinamik özellikleri.....	41
Çizelge 4.8. Pompalı CO ₂ Güç çevrimi için Termodinamik analizi yapılan rezervuarın özellikleri.....	42
Çizelge 4.9a. Pompasız CO ₂ güç çevrimi için karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri.....	43

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.9b. Pompalı CO ₂ güç çevrimi için karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri.....	43
Çizelge 4.10. İkili (Binary) CO ₂ Güç çevrimi için Termodinamik analizi yapılan rezervuarın özellikleri.....	46
Çizelge 5.1. Farklı rezervuar koşullarındaki basit CO ₂ çevriminin termodinamik analiz sonuçları [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012].....	50
Çizelge 5.2. ÖB-7, ÖB-8 kuyuları ile Atrens ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarına göre hesaplanan çevrimlerin termodinamik analiz sonuçları.....	63
Çizelge 5.3. Pompalı ve pompasız CO ₂ çevrimlerinin termodinamik analiz sonuçları.....	71
Çizelge 5.4. Farklı iş akışkanları için ikili (binary) CO ₂ çevriminin termodinamik analiz sonuçları.....	75

RESİMLER LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. İtalya'nın Larderello bölgesinde 19. yüzyılın ilk yarısında kurulan kapalı lagün [Dickson ve Fanelli, 2004].....	12
Resim 2.2. Mucit Prince Piero Ginori Conti ile birlikte 1904 yılında Larderello'da ilk kez jeotermal buhar enerjisi kullanılarak elektrik üretilen motor [Dickson ve Fanelli, 2004].....	13

SİMGELER ve KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simge	Açıklama
$\dot{m}$	Kütle debisi, (kg s^{-1})
$\dot{W}$	İş, (kW)
$\dot{W}_t$	Türbin işi, (kW)
$\dot{W}_p$	Pompa işi, (kW)
$\dot{W}_{kayıp}$	Kayıp iş, (kW)
$\dot{W}_{tr}$	Tersinir iş, (kW)
$\dot{W}_{net}$	Net iş, (kW)
$\dot{Q}$	Birim zamanda ısı geçişi, (kW)
$\dot{Q}_g$	Sisteme giren ısı akısı, (kW)
$\dot{Q}_ç$	Sistemden çıkan ısı akısı, (kW)
$\dot{I}$	Toplam tersinmezlik, (kW)
$\dot{S}_{gen}$	Toplam entropi üretimi, (kW K^{-1})
$\dot{E}$	Ekserji, (kW)
P	Basınç, (MPa)
P_{enj}	Enjeksiyon kuyusu basıncı, (MPa)
$P_{üret}$	Üretim kuyusu basıncı, (MPa)
P_{rez}	Rezervuar basıncı, (MPa)
P	Bileşik basınç, (Pa)
T	Sıcaklık, (K)
T_0	Çevre (referans) sıcaklığı, (K)
T_{rez}	Rezervuar sıcaklığı, (K)
T_{enj}	Enjeksiyon sıcaklığı, (K)
f	Sürtünme faktörü

Simge	Açıklama
$Re_{D,p}$	Reynolds sayısı
D	Kuyu çapı, (m)
D_{pe}	Eşdeğer çap, (m)
Δz	Yükseklik farkı, (m)
ΔL	Kuyular arası mesafe, (m)
g	Yer çekim ivmesi, (ms^{-2})
g_c	Çevirme faktörü, (1 kgm/Ns^{-2})
G	Kütleli akı, (kg/m^2s)
k	Rezervuarın geçirgenlik katsayısı, (m^2)
K_1	Viskos katsayısı
K_2	Atalet katsayısı
h	Entalpi, ($kJkg^{-1}$)
s	Entropi, ($kJ(kgK)^{-1}$)
u	Toplam iç enerji, ($kJkg^{-1}$)
v	Özgöl hacim, (m^3kg^{-1})
x	Kuruluk derecesi
ρ	Yoğunluk, (kgm^{-3})
μ	Dinamik viskozite, (Pas)
v	hız, (m/s)
ε	Pürüzlülük katsayısı, (m)
ε	Boşluk kesri
H	Rezervuar yüksekliği, (m)
W	Rezervuar genişliği, (m)
η_I	Birinci yasa verimi
η_{II}	İkinci yasa verimi
Φ_s	Şekil faktörü
$\Delta P_{f\text{ kuyu}}$	Sürtünmeden kaynaklanan basınç kaybı, (Pa)

Kısaltma	Açıklama
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CO₂	Karbon-dioksit
EES	Engineering Equation Solver
GJS	Gelişmiş Jeotermal Sistemler
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan teknolojiye rağmen dünya genelinde artan nüfus oranı ve sanayileşme, ülkelerin büyüyen enerji taleplerini karşılamalarına yetmemektedir. 1973 Petrol krizi ve fosil kaynaklı yakıtların azalması ile birlikte yaşanan politik sorunlar, gelişmiş veya gelişmekte olan birçok ülkenin yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgisini arttırmıştır. Artan enerji talepleri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının da olabildiğince verimli kullanılması gerekmektedir.

Yıllar boyunca, gerekli olan enerji talebi ile birlikte paralel olarak artan enerji kullanımı, dünya genelinde çevre kirliliği sorununu da beraberinde getirmiştir. Bölüm 2’de küresel olarak artan sera gazı emisyonları, fosil yakıt ve yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimi ve tüketimi gibi bilgiler sunulmuştur. Bununla birlikte, mevcut enerji üretim sistemlerinin iyileştirilmesi ve yenilenebilir enerji kaynakları ile daha verimli şekilde güç üretimi konusunu ele alan araştırmalar giderek artmaktadır. Ayrıca enerji kaynağının ekonomik ve çevre ile uyumlu olması dikkat edilmesi gereken hususlardandır. Bu nedenle gerekli olan enerji talebinin karşılanması için hazırlanan projeler, orta ve uzun vadeli gelecek projeksiyonları şeklinde hazırlanmalıdır. Dünya genelinde, hükümetler tarafından da desteklenen yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretim tesislerinin ilk yatırım maliyetleri, sağlanan fonlar yardımıyla azaltılabilir.

Fosil yakıtlara alternatif enerji kaynakları arasında en önemlilerinden birisi olan jeotermal enerji, jeotermal kaynaklardan doğrudan veya dolaylı olarak her türlü faydalanılmasını kapsamaktadır. Yenilenebilir, sürdürülebilir, ucuz, güvenilir, tükenmeyen, çevre dostu ve yeşil bir enerji türü olan jeotermal enerji, kısa süreli atmosferik olaylardan etkilenmeyerek, rezervuardaki re-enjeksiyon koşulları devam ettiği sürece bu özelliklerini korurlar. Bölüm 2’de jeotermal enerjinin tanımı, tarihi ve bazı mevcut uygulama yöntemleri hakkında bilgiler sunulmuştur.

Yapılan çalışmada, mevcut jeotermal tesislerin iyileştirilmesi ve küresel iklim değişikliği nedeniyle artan çevresel faktörler göz önüne alınarak, jeotermal enerji

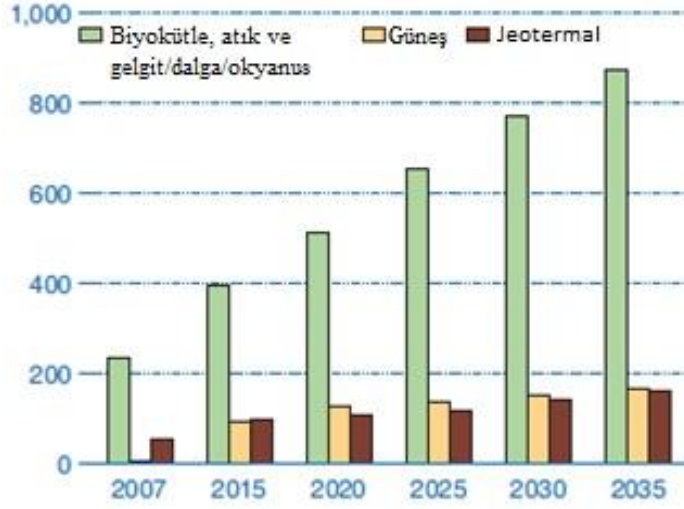
kaynaklı, iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı üç farklı çevrimin termodinamik analizi incelenmiştir. Bölüm 3’de jeotermal akışkan olarak karbon-dioksitin kullanımı ve yer altında depolanması ile ilgili literatürde bulunan mevcut çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 4’de, tasarlanan bu çevrimlerin çalışma şemaları ve koşulları verilmiştir. Bölüm 5’de ise elde edilen sonuçlar neticesinde hazırlanan diyagramlar ve grafikler sunulmuştur.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI ve JEOTERMAL ENERJİ

Bu bölümde Dünya genelinde, ülkelerin enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi, tüketimi ve bu üretime paralel olarak değişen sera gazı emisyonları ile ilgili bilgiler verilerek, yenilenebilir enerjiye olan ihtiyacın önümüzdeki yıllarda hangi ölçüde değişeceği irdelenmektedir. Ayrıca jeotermal enerjinin tanımı, tarihi ve mevcut uygulama yöntemleri ile ilgili ön bilgiler sunulmaktadır.

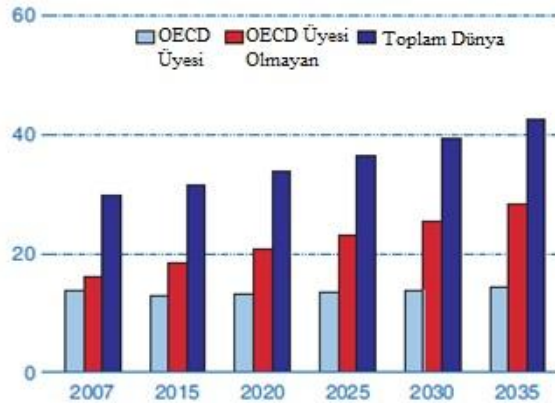
2.1. Sera Gazı Emisyonları ve Yenilenebilir Enerjiye Olan İhtiyaç

Küresel iklim değişikliği konusundaki endişelerden kaynaklanan gelişmeler ve yabancı ülkelerin etkisinden ve kontrolünden bağımsız olarak enerji üretme arzusu gibi nedenler, yenilenebilir enerji üretimindeki gelişmelerin giderek daha da artacağını göstermektedir. 2011 yılında A.B.D Enerji Bakanlığı tarafından yayımlanan uluslararası enerji raporuna göre [EIA, 2011], 2008 yılında 19,1 trilyon kWh olan Dünya genelindeki net elektrik üretiminin, %84 oranında bir artışla, 2020 yılında 25,5 trilyon kWh ve 2035 yılında ise 35,2 trilyon kWh olacağı tahmin edilmektedir. 2003 ve 2008 yılları arasında dünyadaki enerji fiyatlarındaki hızlı artış ve sera gazı emisyonları nedeniyle oluşan çevresel endişeler fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir kaynaklara olan ilgiyi arttırmıştır. 2010 yılında yayımlanan rapora göre [EIA, 2010], Dünya’da yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretiminin 2007 ile 2035 yılları arasında yılda ortalama %3 oranında büyümesinin beklendiği belirtilmektedir. Şekil 2.1 Dünya’daki yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimlerinin milyar kWh cinsinden oranlarını göstermektedir [EIA, 2010].



Şekil 2.1. 2007-2035 yılları arasında, rüzgar ve hidroelektrik kaynaklar hariç, Dünyadaki yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimlerinin oranları (milyar kWh) [EIA, 2010]

Uluslararası enerji raporunda [EIA, 2010], 2007 yılında 29,7 milyar metrik ton olan Dünya'daki enerji kaynaklı karbon dioksit emisyonlarının %43 değerinde bir artışla, 2020 yılında 33,8 milyar metrik ton ve 2035 yılında ise 42,4 milyar metrik ton olacağının tahmin edildiği belirtilmektedir. OECD (Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü) üyesi olmayan, güçlü bir ekonomik büyümeye sahip ve fosil yakıtlara olan bağılılığı devam eden ülkelerin çoğunun mevcut politikaları karbon dioksit emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. 2007 yılına göre OECD üyesi olmayan ülkelerin emisyon değerleri, OECD üyesi ülkelere göre %17 oranında daha yüksektir [EIA, 2010]. Bu oranın 2035 yılında ikiye katlanması beklenmektedir [EIA, 2010]. Şekil 2.2'de Dünya'daki enerji kaynaklı karbon dioksit emisyonlarının değerleri grafik halinde gösterilmektedir [EIA, 2010].



Şekil 2.2. 2007-2035 yılları arasında Dünya'daki enerji kaynaklı karbon dioksit emisyonlarının değerleri (milyar metrik ton) [EIA, 2010]

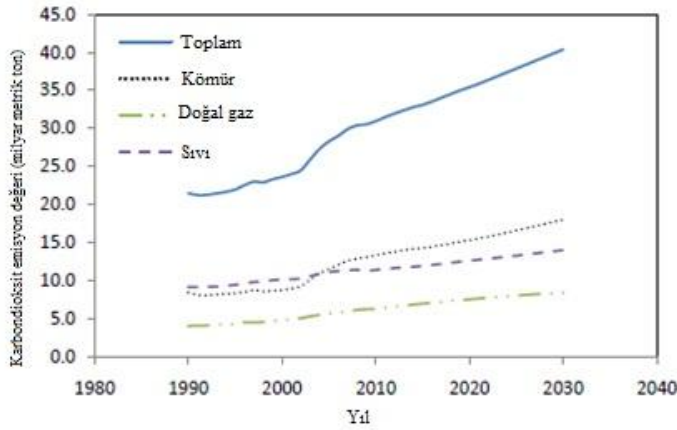
Dünya'daki enerji kullanımı, öncelikle fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan karbon dioksit sonucu oluşan emisyonlar nedeniyle iklim değişikliği tartışmalarının merkezi konumunda olmaya devam etmektedir. Çizelge 2.1'de Dünya genelinde enerji kaynaklı karbon dioksit emisyonlarının bölgelere göre dağılımı sunulmaktadır [EIA, 2010].

Çizelge 2.1. 1990-2035 yılları arasında Dünya genelinde enerji kaynaklı karbon dioksit emisyonlarının bölgelere göre dağılımı (milyar metrik ton) [EIA, 2010]

Bölge	Tarih		Projeksiyonlar					Yüzde değişimin yıllık ortalaması	
	1990	2007	2015	2020	2025	2030	2035	1990-2007	2007-2035
OECD üyesi olan	11,5	13,7	13,0	13,1	13,5	13,8	14,2	1,0	0,1
Kuzey Amerika	5,8	7,0	6,7	6,9	7,2	7,4	7,7	1,1	0,3
Avrupa	4,2	4,4	4,1	4,0	4,0	4,1	4,1	0,3	-0,2
Asya	1,6	2,3	2,1	2,2	2,3	2,3	2,4	2,1	0,2
OECD üyesi olmayan	10,0	16,0	18,5	20,7	23,0	25,5	28,2	2,8	2,0
Avrupa ve Avrasya	4,2	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	3,3	-2,2	0,3
Asya	3,7	9,4	11,2	13,0	14,9	16,9	19,0	5,7	2,5
Orta Doğu	0,7	1,5	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	4,6	2,1
Afrika	0,7	1,0	1,2	1,2	1,3	1,5	1,6	2,6	1,7
Merkez ve Güney Amerika	0,7	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	3,1	1,4
Toplam Dünya	21,5	29,7	31,5	33,8	36,5	39,3	42,4	1,9	1,3

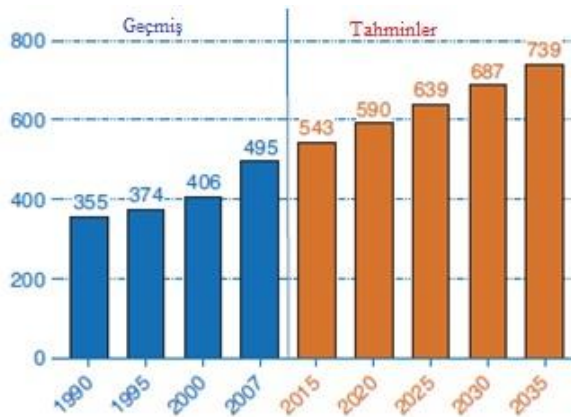
A.B.D. Enerji Bakanlığı'nın 2009 yılında hazırladığı rapora göre [EIA, 2009], OECD'nin ülkeler arasında yaptığı araştırmanın sonucunda Güney Kore'nin yıllık karbon-dioksit emisyonu listesinin başında yer aldığı belirtilmektedir. OECD üyesi olmayan ülkeler arasında ise Çin en yüksek büyüme oranına sahiptir. Elektrik üretmek için en yaygın yakıt olarak kullanılan kömürün enerji ile ilgili CO₂

emisyollarında en yüksek paya sahip olmaya devam ettiği de vurgulanmaktadır. 2007 yılında dünyada kullanılan elektriğin %49'u kömür ile üretilmiştir [EIA, 2009]. şekil 2.3 1990 yılından 2030 yılına kadar yakıt türüne göre CO₂ emisyonları ile ilgili tahminleri göstermektedir [EIA, 2009].



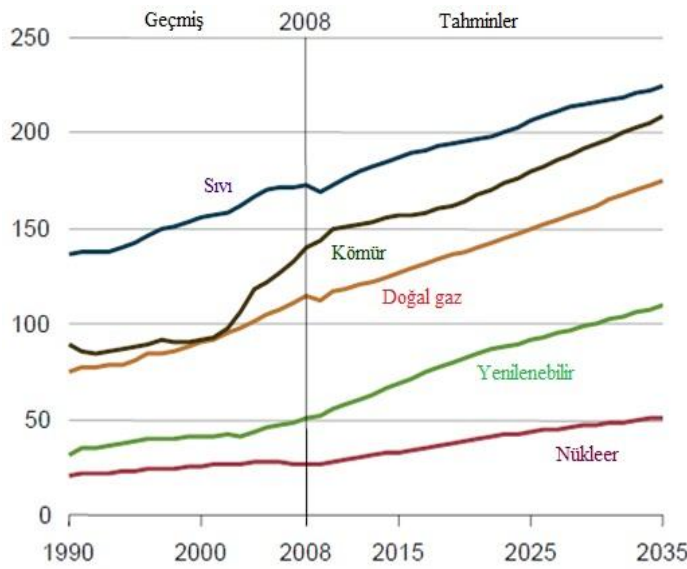
şekil 2.3. 1990-2030 yılları arasında yakıt tipine göre dünyadaki enerji ile ilgili karbondioksit emisyonları [EIA, 2009]

A.B.D. Enerji Bakanlığı tarafından yayımlanan rapora göre [EIA, 2010], 2007 yılında 495 katrilyon Btu olan Dünya'daki enerji tüketiminin 2035 yılına kadar %49 oranında yani yıllık %1,4 değerinde bir artışla 739 katrilyon Btu'ya ulaşması beklenilmektedir. şekil 2.4 Dünya genelindeki enerji tüketim değerlerini grafik halinde göstermektedir [EIA, 2010].



şekil 2.4. 1990-2035 yılları arasında Dünya'daki enerji tüketimi değerleri (katrilyon Btu) [EIA, 2010]

Ayrıca 2011 yılında yayımlanan uluslararası enerji raporuna göre [EIA, 2011], Dünya genelinde yakıt türüne göre pazarlanan enerji kullanımının artacağı öngörülmektedir (Şekil 2.5). Rapora göre Dünya çapında kullanılan enerjinin çoğunun fosil yakıtlar tarafından temininin devam etmesi beklenmektedir. 2008 yılında %34 oranında paya sahip olan sıvı yakıtların –çoğunlukla petrol- en büyük enerji kaynağı olarak kalmasına rağmen, yükselen petrol fiyatlarından ötürü 2035 yılında bu oranın %29’a düşmesi öngörülmektedir. Yenilenebilir enerji ise dünyanın en hızlı büyüyen enerji şeklidir ve 2008 yılında %10 olan payının, 2035 yılında %14 oranında artması beklenmektedir [EIA, 2011].



Şekil 2.5. Dünya genelinde yakıt türüne göre pazarlanan enerji kullanımı (katrilyon Btu) [EIA, 2011]

Raporda [EIA, 2011], 2008 yılında 60 milyar kWh olan jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretiminin, 2035 yılında 186 milyar kWh değerine ulaşması beklendiği belirtilmektedir. Çizelge 2.2’de OECD üyesi olan ve olmayan ülkelerdeki yenilenebilir enerji kaynağına göre elektrik üretimleri sunulmaktadır [EIA, 2011].

Çizelge 2.2. 2008-2035 yılları arasında OECD üyesi olan ve olmayan ülkelerdeki yenilenebilir enerji kaynağına göre elektrik üretimleri (milyar kWh) [EIA, 2011]

Bölge	2008	2015	2020	2025	2030	2035	Yüzde değişimin yıllık ortalaması
							2008-2035
OECD üyesi olan							
Hidrotermal	1329	1418	1520	1600	1668	1717	1,0
Rüzgar	181	492	689	806	852	898	6,1
Jeotermal	38	56	67	79	93	104	3,8
Güneş	12	68	86	95	105	120	8,8
Diğerleri	217	268	309	362	381	398	2,3
Toplam	1778	2302	2670	2941	3099	3236	2,2
OECD üyesi olmayan							
Hidrotermal	1791	2363	2946	3224	3536	3903	2,9
Rüzgar	29	219	347	426	499	564	11,6
Jeotermal	22	56	58	61	70	81	5,0
Güneş	0	19	48	60	65	71	22,8
Diğerleri	41	132	186	252	321	375	8,5
Toplam	1884	2788	3585	4023	4491	4995	3,7
Dünya							
Hidrotermal	3121	3781	4465	4823	5204	5620	2,2
Rüzgar	210	710	1035	1232	1350	1462	7,5
Jeotermal	60	112	125	139	163	186	4,2
Güneş	13	87	134	155	170	191	10,6
Diğerleri	258	400	496	614	702	772	4,1
Toplam Dünya	3662	5091	6256	6964	7590	8232	3,1

Karbon dioksit emisyon değerleri yüksek olan fosil yakıtlarına nazaran alternatif enerji kaynakları çok daha önemlidir. Tek başına büyük enerji taleplerini karşılayamazlar da güneş, rüzgar, hidrotermal enerji vb. kaynakları da kullanılabilir. Örneğin Jeotermal enerji, yeryüzünün iç enerjisini kullanarak, düşük miktarda sera gazı emisyonu ile büyük miktardaki enerji talebini karşılayabilecek potansiyele sahiptir.

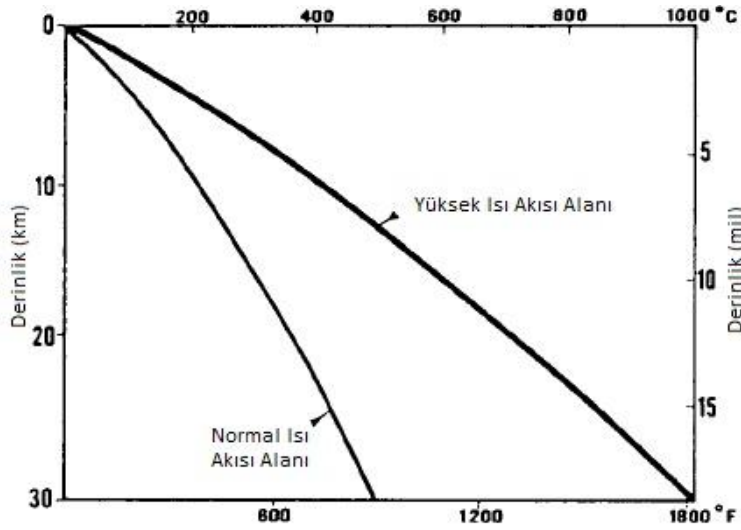
2.2. Jeotermal Enerjinin Tanımı ve Tarihi

Yer ısısı olarak ifade edilen jeotermal kaynak, yer kabuğunun derinliklerinde oluşan ısı enerjisinden meydana gelen ve çeşitli kimyasallar içeren sıcak su, buhar ve gazlardır. Doğrudan veya dolaylı olarak bu kaynaklardan faydalanılması ise jeotermal enerji olarak tanımlanabilir.

Yerel bir kaynak olan jeotermal enerji, ithal yakıtların yerini alarak ülkenin cari açığının azalmasına yardımcı olur ve enerji güvenliğine katkı sağlar. Fosil yakıtlara göre çok daha az hava kirliliğine neden olmasından ötürü çevresel açıdan avantajlı bir enerji kaynağıdır. Jeotermal kaynakların elektriksel güç üretiminde ve doğrudan ısıtma uygulamalarında kullanılmasıyla enerji temini sağlanır. Ayrıca binalarda ve endüstride jeotermal ısı pompalarının kullanılması ile de elektrik ve doğalgaz tasarrufu sağlanır [Lund ve ark., 2004].

Yerkabuğunda muhtemelen dünyanın enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü karşılayacak yeterince ısı mevcuttur. Yeryüzünün ısı içeriği olan çekirdeğin sıcaklığı, yeryüzünün kabuğu olan mantodan çok daha yüksektir ve bu derinliklere inmek imkansızdır [Armstead ve Tester, 1987]. Yeryüzünün derinliklerindeki radyoaktif maddelerin mevcut miktarı hakkında doğrudan bilgiye sahip olunmadığı ve bunun gibi birçok belirsizlikler nedeniyle, yeryüzünün toplam ısı potansiyelini değerlendirmek kolay değildir. Ayrıca toprağın derinliklerindeki maddelerin fiziksel özelliklerinin bilinmemesinin yanı sıra yüzeydeki özellikleri ile de aynı olmayabilir [Armstead ve Christopher, 1983].

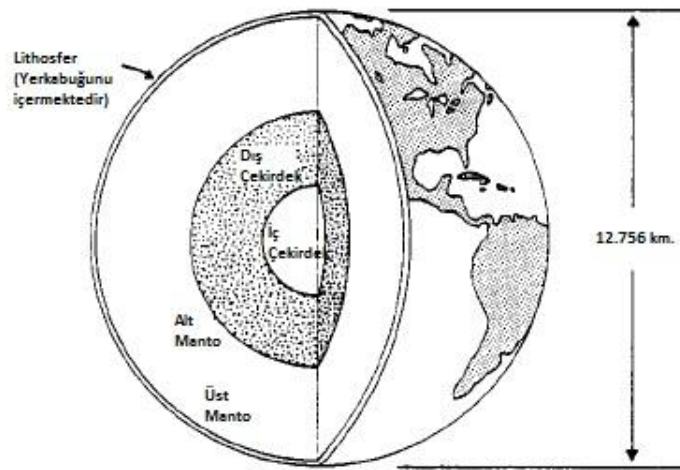
Jeotermal gradyen, yerkabuğunun derinliği ile sıcaklığın artışını ifade eder. Modern teknoloji ile ulaşılabilir sondaj derinliklerinde, jeotermal gradyen ortalama 2,5-3°C/100 m.'dir. Örneğin, yıllık ortalama dış hava sıcaklığının 15 °C olduğu varsayıldığında zemin seviyesinin ilk birkaç metre derinliğinde de bu sıcaklık aynıdır. 2000 m. derinliğe inildiğinde sıcaklık 65°-75°C değerine, 3000 m. derinliğinde ise 90°-105°C civarına ulaşır. Ayrıca ortalama jeotermal gradyen değeri 1°C/100 m.'den daha düşük olan ya da bu değerden on kat daha fazla olan geniş alanlar da mevcuttur [Dickson ve Fanelli, 2004]. İlk birkaç on kilometre için yerküre sıcaklığının derinlikle arttığı kesin olmakla beraber merkeze kadar sabit bir sıcaklık artışına sahip olduğu varsayılır. Buna göre, yerkabuğu içerisindeki sıcaklığın derinliğe göre değişimi Şekil 2.6'da sunulmaktadır [Lund ve ark., 2004].



Şekil 2.6. Yerkabuğu içerisindeki derinlik-sıcaklık eğrisi [Lund ve ark., 2004]

İç kısımları sıcak olan yerküreden dışa doğru kararlı bir ısı akışı ve yüzeyden uzaya sürekli olarak ışıınım ile ısı kaybı mevcuttur. Yüzeyden olan ısı akışının değeri 82 mW/m^2 'dir. Yerkürenin yüzey alanı $5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2$ olarak alınırsa, ısı kaybı miktarı da 42 milyon MW_e olarak hesaplanır [Williams ve Von Herzen, 1974]. Mevcut sondaj teknolojisinin durumu ve yerkabuğunun derinliklerine nüfuz etmenin imkansız olması, kabuğun ısıl içeriğini belirlemeyi zorlaştırır. Dünyadaki en derin kuyu 12 860 m. derinliğinde Rusya'nın Kola yarımadasındadır. İkinci derin kuyu ise 10 658 m. derinliğinde ve İngiltere'de Wytch çiftliğinde bulunmaktadır [Petzet, 1998]. White 1965 yılında yaptığı çalışmada, yeryüzünden 10 km. derinliğe kadar olan bölgedeki ısıl enerjinin $4,77 \times 10^9$ litre petrolün yakılmasına eşdeğer olan $1,3 \times 10^{27} \text{ J}$ olduğu sonucuna ulaşmıştır [White, 1965]. Dünya genelinde tüm enerji tiplerini içeren tüketimin yaklaşık olarak günlük 100 milyon varil petrol kullanımına eşdeğer olduğu kabul edilirse [U.S. Department of Energy, 1987], 10 km. derinliğe kadar olan kayalardaki ısıl enerji tüm insanlığın ihtiyacını $2,3 \times 10^9$ gün, başka bir deyişle 6 milyon yıl karşılayabilecek kadardır. Yer kabuğunun 10 km. derinliğindeki bu kısmın tamamından yararlanabilmek elbette mümkün değildir ancak bu hesaplama jeotermal enerji kaynağının büyüklüğü hakkında bir fikir sahibi olmamızı sağlar [Lund ve ark., 2004].

Yerkürenin şematik kesiti Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Yer kabuğu diye adlandırılan üst tabakadan ve bu yer kabuğunun altında bulunan manto adlı kısmın üst bölgesinden meydana gelen litosfer, yüzeyden yaklaşık 100 km. derinliğe sahiptir. Litosfer tabakası katı kayalardan meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklığa ve basınca sahip manto ise çok viskoz bir sıvı gibi davranarak, gerilme altında çok yavaş bir biçimde kayar. Ana bileşeni silika (SiO_2) olan yer kabuğu ve manto tabakalarında, en yüksek silika konsantrasyonuna kıtasal kabuk sahiptir. Dış ve iç çekirdek ise demir-nikel-bakır karışımından meydana gelmektedir. Dış çekirdekte bu karışım sıvı halden, iç çekirdekte ise katı halden oluşmaktadır [Lund ve ark., 2004].



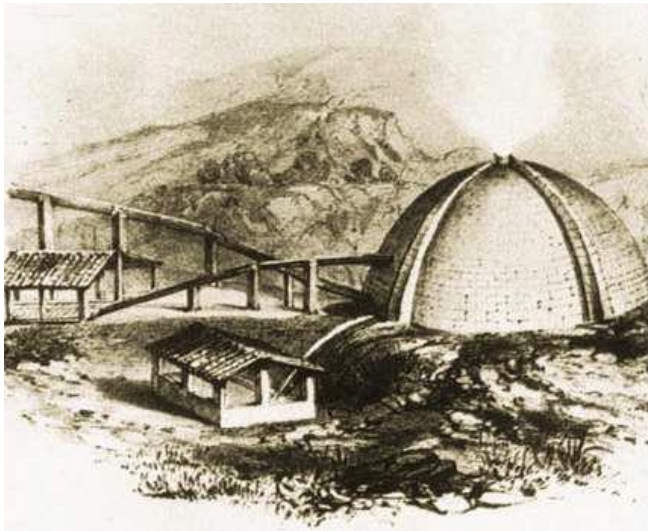
Şekil 2.7. Yerkürenin iç kısımları [Lund ve ark., 2004]

Jeotermal kaynaklar, sahip oldukları büyük miktardaki ısının yüzeye verimli bir şekilde taşınabilmesi için aracı bir akışkana ihtiyaç duyarlar. Doğada bu ihtiyacı karşılayabilecek, yüksek ısı kapasitesine ve yüksek buharlaşma gizli ısısına sahip olan su, ideal bir ısı transfer akışkanıdır [Lund ve ark., 2004]. Suyun yoğunluğu ve viskozitesi sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Dolayısıyla yerkabuğunun derinliklerinde ısınan su, kayaların içinde bulunan soğuk sudan daha hafiftir ve kaldırma kuvvetine maruz kalır. Böylece yeteri kadar ısınan su kaya içerisindeki akışa karşı olan direnci yenerek yukarı doğru ilerler ve yerini daha soğuk olan su alır. Böylece ısı kaynağı ile yer altı suyu arasında doğal taşınım meydana gelmiş olur. Jeotermal kaynakların

ekonomik açıdan en önemli türlerinin oluşumu bu taşınım sayesinde oluşur ve bunlara taşınımsal hidrotermal kaynaklar adı verilir [Lund ve ark., 2004].

Bazı taşınımsal hidrotermal kaynaklarda sistem buhar üretemez. Bunun nedeni sıcaklığın basınç tarafından belirlenen buharlaşma noktasına hiçbir zaman ulaşamamasıdır. Diğer bazı sistemlerde ise durum bunun tam tersidir. Buhar üretilir, yükselir ve soğuk kayalarla karşılaşması sonucu kısmi olarak yoğunlaşır. Yoğuşma ile meydana gelen basınç düşümü de daha çok buharın oluşumunu sağlar. Böylece buhar taşınımı meydana gelmiş olur. Buhar ağırlıklı sistemlerin tipik değerlerinden birine de Larderello/İtalya'da bulunan rezervuar sahiptir. Rezervuarın sıcaklığı 238°C , basıncı ise 3450 kPa 'dır [Lund ve ark., 2004].

İçerdiği enerjiden ötürü jeotermal akışkanlardan yararlanılması 19. yüzyılın başlarına dayanır. Bu süreçte İtalya'nın Larderello bölgesinde doğal olarak ortaya çıkmakta olan veya özel olarak delinmiş sondaj kuyularından çıkan jeotermal akışkanın kullanıldığı kimyasal bir tesis kurulmuştur. 1827 yılında bu sektörün kurucusu olan Francesco Larderel tarafından buharlaşma sürecinde yakıt olarak çevre ormanlardan sağlanan odunun yerine jeotermal enerjiden faydalanılan bir sistem geliştirilmiştir. Resim 2.1'de bu sistemin resmi sunulmuştur [Dickson ve Fanelli, 2004].



Resim 2.1. İtalya'nın Larderello bölgesinde 19. yüzyılın ilk yarısında kurulan kapalı lagün [Dickson ve Fanelli, 2004]

Mekanik enerji üretmek için buharın işletilmesi de aynı zamanda başlamıştır. Jeotermal buhar ilkel gaz asansörleri, pistonlu ve satrifüj pompalar, vinçler gibi cihazlarda kullanılmıştır. İlk jeotermal kaynaklı merkezi ısıtma sisteminin çalışmaları 1892 yılında Boise, Idaho'da (A.B.D) başlamıştır. 1910 ve 1940 yılları arasında Toskana, sanayi, konut binaları ve seraları ısıtmak için düşük basınçlı buharın kullanıldığı hale getirilmiştir. Jeotermal enerji kullanımında diğer bir öncü olan İzlanda 1928 yılında, jeotermal akışkanlardan (özellikle sıcak sular) ısıtma amaçlı yararlanmaya başlamıştır. Jeotermal buhardan elektrik üretiminin ilk denemesi 1904 yılında Larderello'da yapılmıştır. Resim 2.2'de yapılan bu sistemin fotoğrafı sunulmuştur [Dickson ve Fanelli, 2004].



Resim 2.2. Mucit Prince Piero Ginori Conti ile birlikte 1904 yılında Larderello'da ilk kez jeotermal buhar enerjisi kullanılarak elektrik üretilen motor [Dickson ve Fanelli, 2004]

Bu deneydeki başarı jeotermal enerjinin sanayideki değerinin açık bir göstergesidir ve kullanılan bu sistem daha sonra önemli ölçüde geliştirilmesi için başlangıç olmuştur. Larderello'daki elektrik üretimi ticari bir başarı elde etmiştir. 1942 yılında jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretiminin kurulu kapasitesi 127 650 kWe ulaşmıştır. Bazı ülkeler de İtalya'da kurulan bu örneği yakından takip etmiştir. İlk jeotermal kuyu 1919 yılında Beppu, Japonya'da, daha sonra 1921 yılında da Geysers,

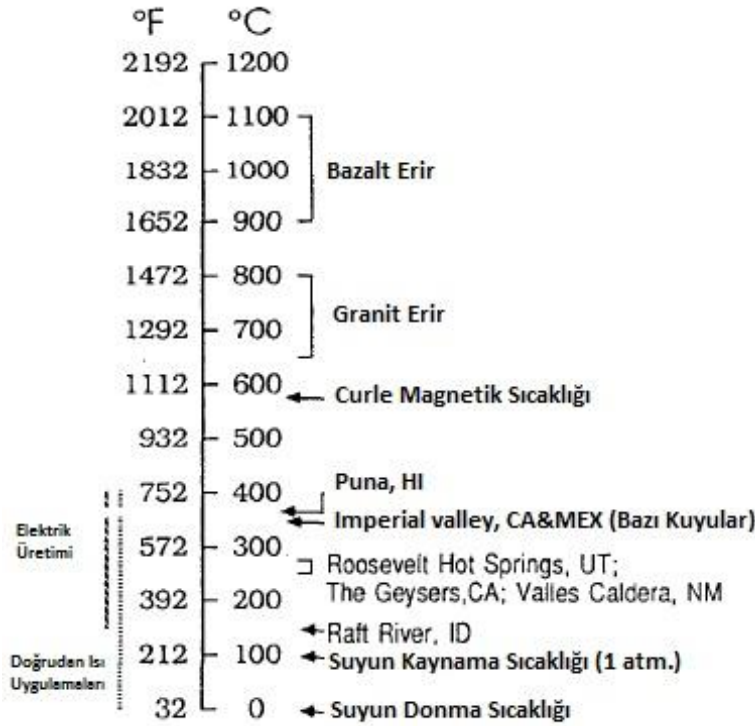
Kaliforniya, A.B.D’de kurulmuştur. 1958 yılında Yeni Zelanda’da küçük bir jeotermal enerji kaynaklı tesisin işletimine, 1959 yılında bir başka tesis ile Meksika’da, 1960 yılında ise A.B.D’de başlanmıştır [Dickson ve Fanelli, 2004].

Jeotermal kaynakların genel olarak sınıflandırılması daha önce White ve Williams [White ve Williams, 1975] tarafından modellenmiştir. Bu modelleme Çizelge 2.3’de sunulmuştur. Sıcaklığı 10 °C’den 340 °C ve üstüne kadar ulaşabilen jeotermal kaynaklarda, Susanville-Kaliforniya’da olduğu gibi 103°C’ye kadar ekonomik olarak elektrik üretilebilir [Lund ve ark., 2004].

Çizelge 2.3. Jeotermal kaynak tipleri [Lund ve ark., 2004]

<u>Kaynak tipi</u>	<u>°C</u>
Taşınımalsal Hidrotermal Kaynaklar	
Buhar ağırlıklı	≈240
Sıcak su ağırlıklı	20-350+
Diğer Hidrotermal Kaynaklar	
Tortul havza/bölgesel akiferler (tortul kayalardaki sıcak akışkan)	20-150
Basınçlı Yer altı Kaynakları	
(hidrostatik basınçtan daha büyük bir basınç altındaki sıcak akışkan)	90-200
Sıcak Kaya Kaynakları	
Halen erimiş halde bulunan kısın (magma)	>600
Katılaşmış (sıcak kuru kaya)	90-650

Bazı jeotermal kaynaklar ve sıcaklıkları Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Ayrıca kolaylık olması bakımından jeotermal sıcaklıklar genel olarak, düşük sıcaklıklar (<90°C), orta seviyedeki sıcaklıklar (90°C-150°C) ve yüksek sıcaklıklar (>150°C) olmak üzere üç gruba ayrılır [Lund ve ark., 2004].



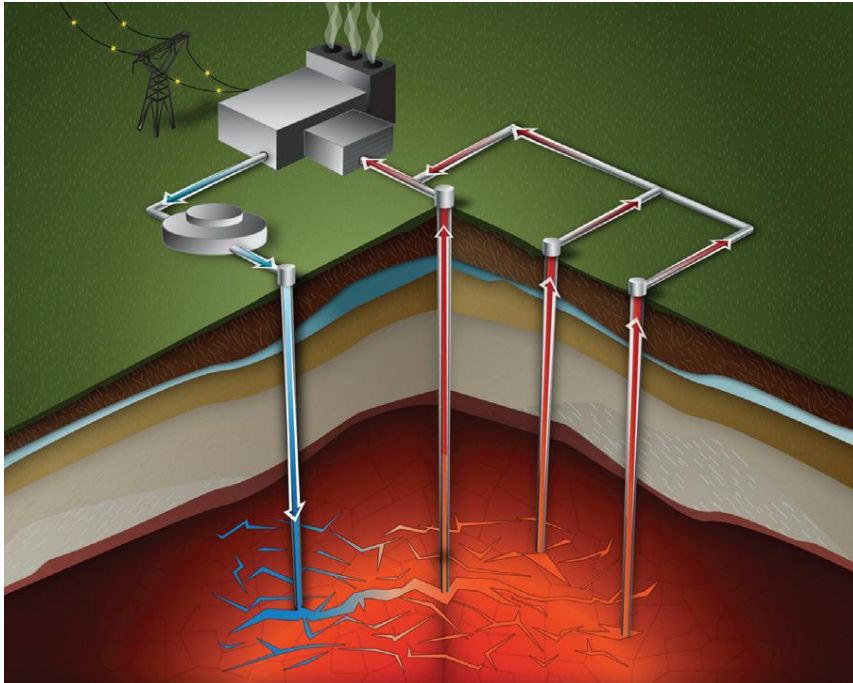
Şekil 2.8. Jeotermal sıcaklıklar [Lund ve ark., 2004]

Sıcak kuru kayaların jeotermal enerjide kullanımı ilk kez 1970 yılında Bob Potter tarafından incelenmiştir [Smith, 1995]. Potter'ın konseptine göre, sıcak kuru kayalarda daha önceden yer alan ısıya büyük bir hidrolik basınç ile erişilip, dikey "hidrolik kırılma" oluşturulabilir. Isı daha sonra basınçlı su kullanılan bir kapalı devre sirkülasyonu ile geri kazanılabilir. Bundan üç yıl sonra ise bu çalışmanın patenti alınmıştır [Potter ve ark., 1974].

2.3. Jeotermal Enerji Kaynağının Mevcut Uygulama Yöntemleri

Elektrik üreten çoğu santral gibi jeotermal enerji santralleri de ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. Yeryüzü kabuğunun altındaki ısıdan yararlanmanın bir çeşidi de Gelişmiş Jeotermal Sistemlerdir. Gelişmiş Jeotermal Sistemler (G.J.S.), verimsiz jeotermal kaynaklardan ekonomik miktarda ısı elde etmek amacıyla oluşturulan rezervuarlarda kullanılmak için tasarlanmıştır. Birçok bakımdan Gelişmiş Jeotermal Sistemler, sıcak kuru kayalardan faydalanan sistemlere göre çok az farklılık gösterir (Şekil 2.9). Düşük geçirgenliğe sahip olan sıcak kayaların içerisindeki

kırıklarda bir ağ oluşturacak şekilde kuyu delinir. İkinci bir kuyu ise çatlaklı kaya hacmi ile kesişerek iyi bir sirkülasyon döngüsü sağlayacak şekilde delinir. Bir kuyudan aşağı doğru pompalanan suyun, döngü yoluyla diğer kuyudan elde edilmesinden önce kırık ağ üzerinden akıtılıp, ısıtılması sağlanır. Isıl enerjiye sahip olan suyun elektrik üretimi için yüzeye çıkarılmasından sonra işlemin tekrarlanması amacıyla ilk kuyuya tekrar enjekte edilir. Gelişmiş Jeotermal Sistemlerin kullanıldığı rezervuarlar genişletilip çoğaltılarak birden fazla kuyuya ve sirkülasyon döngüsüne sahip olabilir [DOE, 2010^a].



Şekil 2.9. Gelişmiş Jeotermal Sistemler

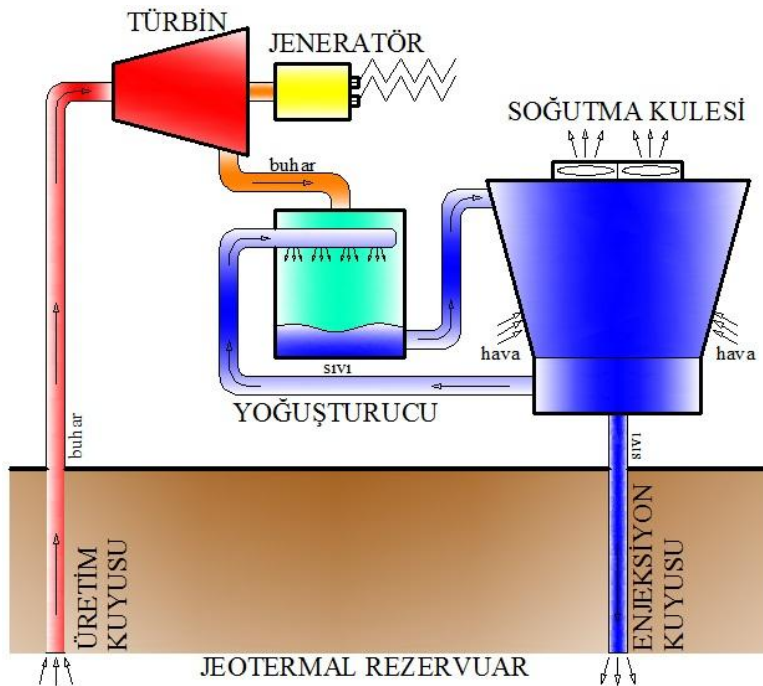
Şekil 2.9’da görüldüğü gibi yeraltında ısınan jeotermal akışkan üretim kuyusundan yeryüzüne ulaşır ve bu enerji santralde kullanılır. Üretim kuyusundan elde edilen akışkanın fazı ve özelliklerine bağlı olarak, yüzeyde kullanılacak tesisin türü seçilir. Jeotermal akışkan olarak suyun kullanıldığı düşünülürse, yüzeyde kurulacak tesisin türünün belirlenmesinde buhar bileşimi (kuru ve sıcak buhar olup olmadığı), üretim kuyusundan çıkış sıcaklığı ve basıncı, akışkan içerisindeki çözünmüş gazların miktarı vb. faktörler etkilidir. Çevre duyarlılığı ve meteorolojik koşullar nedeniyle de

akışkan olarak suyun kullanımı tesisin tasarımını etkilemektedir. Tesislerdeki en büyük amaç ise ekonomik bir şekilde mümkün olan maksimum gücü elde etmektir.

Jeotermal enerji kaynaklı santraller akışkanın sıcaklığına, basıncına (veya fazına) ve mineral içeriğine göre; kuru buharlı, flaşlı ve ikili santraller olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir.

2.3.1. Kuru buhar santralleri

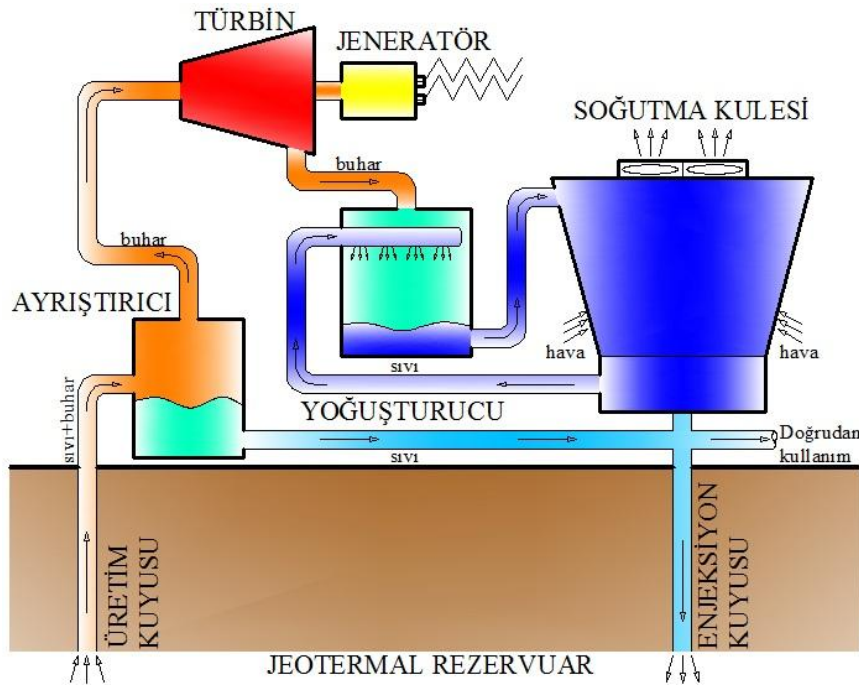
Bu tür santraller özellikle jeotermal kaynağın yüksek kaliteli buhardan (kuru, doymuş ya da kısmen kızgın buhar) oluştuğu yerlerde inşa edilmektedir. Şekil 2.10'da kuru buhar santrallerinin temel dizaynı gösterilmiştir. Bu tasarımda buhar türbin/jeneratör ünitesine doğrudan girer ve elektrik üretir. Türbinden çıkan düşük basınçtaki ve yoğunlaşmış buhar (su) bir soğutma kulesi vasıtasıyla soğutulur. Suyun bir bölümü tekrar rezervuara enjekte edilir ve diğer bölümü ise türbinden çıkan buharı soğutmak için yoğunlaştırıcıya gönderilir. Bu tasarım, buhar kuru ise ve içerisinde çözünmüş herhangi bir mineral bulunmuyorsa etkilidir.



Şekil 2.10. Jeotermal enerji kaynaklı Kuru Buhar Santralleri

2.3.2. Flaşlı buhar santralleri

Jeotermal enerji kaynaklı elektrik santralleri arasında bugün en yaygın olanı flaşlı buhar santralleridir. Sıvı egemen jeotermal kaynaklardan güç üretimi için iki farklı enerji dönüşüm sistemi bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki kaynaklar için flaşlı buhar santralleri tercih edilir. Şekil 2.11’de flaşlı buhar santrallerinin çalışma şemasını gösterilmektedir. Bu tür çevrimlerde jeotermal akışkanın flaş tanklarında kaynatılması ile basıncı azaltılır. Sıvıdan ayrılan buhar elektrik jeneratörüne birleştirilmiş bir türbin vasıtası ile genişletirilir. Flaş tankında buharlaştırılamayan sıvı ise tekrar rezervuara enjekte edilir. Bu tür çevrimlerin birkaç avantajı bulunmaktadır. (1) Tesisin ana bileşenleri korozif özellikteki jeotermal akışkana maruz kalmaz. (2) Yoğuşturulmuş buhar kondenserde kullanılabilir. (3) Çevrim mühendis için nispeten basittir [DOE, 2010^b].



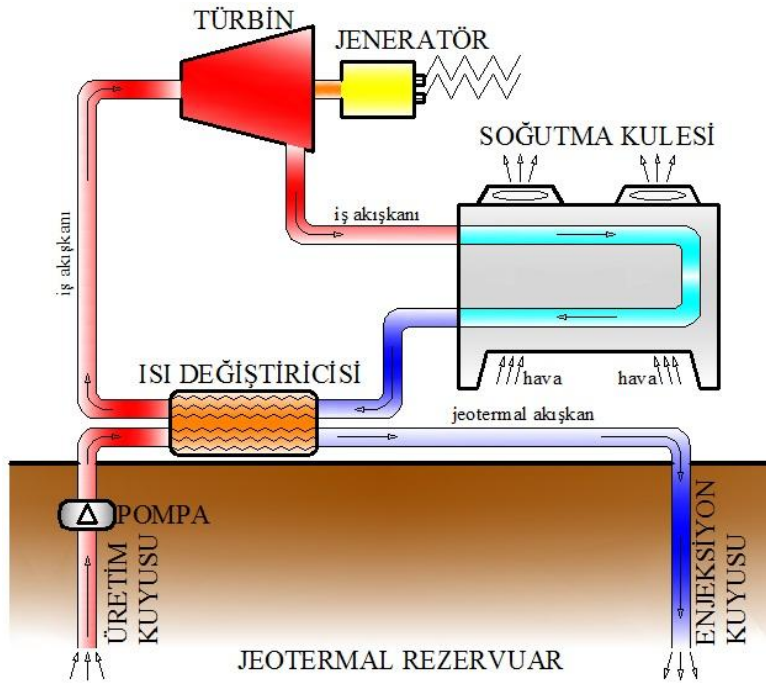
Şekil 2.11. Jeotermal enerji kaynaklı Flaşlı Buhar Santralleri

Bu tür tesislerde, içerisinde yüksek miktarda mineral barındıran akışkanların veya yoğuşturulması zor olan gazların flaş tankı içerisinde depolanması zor olduğundan ve

buhar türbinindeki net güç üretimini büyük ölçüde azaltmasından ötürü, kullanılmaması gerekmektedir [Armstead ve Christopher, 1983].

2.3.3. İkili çevrim kullanılan santraller

İkili çevrim kullanılan santrallerde akışkan sıcaklığı 90° ila 175°C arasındadır. Bu akışkanlar, içerisinde yüksek miktarda çözünmüş gaz içerdiğinden korozif bir etkiye sahiptir. Şekil 2.12’de ikili çevrim kullanılan bir santralin çalışma şeması gösterilmektedir. Bu tesis türünde jeotermal akışkanın sahip olduğu ısı, kapalı çevrimde çalışan iş akışkanına bir ısı değiştiricisi vasıtasıyla aktarılır. Böylece ikili santrallerdeki hareketli parçaların, jeotermal akışkandaki korozif etki sebebiyle zarar görmesi engellenir. İş akışkanının kaynama noktası, jeotermal akışkana göre önemli ölçüde düşük seçilir. Böylece jeotermal akışkanın sahip olduğu ısı enerjisi sayesinde, iş akışkanı türbinde kullanılacak şekilde kolayca buharlaşır. Gaz fazındaki iş akışkanı türbinden geçerek, soğutma kulesi yardımıyla yoğuşturulup açığa çıkan ısı atmosfere atılır. Soğutulan akışkanın ısı değiştiricisine pompalanmasıyla Rankine çevrimi tamamlanır. Kapalı bir çevrim kullanıldığından, jeotermal akışkan atmosfere yayılmaz [Armstead ve Christopher, 1983]. Bu tür çevrimlerin kullanılmasının avantajı, jeotermal akışkanın hiçbir şekilde dış çevreyle temas halinde olmaması ve çevrimin jeotermal akışkanın debisine göre daha fazla güç üretimi potansiyeline sahip olmasıdır [DOE, 2010^b]. Bununla birlikte flaşlı ve ikili çevrimleri ekonomik açıdan da incelemek gerekir. Flaşlı santrallerde büyük, pahalı ve düşük basınçta çalışan türbinler maliyeti arttırırken, ikili çevrimlerde ise ısı değiştiricisi ve kondenser kullanılması maliyeti arttırır [Armstead ve Christopher, 1983].



Şekil 2.12. Jeotermal enerji kaynaklı İkili Çevrimin kullanıldığı Santraller

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde karbon-dioksitin jeotermal akışkan olarak güç üretim tesislerinde kullanılması ve enjekte edilen karbon-dioksitin yeraltında depolanması ile ilgili literatürdeki mevcut çalışmalardan elde edilen bilgiler sunulmaktadır.

3.1. Jeotermal Akışkan Olarak Karbon-dioksitin Kullanımı

Doğada kısıtlı olarak bulunan su yerine kritik üstü karbon-dioksitin jeotermal akışkan olarak kullanılabileceği fikri 2000 yılında Brown tarafından geliştirilmiştir [Brown, 2000]. Uluslararası Los Alamos Laboratuvarında gerçekleştirilen bu çalışmada özellikle jeotermal enerji kaynaklı güç üretimi için kritik üstü karbon-dioksit ve suyun uygun rezervuar koşullarındaki termodinamik özellikleri araştırılmıştır. Çizelge 2.1’de 4 km. derinliğe ve 30 MPa enjeksiyon basıncına sahip bir Sıcak Kuru Kayaç (Hot Dry Rock) rezervuarında kritik üstü karbon-dioksit ile suyun termodinamik özellikleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada karbon dioksitin jeotermal enerji kaynaklı güç üretim tesislerinde kullanımının yanı sıra geleneksel sistemlerin geliştirilmesinde de kullanılabileceği sonucu elde edilmiştir [Brown, 2000].

Çizelge 3.1. 4 km. derinliğe ve 30 MPa enjeksiyon basıncına sahip bir Sıcak Kuru Kayaç rezervuarında kritik üstü karbon-dioksit ile suyun termodinamik özellikleri [Brown, 2000]

Akışkan	Kritik üstü CO ₂	Su
Sıcaklık, °C	260	260
Basınç, MPa	56,5	55,7
Yoğunluk, g/cc	0,520	0,835
Viskozite, micropoise	474	1162
Akış oranı, (yoğunluk/viskozite)	1,10	0,72
Oran, CO ₂ /Su	1,53	

Pruess ve Azaroual tarafından 2006 yılında yapılan çalışmada, suyun ve karbon-dioksitin termodinamik özelliklerini karşılaştırmış ve karbon dioksitin kuyularda ve rezervuar kırıklarındaki basınç ve sıcaklık durumları incelenmiştir. Çalışmaları

ışığında Gelişmiş Jeotermal Sistemlerin rezervuarlarında ısı transfer akışkanı olarak suya göre karbon-dioksitin kullanımının daha üstün olduğu ve karbon-dioksit kullanımı ile akışkan sirkülasyonunun sağlanması için harcanan gücün azaltılabileceği sonucuna varılmıştır [Pruess ve Azaroual, 2006].

İş akışkanı olarak kritik üstü karbon-dioksitin kullanılmasının ana nedenleri arasında, karbon-dioksitin diğer iş akışkanlarına göre düşük kritik basınç ve sıcaklığa sahip olması; bunun yanı sıra, yanmaması, temininin kolay ve ucuz olması, ısıl olarak kararlı ve inert olması, zehirli olmaması ve çevre kirliliğine etkisinin diğer iş akışkanlarına göre az olması gelmektedir [Zhang ve ark., 2006].

Bugüne kadar yapılan araştırmalar ve fiziko-kimyasal özellikleri dikkate alındığında, Gelişmiş Jeotermal Sistemlerin (GJS) işletiminde karbon-dioksitin jeotermal akışkan olarak kullanılmasının avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Jeotermal akışkan olarak karbon-dioksitin kullanımı için elverişli özellikler şunlardır:

1. Rezervuara enjekte edilen soğuk karbon-dioksit ile üretim kuyusundan elde edilen sıcak karbon-dioksit arasındaki büyük yoğunluk farkı su ile karşılaştırıldığında, sistemdeki sirkülasyon ihtiyacı için pompalamada harcanan gücün büyük ölçüde azaltılabileceği belirtilmiştir [Brown, 2000].
2. Karbon-dioksitin sahip olduğu düşük viskozite, verilen bir basınç gradyeni için daha büyük akış hızlarına sebep olur [Pruess, 2006].
3. Karbon-dioksitin yer altındaki kayalar üzerindeki çözücü etkisi çok azdır. Bu yüzden, su kaynaklı sistemlerdeki çökelme ve asit ayrışması gibi problemler en aza indirgenir [Pruess, 2006].
4. Karbon-dioksit, su problemi yaşanan kurak yerlerde de jeotermal akışkan olarak kullanılabilir.

2008 yılında yapılan bir çalışmada ise [Gurgenci ve ark., 2008^a], ikili çevrim ile çalışan jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretim tesisi yerine, tek çevrim ile çalışan ve jeotermal akışkan olarak kritik üstü karbon-dioksitin kullanıldığı bir sistem önerilmiştir. Aynı yılda Gurgenci ve arkadaşları tarafından yapılan diğer bir çalışmada [Gurgenci ve ark., 2008^b] jeotermal akışkan olarak kritik üstü karbon-dioksitin kullanıldığı ve çevrim içi döngünün termosifon etkisi ile sağlandığı jeotermal enerji kaynaklı bir sistemin ısı veriminin benzer rezervuar ve ortam sıcaklığına sahip geleneksel ikili enerji santralinin verimine oranla %50'den daha fazla olması beklendiği belirtilmiştir. Verim oranındaki bu gelişme, elektrik enerjisi satış fiyatının %150 oranında artırılmasına eşdeğerdir ve Gelişmiş Jeotermal Sistemlerin finansal kapasitesi üzerinde önemli bir etki yapacağı belirtilmektedir. Bu çalışmada, 235 °C sıcaklığındaki rezervuar boyunca 6 ton/s kütleli debiye sahip karbon-dioksitin sirküle edildiği jeotermal enerji kaynaklı bir güç üretim tesisinin 500 MW elektrik üretebileceği sonucuna varılmıştır. Rezervuardaki karbon-dioksit kaybının %10 olduğu kabul edilirse, böyle bir tesisin yılda ortalama 16 milyon ton karbon-dioksit ihtiyacının olacağı ve bunun da aynı kapasiteye sahip üç adet kömür kaynaklı enerji tesisi sayesinde karşılanabileceği öngörülmüştür [Gurgenci ve ark., 2008^b].

Atrens ve arkadaşları tarafından 2009 yılında yayımlanan bir diğer çalışmada ise jeotermal akışkan olarak suyun kullanıldığı geleneksel yöntemlere göre, iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanılmasının net elektrik üretimi bakımından kıyaslanabilir olduğu ve geleneksel yöntemlere göre daha basit bir dizayna sahip olmasından ötürü ekonomik olduğu vurgulanmıştır [Atrens ve ark., 2009].

2011 yılında Remoroza ve arkadaşları tarafından karbon-dioksit ile çalışan bir Gelişmiş Jeotermal Sistemin enjeksiyon ve üretim kuyularındaki üç boyutlu akış simüle edilmiştir. Yapılan araştırmaya göre rezervuar sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, enjeksiyon basıncının o kadar düşük olmasının yeterli olabileceği ve daha fazla toplam ekserji üretilebileceği sonucuna varılmıştır [Remoroza ve ark., 2011].

3.2. Karbon-dioksitin Yeraltında Depolanması

2005 yılında Regnault ve arkadaşları kritik üstü karbon-dioksitin yer altında depolanması ile ilgili bir çalışma yapmıştır [Regnault ve ark., 2005]. Bu çalışmada, kaya minerallerinin kritik üstü karbon-dioksit ile reaktivitesinin tamamen bilinmemesinden ötürü, deneysel olarak hem karbon-dioksit ile su karışımının hem de kritik üstü fazdaki karbon-dioksitin kaya mineralleri ile reaksiyonunun varlığının ve büyüklüğünün değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmanın önceki çalışmalara göre en büyük farkının çözünmüş karbon-dioksitin ana reaktan olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın sonucunda kaya mineralleri ile kritik üstü karbon-dioksit arasındaki reaksiyonların potansiyel olarak örtü kayacın (cap rock) sızdırmazlık özelliğini bozabileceğini, kuyu etrafındaki güçlü reaktivite sonucu oluşacak potansiyel reaksiyonlar ile olası kısa yolların oluşabileceği ve gözenekliliğin artacağı belirtilmiştir. Böylece düşük yoğunluklu kritik üstü karbon-dioksit nedeniyle örtü kayacın kendi özelliklerinin değişebilir olacağı, karbon-dioksitin örtü kayacın yukarısına doğru bir akış yapabileceği ve sahip olduğu düşük viskozite ile karbon-dioksitin daha sonra örtü kayacın içerisinde geçebileceği belirtilmiştir [Regnault ve ark., 2005].

2006 yılında Pruess, jeotermal rezervuarda karbon-dioksit kullanımı ile oluşan ısı transfer ve akışkan hareketlerini araştırmak maksadıyla, karbon-dioksitin termofiziksel özelliklerini hesaplamış ve problemi nümerik olarak simüle etmiştir [Pruess, 2006]. Fenton Hill de yapılan deneye göre, rezervuara enjekte edilen suyun kaybının %7 ila %12 arasında olduğu hesaplanmıştır. Karbon-dioksit için ise bu kayıp %5 olsa dahi 1 MW elektrik üretiminde rezervuarda yaklaşık 1 kg/s CO₂ kaybının olacağı belirtilmiştir [Pruess, 2006]. Bu yüzden potansiyel bir jeotermal akışkan olarak suyun yerine karbon-dioksitin kullanımı, çalışmalarda motivasyon sağlayabilir.

2010 yılında Pruess ve Spycher tarafından yapılan çalışmada [Pruess ve Spycher, 2010], karbon-dioksit ile çalışan gelişmiş jeotermal sistemlerdeki sıvı akışı ve ısı transferi özetlenmiştir. Karbon-dioksitin rezervuara enjekte edildiği ilk birkaç hafta

içerisinde, akışkanın hızla rezervuar kırıkları içerisine yerleştiği ve üretim kuyusundan karbon-dioksit elde edilebileceği belirtilmiştir. Daha sonra ilk birkaç yıl boyunca iki fazlı karbon-dioksit/su karışımının ve bunu takiben kritik üstü karbon-dioksitin üretilebileceği vurgulanmıştır [Pruess ve Spycher, 2010].

Atrens ve arkadaşları tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada [Atrens ve ark., 2011], karbon-dioksit ile çalışan Gelişmiş Jeotermal bir sistemdeki su konsantrasyonu limiti, rezervuarın kuruma süresi ve özellikleriyle, rezervuar içerisindeki akışkan kayıpları ve hacmi arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışma sonucunda rezervuarın tam kurutulmasının birinci dereceden bir fonksiyon olduğu ve enjeksiyon oranı yarılanma süresinin, rezervuarın işletme hacmine bölünmesiyle bulunabileceği; tipik bir Gelişmiş Jeotermal Sistemde karbon-dioksit ile çalışacak güç üretim ekipmanları doğrudan kullanılmadan önce rezervuarın tam kurutulmasının muhtemelen birkaç yıl sürebileceği; akışkandaki küçük karışım oranlarının tam kurutma dinamiğinde önemli ölçüde değişiklik yapmayacağı; orta dereceli karışım oranlarında yeterli ölçüde tam kurutmanın imkansız olacağı; diğer sistem parametrelerini etkilemediği sürece rezervuardaki sıvı kaybının tam kurutma dinamiklerini değiştirmeyeceği; sistemin akışkan kaybındaki ve/veya rezervuar sınırlarında bulunan karışımdaki karbon-dioksitin, rezervuarın kayaç olmayan bölümlerinde beklenildiğinden iki üç kat daha fazla miktarda rezervuarın kendi içerisinde depolanabilmesi mümkün olabileceği; karbon-dioksit esaslı Gelişmiş Jeotermal Sistemin tam kurutulması sırasında yüzeyde büyük miktarlarda üretilen suyun bertaraf edilmesi gerekeceği; eğer Gelişmiş Jeotermal Sistemin rezervuarı ile yeraltındaki diğer bölgelerin geniş bağlantıları varsa, sistemde su üretimi devam edebileceği, sonuçlarına varılmıştır [Atrens ve ark., 2011].

Jeotermal akışkan olarak karbon-dioksitin kullanılması ile birlikte karbon-dioksitin jeolojik olarak uzun dönem depolanmasındaki mekanizmayı anlamak önemlidir. Metz ve arkadaşları 2005 yılında yaptıkları çalışmada karbon-dioksitin rezervuarda kullanılmasının yollarını tanımlamıştır [Metz ve ark., 2005]. Jeolojik oluşumlardaki karbon-dioksitin depolanma etkinliği, fiziksel ve jeokimyasal hapsedme mekanizmalarının kombinasyonuna bağlıdır. Metz ve arkadaşlarının çalışmasına

göre karbon-dioksitin yer altında depolanmasının birinci yolu fiziksel (stratigrafik, yapısal ve hidrodinamik) olarak karbon-dioksitin hapsedilmesidir. Bu tanımlama geçirgenliği düşük tabakalar altında karbon-dioksitin jeolojik oluşumlar tarafından depolanmasını işaret eder. Burada örtü kayaç, karbon-dioksitin depolandığı bölgenin sızdırmaz katmanıdır. Yapısal hapsetme kırılmış ya da parçalanmış kaya oluşumlarını içerir. Stratigrafik hapsetme ise tortulaşmış ortamların neden olduğu kaya tipi değişikliklerinden oluşur. Hidrodinamik hapsetmede ise kapalı bir hapsetmeye gerek kalmadan, akışkanın çok uzun mesafeler boyunca yavaş yavaş taşınması ile meydana gelecek tuzlu oluşumları işaret eder. Karbon-dioksit enjekte edildiğinde, tuzlu suyun yerini alır ve sudan daha az yoğun olduğu için yüzerek yukarıya doğru taşınır. Oluşumun en üstüne ulaştığında ise doymuş karbon-dioksit tortusu ayrı bir faz olarak taşınmaya devam eder. Uzun vadede karbon-dioksitin önemli bir miktarı oluşumdaki suyun içerisinde çözülür ve yer altı suyu ile birlikte taşınır. Yer altındaki karbon-dioksit, depolanma kapasitesini ve etkinliğini arttıracak kayaç ve oluşumdaki su ile bir dizi jeokimyasal etkileşime maruz kalabilir. Karbon-dioksitin yer altında depolanması ile ilgili diğer bir yol çözünürlük hapsi (solubility trapping) olarak adlandırılır ve karbon-dioksitin oluşumdaki su içerisinde çözünmesini işaret eder. Daha sonra kayaç çözünürken pH artışı eşliğinde iyonik türler oluşur. Son olarak bazı kırıklar jeolojik depolamanın en kalıcı formu olan kararlı karbonata dönüşebilir ve bu mineral hapsetme (mineral trapping) olarak adlandırılır. Potansiyel olarak bin yıl veya daha uzun sürebilen mineral hapsetme, nispeten yavaştır [Metz ve ark., 2005].

Jeotermal sistemin çevre üzerindeki tam alanlı etkisi her tesise göre farklı incelenmelidir. Genel olarak, kömür ve petrol bazlı güç üretim tesislerine kıyasla jeotermal enerji kaynaklı güç üretimi oldukça düşük kirlilik seviyelerine sahiptir. Yine de jeotermal kaynaklı güç üretiminin çevreye olan bazı önemli etkileri tartışılmalıdır. Gelişmiş Jeotermal Sistemlerde iş akışkanı olarak karbon-dioksit kullanılmadan önce, rezervuara çok büyük miktarda su pompalamak gerekir. Bu miktarda su da toprakta erozyona sebep olabilir. Örneğin California'nın Gayzer bölgesinde bu problem erozyon şeklinde gözlemlenmiştir [Armstead ve Christopher, 1983]. Her ne kadar erozyon ısı madenciliğinin yapısında olmayan bir sorun olarak

görülse de, bu olay jeografik yer ve zemine göre değişebilir. Diğer bir olası negatif etki ise aşırı gürültüdür. Akışkanın yüksek basınçta emisyonundan meydana gelir. Ayrıca güç istasyonu makinelerinin sesi de gürültüye yol açar. Jeotermal projenin başlangıcında ise sondajdan dolayı da gürültü oluşabilir [Armstead ve Christopher, 1983].

Büyük miktarda karbon-dioksitin rezervuarlara enjekte edilmesi ile atmosferdeki karbon-dioksit emisyonunun önemli boyutta azalması sağlanabilir. Pruess 2008 yılında yaptığı çalışmada büyük rezervuarlarda karbon-dioksitin jeolojik olarak depolanmasını incelemiştir [Pruess, 2008]. Bu çalışmada karbon-dioksitin kırıklar boyunca, fay hatlarında veya daha önceden beri var olan düzensiz tıkanmış kuyu sondajlarında sızıntı oluşturmalarının beklendiğini belirtmiştir. Çalışmaya göre jeolojik depolama rezervuarlarında ve toprak yüzeyinde karbon-dioksitin sızıntı yapması ve tahliyesiyle ilgili potansiyel tehlikelerin bazı endişelerin sayısını arttırdığı belirtilmiştir [Pruess, 2008]. Bunlar:

1. Yer altı su kaynaklarının asitleştirilmesi,
2. Toprak yüzeyinden sızıntı yapan karbon-dioksitin tahliyesi esnasında meydana gelebilecek boğulma (asphyxiation) tehlikesi,
3. Depolanma etkinliğini azaltacak şekilde atmosferik konsantrasyondaki karbon-dioksitin artışı,
4. Püsküren yüksek enerjili bir deşarj ile meydana gelebilecek zarar.

Çalışmanın sonucunda elde edilen kanıtlar ışığında, yalnızca sıkıştırılmış gazın mekanik enerjisi tarafından desteklenen yüksek enerjili bir deşarjın, termal enerjinin azımsanmayacak bir katkısı olmadan mümkün olamayacağını göstermiştir [Pruess, 2008].

Gherardi ve arkadaşlarının 2007 yılında yaptığı çalışmada, jeolojik olarak hapsedilmiş karbon-dioksitin tükenmiş bir gaz rezervuarının örtü kayacını uyarması ile oluşan reaktif akışın simülasyonu sunulmuştur [Gherardi ve ark., 2007]. Simülasyonlar, rezervuardaki bazı gaz sızıntısı oluşumlarının örtü kayacın jeokimyasal evrimi üzerinde güçlü bir etkisi olabileceğini göstermiştir. Gherardi ve arkadaşlarına göre karbon-dioksit bakımından zengin akışkan, tamamen doymuş haldeki sıvının pH değerini artırır ve karbon-dioksit ile kayalar arasındaki etkileşimi arttırarak karbonat çökmesine neden olur. Bundan ötürü, potansiyel karbon-dioksit rezervuarlarının, sızdırmazlığı daha yüksek örtü kayaların bulunduğu yerlerde yapılması düşünülmelidir [Gherardi ve ark., 2007].

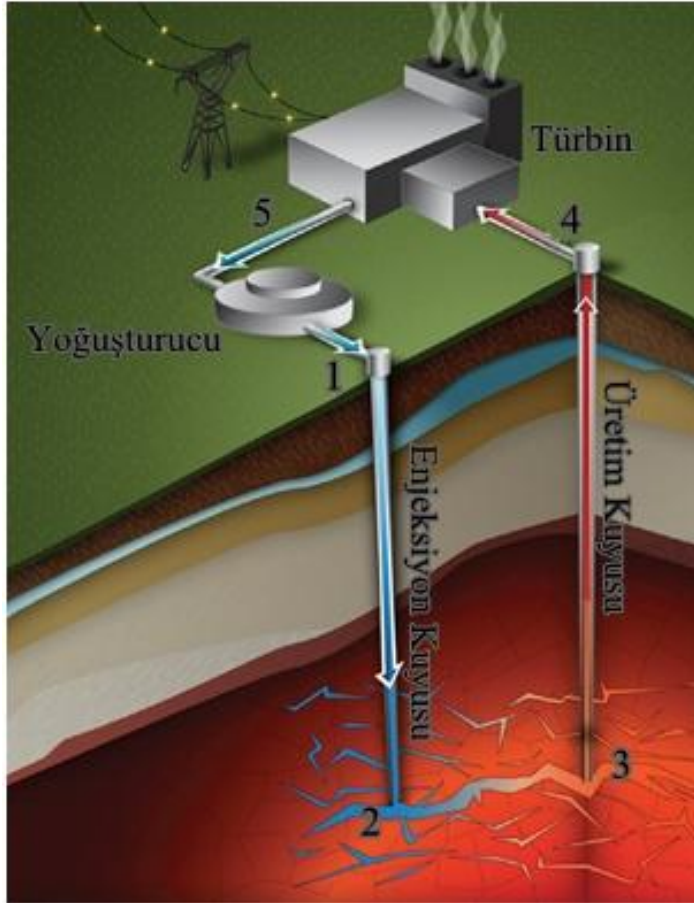
4. GÜÇ ÇEVİRİMİ TASARIMI

Bu bölümde iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı, jeotermal enerji kaynaklı basit bir güç çevriminin farklı rezervuar koşullarındaki termodinamik analizi ve bu çevrimin Aydın ili, Ömerbeyli jeotermal sahasında bulunan ÖB7 ve ÖB8 kuyularına ait rezervuar özellikleri ile çevrimlerin termodinamik analizi incelenmiştir. Ardından, iş akışkanının çevrim içi sirkülasyonunu sağlamak amacıyla, incelenen basit çevrime pompa eklenildiğinde termodinamik analizinde meydana gelen değişiklikler tetkik edilmiştir. Son olarak, karbon-dioksit ile birlikte farklı iş akışkanlarının denendiği ikili (binary) bir Rankine çevriminin termodinamik analizi incelenmiştir. Karbon-dioksitin çevrim noktaları boyunca değişen termodinamik özellikleri Engineering Equation Solver (EES) programı yardımı ile hesaplanmıştır.

4.1. Farklı Rezervuar Koşullarındaki Basit CO₂ Güç Çevrimi

III. Uluslararası Nükleer ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları konferansında da sunulmuş olan bu çalışmada [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012], sistem, yüzeyde türbin ve yoğunlaştırıcı ekipmanlarından meydana gelen, iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı, jeotermal enerji kaynaklı güç çevrimini ifade etmektedir. Çevrimin şeması Şekil 4.1'de sunulmuştur. Burada çevre sıcaklığında (T_0), doymuş sıvı fazında olan karbon-dioksit enjeksiyon kuyusu vasıtası ile rezervuara enjekte edilir. Rezervuardaki ısı enerjisi ile kritik-üstü faza ulaşan karbon-dioksitin yoğunluğu, sıcaklığı ve basıncı artar. Ardından üretim kuyusunu izleyerek, elektrik üretmek amacıyla doğrudan türbini besler. Daha sonra tekrar rezervuara enjekte edilmek üzere çevre sıcaklığında doymuş sıvı fazına yoğunlaştırılır. Bu tasarımın geleneksel jeotermal tesisler ile arasındaki en büyük fark çevrimde kullanılan akışkanın sirkülasyonu için gerekli ekipmanlarının kullanılmamasıdır. Fakat ilk sondaj çalışmalarında rezervuarı belirli bir rejime getirmek amacıyla pompanın kullanılabileceği dikkate alınmalıdır. Enjeksiyon ve üretim kuyuları arasındaki karbon-dioksitin sahip olduğu büyük yoğunluk farkı ile oluşan kaldırma etkisi

çevrimindeki basınç farkını yenmek için kullanılır ve bu olay, pompalama gücü için gereksinimlerin ve ekipmanların elimine edilmesini mümkün kılar.



Şekil 4.1. Jeotermal enerji kaynaklı Basit CO₂ Güç Çevrimi

Bu bölümde, iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı bir güç üretim sisteminin, verileri Çizelge 4.1’de sunulan farklı rezervuar koşullarındaki termodinamik analizi yapılmıştır. Rezervuarın derinliği, sıcaklığı, alanı, geçirgenliği vb. değerleri değiştirilerek bu değerler altında jeotermal enerji kaynaklı güç üretim tesisindeki termodinamik değişiklikler incelenmiştir. Burada rezervuarların genişliğine, yüksekliğine ve geçirgenliğine ait değerler literatürdeki benzer çalışmalar ışığında, tahmini yaklaşık değerler alınarak hesaplamalara dahil edilmiştir.

Çizelge 4.1. Termodinamik analizi yapılan rezervuarların özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

No	Rezerv. derinliği	Rezerv. sıcaklığı	Kuyular arası mesafe	Rezerv. genişliği	Rezerv. yüksekliği	Geçirgenlik oranı	Çevre sıcaklığı	Kütleli debi	Kuyu çapı
	[m]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[°C]	[kgs ⁻¹]	[m]
1	2000	200	800	400	400	1E-13	25	125	0,35
2	3000	200	800	400	400	1E-13	25	125	0,35
3	4000	200	800	400	400	1E-13	25	125	0,35
4	5000	200	800	400	400	1E-13	25	125	0,35
5	4000	150	800	400	400	1E-13	25	125	0,35
6	4000	250	800	400	400	1E-13	25	125	0,35
7	4000	200	600	400	400	1E-13	25	125	0,35
8	4000	200	1000	400	400	1E-13	25	125	0,35
9	4000	200	1200	400	400	1E-13	25	125	0,35
10	4000	200	1400	400	400	1E-13	25	125	0,35
11	4000	200	1600	400	400	1E-13	25	125	0,35
12	4000	200	800	300	300	1E-13	25	125	0,35
13	4000	200	800	500	500	1E-13	25	125	0,35
14	4000	200	800	600	600	1E-13	25	125	0,35
15	4000	200	800	700	700	1E-13	25	125	0,35
16	4000	200	800	800	800	1E-13	25	125	0,35
17	4000	200	800	400	400	1E-12	25	125	0,35
18	4000	200	800	400	400	1E-14	25	125	0,35
19	4000	200	800	400	400	1E-13	20	125	0,35
20	4000	200	800	400	400	1E-13	30	125	0,35
21	4000	200	800	400	400	1E-13	25	75	0,25
22	4000	200	800	400	400	1E-13	25	175	0,45

Hesaplamalarda, enjeksiyon ve üretim kuyusu içerisindeki karbon-dioksitin akışının tersinir adyabatik (izantropik) olduğu, çevrimdeki proseslerin ideal olduğu ve çevrim boyunca sistemde akışkan olarak yalnızca karbon-dioksitin bulunduğu kabul edilmiştir. Böylece kuyulardaki basınç değişimi borulardaki standart akışa göre hesaplanmıştır [White, 2008].

Rezervuardaki hesaplamalarda, jeotermal akışkanın herhangi bir iş üretmediği, boru boyunca rezervuardan iş akışkanına ısı akışının olmadığı, pürüzlülük oranının (ϵ) ve boru çapının (D) sabit olduğu kabulü yapılmıştır. Buna göre akışkan özelliğindeki değişiklikler enjeksiyon kuyusu, üretim kuyusu (Δz) ve kuyular arası mesafe (L)

boyunca 100 adet iterasyon yapılacak şekilde belirli aralıklarla (örn. 6 m, 8 m, 10 m) aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanmıştır.

Enjeksiyon kuyusu başlangıcındaki termodinamik özellikleri bilinen karbon-dioksitin, prosesin izantropik olması ile birlikte kuyu boyunca değişen basıncı, Termodinamiğin birinci kanununa göre aşağıdaki denklem şeklinde ifade edilebilir.

$$P_{enj} = P_{rez} + \Delta Pf_{kuyu} - \rho g \Delta z \quad (4.1)$$

Kuyudaki sürtünme kaybı nedeniyle meydana gelen basınç kaybı akışkanın hızı ile kütle debisinin bir fonksiyonudur ve Eşitlik 4.2'deki gibi ifade edilir.

$$\Delta Pf_{kuyu} = f \frac{\Delta z}{D} \rho \frac{v^2}{2} = f \frac{8\dot{m}^2 \Delta z}{\rho \pi^2 D^5} \quad (4.2)$$

Burada, sürtünme faktörü (f), yüzeyle akışkan arasında meydana gelen turbülanslı akışa göre hesaplanmıştır (bkz. Eş. 4.3 ve Eş. 4.4) [Haaland, 1983].

$$f = \left[-1,8 \log \left[\frac{6,9}{Re_D} + \left(\frac{\varepsilon}{3,7.D} \right)^{1,11} \right] \right]^{-2} \quad (4.3)$$

$$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8 \text{ ve } 10^{-6} \leq \varepsilon / D \leq 5 \times 10^{-2} \quad (4.4)$$

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (4.5)$$

Kütlesel debisi bilinen akışkanın hızı ise Eşitlik 4.6'daki gibi, kuyu çapı ve akışkanın sahip olduğu yoğunluğun bir fonksiyonudur.

$$\dot{m} = \rho v A = \rho v \pi \frac{D^2}{4} \quad (4.6)$$

Enjeksiyon ve üretim kuyusu arasında bulunan rezervuarda ise sabit alanda doğrusal olarak artan sıcaklık ile D'Arcy akışına göre hesaplama yapılmıştır.

$$\Delta T = \Delta L \frac{T_{rez} - T_{enj}}{L} \quad (4.7)$$

Burada gözenekli ortamda akış için pratik bir denklem elde edebilmek amacıyla Ergun denkleminden (Eşitlik 4.8) yararlanılabilir [Ergun, 1952].

$$\frac{(P_0 - P_L)g_c \rho}{G_0^2} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} \frac{(\Phi_s D_{pe})}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)}{Re_p} + 1,75 \quad (4.8)$$

Rezervuardaki hızın çok yavaş olmasından ötürü aşağıda sunulan Ergun denkleminde eşitliğin sağ tarafındaki türbülant etkiyi ifade eden ikinci terim ihmal edilebilir (Eşitlik 4.8 ve Eşitlik 4.9). Böylece Eşitlik 4.10 elde edilir [Uysal, 2006].

$$\frac{(P_0 - P_L)g_c}{L} = K_1 v_0 + K_2 v_0^2 \quad (4.9)$$

$$\frac{(P_0 - P_L)g_c}{L} = K_1 v_0 \quad (4.10)$$

Eşitlik 4.10 tekrar düzenlenirse,

$$v_0 = \frac{g_c}{K_1} \frac{(P_0 - P_L)}{L} \quad (4.11)$$

elde edilir. Viskos katsayısı K_1 [Uysal, 2006],

$$K_1 = 150 \frac{\mu}{\Phi_s^2 D_{pe}^2} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (4.12)$$

Eşitlik 4.11’de yerine koyularak,

$$v_0 = \frac{\Phi_s^2 D_{pe}^2}{150\mu} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \frac{(P_0 - P_L)g_c}{L} \quad (4.13)$$

ve gözenekli ortam geçirgenliği (k) [Uysal, 2006],

$$k = \frac{\Phi_s^2 D_{pe}^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (4.14)$$

olarak ifade edildiğinde Eşitlik 4.13 aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$v_0 = \frac{k}{\mu} \frac{(P_0 - P_L)g_c}{L} \quad (4.15)$$

Elde edilen bu denklem D’Arcy yasası olarak tanımlanır ve yatay akışlar için hidrostatik etkiler ihmal edilebildiğinden Eşitlik 4.16 şeklinde ifade edilebilir.

$$v_0 = k \frac{g_c}{\mu} \frac{(-\Delta P)}{L} \quad (4.16)$$

Bu denklem ise kütle debisi cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\Delta P f_{rez} = -\frac{\dot{m}\mu\Delta L}{\rho k H W} = -\frac{\dot{m}\mu\Delta L}{\rho k A} \quad (4.17)$$

Böylece enjeksiyon kuyusu sonu ve üretim kuyusu başlangıcındaki karbon dioksitin termodinamik özelliklerinin bilinmesi ile ve Termodinamiğin birinci kanununun jeotermal rezervuar için uygulanması sonucu aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\dot{Q}_g = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (4.18)$$

Rezervuar için Termodinamiğin ikinci kanunu, kararlı durum işletiminde Eşitlik 4.19'daki forma indirgenir.

$$(\dot{S}_{gen})_{rez.} = \dot{m} \cdot (s_3 - s_2) - \frac{\dot{Q}_g}{T_{rez}} \quad (4.19)$$

Tersinmezlik ile entropi üretimi arasındaki ilişki ise aşağıdaki denklemde sunulmuştur.

$$\dot{I} = T_0 \cdot (\dot{S}_{gen})_{rez.} \quad (4.20)$$

Üretim kuyusundaki basınç farkı ise enjeksiyon kuyusuna benzer şekilde aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$P_{üret} = P_{rez} - \Delta Pf_{kuyu} - \rho g \Delta z \quad (4.21)$$

Böylece üretim kuyusu ağzında karbon dioksitin termodinamik özellikleri elde edilir. Yüzeydeki modellemede, üretim kuyusundan çıkan kritik-üstü CO₂ gazı türbine gönderilmekte ve elektrik üretimi gerçekleşmektedir. Türbindeki genleşme prosesinin izantropik olarak gerçekleştiği ve yoğunlaştırucudaki basınç kayıplarının ihmal edilecek mertebede olduğu kabul edilmiştir. Bu kabuller ışığında, Termodinamiğin birinci kanunu kullanılarak türbinde üretilen mekanik iş hesaplanabilir. (bkz. Şekil 4.1, Eşitlik 4.22). Ayrıca Çizelge 4.1'de verileri sunulan rezervuar koşulları için her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri Ek -1'de sunulmuştur.

$$\dot{W}_t = \dot{m} \cdot (h_4 - h_5) \quad (4.22)$$

Termodinamiğin birinci kanunu yoğunlaştırucu için yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\dot{Q}_\zeta = \dot{m} \cdot (h_5 - h_1) \quad (4.23)$$

Termodinamiğin ikinci kanunu uygulanarak yoğuşturucudaki entropi üretimi,

$$(\dot{S}_{gen})_{yoğ} = \dot{m} \cdot (s_1 - s_5) + \frac{\dot{Q}_\zeta}{T_0} \quad (4.24)$$

olarak elde edilir. Yoğuşturucudaki tersinmezlik miktarı ise Eşitlik 4.20'ye benzer şekilde hesaplanabilir.

Çevrimin birinci kanun verimi,

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{Q}_g} \quad (4.25)$$

olarak tanımlanır. Pompa kullanılmadığı için net iş, türbin işine eşit alınmıştır.

Çevrimin ikinci kanun verimi, sistemden elde edilen net işin elde edilebilecek maksimum işe oranı olarak tanımlanır ve çevrimin tersinmezliği cinsinden Eşitlik 4.26'daki gibi ifade edilir.

$$\eta_{II} = \frac{|\dot{W}_{net}|}{|\dot{W}_{tr}|} = 1 - \frac{\dot{I}}{|\dot{W}_{tr}|} \quad (4.26)$$

Bu denklemde, tersinir iş $\dot{W}_{tr}$ ile temsil edilmiştir. Termodinamiğin ikinci kanuna göre, jeotermal enerji kaynağı kullanan güç çevrimi için elde edilebilecek maksimum iş (tersinir iş) Eşitlik 4.27 kullanılarak bulunur.

$$|\dot{W}_{tr}| = |\dot{Q}_g| \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{rez}}\right) \quad (4.27)$$

4.2. Ömerbeyli Jeotermal Sahasında Bulunan Kuyuların Verilerine Göre Hesaplanan Basit CO₂ Güç Çevrimi

Bu bölümde, X. Uluslararası Yapıda Tesisat Teknolojisi Sempozyumu'nda da benzer bir termodinamik analizi sunulan [Yalçınkaya ve Bıyıkoglu, 2012^a], Ömerbeyli jeotermal sahasındaki ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularına ait rezervuarların verileri kullanılarak, iş akışkanı olarak karbon-dioksit kullanıldığı, jeotermal enerji kaynaklı basit bir güç çevriminin termodinamik analizi incelenmiştir. Enjeksiyon ve üretim kuyusu içerisindeki karbon-dioksitin akışının tersinir adyabatik (izantropik) olduğu ve yer yüzündeki modellemede, güç santralindeki proseslerin ideal olduğu kabul edilmiştir. Literatürdeki benzer çevrimler ile karşılaştırma yapmak amacıyla, karbon-dioksitin çevrimdeki kütle debisi rezervuardan çekilen ısı enerjisi 80 MW elde edilene kadar yapılan iterasyonlar sonucu hesaplanmıştır. Bu oran tesisin ömrüyle ve rezervuar soğumadan elde edilecek verimli ısı enerjisi ile bağlantılı olarak belirlenmiştir. Ayrıca pürüzlülük katsayısı (ϵ) 0,0004 m, rezervuarın geçirgenliği ve alanının çarpımı (kA) $2,1 \times 10^{-9} \text{ m}^4$, enjeksiyon ve üretim kuyusunun çapı (D) 0,5 m. alınarak hesaplamalara dahil edilmiştir [Atrens ve ark., 2009]. Teoride kullanılan türbin tam yalıtımlı (adyabatik) olarak öngörülmüş ve türbin izantropik olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Çevrimin şeması ise Şekil 4.1 ile aynıdır

Bu çalışmadaki jeotermal enerji kaynaklı güç çevrimine benzer şekilde, 2009 yılında Atrens ve ark. [Atrens ve ark., 2009] farklı rezervuar koşullarında jeotermal enerji kaynaklı bir güç çevriminin termodinamik analizini incelemişlerdir. Rezervuar derinliği 5000 m, rezervuar sıcaklığı 235 °C, rezervuar basıncı 35 MPa ve çevre sıcaklığı 25 °C olan bu çalışmadaki karbon dioksitin termodinamik özellikleri Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Atrens ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki karbon dioksitin Termodinamik özellikleri [Yalçınkaya ve Bıyıkoglu, 2012^b]

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434**	25*	-232,3**	-1,491**	0,001405**	711,8**
2	Kritik-üstü gaz	46466**	71,1**	-183,3**	-1,491**	0,001129**	885,8**
3	Kritik-üstü gaz	35000*	235*	105,7**	-0,7564**	0,002536**	394,3**
4	Kritik-üstü gaz	18664**	172,4**	56,6**	-0,7564**	0,003709**	269,6**
5	Kritik-üstü gaz	6434**	75,2**	-6,9**	-0,7564**	0,008077**	123,8**

* Atrens vd.'ne ait sıcaklık ve basınç değerleri [Atrens ve ark., 2009]

** EES kullanılarak hesaplanan CO₂'in termodinamik özellikleri

Kıyaslama amacıyla yukarıda termodinamik analizini yaptığımız çevrime göre rezervuar sıcaklık ve basınç değerleri farklı olan, Gurgenci vd. [Gurgenci ve ark., 2008^a] tarafından incelenen, iş akışkanı olarak CO₂ kullanan, jeotermal enerji kaynaklı Rankine çevriminin termodinamik özellikleri Çizelge 4.3'de sunulmuştur. Diğer çevrimlerde olduğu gibi üretim ve enjeksiyon kuyusunun tersinir adyabatik olduğu kabul edilmiştir. Çevrimde rezervuar sıcaklığı 235 °C, rezervuar basıncı 48.1 MPa ve çevre sıcaklığı ise 20 °C olarak kabul edilmiştir [Gurgenci ve ark., 2008^a].

Çizelge 4.3. Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan basit CO₂ Rankine çevriminin termodinamik özellikleri [Yalçınkaya ve Bıyıkoglu, 2012^b]

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	20*	5.7**	-250.9**	-1.551**	0.0013**	773,6**
2	Kritik-üstü gaz	61**	48.1*	-201.7**	-1.551**	0.0011**	923,6**
3	Kritik-üstü gaz	235*	48.1*	110.9**	-0.804**	0.0021**	486,5**
4	Kritik-üstü gaz	191**	26.2*	59.2**	-0.804**	0.0028**	355,2**
5	Kritik-üstü gaz	54**	5.7**	-28.6**	-0.804**	0.0082**	122,5**

* Gurgenci vd.'ne ait sıcaklık ve basınç değerleri [Gurgenci ve ark., 2008^a]

** EES kullanılarak hesaplanan CO₂'in termodinamik özellikleri

Gürgenci vd. [Gürgenci ve ark., 2008^a] tarafından yapılan çalışmada karbon-dioksitin çevrim boyunca kritik-üstü fazda olduğu jeotermal enerji kaynaklı bir güç çevrimi daha incelenmiştir. Kıyaslama amacıyla yukarıda termodinamik analizi yapılan çevrimlere göre rezervuar sıcaklık ve basınç değerleri farklı olan, Gürgenci vd. [Gürgenci ve ark., 2008^a] tarafından incelenen, iş akışkanı olarak CO₂ gazının kullanıldığı, jeotermal enerji kaynaklı Brayton gaz çevriminin termodinamik özellikleri Çizelge 4.4’de sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan kompresörsüz CO₂ Brayton çevriminin termodinamik özellikleri [Yalçınkaya ve Bıyıkoglu, 2012^b]

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Kritik-üstü gaz	47*	8*	-78.4**	-1.001**	0.0043**	231,2**
2	Kritik-üstü gaz	136**	25*	-29.6**	-1.001**	0.0022**	454,1**
3	Kritik-üstü gaz	235*	25*	125.6**	-0.659**	0.0035**	287,5**
4	Kritik-üstü gaz	168**	13*	74.3**	-0.659**	0.0055**	182,5**
5	Kritik-üstü gaz	122**	8*	41.8**	-0.659**	0.0079**	126,4**

* Gürgenci vd.’ne ait sıcaklık ve basınç değerleri [Gürgenci ve ark., 2008^a]

** EES kullanılarak hesaplanan CO₂’in termodinamik özellikleri

Diğer çevrimlerde olduğu gibi, bu çevrimde de üretim ve enjeksiyon kuyusunun tersinir adyabatik olduğu kabul edilmiştir. Çevrimde rezervuar sıcaklığı 235 °C, rezervuar basıncı 25 MPa ve enjeksiyon sıcaklığı ise 47 °C olarak kabul edilmiştir [Gürgenci ve ark., 2008^a].

Ömerbeyli jeotermal sahasında bulunan ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularına ait özellikler ise Çizelge 4.5’de sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Ömerbeyli jeotermal sahasında bulunan bazı kuyulara ait özellikler [Doğdu, 2006]

Kuyu adı	Toplam derinlik, [m]	Maks. sıcaklık, [°C]
ÖB-7	2398 m	223 °C
ÖB-8	2000 m	221 °C

Enjeksiyon kuyusunun girişinde, karbon-dioksitin çevre sıcaklığında , doymuş sıvı fazında olduğu kabul edilmiştir. Çevre sıcaklığı (T_0) ise Aydın ilinin yıl içerisindeki ortalama sıcaklığı göz önüne alınarak 18 °C olarak alınmıştır. Rezervuardaki hesaplamalarda, jeotermal akışkanın herhangi bir iş üretmediği, boru boyunca rezervuardan iş akışkanına ısı akışı olmadığı, pürüzlülük oranının (ϵ) ve boru çapının (D) sabit olduğu kabulü yapılarak ve Bölüm 4.1’de sunulan denklemler kullanılarak akışkanın özelliğindeki değişiklikler elde edilmiştir. Enjeksiyon ve üretim kuyusu arasında bulunan rezervuarda ise, bir önceki bölümdeki hesaplamalara benzer şekilde, sabit alanda doğrusal olarak artan sıcaklık ile D’Arcy yasına göre hesaplanmıştır.

Ömerbeyli jeotermal sahasındaki ÖB-7 kuyusunun Çizelge 4.5’de sunulan verileri ve Bölüm 4.1’deki eşitlikler yardımıyla elde edilen çevrimdeki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri Çizelge 4.6’da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. Ömerbeyli jeotermal sahasındaki ÖB-7 kuyusunun verilerine göre çevrimdeki karbon-dioksitin Termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	5465	18	-257,5	-1,573	0,00126	793,8
2	Kritik-üstü gaz	25289	40,1	-234	-1,573	0,001135	880,8
3	Kritik-üstü gaz	19278	223	124,2	-0,6178	0,004361	229,3
4	Kritik-üstü gaz	14397	192,8	100,7	-0,6178	0,005375	186
5	Kritik-üstü gaz	5465	102	33,9	-0,6178	0,01129	88,57

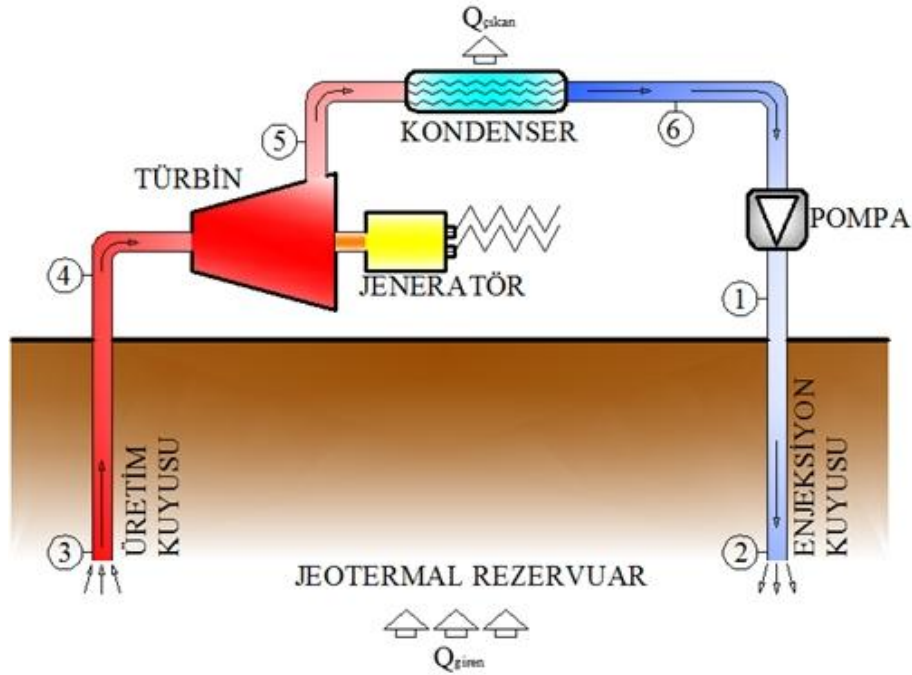
Ömerbeyli jeotermal sahasındaki ÖB-8 kuyusunun Çizelge 4.5’de sunulan verileri ve Bölüm 4.1’deki eşitlikler yardımıyla elde edilen çevrimdeki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri Çizelge 4.7’de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Ömerbeyli jeotermal sahasındaki ÖB-8 kuyusunun verilerine göre çevrimdeki karbon-dioksitin Termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	5465	18	-257,5	-1,573	0,00126	793,8
2	Kritik-üstü gaz	21857	37,1	-237,9	-1,573	0,001149	870,1
3	Kritik-üstü gaz	15514	221	132,8	-0,5635	0,005453	183,4
4	Kritik-üstü gaz	12214	196,4	113,2	-0,5635	0,006516	153,5
5	Kritik-üstü gaz	5465	120,4	54,8	-0,5635	0,01215	82,27

4.3. Pompalı CO₂ Güç Çevrimi

Bu bölümde, yukarıda incelemesini yapmış olduğumuz iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı, jeotermal enerji kaynaklı basit bir çevrime, akışkanın çevrim içi döngüsünü sağlamak amacıyla pompa eklenildiğinde meydana gelen termodinamik değişiklikler incelenmiştir. Sistem, yüzeyde türbin, yoğunlaştırıcı ve pompadan meydana gelen bir güç çevrimini ifade etmektedir. Çevrimin şeması Şekil 4.2’de sunulmuştur. Çevrimi içerisinde kullanılan iş akışkanı, karbon-dioksit, çevre sıcaklığında (T_0), doymuş sıvı fazına yoğunlaştırılarak, pompa vasıtasıyla basıncı artırılır. Daha sonra enjeksiyon kuyusu vasıtasıyla yer altına enjekte edilerek basıncı ve sıcaklığı yükseltilir. Üretim kuyusundan gaz fazında elde edilen karbon-dioksit türbini besler ve güç üretilir.



Şekil 4.2. Jeotermal enerji kaynaklı Pompalı CO₂ Güç Çevrimi

Tasarlanan bu çevrimin rezervuar koşulları, yukarıda incelemesini yapmış olduğumuz basit CO₂ güç çevrimindeki 3 numaralı rezervuar özellikleri ile aynı alınmıştır. Rezervuarın sahip olduğu özellikler Çizelge 4.8’de sunulmuştur. Ayrıca kıyaslama yapmak amacıyla rezervuar basıncı 40 MPa olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.8. Pompalı CO₂ Güç çevrimi için Termodinamik analizi yapılan rezervuarın özellikleri

No	Rezerv. derinliği	Rezerv. sıcaklığı	Kuyular arası mesafe	Rezerv. genişliği	Rezerv. yüksekliği	Geçirgenlik oranı	Çevre sıcaklığı	Kütleli debi	Kuyu çapı
	[m]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[°C]	[kg s ⁻¹]	[m]
3	4000	200	800	400	400	1E-13	25	125	0,35

Hesaplamalarda, çevrim boyunca ve rezervuar içerisinde yapılan kabuller, incelenen bir önceki basit CO₂ güç çevrimindekiler ile aynıdır.

Yoğuşturucudaki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Dolayısıyla, 5 ve 6 noktalarının basınçları birbirine eşit alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, yoğuşturucu çıkışında iş akışkanının doymuş fazda olduğu ve pompalama işleminin

izantropik olarak gerçekleştiği kabul edilmiştir. Dolayısıyla 6 ve 1 noktalarının entropileri birbirine eşit alınmıştır. Ayrıca Çizelge 4.8’de verileri sunulan rezervuar koşulları için her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri pompasız CO₂ güç çevrimi için Çizelge 4.9a’da ve pompalı CO₂ güç çevrimi için Çizelge 4.9b’de sunulmuştur.

Çizelge 4.9a. Pompasız CO₂ güç çevrimi için karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik-üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864
3	Kritik-üstü gaz	40000	200	44,78	-0,9037	0,002012	497
4	Kritik-üstü gaz	22761	150,4	5,495	-0,9037	0,002657	376,3
5	Kritik-üstü gaz	6434	43,61	-55,69	-0,9037	0,006217	160,9

Çizelge 4.9b. Pompalı CO₂ güç çevrimi için karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Sıkıştırılmış sıvı	7377	27,2	-230,8	-1,491	0,001384	722,5
2	Kritik-üstü gaz	39027	65,35	-191,7	-1,491	0,001153	867
3	Kritik-üstü gaz	40000	200	44,78	-0,9037	0,002012	497
4	Kritik-üstü gaz	22761	150,4	5,495	-0,9037	0,002657	376,3
5	Kritik-üstü gaz	6434	43,61	-55,69	-0,9037	0,006217	160,9
6	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8

Termodinamiğin birinci kanunu yoğuşturucu için yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot (h_5 - h_6) \quad (4.28)$$

Izantropik olarak gerçekleştiğini kabul ettiğimiz pompalama işi, Termodinamiğin birinci kanuna uygulanarak aşağıdaki şekilde entalpi farkları cinsinden yazılabilir.

$$\dot{W}_p = \dot{m} \cdot (h_1 - h_6) \quad (4.29)$$

Çevrimin birinci kanun verimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_p}{\dot{Q}_g} \quad (4.30)$$

Çevrimin ikinci kanun verimi, ekserji cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}_W}{\dot{E}_Q} = \frac{|\dot{W}_{net}|}{|\dot{Q}_g| \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{rez}}\right)} \quad (4.31)$$

Denklem 4.31’de geçen $|\dot{W}_{net}|$ terimi, çevrimden elde edilen net işi temsil etmektedir ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$|\dot{W}_{net}| = |\dot{W}_{tr}| - |\dot{W}_{kayıp}| \quad (4.32)$$

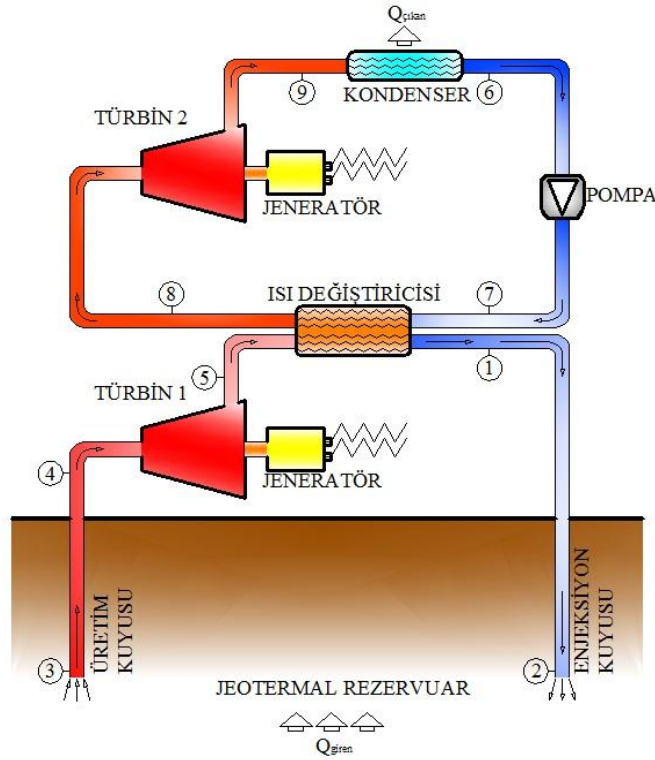
Denklem 4.32’de geçen kayıp iş terimi, $|\dot{W}_{kayıp}|$, çevrim süresince oluşan toplam kayıp işi temsil etmektedir ve termodinamiğin ikinci kanunu uygulanarak aşağıdaki gibi elde edilir,

$$|\dot{W}_{kayıp}| = T_0 \cdot \dot{S}_{gen} = T_0 \cdot \left[\frac{\dot{Q}_\xi}{T_0} - \frac{\dot{Q}_g}{T_{rez}} \right] \quad (4.33)$$

Bu bölümle ilgili, termosifon etkisinin çevrim içi akışkan döngüsünü sağlayacak mertebede olduğu kabul edilerek tasarlanan basit CO₂ güç çevrimi ve pompanın kullanıldığı çevrim ile literatürdeki mevcut benzer çalışmaların sonuçlarının karşılaştırıldığı makale, kullanılan rezervuar verileri farklı olacak şekilde, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisinde yayımlanmak üzere gönderilmiştir [Yalçinkaya ve Bıyıkoglu, 2012^b].

4.4. İkili (Binary) CO₂ Güç Çevrimi

Bu bölümde iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı, jeotermal enerji kaynaklı basit bir çevrim ile birlikte farklı iş akışkanlarının denendiği ikili (binary) bir Rankine çevriminin termodinamik analizi incelenmiştir. Sistem, yüzeyde türbin, ısı değiştiricisi ve bir Rankine çevriminden meydana gelen güç çevrimini ifade etmektedir. Çevrimin şeması Şekil 4.3'de sunulmuştur. Rankine çevrimi içerisinde kullanılan iş akışkanı çevre sıcaklığında, doymuş sıvı fazına yoğunlaştırularak, pompa vasıtasıyla basıncı yükseltilir. Daha sonra ısı değiştiricisinde, diğer çevrimdeki iş akışkanı olan yüksek ısıdaki karbon-dioksit ile ısı alışverişi yaparak, gaz fazına geçer ve türbini besler.



Şekil 4.3. Jeotermal enerji kaynaklı İkili (Binary) CO₂ Güç Çevrimi

Bu hesaplamalarda tercih edilen rezervuarın özellikleri, basit CO₂ güç çevriminin termodinamik analizi sonucundan elde edilen verilere göre, karbon-dioksitin türbin çıkışındaki sıcaklığının yüksek olmasına dikkat edilerek seçilip, hesaplamalara dahil edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan rezervuar koşulları Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

Çizelge 4.10. İkili (Binary) CO₂ Güç çevrimi için Termodinamik analizi yapılan rezervuarın özellikleri

No	Rezerv. derinliği	Rezerv. sıcaklığı	Kuyular arası mesafe	Rezerv. genişliği	Rezerv. yüksekliği	Geçirgenlik oranı	Çevre sıcaklığı	Kütleli debi	Kuyu çapı
	[m]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[°C]	[kg s ⁻¹]	[m]
1	2000	250	1600	300	300	1E-13	20	175	0,45

Sistemin alt tarafında bulunan çevrimin termodinamik analizindeki kabuller, basit CO₂ güç çevrimindeki kabuller ile aynıdır. Ayrıca Rankine çevrimindeki proseslerin de ideal olduğu kabul edilmiştir.

Yoğuşturucu çıkışında çevre sıcaklığında, doymuş sıvı fazında olan iş akışkanının izantropik olarak gerçekleştiğini kabul ettiğimiz sıkıştırma prosesi için gerekli olan iş, Termodinamiğin birinci kanunu ışığında aşağıdaki şekilde entalpi farkları cinsinden yazılabilir.

$$\dot{W}_p = \dot{m} \cdot (h_7 - h_6) \quad (4.34)$$

Burada, 1 noktasındaki doymuş sıvı fazında olduğunu kabul ettiğimiz karbon-dioksitin sıcaklığı, 7 noktasındaki iş akışkanının sıcaklığından daha büyük olarak seçilmiştir. Kabul edilen sıcaklıkta ve doymuş sıvı fazındaki karbon-dioksit, basit CO₂ güç çevrimindeki hesaplamalara benzer şekilde rezervuara enjekte edilir ve daha önce kullanılan denklemler yardımıyla karbon-dioksitin kullanıldığı çevrimin her bir noktadaki termodinamik özellikleri bulunabilir.

Böylece ısı değiştiricisi girişindeki ve çıkışındaki termodinamik özellikleri bilinen karbon-dioksit ile ısı değiştiricisi girişindeki termodinamik özellikleri bilinen ve Rankine çevriminde kullanılan iş akışkanının, ısı değiştiricisi çıkışındaki özellikleri aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanabilir [Altınışık, 2003].

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} \quad (4.35)$$

$$C_h = \dot{m}_h \cdot c_{p,h} \quad (4.36)$$

$$C_c = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \quad (4.37)$$

$$q = C_h \cdot (T_{hg} - T_{hc}) \quad (4.38)$$

$$q_{\max} = C_{\min} \cdot (T_{hg} - T_{cg}) \quad (4.39)$$

$$c_p = \left(\frac{dh}{dT} \right)_p \quad (4.40)$$

Yukarıdaki denklemler yardımıyla ısı değıştiricisi çıkışında (bkz. Şekil 4.3), gaz fazında olan iş akışkanının sıcaklığı ve kütsel debisi, ısı değıştiricisinin ϵ (etkinlik) değeri 0,80 elde edilecek şekilde yapılan iterasyonlarla hesaplanabilir.

Rankine çevriminde, türbindeki genleşme prosesinin izantropik olarak gerçekleştiğı kabulü ışığında, Termodinamiğın birinci kanunu kullanılarak türbinde üretilen mekanik iş hesaplanabilir. (bkz. Şekil 4.3, Eşitlik 4.41). Ayrıca Çizelge 4.10'da verileri sunulan rezervuar koşulları için her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksidin ve diğeri iş akışkanının termodinamik özellikleri Ek-4'de sunulmuştur.

$$\dot{W}_{t2} = \dot{m} \cdot (h_8 - h_9) \quad (4.41)$$

Yoğuşturucudaki basınç kayıplarının ihmal edilecek mertebede olduğu kabul edilelerek, Termodinamiğın birinci kanunu yoğuşturucu için yazılırsa Eşitlik 4.42 elde edilir.

$$\dot{Q}_\zeta = \dot{m} \cdot (h_9 - h_6) \quad (4.42)$$

Termodinamiğın ikinci kanunu uygulanarak yoğuşturucudaki entropi üretimi,

$$\left(\dot{S}_{gen} \right)_{yog} = \dot{m} \cdot (s_6 - s_9) + \frac{\dot{Q}_\zeta}{T_0} \quad (4.43)$$

olarak elde edilir.

Yoğuşturucudaki tersinmezlik miktarı ise aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir.

$$\dot{I} = T_0 \cdot (\dot{S}_{gen})_{yog.} \quad (4.44)$$

Çevrimin birinci kanun verimi,

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} = \frac{\dot{W}_{t1} + \dot{W}_{t2} - \dot{W}_p}{\dot{Q}_g} \quad (4.45)$$

olarak tanımlanır. Pompa kullanıldığı için net iş, her iki çevrimde kullanılan türbin işi toplamından çıkarılmıştır.

Çevrimin ikinci kanun verimi, sistemden elde edilen net işin elde edilebilecek maksimum işe oranı olarak tanımlanır ve çevrimin tersinmezliği cinsinden Eşitlik 4.46'daki gibi ifade edilir.

$$\eta_{II} = \frac{|\dot{W}_{net}|}{|\dot{W}_{tr}|} = 1 - \frac{\dot{I}}{|\dot{W}_{tr}|} \quad (4.46)$$

Bu denklemde, tersinir iş $\dot{W}_{tr}$ ile temsil edilmiştir. Termodinamiğin ikinci kanuna göre, jeotermal enerji kaynağı kullanan güç çevrimi için elde edilebilecek maksimum iş (tersinir iş) Eşitlik 4.47 kullanılarak bulunur.

$$|\dot{W}_{tr}| = |\dot{Q}_g| \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{rez}} \right) \quad (4.47)$$

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde Termodinamik analizi yapılmış olan, sırasıyla, farklı rezervuar koşullarındaki basit CO₂ güç çevrimi, Ömerbeyli jeotermal sahasında bulunan ÖB-7 ile ÖB-8 kuyularına ait rezervuar koşullarındaki basit CO₂ güç çevrimi, pompalı CO₂ güç çevrimi ve son olarak ikili CO₂ güç çevriminden elde edilen sonuçlar çizelgeler halinde hazırlanarak, elde edilen veriler ışığında T-s, P-h diyagramları sunulmuştur.

5.1. Farklı Rezervuar Koşullarında Basit CO₂ Güç Çevrimi

Bu bölümde Şekil 4.1’de modellemesi sunulmuş olan basit CO₂ güç çevriminde rezervuarın derinliği, rezervuarın sıcaklığı, rezervuarın alanı, enjeksiyon ve üretim kuyularının çapı ve çevre sıcaklığı gibi parametreleri değiştirilerek, bu koşullarda çevrimin termodinamik analizinin ne şekilde değiştiği incelenmiştir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda, iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç üretim sisteminin termodinamik analizinden elde edilen veriler Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

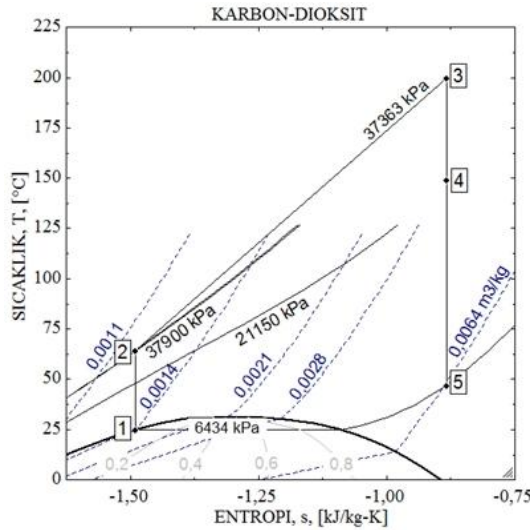
Çizelge 5.1. Farklı rezervuar koşullarındaki basit CO₂ çevriminin termodinamik analiz sonuçları [Bıyikoğlu ve Yalçınkaya, 2012]

No	$\dot{Q}_g$ [kW]	$\dot{Q}_ç$ [kW]	$\dot{W}_t$ [kW]	$\dot{S}_{gen_{rez.}}$ [kWK ⁻¹]	$\dot{S}_{gen_{yoğ.}}$ [kWK ⁻¹]	$\dot{I}_{rez.}$ [kW]	$\dot{I}_{yoğ.}$ [kW]	$P_{üretim}$ [kPa]	η_I	η_{II}
1	37566	30401	7185	18,691	3,879	5573	1156	16054	0,191	0,516
2	33560	26036	7529	14,634	1,764	4363	526	19126	0,224	0,606
3	30238	22885	7358	12,043	0,807	3591	241	21150	0,243	0,657
4	27560	20520	7040	10,202	0,374	3042	112	22486	0,255	0,691
5	19885	15750	4120	5,757	0,076	1717	23	17362	0,207	0,704
6	39588	29206	10386	19,079	3,208	5688	956	23558	0,262	0,610
7	30209	22840	7374	11,966	0,793	3568	237	21231	0,244	0,660
8	30265	22925	7342	12,110	0,816	3611	243	21070	0,243	0,656
9	30293	22969	7328	12,189	0,825	3634	246	20990	0,242	0,654
10	30321	23013	7313	12,266	0,834	3657	249	20909	0,241	0,652
11	30350	23056	7298	12,343	0,844	3680	252	20829	0,240	0,650

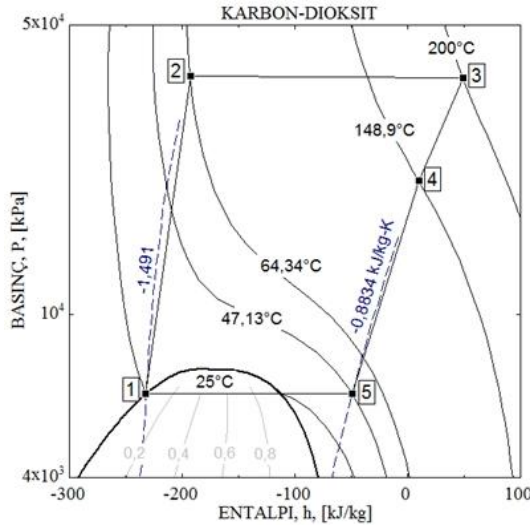
Çizelge 5.1. (Devam) Farklı rezervuar koşullarındaki basit CO₂ çevriminin termodinamik analiz sonuçları [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

No	$\dot{Q}_g$ [kW]	$\dot{Q}_c$ [kW]	$\dot{W}_t$ [kW]	$\dot{S}_{gen_{rez.}}$ [kWK ⁻¹]	$\dot{S}_{gen_{yoğ.}}$ [kWK ⁻¹]	$\dot{I}_{rez.}$ [kW]	$\dot{I}_{yoğ.}$ [kW]	$P_{üretim}$ [kPa]	η_I	η_{II}
12	30325	23016	7311	12,271	0,834	3659	249	20900	0,241	0,652
13	30198	22820	7380	11,928	0,789	3556	235	21267	0,244	0,661
14	30175	22789	7392	11,875	0,784	3541	234	21330	0,245	0,662
15	30163	22769	7399	11,839	0,779	3530	232	21368	0,245	0,663
16	30154	22756	7404	11,820	0,775	3524	231	21393	0,246	0,663
17	30138	22729	7412	11,767	0,770	3508	230	21442	0,246	0,665
18	31358	24579	6784	14,901	1,263	4443	376	18335	0,216	0,584
19	32349	24273	8068	13,981	0,449	4099	132	21824	0,249	0,656
20	27205	20741	6466	9,590	1,332	2907	404	19784	0,238	0,661
21	18116	13690	4428	7,154	0,473	2133	141	21269	0,244	0,661
22	42394	32134	10269	17,029	1,149	5077	343	21025	0,242	0,654

Referans rezervuar koşulu olarak alınan 3 numaralı rezervuarın (bkz. Çizelge 4.1) özelliklerine göre hazırlanan T-s ve P-h diyagramı Şekil 5.1a ve Şekil 5.1b'de sunulmuştur.

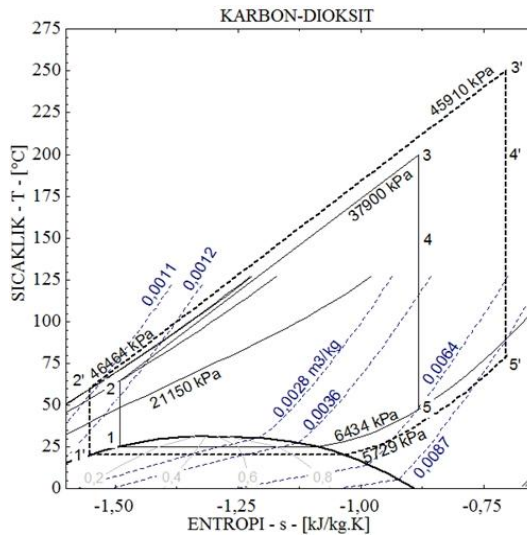


Şekil 5.1a. 3 numaralı rezervuarın özelliklerine göre hesaplanan çevrimin T-s diyagramı [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]



Şekil 5.1b. 3 numaralı rezervuarın özelliklerine göre hesaplanan çevrimin P-h diyagramı [Bıykoğlu ve Yalçınkaya, 2012]

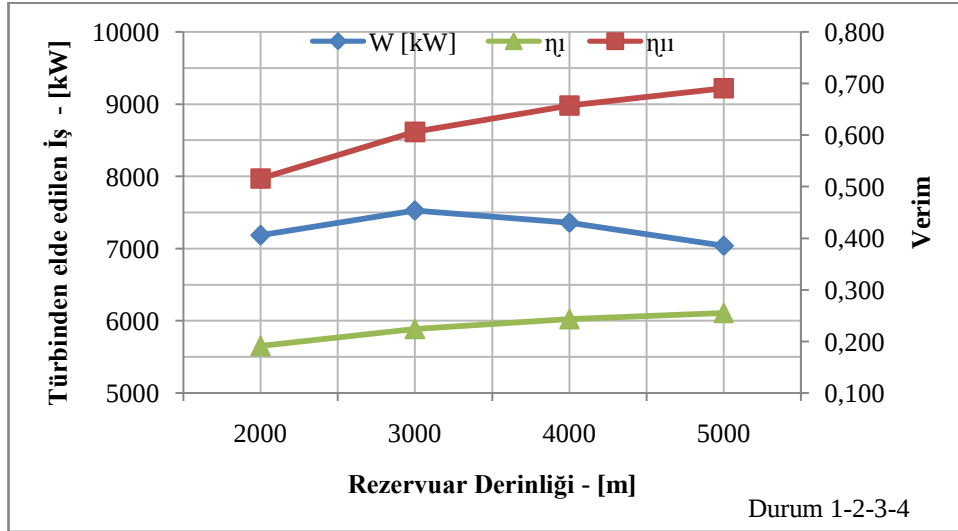
Termodinamik analizi yapılan bütün çevrimlerin çalışma alanının anlaşılabilmesi için 3 numaralı referans rezervuar koşulu ile karşılaştırmalı olarak hazırlanan T-s diyagramı Şekil 5.2’de sunulmuştur.



Şekil 5.2. 3 numaralı referans rezervuar koşuluyla karşılaştırmalı olarak diğer bütün çevrimlerin çalışma alanını ifade eden T-s diyagramı [Bıykoğlu ve Yalçınkaya, 2012]

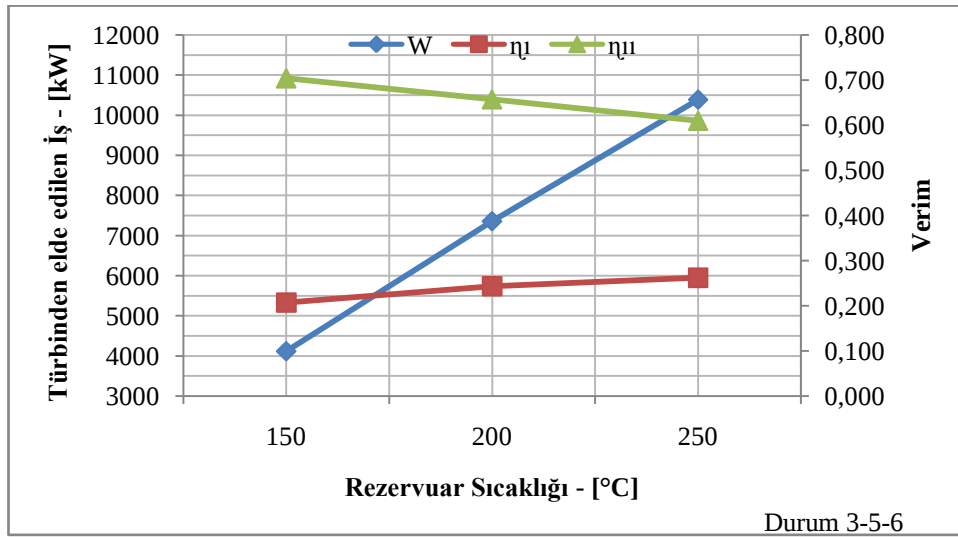
Ayrıca Çizelge 4.1’de verileri sunulan rezervuar koşulları için her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları Ek -2’de sunulmuştur.

Bu sonuçlarla birlikte farklı rezervuar koşullarında çevrimin birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işin değişiminin incelenmesi için hazırlanan diyagramlar aşağıda sunulmuştur.



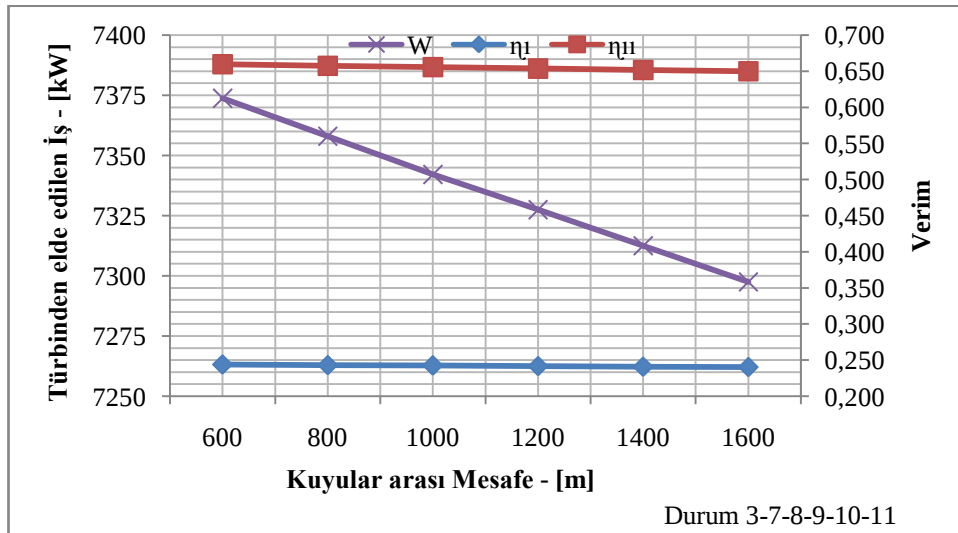
Şekil 5.3. Rezervuar durumu 1-2-3-4 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar derinliklerinde birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

Şekil 5.3'e göre, rezervuar derinliği arttıkça, çevrimin birinci ve ikinci kanun verimlerinin yükseldiği fakat türbinden elde edilen işin 3000 m derinlikten sonra giderek azaldığı gözlemlenmektedir. Bunun nedeni çevrimin 4 ve 5 noktalarında (bkz Şekil 4.1) karbon-dioksitin sahip olduğu entalpi değerlerinin giderek azalmasıdır. Dolayısıyla bu iki değer farklarının (bkz. Eşitlik 4.13) 3000 metreden sonra azalmasıyla elde edilen türbin işi de azalmaktadır.



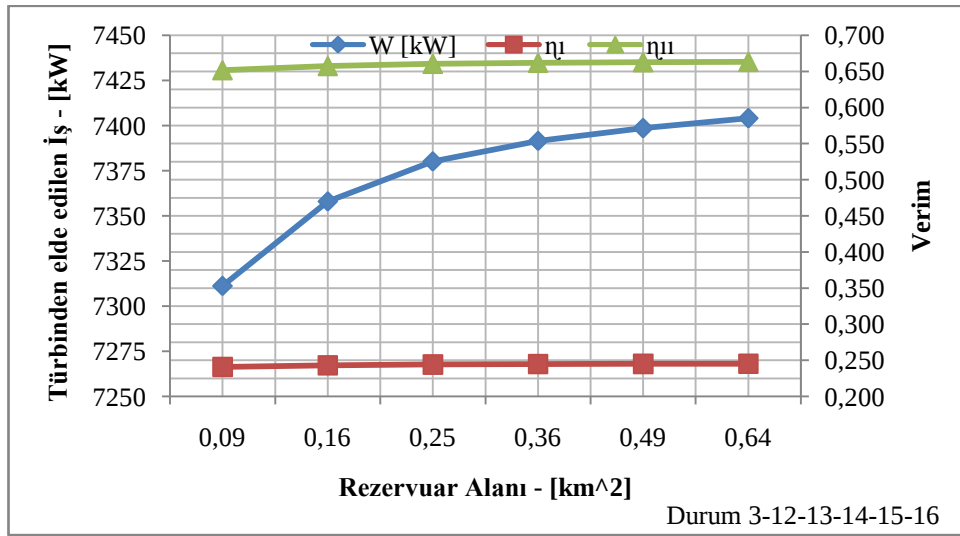
Şekil 5.4. Rezervuar durumu 3-5-6 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar sıcaklıklarında birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri

Şekil 5.4 incelendiğinde, rezervuar sıcaklığının yükseltilmesinin çevrimin birinci kanun verimini ve türbinden elde edilen işi arttırdığı, buna karşılık çevrimin ikinci kanun verimini ise azalttığı görülmektedir.



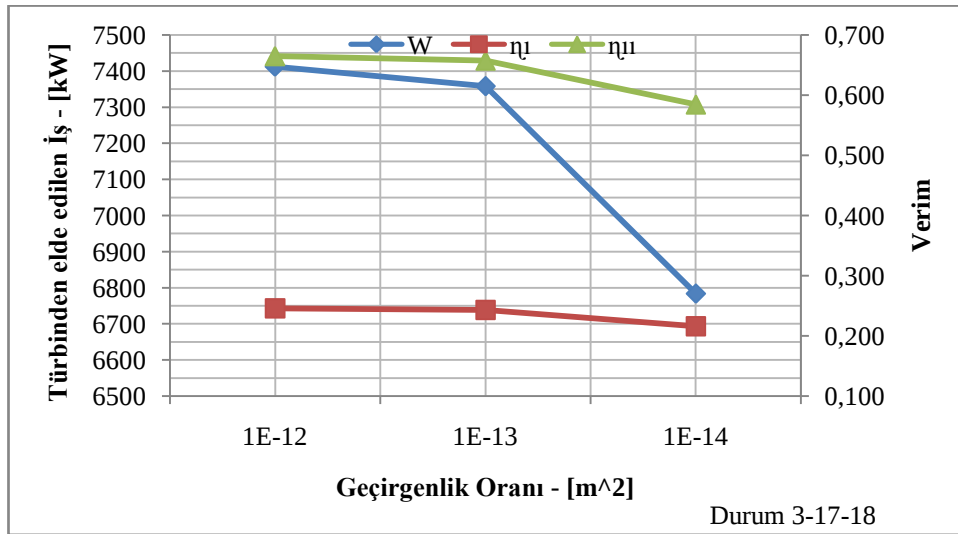
Şekil 5.5. Rezervuar durumu 3-7-8-9-10-11 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kuyular arası mesafelerde birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

Kuyular arası mesafenin arttırılması ile çevrimin birinci ve ikinci kanun verimlerinde düşük oranda bir azalma görülmektedir. Türbinden elde edilen işteki azalma ise lineer olarak gerçekleşmektedir (bkz. Şekil 5.5). Burada kuyular arası mesafenin arttırılması, D'Arcy akışı hesaplamaları ile bağıntılı olarak üretim kuyusundan elde edilen basıncın değerini de düşürmektedir.



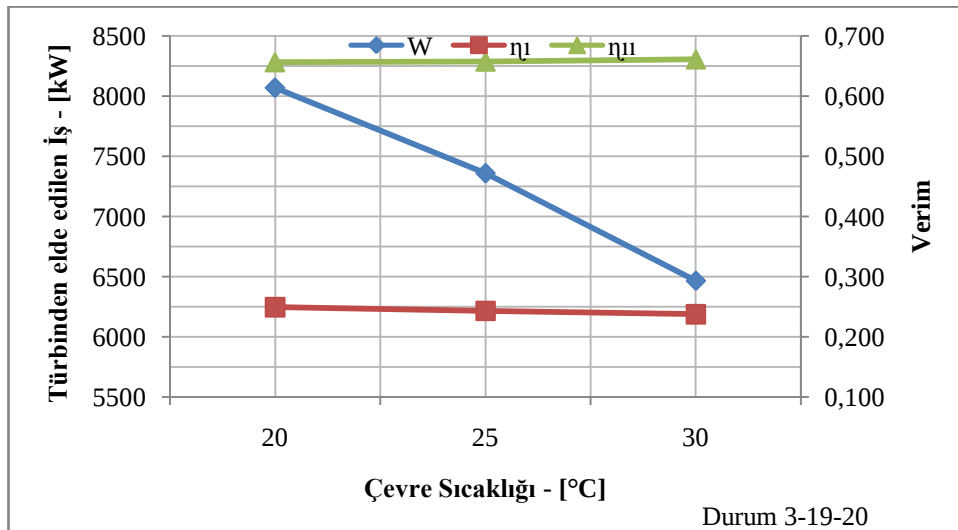
Şekil 5.6. Rezervuar durumu 3-12-13-14-15-16 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar alanlarında birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

Yukarıdaki şekilde, incelenen rezervuar koşulları altında, rezervuar alanının arttırılmasıyla çevrimlerin birinci ve ikinci kanun verimlerinde artış söz konusudur. Türbinden elde edilen işin ise yaklaşık 100 kW değerinde yükseldiği görülmektedir.



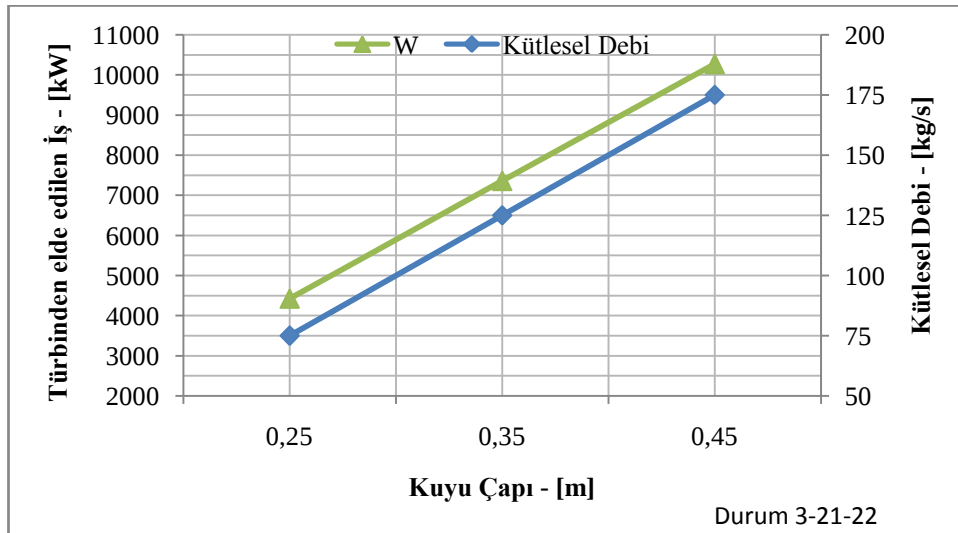
Şekil 5.7. Rezervuar durumu 3-17-18 için hesaplanan çevrimlerin, farklı geçirgenlik oranlarında birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

Rezervuar durumu 3-17-18 için hesaplanan çevrimlerde, rezervuarın geçirgenlik oranının azalmasıyla birinci ve ikinci kanun verimleri ile birlikte türbinden elde edilen işin giderek daha fazla azaldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 5.8. Rezervuar durumu 3-19-20 için hesaplanan çevrimlerin, farklı çevre sıcaklıklarında birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

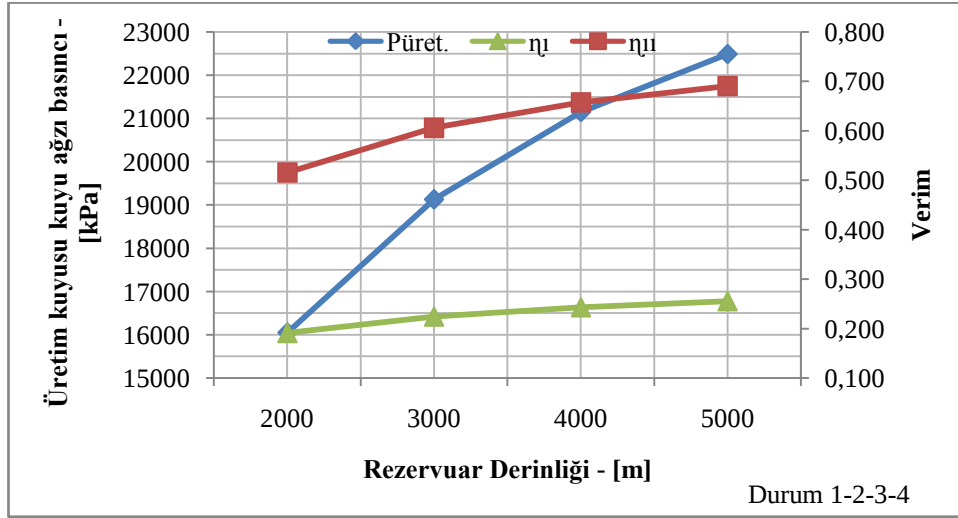
Rezervuar durumu 3-19-20 için incelenen çevrimlerde, çevre sıcaklığının, dolayısıyla enjeksiyon sıcaklığının artırılması ile çevrimin ikinci kanun veriminin artmış olmasına rağmen birinci kanun veriminin ve türbinden elde edilen işin azaldığı görülmektedir. Enjeksiyon sıcaklığı arttıkça karbon-dioksitin doymuş sıvı fazında enjekte edildiği kabulü yapılmasından ötürü, enjeksiyon basıncı da arttırılmaktadır. Fakat bu üretim kuyusundan elde edilen basıncın değerini düşürmektedir ve dolayısıyla türbinden elde edilen işte bir azalma söz konusudur.



Şekil 5.9. Rezervuar durumu 3-21-22 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kuyu çaplarında ve kütleli debilerde türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri [Bıykoğlu ve Yalçınkaya, 2012]

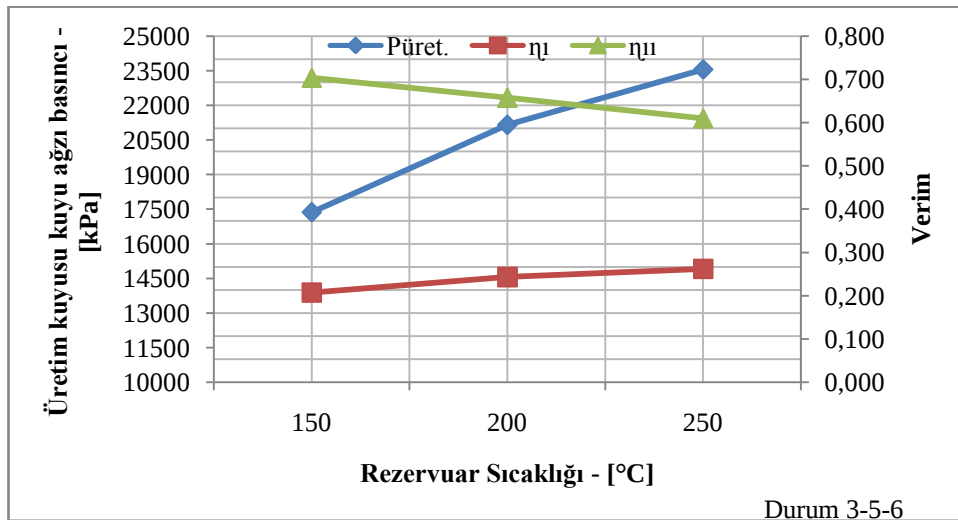
Kütleli debi ile orantılı şekilde arttırılan kuyu çapı ile incelenen çevrimlerdeki türbinden elde edilen işin doğrusal orantılı olarak arttığı gözlemlenmektedir (bkz. Şekil 5.9).

Jeotermal enerji kaynaklı güç üretim sisteminde, farklı rezervuar koşullarında çevrimin birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağzındaki basıncın değişiminin incelenmesi için hazırlanan diyagramlar aşağıda sunulmuştur.



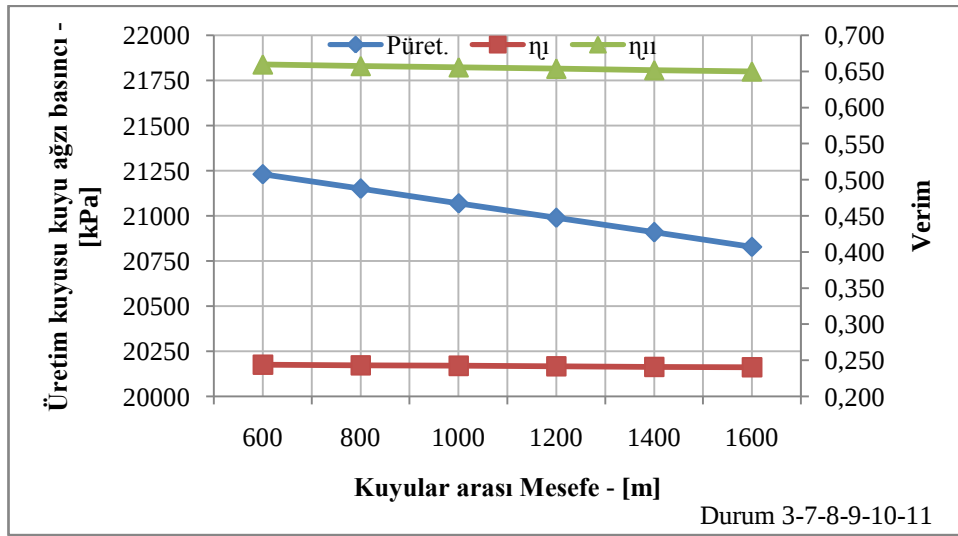
Şekil 5.10. Rezervuar durumu 1-2-3-4 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar derinliklerinde birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağzı basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

Rezervuar derinliğinin artırılması ile çevrimin birinci ve ikinci kanun verimlerinin yanı sıra üretim kuyusunda, kuyu ağzından elde edilen basıncın da arttığı gözlemlenmektedir (bkz. Şekil 5.10). Bu oran her bir 2000 m. derinlik için yaklaşık 5 MPa oranında artmaktadır.



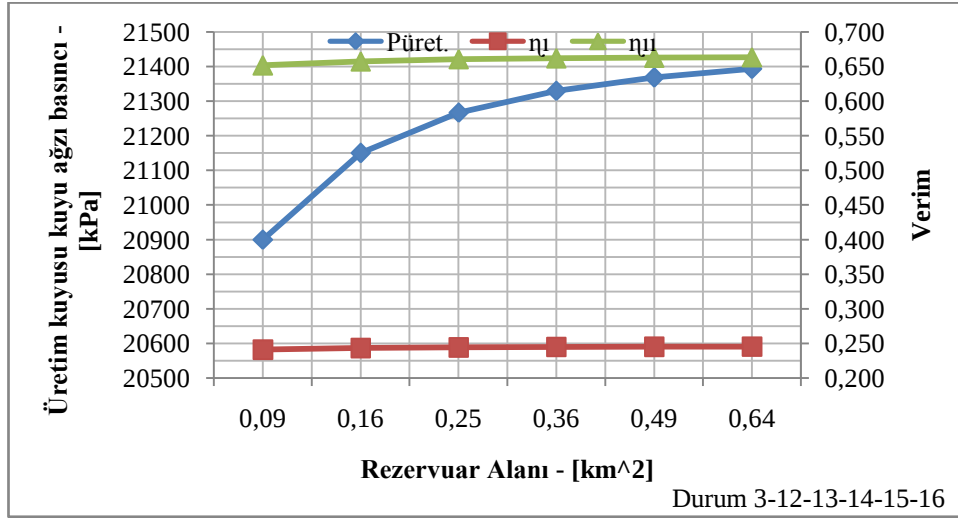
Şekil 5.11. Rezervuar durumu 3-5-6 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar sıcaklıklarında birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağzı basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

Rezervuar sıcaklığının arttırılması ile çevrimin ikinci kanun veriminin azaldığı fakat buna rağmen birinci kanun veriminin ve üretim kuyusu, kuyu ağzından elde edilen basıncın arttığı gözlemlenmektedir (bkz. Şekil 5.11). Bu oran her 50 °C’lik sıcaklık artışı için yaklaşık 3 MPa değerinde artmaktadır.



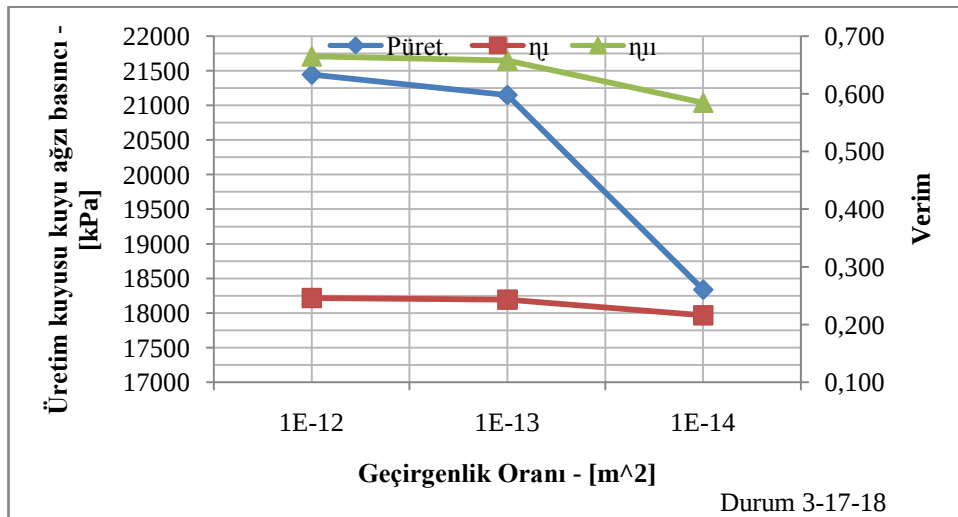
Şekil 5.12. Rezervuar durumu 3-7-8-9-10-11 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kuyular arası mesafelerde birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağzı basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

Kuyular arası mesafenin arttırılması ile çevrimin birinci ve ikinci kanun verimlerinin az da olsa azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte üretim kuyusundan elde edilen basınç değeri de düşmektedir (bkz. Şekil 5.12). Ayrıca çevrimin birinci kanun veriminin her bir 200 m. için %0,1 oranında azaldığı gözlemlenmektedir.



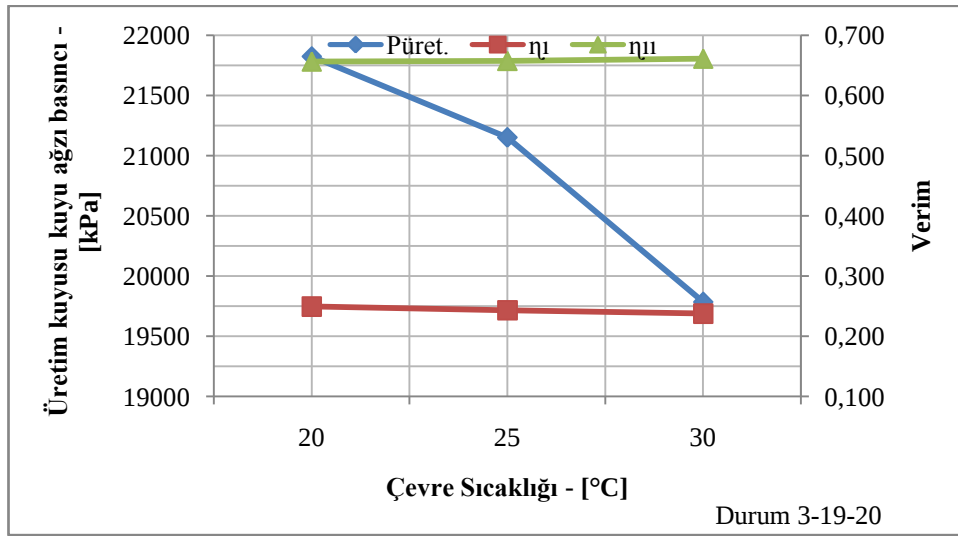
Şekil 5.13. Rezervuar durumu 3-12-13-14-15-16 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar alanlarında birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağız basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

Rezervuar alanının arttırılması çevrimin birinci ve ikinci kanun verimlerinde giderek azalacak şekilde bir artışa neden olmuştur. Bu oran yaklaşık %0.1 ila %0.5 arasındadır. Aynı şekilde üretim kuyusundan elde edilen basınç değerinde de bir artış söz konusudur (bkz. Şekil 5.13).



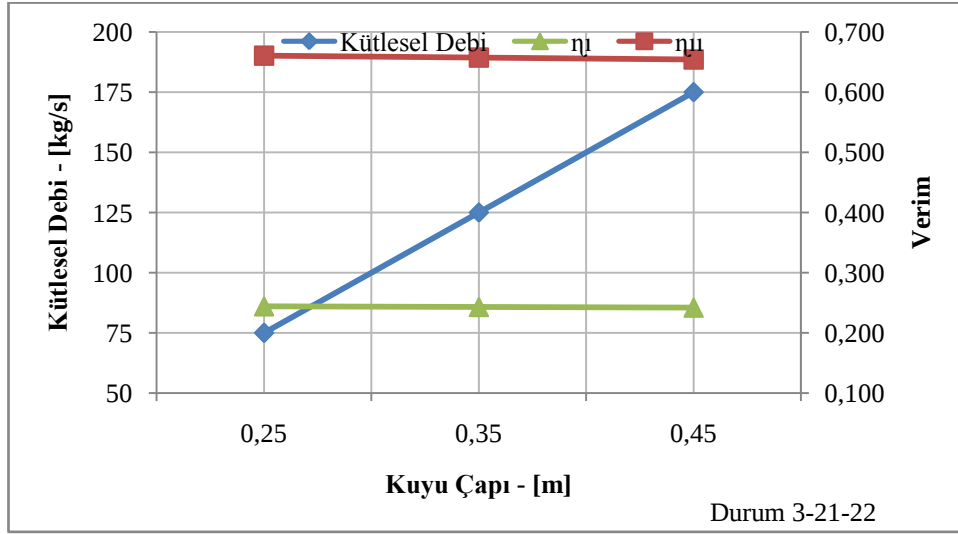
Şekil 5.14. Rezervuar durumu 3-17-18 için hesaplanan çevrimlerin, farklı geçirgenlik oranlarında birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağız basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

Rezervuarın sahip olduğu geçirgenlik oranını azalttığımızda, türbinden elde edilen işte de olduğu gibi, üretim kuyusundan elde edilen basınçta giderek artan bir azalma söz konusudur. Bununla birlikte çevrimin birinci ve ikinci kanun verimlerinin de azaldığı gözlemlenmektedir (bkz. Şekil 5.14).



Şekil 5.15. Rezervuar durumu 3-19-20 için hesaplanan çevrimlerin, farklı çevre sıcaklıklarında birinci ve ikinci kanun verimi ile üretim kuyusu kuyu ağız basıncına göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

Çevre sıcaklığının arttırılması ile çevrimin birinci kanun veriminde düşük oranda da olsa bir azalma söz konusudur. Buna rağmen çevrimin ikinci verimi artmaktadır. Üretim kuyusundan elde edilen basınç değeri ise 10 °C'lik sıcaklık artışında yaklaşık 2 MPa azalmıştır (bkz Şekil 5.15).



Şekil 5.16. Rezervuar durumu 3-21-22 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kuyu çaplarında ve kütleli debilerde çevrimin birinci ve ikinci kanununa göre değişen termodinamik özellikleri [Bıyıkoglu ve Yalçinkaya, 2012]

Enjeksiyon ve üretim kuyusu çaplarının, akışkanın kütleli debisi ile doğru orantılı olarak artırılması neticesinde ise çevrimin birinci ve ikinci kanun verimlerinin çok az etkilendiği gözlemlenmektedir (bkz. Şekil 5.16).

Ayrıca her bir rezervuar koşulu için yapılan hesaplamalar sonucu hazırlanan diğer diyagramlar Ek-3’de sunulmuştur.

5.2. Ömerbeyli Jeotermal Sahasında Bulunan Kuyuların Verilerine Göre Hesaplanan Basit CO₂ Güç Çevrimi

Termosifon etkisi ile çevrim içi akışkan döngüsünün sağlandığı kabul edilen, Şekil 4.1’de çalışma şeması sunulan, iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı, jeotermal enerji kaynaklı basit bir güç çevriminin termodinamik analizi Ömerbeyli jeotermal sahasında bulunan ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularına ait rezervuarların verileri ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarla kıyaslama yapmak amacıyla Atrens ve ark. tarafından 2009 yılında incelenen rezervuar koşulları ile Gurgenci ve ark. tarafından 2008 yılında incelenen rezervuar koşullarına göre de çevrimin Termodinamik analiz gerçekleştirilmiş ve karbon-dioksitin çevrimdeki kütle debisi, hesaplaması yapılan

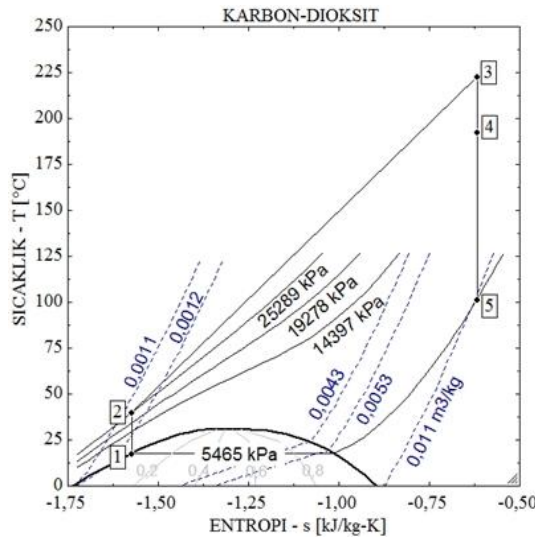
beş çevrimde de 276,8 kg/s olarak alınmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. ÖB-7, ÖB-8 kuyuları ile Atrens ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarına göre hesaplanan çevrimlerin termodinamik analiz sonuçları

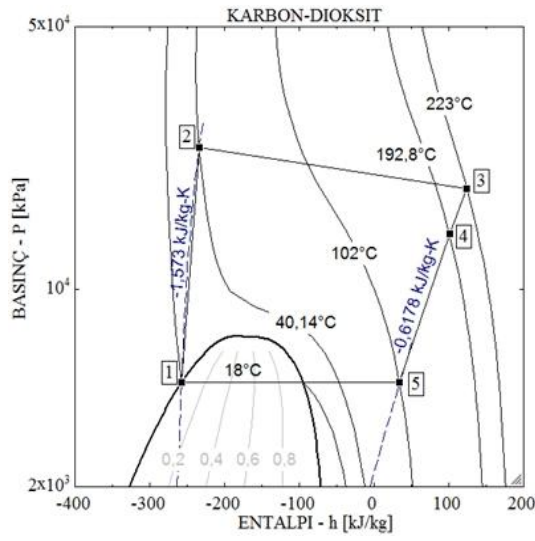
Çevrim adı	$\dot{Q}_g$ [kW]	$\dot{Q}_\xi$ [kW]	$\dot{W}_t$ [kW]	$\dot{S}gen_{rez.}$ [kW.K ⁻¹]	$\dot{S}gen_{yog.}$ [kW.K ⁻¹]	$\dot{I}_{rez.}$ [kW]	$\dot{I}_{yog.}$ [kW]	η_I	η_{II}
ÖB-7	99157	80660	18497	64,566	12,620	18798	3674	0,187	0,451
ÖB-8	102617	86437	16180	71,786	17,432	20900	5075	0,158	0,384
Atrens vd.*	80000	62402	17568	45,916	5,947	13690	1773	0,220	0,532
Rankine**	86534	61526	24302	36,520	3,067	10706	899	0,281	0,683
Brayton**	42954	33265	9016	10,087	18,859	2957	5528	0,210	0,533

* Atrens vd.’ne ait rezervuar koşulları [Atrens ve ark., 2009], ** Gurgenci vd.’ne ait rezervuar koşulları [Gurgenci ve ark., 2008^a]

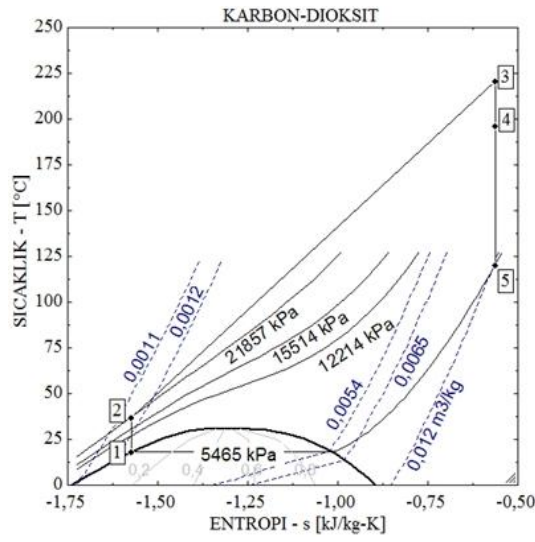
Ömerbeyli jeotermal sahasındaki ÖB-7 (Şekil 5.17a, Şekil 5.17b) ve ÖB-8 (Şekil 5.18a, Şekil 5.18b) kuyularının verilerine göre hesaplanan güç çevrimlerinin T-s ve P-h diyagramları elde edilen sonuçlara göre aşağıda sunulmuştur.



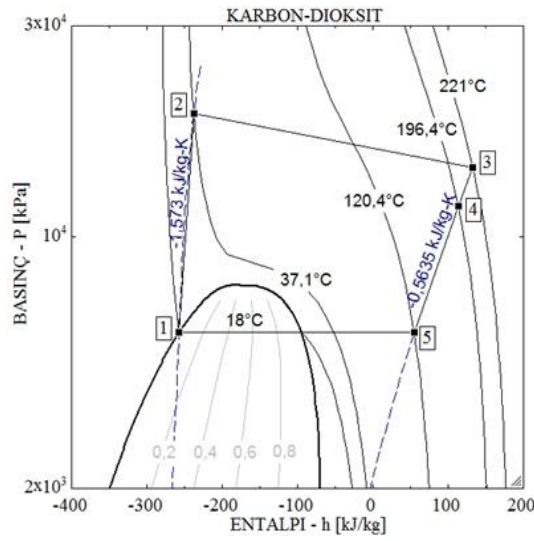
Şekil 5.17a. ÖB-7 kuyusunun verilerine göre hesaplanan güç çevriminin T-s diyagramı



Şekil 5.17b. ÖB-7 kuyusunun verilerine göre hesaplanan güç çevriminin P-h diyagramı

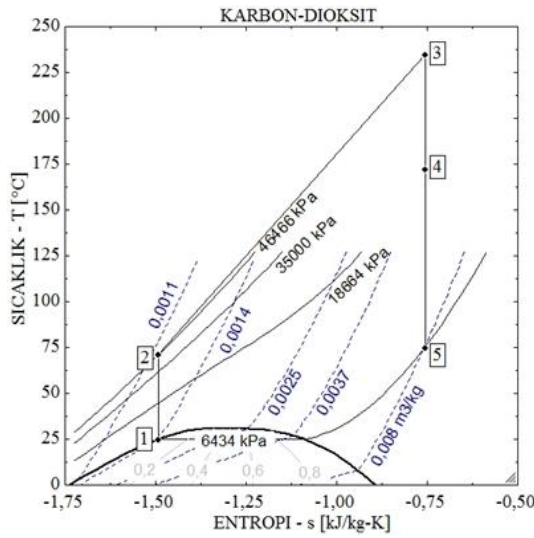


Şekil 5.18a. ÖB-8 kuyusunun verilerine göre hesaplanan güç çevriminin T-s diyagramı

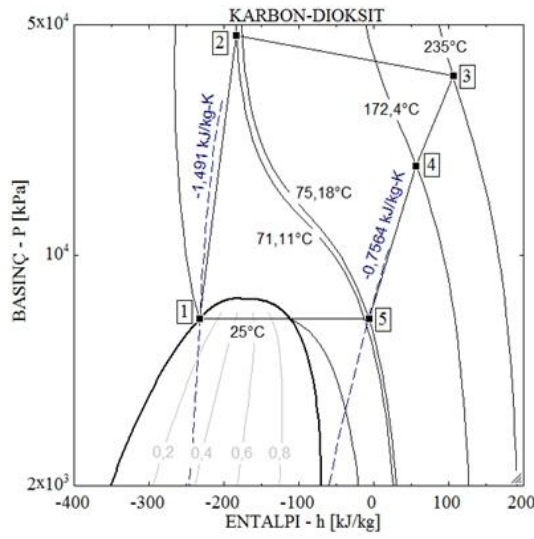


Şekil 5.18b. ÖB-8 kuyusunun verilerine göre hesaplanan güç çevriminin P-h diyagramı

Atrens ve ark. tarafından 2009 yılında incelenen rezervuar koşullarına göre Termodinamik analiz yapılan çevrimin T-s ve P-h diyagramları ise sırasıyla Şekil 5.19a ve Şekil 5.19b’de sunulmuştur.

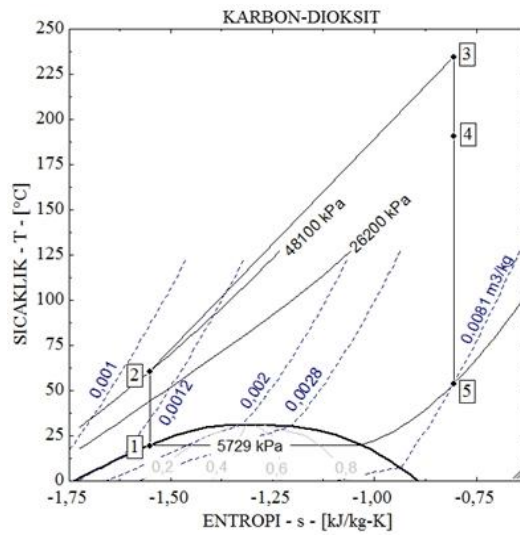


Şekil 5.19a. Atrens ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimin T-s diyagramı

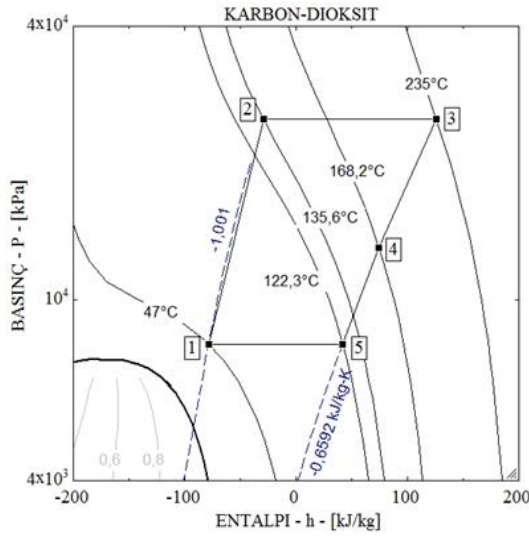


Şekil 5.19b. Atrens ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimin P-h diyagramı

Gurgenci vd. [Gurgenci ve ark., 2008^a] tarafından incelenen, yukarıda T-s ve P-h diyagramlarını verdiğimiz çevrimlere göre farklı rezervuar basınç ve sıcaklığına sahip basit CO₂ Rankine çevriminin T-s ve P-h diyagramı Şekil 5.20a ve Şekil 5.20b’de sunulmuştur.

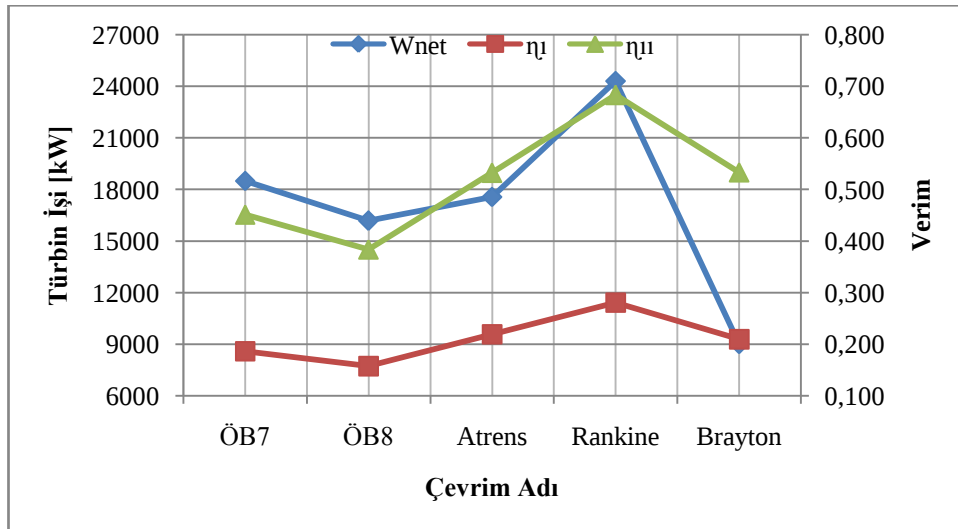


Şekil 5.20a. Gurgenci ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki Rankine çevrimin T-s diyagramı



Şekil 5.21b. Gurgenci ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki Brayton çevrimin P-h diyagramı [Yalçınkaya ve Bıyıkoglu, 2012^b]

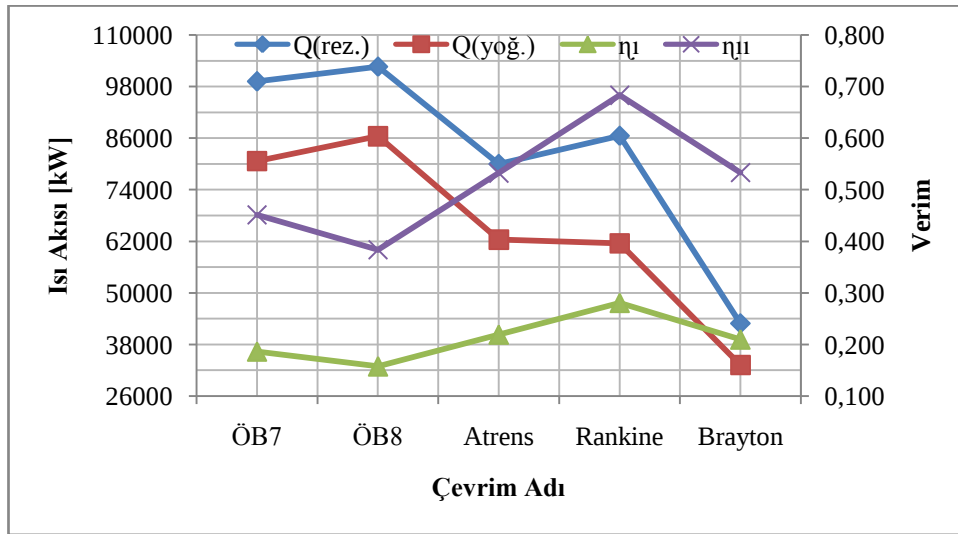
Bu sonuçlarla birlikte Ömerbeyli jeotermal sahasında bulunan ÖB-7 - ÖB-8 kuyularına ait rezervuar koşullarındaki çevrim ile 2009 yılında Atrens ve arkadaşları tarafından ve 2008 yılında Gurgenci ve arkadaşları tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimin birinci ve ikinci kanun verimi ile türbinden elde edilen işin değişiminin incelenmesi için hazırlanan diyagram aşağıda sunulmuştur.



Şekil 5.22. ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularına ait rezervuar koşullarındaki çevrimler ile Atrens ve ark. ile Gurgenci ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimlerin birinci ve ikinci kanun verimleri ile türbinden elde edilen işe göre değişen termodinamik özellikleri

ÖB-7 kuyusuna ait rezervuar koşullarındaki çevrimden elde edilen türbin işinin, Atrens ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimden elde edilen türbin işine göre daha yüksek bir değerde olduğu gözlemlenmektedir. Fakat buna rağmen Ömerbeyli jeotermal sahasında bulunan ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularının rezervuar özelliklerine göre hesaplanan çevrimlerin birinci ve ikinci kanun verimleri, Atrens ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrime oranla daha düşük elde edilmiştir. Gurgenci ve ark. tarafından incelenen Rankine çevriminde ise rezervuar içerisindeki modellemede D'Arcy akışı kabulü yapılmadığından ve kuyular arasında herhangi bir basınç kaybının olmamasından ötürü, çevrimin birinci ve ikinci kanun verimleri ile türbinden elde edilen iş diğer çevrimlere oranla daha yüksek hesaplanmıştır. Ayrıca çevrim boyunca kritik-üstü fazda karbon-dioksitin kullanıldığı Brayton çevriminin birinci ve ikinci kanun verimleri, ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularının koşullarına göre hesaplanan çevrimlerden yüksek olmasına rağmen türbinden elde edilen iş miktarı çok daha düşüktür. Bunun nedeni Brayton çevriminde karbon-dioksitin çevrim boyunca kritik-üstü fazda olması ve enjeksiyon koşullarının diğerlerine oranla daha yüksek basınçta ve sıcaklıkta olmasıdır.

Ayrıca termodinamik analizi yapılan çevrimlerin birinci ve ikinci kanun verimleri ile rezervuardan çekilen ısı enerjisi değişiminin incelenmesi için hazırlanan diyagram Şekil 5.23'de sunulmuştur.



Şekil 5.23. ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularına ait rezervuar koşullarındaki çevrimler ile Atrens ve ark. ile Gurgenci ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimlerin birinci ve ikinci kanun verimleri ile rezervuardan çekilen ısı enerjisine göre değişen termodinamik özellikleri

Kıyaslama yapmak amacıyla, termodinamik analizi gerçekleştirilen çevrimlerdeki karbon-dioksitin kütleli debisi eşit alınmıştır. Buna paralel olarak ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularına ait rezervuar koşullarındaki çevrimlerin, rezervuar boyunca çektikleri ısı enerjisi Atrens ve ark. ile Gurgenci ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimlere oranla çok daha yüksektir. Fakat buna rağmen Ömerbeyli jeotermal sahasında bulunan ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularına ait rezervuar koşullarındaki çevrimlerin birinci ve ikinci kanun verimleri, Atrens ve ark. ile Gurgenci ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimlere göre daha düşük elde edilmiştir. Birinci kanun veriminin daha düşük elde edilmesinde ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularında üretim kuyusundan elde edilen basıncın, Gurgenci ve ark. tarafından incelenen Brayton çevrimi hariç, diğer tüm çevrimlere oranla daha az olması etkili bir rol oynamıştır. İkinci kanun veriminde ise ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularına oranla Atrens ve ark. ile Gurgenci ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimin tersinmezlik oranının çok daha düşük olması, ikinci kanun veriminin daha az elde edilmesine neden olmuştur. Ayrıca Atrens ve ark. ile Gurgenci ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrimin, rezervuar sıcaklığının ve

derinliğinin ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularına oranla yüksek olması sonuçlardaki bu farkın oluşmasını etkilemiştir.

5.3. Pompalı CO₂ Güç Çevrimi

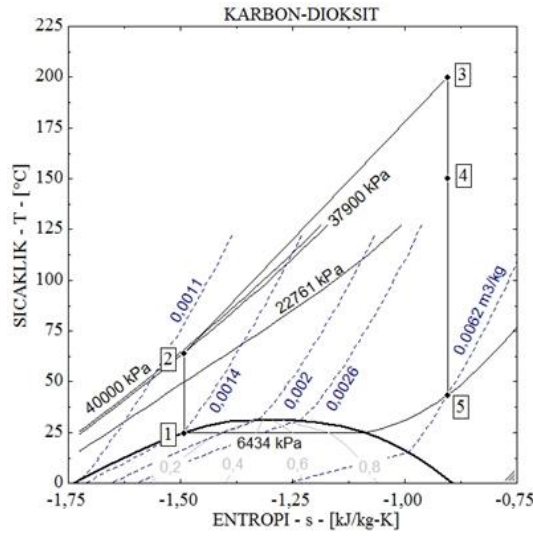
Termosifon etkisi ile çevrim içi akışkan döngüsünün sağlandığı kabul edilen sistem ile pompa yardımıyla akışkan sirkülasyonunun sağlandığı, iş akışkanı olarak kritik-üstü karbon-dioksit kullanıldığı, jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretim tesisinin termodinamik analizi yapılmıştır.

Yapılan hesaplamalar ışığında, her iki çevrim için elde edilen sonuçlar Çizelge 5.3’de sunulmuştur.

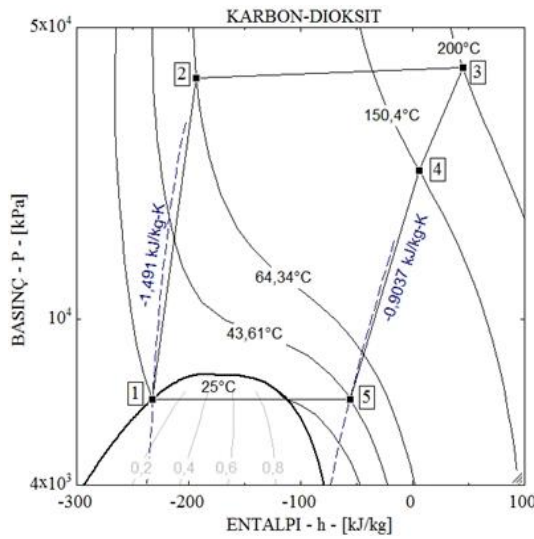
Çizelge 5.3. Pompalı ve pompasız CO₂ çevrimlerinin termodinamik analiz sonuçları

Çevrim adı	$\dot{Q}_g$ [kW]	$\dot{Q}_\phi$ [kW]	$\dot{W}_{net}$ [kW]	$\dot{S}gen_{rez.}$ [kW.K ⁻¹]	$\dot{S}gen_{yoğ.}$ [kW.K ⁻¹]	$\dot{I}_{rez.}$ [kW]	$\dot{I}_{yoğ.}$ [kW]	η_I	η_{II}
Pompasız	29723	22076	7648	10,594	0,632	3159	188	0,257	0,696
Pompalı	29560	22076	7461	10,938	0,632	3261	188	0,252	0,685

Elde edilen sonuçlara göre, termosifon etkisinin çevrim içi akışkan döngüsünü sağlayacak mertebede kabul edildiği, karbon-dioksit ile çalışan jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretim tesisinin T-s ve P-h diyagramları aşağıda sunulmuştur (Şekil 5.24a), (Şekil 5.24b).

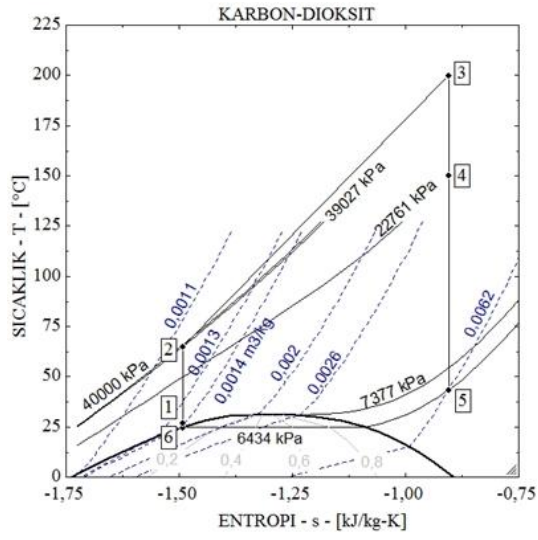


Şekil 5.24a. Pompasız CO₂ Güç Çevriminin T-s diyagramı

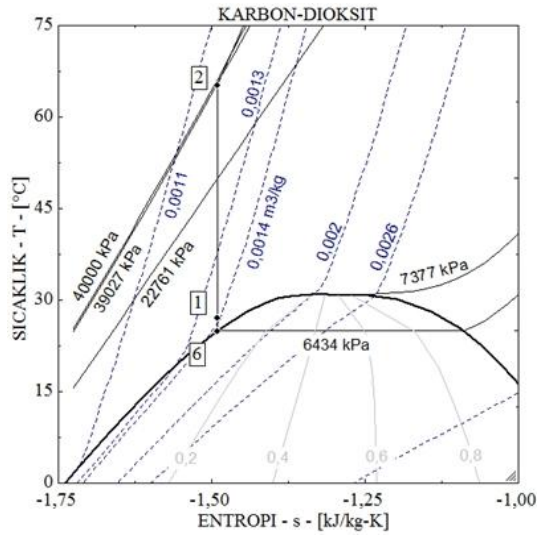


Şekil 5.24b. Pompasız CO₂ Güç Çevriminin P-h diyagramı

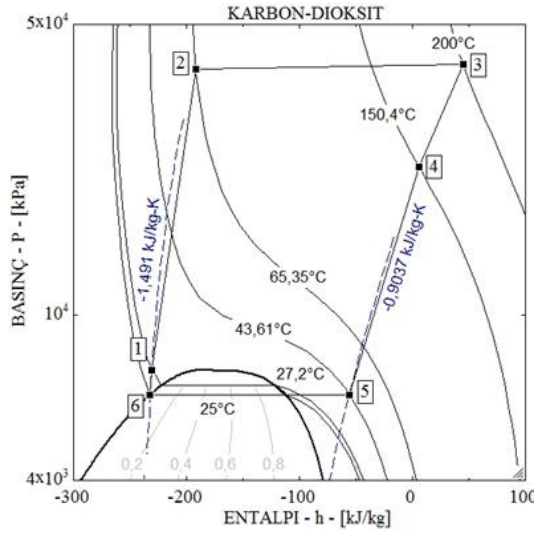
Termosifon etkisinin çevrim içi akışkan döngüsünü sağlayamayacak mertebede kabul edildiği ve pompa kullanılarak hesaplanan çevrimin T-s diyagramı (Şekil 5.25a), T-s diyagramında 1 ve 6 noktalarının yakınlaştırılmış görünümü (Şekil 5.25b) ve P-h (Şekil 5.25c) diyagramı ise aşağıda sunulmuştur.



Şekil 5.25a. Pompalı CO₂ Güç Çevriminin T-s diyagramı

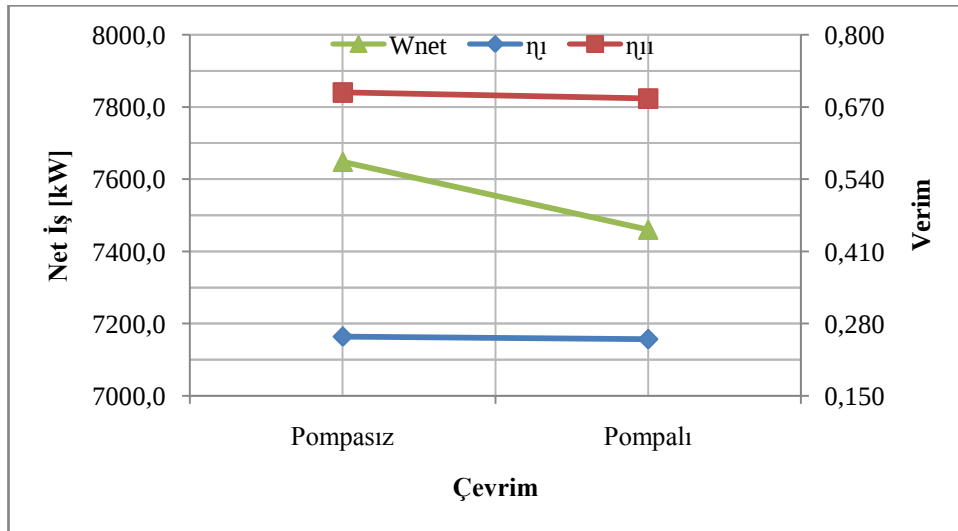


Şekil 5.25b. T-s diyagramında 1 ve 6 noktalarının yakınlştırılmış görünümü



Şekil 5.25c. Pompalı CO₂ Güç Çevriminin P-h diyagramı

Elde edilen sonuçlara göre, jeotermal enerji kaynaklı pompalı ve pompasız CO₂ güç çevrimlerinin Termodinamiğin birinci ve ikinci kanununa göre verimleri ile elde edilen net işin karşılaştırıldığı diyagram Şekil 5.26'da sunulmuştur. Pompanın kullanılması ile üretilen net işin ve verimlerin azaldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 5.26. Net iş, birinci ve ikinci kanun verimlerinin pompasız ve pompalı CO₂ güç çevrimleri için aldığı değerler

Akışkanın çevrim içi sirkülasyonunun pompa yardımıyla sağlanması, çevrimde üretilen net işin azalmasına neden olmuştur. Bununla birlikte çevrimin birinci kanun

veriminin %0,5 oranında, ikinci kanun veriminin ise %1,1 oranında azaldığı gözlemlenmektedir.

5.4. İkili (Binary) CO₂ Güç Çevrimi

Bu bölümde Şekil 4.3’de çalışma şeması sunulmuş olan ikili (binary) CO₂ güç çevrimindeki iş akışkanı değiştirilerek, karbon dioksit ile birlikte farklı iş akışkanlarının kullanılmasının çevrimin termodinamik analizini ne şekilde değiştirdiği incelenmiştir.

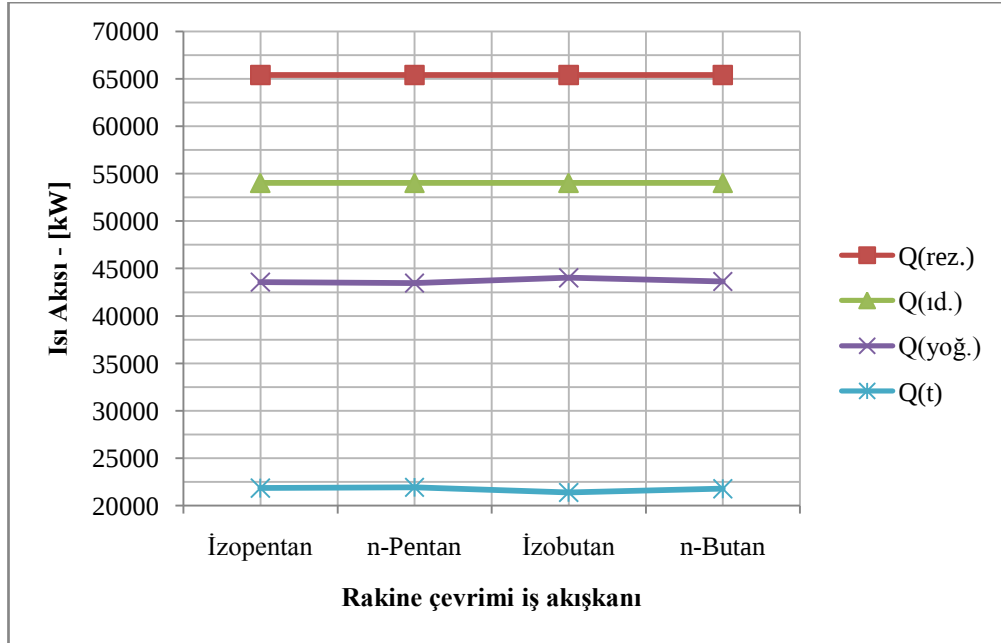
Yapılan hesaplamalar sonucunda, karbon dioksit ile birlikte iş akışkanı olarak izopentanın kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç üretim sisteminin termodinamik analizinden elde edilen veriler Çizelge 5.4’de sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Farklı iş akışkanları için ikili (binary) CO₂ çevriminin termodinamik analiz sonuçları

	Birim	CO ₂ +Izopentan	CO ₂ +n-Pentan	CO ₂ +Izobutan	CO ₂ +n-Butan
$\dot{Q}_g$	[kW]	65415	65415	65415	65415
$\dot{Q}_\zeta$	[kW]	43569	43475	44023	43635
$\dot{W}_{t1}$	[kW]	11408	11408	11408	11408
$\dot{W}_{t2}$	[kW]	10645	10706	10590	10793
$\dot{W}_p$	[kW]	173	140	571	386
$\dot{S}_{gen_{rez.}}$	[kW K ⁻¹]	41,822	41,822	41,822	41,822
$\dot{S}_{gen_{yoğ.}}$	[kW K ⁻¹]	1,023	1,131	0,201	0,349
$\dot{I}_{rez.}$	[kW]	12260	12260	12260	12260
$\dot{I}_{yoğ.}$	[kW]	300	332	59	102
η_I		0,334	0,336	0,328	0,333
η_{II}		0,563	0,562	0,572	0,570

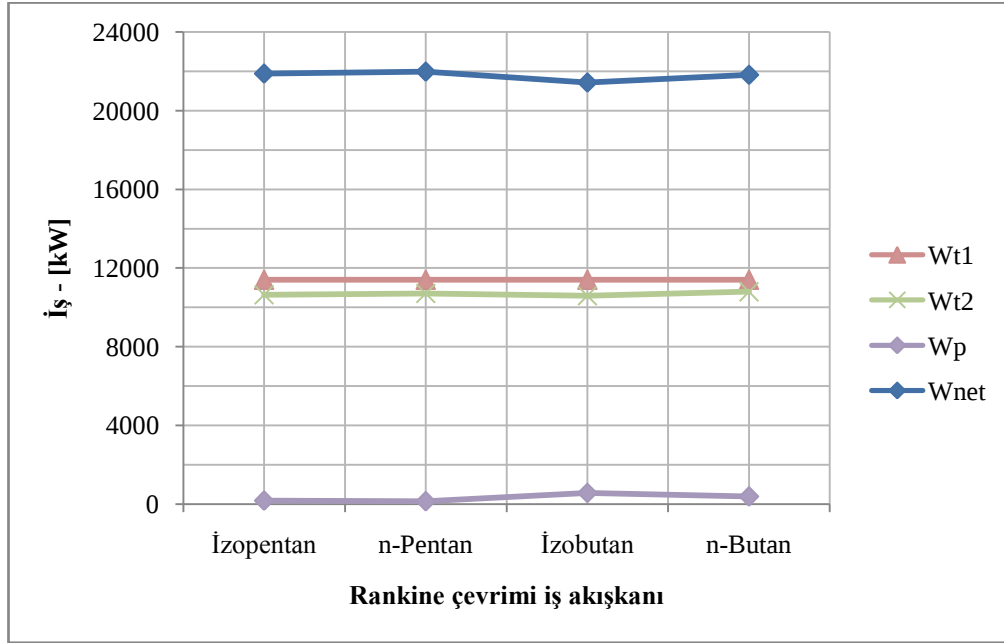
Termodinamik analizi yapılan bu çevrimlere ait T-s ve P-h diyagramları Ek-5’de sunulmuştur.

Ayrıca ikili çevrimde denenilen farklı iş akışkanları için çevrimin termodinamik analizinde meydana gelen değişimleri gösteren grafikler aşağıda sunulmuştur.



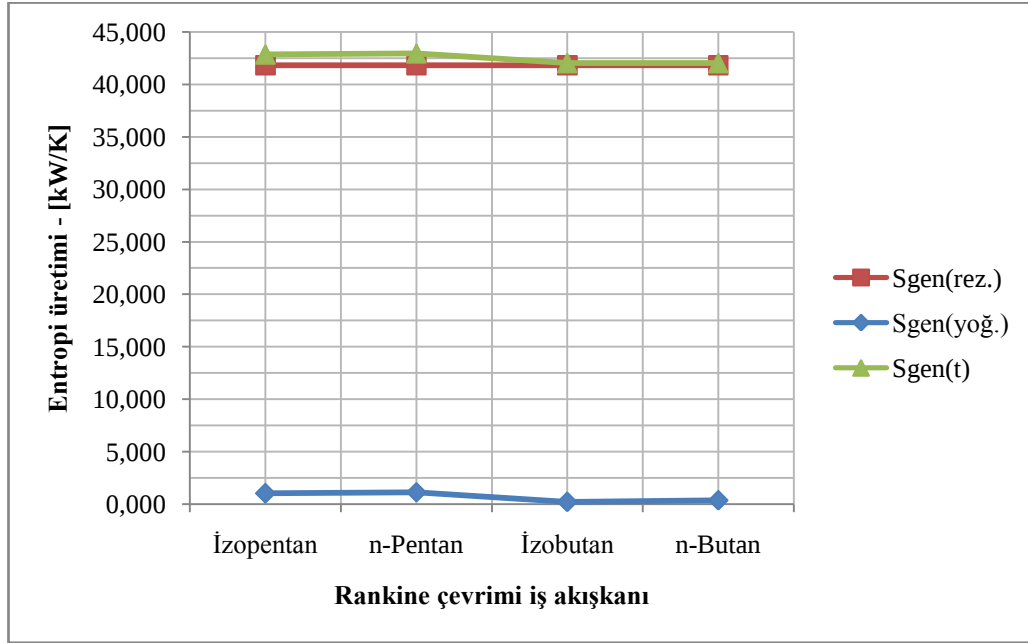
Şekil 5.27. İkili çevrimde karbon-dioksit ile birlikte kullanılan iş akışkanlarına göre çevrimin ısı akısında meydana gelen değişim

Çevrim hesaplamasının gerçekleştirildiği rezervuar özelliklerinin ve kullanılan basit CO₂ güç çevriminin aynı olmasından ötürü incelenen bütün çevrimlerde rezervuardan elde edilen ısı akısı miktarı eşittir. Buna rağmen kullanılan diğer iş akışkanlarının sahip olduğu termodinamik özelliklerinden ötürü yoğunlaştırucu vasıtasıyla çevreye atılan ısı miktarı oranı izobutanda en yüksek değere ulaşmıştır (bkz. Şekil 5.27).



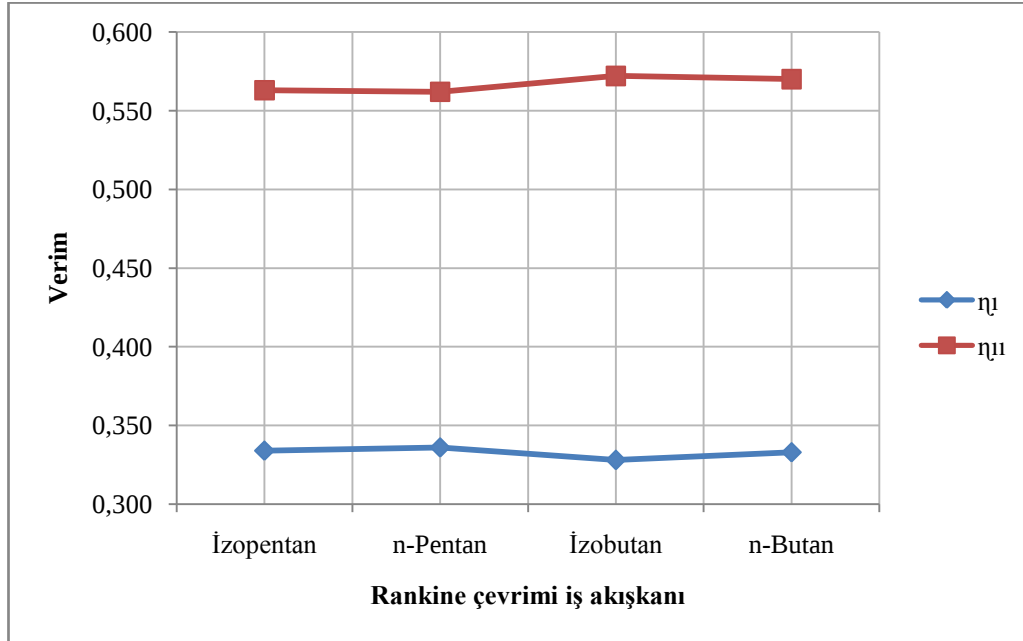
Şekil 5.28. İkili çevrimde karbon-dioksit ile birlikte kullanılan iş akışkanlarına göre çevrimde üretilen işte meydana gelen değişim

İkili çevrimde karbon-dioksit ile denenen iş akışkanları arasında türbinden elde edilen işin en yüksek olduğu çevrim, n-butanın iş akışkanı olarak kullanıldığı çevrimdir. Buna rağmen ikili çevrimde elde edilen net işin en yüksek oranda olduğu çevrim ise n-pentanin karbon-dioksitle birlikte iş akışkanı olarak kullanıldığı çevrimdir (bkz. Şekil 5.28).



Şekil 5.29. İkili çevrimde karbon-dioksit ile birlikte kullanılan iş akışkanlarına göre çevrimde üretilen entropide meydana gelen değişim

İncelemesi yapılan bütün ikili çevrimlerin rezervuar özelliklerinin aynı olması nedeniyle, rezervuarda üretilen entropi miktarları bütün çevrimler için eşittir. Fakat yoğuşturucuda üretilen entropi miktarının en yüksek olduğu çevrim, iş akışkanı olarak n-pentanin kullanıldığı çevrimdir. Yoğuşturucudaki entropi miktarının en düşük olduğu çevrim ise izobutanın iş akışkanı olarak kullanıldığı çevrime aittir (bkz. Şekil 5.29).



Şekil 5.30. İkili çevrimde karbon-dioksit ile birlikte kullanılan iş akışkanlarına göre çevrimin birinci ve ikinci kanununa ait veriminde meydana gelen değişim

Termodinamik analizi gerçekleştirilmiş olan, aynı rezervuar özelliklerine sahip, jeotermal enerji kaynaklı güç çevrimleri arasında birinci kanun veriminin en yüksek olduğu iş akışkanı, karbon-dioksit ile birlikte n-pentanin kullanıldığı çevrime aittir. Bunun nedeni n-pentanin iş akışkanı olarak kullanıldığı çevrimdeki kütleli debisinin diğer çevrimlerdeki iş akışkanlarına göre düşük olmasına rağmen, çevrimden elde edilen net iş değerinin diğerlerine göre yüksek olmasıdır. Birinci kanun veriminin en düşük olduğu iş akışkanı ise ikili çevrimde karbon-dioksit ile birlikte izobutanın denendiği çevrimde gerçekleşmiştir. Aynı şekilde karbon-dioksit ile birlikte izobutanın denendiği çevrimden elde edilen net işin değeri, diğer çevrimlere oranla daha düşüktür. Bununla birlikte izobutanın iş akışkanı olarak denendiği çevrimde, çevrimin ikinci kanun verimi diğer çevrimlere oranla en yüksek değere sahiptir. İkinci kanun verimindeki bu farkta, izobutanın iş akışkanı olarak kullanıldığı çevrimde yoğunlaştırıcıdaki entropi üretiminin az olması, dolayısıyla toplam tersinmezlik miktarının diğer iş akışkanlarının kullanıldığı çevrimlere oranla düşük olması etkin bir rol oynamıştır. (bkz. Şekil 5.30).

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı, jeotermal enerji kaynaklı üç farklı güç çevrimi tasarlanmış ve bu çevrimlerin termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. İncelenen bütün çevrimlerde entropi üretiminin pozitif değerde elde edilmesi, çevrimlerin uygulanabilir olduğunun bir göstergesidir. Elde edilen sonuçlara göre, çevrimin birinci kanun verimi ve çevrimden elde edilen net iş miktarı en yüksek değere sahip olan çevrim, karbon-dioksit ile birlikte iş akışkanı olarak n-pentanin tercih edildiği ikili CO₂ güç çevrimine aittir. Fakat burada göz ardı edilmemesi gereken husus, ikili çevrimlerin ilk yatırım maliyetinin, incelenen diğer çevrimlere oranla daha yüksek olmasıdır. Bununla birlikte en yüksek ikinci kanun verimine sahip olan çevrim ise Bölüm 3.1’de incelenen, 5 numaralı rezervuarın özelliklerine sahip basit CO₂ güç çevrimine aittir.

Ömerbeyli jeotermal sahasında bulunan ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularının verilerine göre hesaplanan çevrimlerin, Atrens ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşullarındaki çevrime göre yakın değerde elektrik üretimi sağlayabileceği görülmektedir. Fakat burada kıyaslama yapılması amacıyla karbon-dioksitin kütleli debisinin beş çevrimde de aynı alındığı, bununla birlikte yapılan hesaplamalarda ÖB-7 ve ÖB-8 rezervuarlarından çekilen ısı enerjisi değerinin Atrens ve ark. ile Gurgenci ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşulundaki çevrimlere göre daha yüksek olduğu not edilmelidir. Buna rağmen ÖB-7 ve ÖB-8 kuyularının verilerine göre hesaplanan çevrimlerin birinci ve ikinci kanun verileri Atrens ve ark. ile Gurgenci ve ark. tarafından incelenen rezervuar koşulundaki çevrimlere göre daha düşük elde edilmiştir.

İncelenen çevrimlerin optimizasyonunun yapılması ve uygulamaya yakın olması amacıyla yer altına enjekte edilen karbon-dioksitin içerisinde bir miktar suyun var olabileceği düşünülerek çevrimlerin yeniden termodinamik analizinin gerçekleştirilmesi ileride yapılması düşünülen çalışmalar arasındadır.

KAYNAKLAR

- Altınışıık K., “Uygulamalarla Isı Transferi”, *Nobel Yayın*, 1. Baskı, 698-710, (2003).
- Armstead H. C. H., Tester J. W., “Heat Mining 2nd ed.”, *E&FN Spon.404*, 34-35, London, (1987).
- Armstead H. C. H., Christopher H., “Geothermal Energy”, *E&FN Spon.478*, 31-32, 150, 393, London, (1983).
- Atrens A. D., Gurgenci H., Rudolph V., “CO₂ Thermosiphon for Competitive Geothermal Power Generation”, *Energy&Fuels*, 23, 553-557, (2009).
- Atrens A. D., Gurgenci H., Rudolph V., “Removal of water for Carbon dioxide-based EGS operation”, *Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, SGP-TR-191, (2011).
- Bıyıkoglu A., Yalçınkaya R., “Effects of Different Reservoir Conditions on CO₂ Power Cycle”, *NuRER 2012 – III. International Conference on Nuclear & Renewable Energy Resource*, İstanbul, (2012).
- Brown D., “A Hot Dry Rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water”, *Twenty-Fifth workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, 233-238, (2000).
- Dickson M. H., Fanelli M., “What is Geothermal Energy?”, *Istituto di Geoscienze e Georisorse*, Pisa, 4-6, 10-11, (2004).
- Ergun S., “Chemical Engineering Program”, 48, 89-94, (1952).
- Gherardi F., Xu T., Pruess K., “Numerical modeling of self-limiting and self-enhancing caprock alteration induced by CO₂ storage in a depleted gas reservoir”, *Chemical Geology*, 244, 103-129, (2007).
- Gurgenci H., Rudolph V., Saha T., Lu M., “Challenges for Geothermal Energy Utilisation”, *Thirty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, SGP-TR-185, (2008^a).
- Gurgenci H., Rudolph V., Saha T., Jacobs P., Dong J., Lu M., “Electricity Generation from an Engineered Geothermal System using a Supercritical CO₂ Geothermal Siphon”, *R&D: Low Emissions Energy Technologies*, Garnaut, (2008^b).
- Haaland S. E., “Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow”, *J Fluids Eng*, 105, (1983).
- Lund J. W., Lineau P. J., Lunis B. C., “Jeotermal Enerji Doğrudan Kullanım ve Tasarım El Kitabı”, *Makina Mühendisleri Odası*, 7-26, Ankara, (2004).

Metz B., Davidson O., de Coninck H., Loos M., Meyer L., “IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage”, **Workgroup III of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, Cambridge University, 208, (2005).

Petzet G. A., “Unreal depth at Wytch Farm”, **Oil & Gas Journal**, 96 (7): 17, (1998).

Potter R. M., Robinson E. S., Smith M. C., “Method of extracting heat from dry geothermal reservoirs”, U.S. patent no. 3.786.858, (1974).

Pruess K., Azaroual M., “On the Feasibility of Using Supercritical CO₂ as Heat Transmission Fluid in an Engineered Hot Dry Rock Geothermal System”, **Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering**, Stanford, 386-393, (2006).

Pruess K., “Enhanced geothermal systems (EGS) using CO₂ as working fluid – A novel approach for generating energy with simultaneous sequestration of carbon”, **Geothermics**, 35, 351-367, (2006).

Pruess K., Spycher N., “Enhanced Geothermal Systems (EGS) with CO₂ as Heat Transmission Fluid - A Scheme for Combining Recovery of Renewable Energy with Geologic Storage of CO₂”, **World Geothermal Congress**, Bali, (2010).

Pruess K., “On CO₂ fluid flow and heat transfer behavior in the subsurface, following leakage from a geologic storage reservoir”, **Environ. Geol.**, (54), 1677-1686, (2008).

Regnault O., Lagneau V., Catalette H., Schneider H., “Experimental study of pure mineral phases/supercritical CO₂ reactivity. Implications for geological CO₂ sequestration”, **C. R. Geoscience**, 337, 1331-1339, (2005).

Remoroza A. I., Moghtaderi B., Doroodchi E., “Coupled Wellbore and 3D Reservoir Simulation of a CO₂ EGS”, **Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering**, Stanford, SGP-TR-191, (2011).

Smith M. C., “The furnace in the basement, The early days of the hot dry rock geothermal energy program, 1970-1973”, **Los Alamos National Laboratory report**, Los Alamos, Part 1, (1995).

Uysal B. Z., “Akışkanlar Mekaniği”, **Alp Yayınevi**, 2. baskı, 273-287, (2006).

U.S. Energy Information Administration, “International Energy Outlook 2011”, **IEO Report, Washington**, 4, 11, 91, (2011).

U.S. Energy Information Administration, “International Energy Outlook 2010”, **IEO Report, Washington**, 4, 7-9, 123, (2010).

U.S. Energy Information Administration, “International Energy Outlook 2009”, **IEO Report, Washington**, 109-112, (2009).

U.S. Department of Energy, “Energy Security-A Report to the President of the United States”, **U.S. Government Printing Office**, 240, (1987).

U.S. Department of Energy, “A History of Geothermal Energy Research and Development in the United States: Reservoir Engineering 1976 - 2006”, **DOE, Washington**, 124-125, (2010^a).

U.S. Department of Energy, “A History of Geothermal Energy Research and Development in the United States: Energy Conversation 1976 - 2006”, **DOE, Washington**, 1-3, (2010^b).

White D. E., “Geothermal Energy”, **U.S. Geological Survey circular**, (519): 17, (1965).

White D. E., Williams D. L., “Assessment of Geothermal Resources of the United States – 1975”, **U.S. Geological Survey Circular**, (726): 155, (1975).

White F. M., “Fluid Mechanics”, **McGraw-Hill**, Boston, 864, (2008).

Williams D. L., Von Herzen R. P., “Heat Loss from the Earth; New Estimate”, **Geology**, V (2): 327-328, (1974).

Yalçinkaya R., Bıyıkoglu A. “Thermodynamic Analysis of a Power Cycle using Supercritical Carbon-Dioxide under Thermo-siphon Effect,” **X. International HVAC+R Technology Symposium & Fair, The Turkish Society of HVAC and Sanitary Engineers**, İstanbul, 526-535, (2012^a).

Yalçinkaya R., Bıyıkoglu A., “Kritik-üstü Karbon-dioksitin Jeotermal Güç Çevriminde Kullanımı Üzerine”, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, Ankara, (2012^b).

Zhang X. R., Yamaguchi H., Uneno D., Fujima K., Enomoto M., Sawada N., “Analysis of a Novel Solar Energy-powered Rankine Cycle for Combined Power and Heat Generation Using Supercritical Carbon-dioxide”, **Renewable Energy**, 31, 1839-1854, (2006).

EKLER

EK-1 Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri

Ek Çizelge 1.1. 1 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	21486	48,39	-212,5	-1,491	0,001235	809,8
3	Kritik- üstü gaz	20944	200	88,03	-0,7063	0,003679	271,8
4	Kritik- üstü gaz	16054	173,4	68,39	-0,7063	0,00441	226,7
5	Kritik- üstü gaz	6434	88,86	10,91	-0,7063	0,008736	114,5

Ek Çizelge 1.2. 2 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	29562	56,87	-202,8	-1,491	0,001192	839,4
3	Kritik- üstü gaz	29034	200	65,68	-0,8065	0,002647	377,8
4	Kritik- üstü gaz	19126	160,1	36,22	-0,8065	0,003398	294,3
5	Kritik- üstü gaz	6434	62,92	-24,01	-0,8065	0,00743	134,6

EK-1 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri

Ek Çizelge 1.3. 3 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37363	200	48,9	-0,8834	0,002122	471,2
4	Kritik- üstü gaz	21150	148,9	9,644	-0,8834	0,002854	350,4
5	Kritik- üstü gaz	6434	47,13	-49,22	-0,8834	0,006465	154,7

Ek Çizelge 1.4. 4 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	46464	71,11	-183,2	-1,491	0,001129	885,8
3	Kritik- üstü gaz	45910	200	37,28	-0,9434	0,001822	548,8
4	Kritik- üstü gaz	22486	139,8	-11,82	-0,9434	0,002524	396,2
5	Kritik- üstü gaz	6434	37,56	-68,14	-0,9434	0,005739	174,2

EK-1 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri

Ek Çizelge 1.5. 5 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37356	150	-33,92	-1,069	0,001721	580,9
4	Kritik- üstü gaz	17362	95,84	-73,34	-1,069	0,002353	424,7
5	Kritik- üstü gaz	6434	25,85	-106,3	-1,069	0,004328	231

Ek Çizelge 1.6. 6 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37356	250	123,7	-0,733	0,002513	397,9
4	Kritik- üstü gaz	23558	202,9	84,44	-0,733	0,003293	303,7
5	Kritik- üstü gaz	6434	81,4	1,349	-0,733	0,008383	119,3

EK-1 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri

Ek Çizelge 1.7. 7 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37497	200	48,67	-0,8845	0,002116	472,5
4	Kritik- üstü gaz	21231	149	9,41	-0,8845	0,002843	351,8
5	Kritik- üstü gaz	6434	46,93	-49,58	-0,8845	0,006452	155

Ek Çizelge 1.8. 8 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37229	200	49,12	-0,8824	0,002128	469,8
4	Kritik- üstü gaz	21070	148,8	9,837	-0,8824	0,002864	349,1
5	Kritik- üstü gaz	6434	47,31	-48,9	-0,8824	0,006478	154,4

EK-1 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri

Ek Çizelge 1.9. 9 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37095	200	49,34	-0,8813	0,002135	468,5
4	Kritik- üstü gaz	20990	148,8	10,07	-0,8813	0,002875	347,8
5	Kritik- üstü gaz	6434	47,51	-48,55	-0,8813	0,006491	154,1

Ek Çizelge 1.10. 10 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	36961	200	49,57	-0,8802	0,002141	467,1
4	Kritik- üstü gaz	20909	148,7	10,3	-0,8802	0,002886	346,4
5	Kritik- üstü gaz	6434	47,71	-48,2	-0,8802	0,006505	153,7

EK-1 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri

Ek Çizelge 1.11. 11 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	36827	200	49,8	-0,8791	0,002147	465,7
4	Kritik- üstü gaz	20829	148,6	10,53	-0,8791	0,002898	345,1
5	Kritik- üstü gaz	6434	47,91	-47,85	-0,8791	0,006518	153,4

Ek Çizelge 1.12. 12 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	36946	200	49,6	-0,8801	0,002142	466,9
4	Kritik- üstü gaz	20900	148,7	10,32	-0,8801	0,002888	346,3
5	Kritik- üstü gaz	6434	47,73	-48,17	-0,8801	0,006506	153,7

EK-1 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri

Ek Çizelge 1.13. 13 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37557	200	48,58	-0,885	0,002114	473,1
4	Kritik- üstü gaz	21267	149	9,301	-0,885	0,002838	352,4
5	Kritik- üstü gaz	6434	46,84	-49,74	-0,885	0,006446	155,1

Ek Çizelge 1.14. 14 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37662	200	48,4	-0,8858	0,002109	474,2
4	Kritik- üstü gaz	21330	149,1	9,142	-0,8858	0,00283	353,4
5	Kritik- üstü gaz	6434	46,7	-49,99	-0,8858	0,006436	155,4

EK-1 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri

Ek Çizelge 1.15. 15 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37725	200	48,3	-0,8863	0,002106	474,8
4	Kritik- üstü gaz	21368	149,1	9,038	-0,8863	0,002825	354
5	Kritik- üstü gaz	6434	46,61	-50,15	-0,8863	0,00643	155,5

Ek Çizelge 1.16. 16 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37766	200	48,23	-0,8866	0,002104	475,2
4	Kritik- üstü gaz	21393	149,1	8,982	-0,8866	0,002822	354,4
5	Kritik- üstü gaz	6434	46,56	-50,25	-0,8866	0,006426	155,6

EK-1 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri

Ek Çizelge 1.17. 17 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37847	200	48,1	-0,8873	0,002101	476,1
4	Kritik- üstü gaz	21442	149,2	8,825	-0,8873	0,002815	355,2
5	Kritik- üstü gaz	6434	46,43	-50,47	-0,8873	0,006417	155,8

Ek Çizelge 1.18. 18 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37900	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	32546	200	57,86	-0,8416	0,002385	419,4
4	Kritik- üstü gaz	18335	146,6	18,6	-0,8416	0,003313	301,8
5	Kritik- üstü gaz	6434	55,24	-35,67	-0,8416	0,006986	143,2

EK-1 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri

Ek Çizelge 1.19. 19 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	5729	20	-250,9	-1,551	0,001293	773,6
2	Kritik- üstü gaz	39022	54,51	-211,7	-1,551	0,001107	903,8
3	Kritik- üstü gaz	38476	200	47,09	-0,8922	0,002073	482,3
4	Kritik- üstü gaz	21824	149,5	7,821	-0,8922	0,002767	361,4
5	Kritik- üstü gaz	5729	36,52	-56,72	-0,8922	0,006951	143,9

Ek Çizelge 1.20. 20 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	7214	30	-204	-1,401	0,00166	602,4
2	Kritik- üstü gaz	35590	78,54	-164,7	-1,401	0,001252	798,7
3	Kritik- üstü gaz	35059	200	52,94	-0,8643	0,002236	447,2
4	Kritik- üstü gaz	19784	147,7	13,66	-0,8643	0,003055	327,4
5	Kritik- üstü gaz	7214	59,94	-38,07	-0,8643	0,006142	162,8

EK-1 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin termodinamik özellikleri

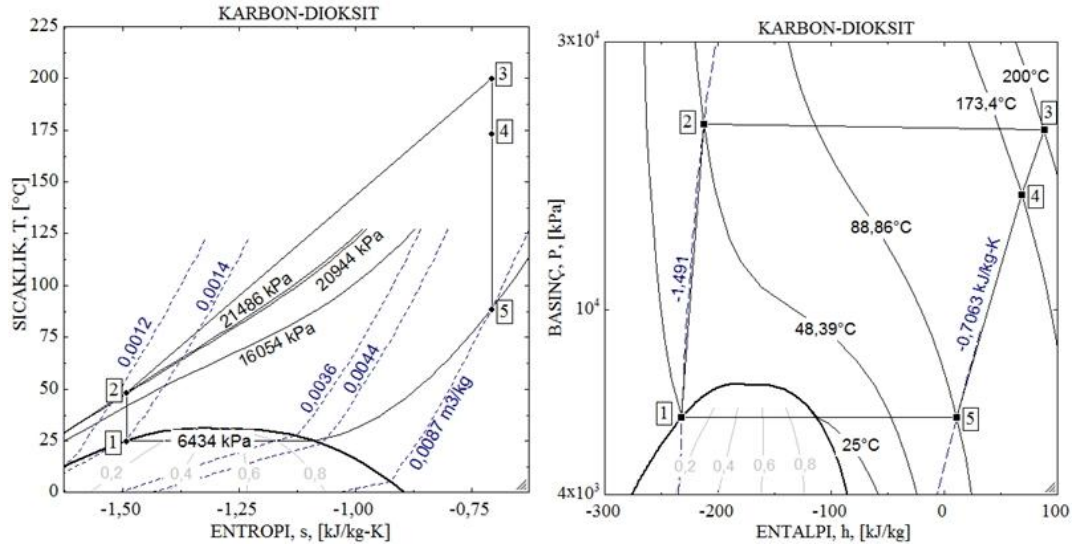
Ek Çizelge 1.21. 21 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37895	64,34	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37573	200	48,55	-0,8851	0,002113	473,3
4	Kritik- üstü gaz	21269	149	9,265	-0,8851	0,002837	352,4
5	Kritik- üstü gaz	6434	46,83	-49,77	-0,8851	0,006445	155,2

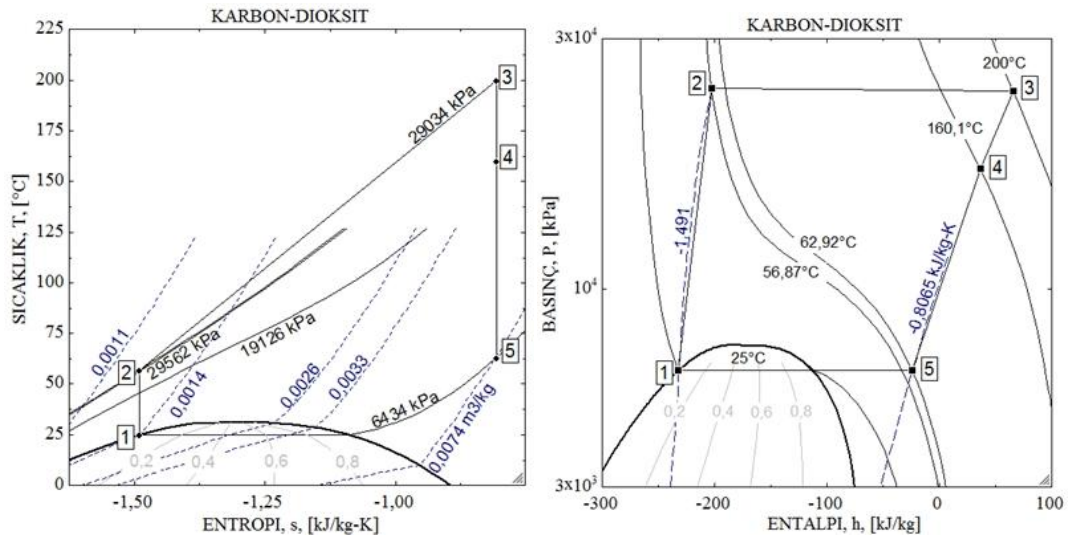
Ek Çizelge 1.22. 22 Numaralı rezervuar koşullarına göre karbon-dioksitin çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Faz	Basınç [kPa]	Sıcaklık [°C]	Entalpi [kJkg ⁻¹]	Entropi [kJ(kgK) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ kg ⁻¹]	Yoğunluk [kgm ⁻³]
1	Doymuş sıvı	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	Kritik- üstü gaz	37902	64,35	-193	-1,491	0,001157	864,2
3	Kritik- üstü gaz	37150	200	49,25	-0,8817	0,002132	469
4	Kritik- üstü gaz	21025	148,8	10	-0,8817	0,002871	348,3
5	Kritik- üstü gaz	6434	47,44	-48,68	-0,8817	0,006486	154,2

EK-2 Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

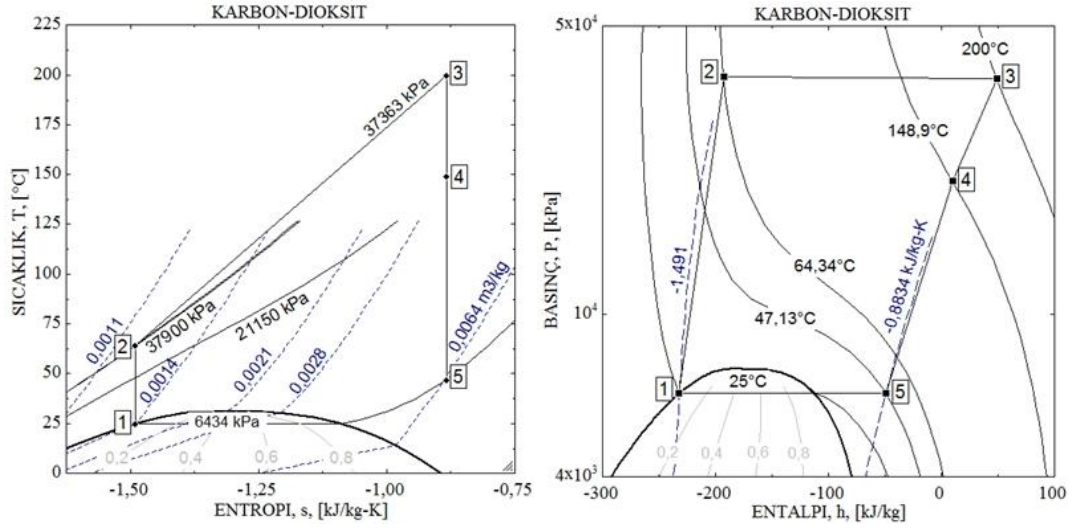


Ek Şekil 2.1. 1 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

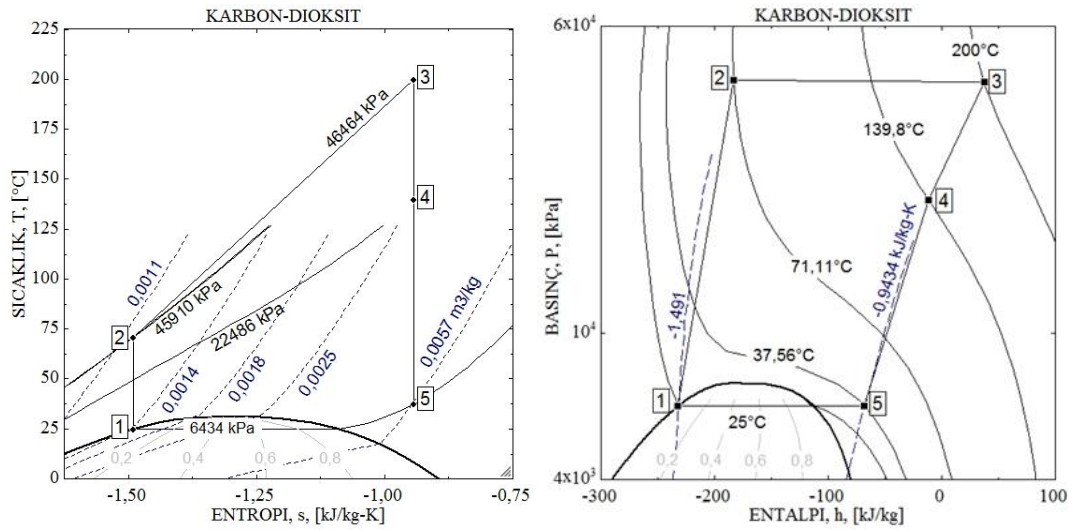


Ek Şekil 2.2. 2 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

EK-2 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

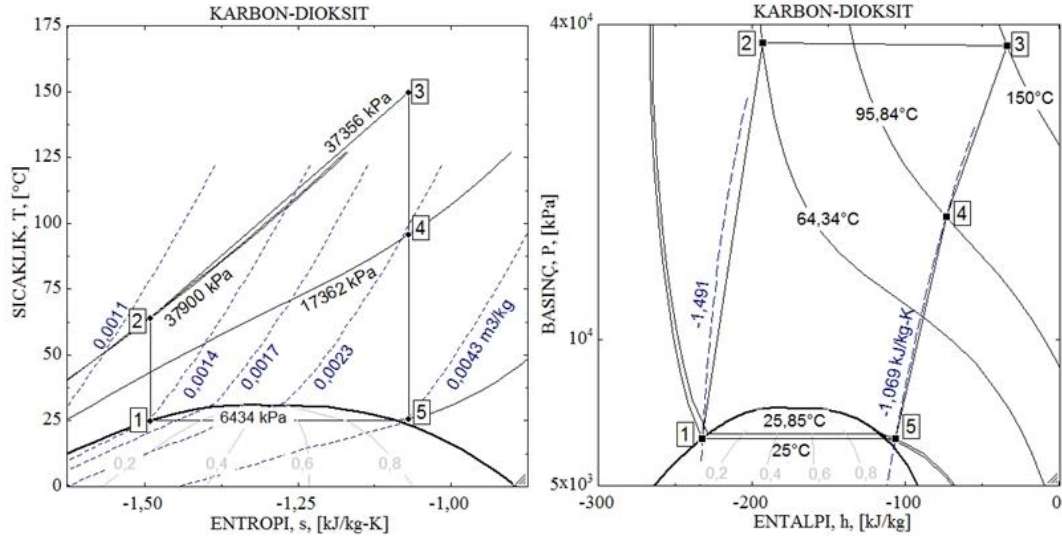


Ek Şekil 2.3. 3 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

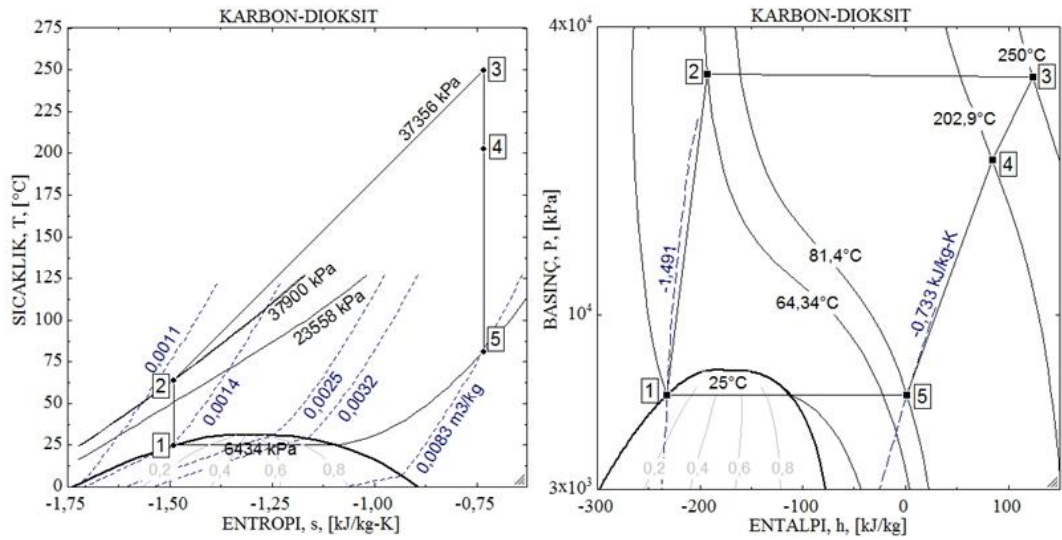


Ek Şekil 2.4. 4 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

EK-2 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

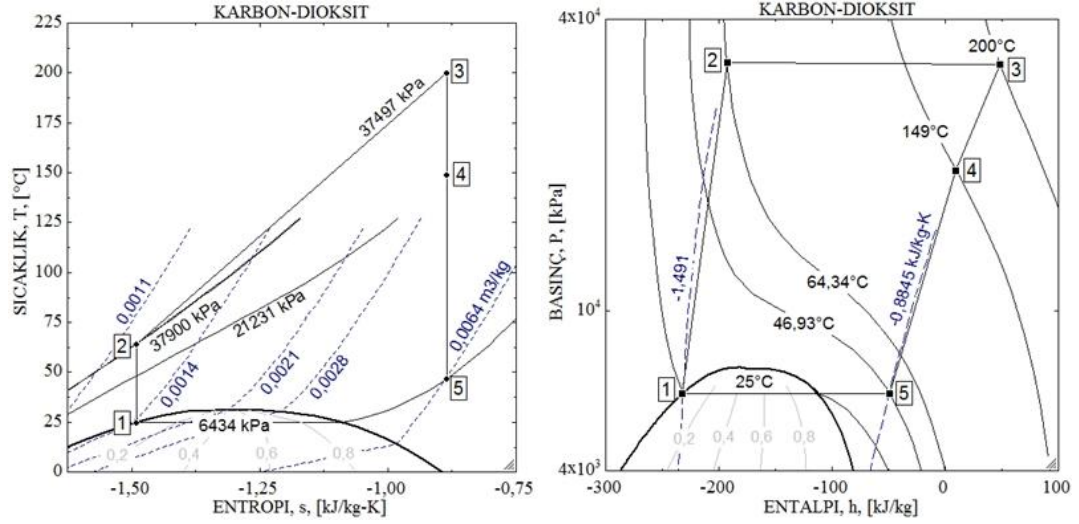


Ek Şekil 2.5. 5 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

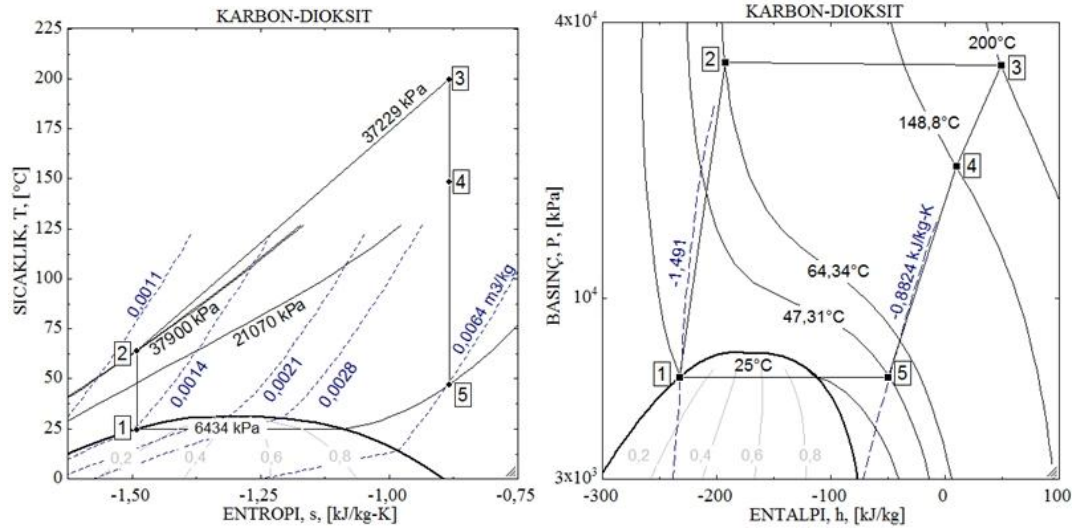


Ek Şekil 2.6. 6 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

EK-2 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

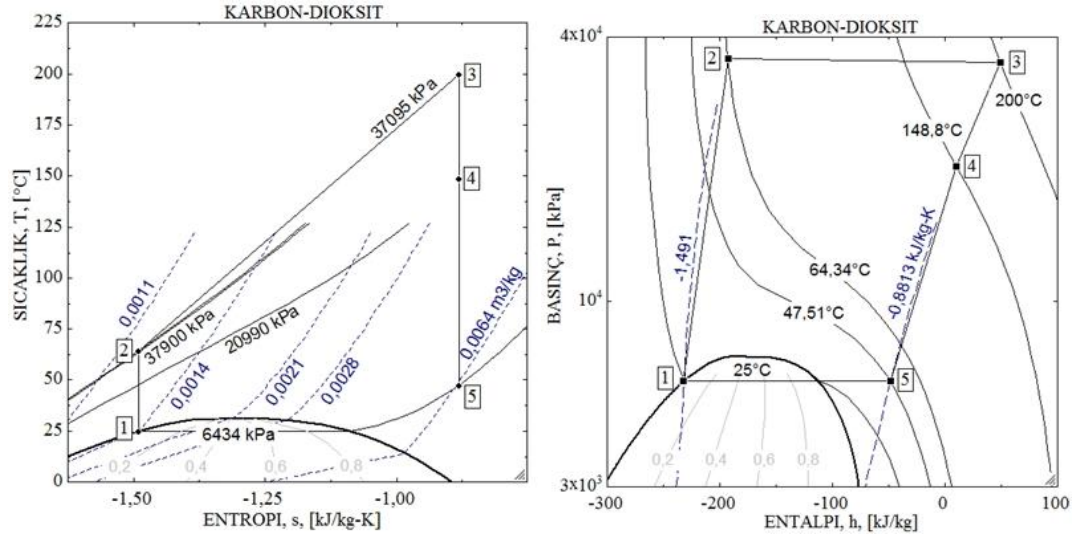


Ek Şekil 2.7. 7 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

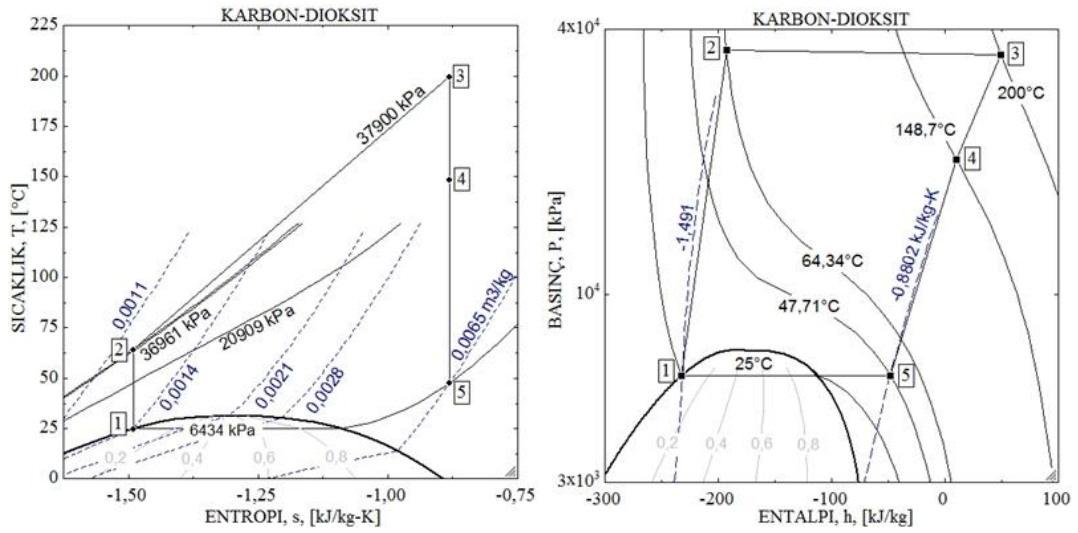


Ek Şekil 2.8. 8 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

EK-2 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

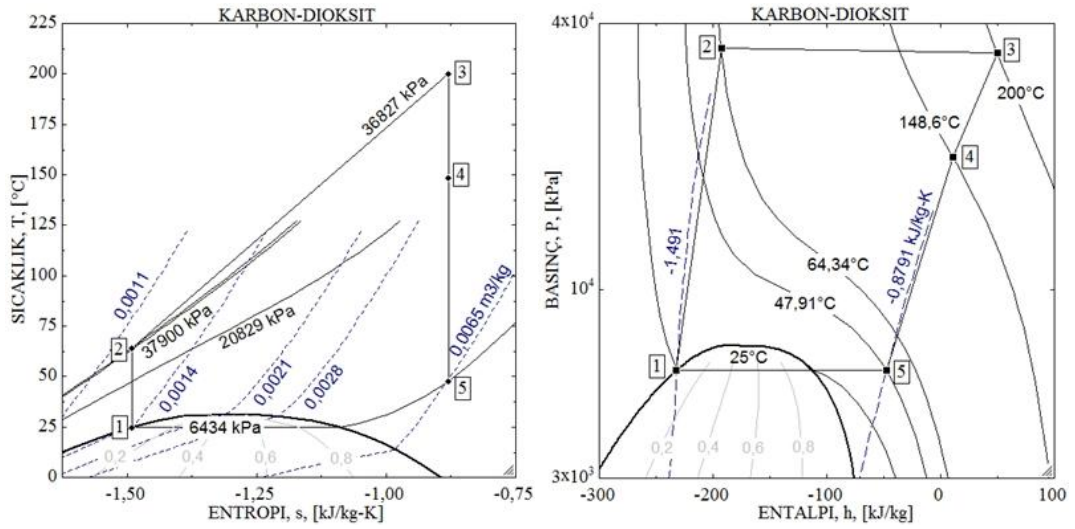


Ek Şekil 2.9. 9 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

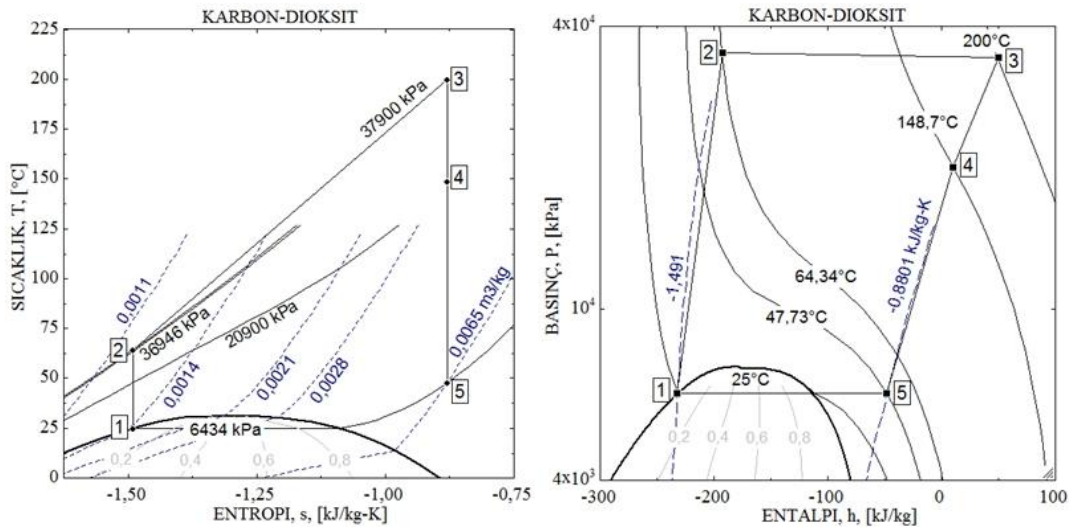


Ek Şekil 2.10. 10 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

EK-2 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

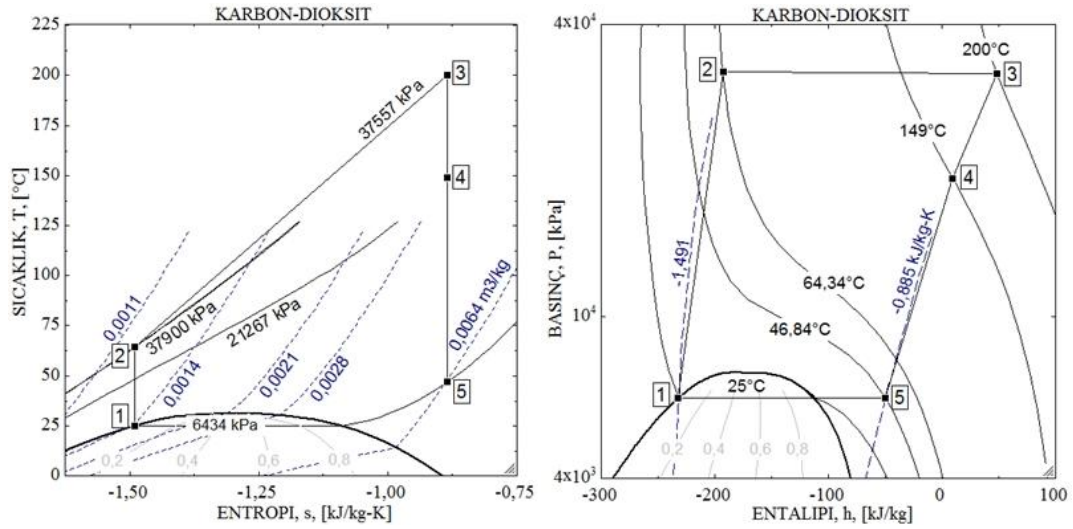


Ek Şekil 2.11. 11 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

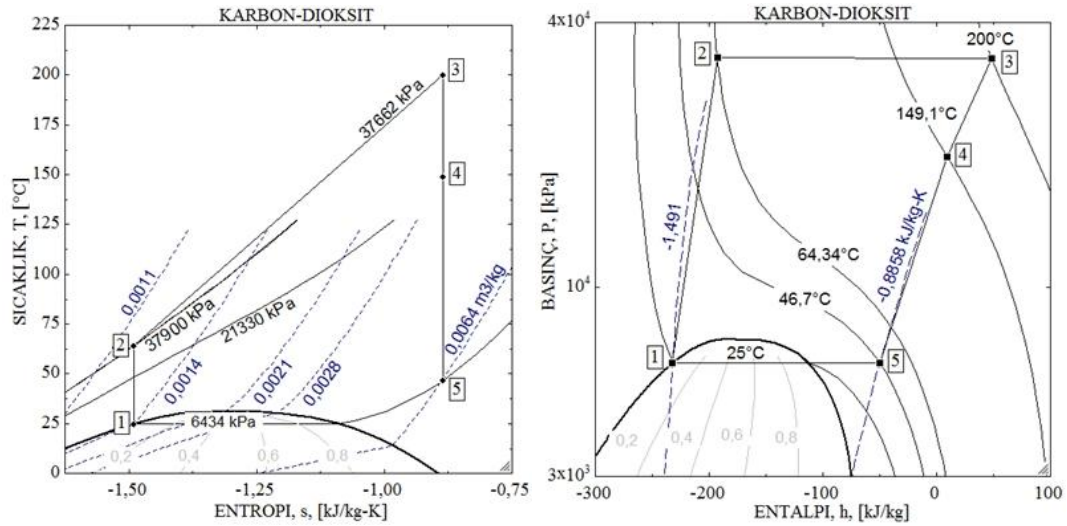


Ek Şekil 2.12. 12 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

EK-2 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

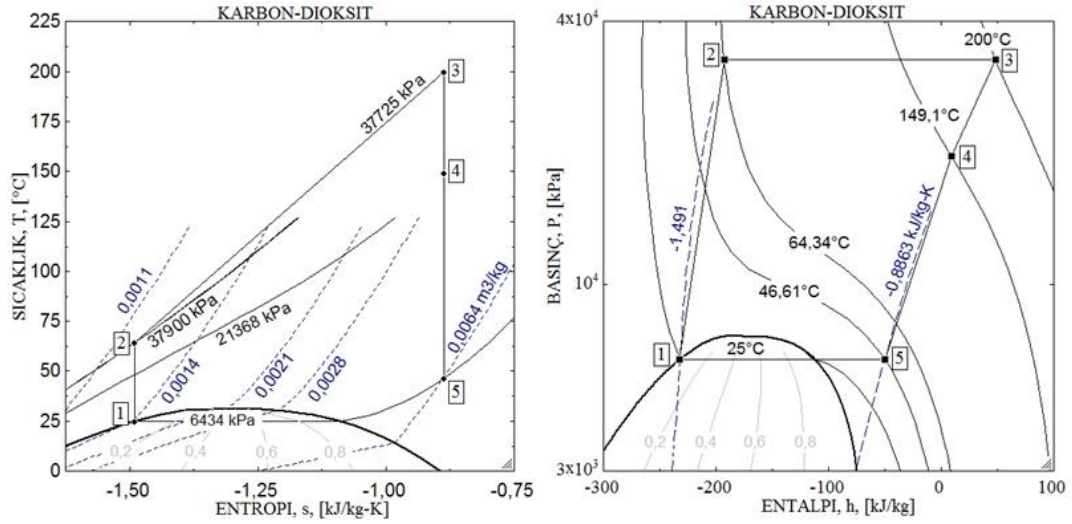


Ek Şekil 2.13. 13 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

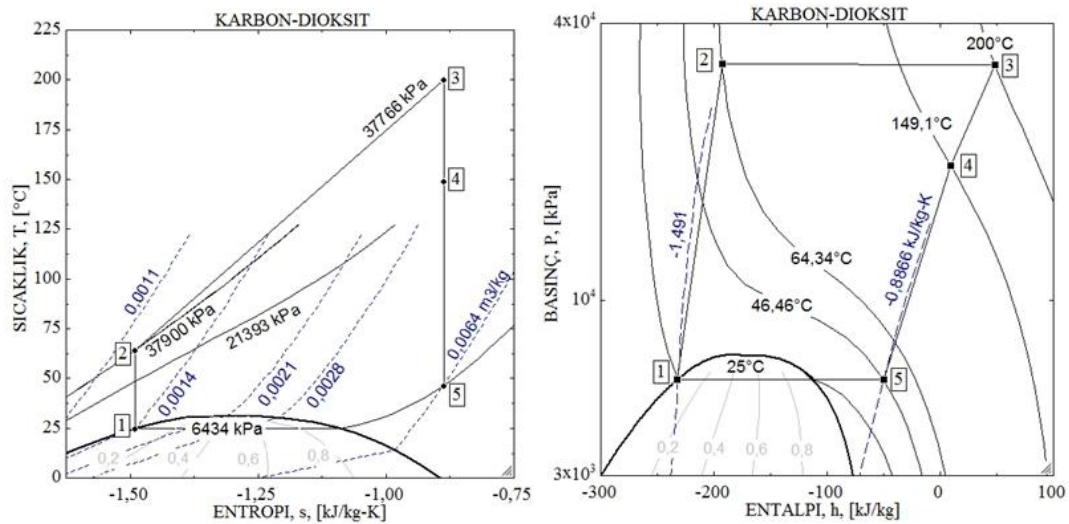


Ek Şekil 2.14. 14 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

EK-2 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

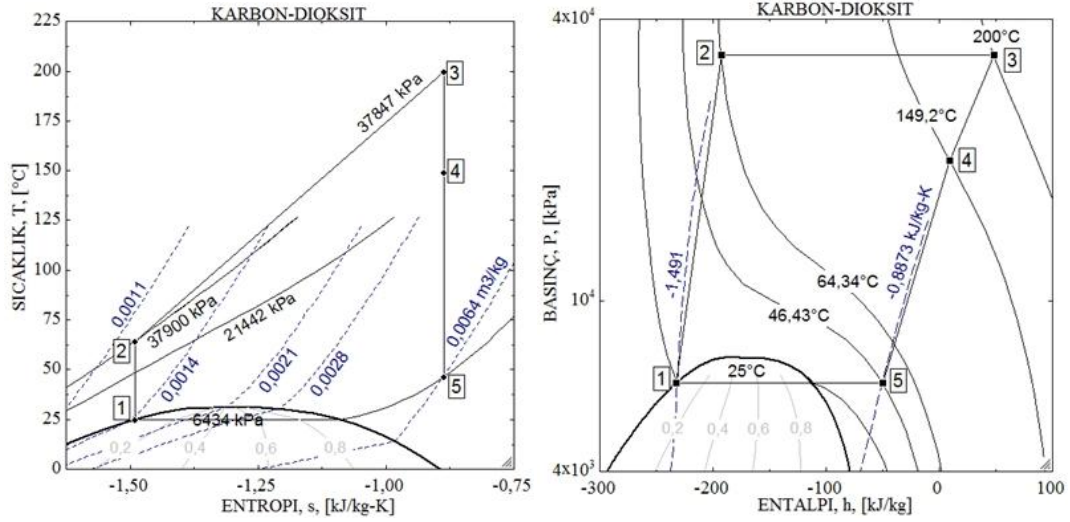


Ek Şekil 2.15. 15 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

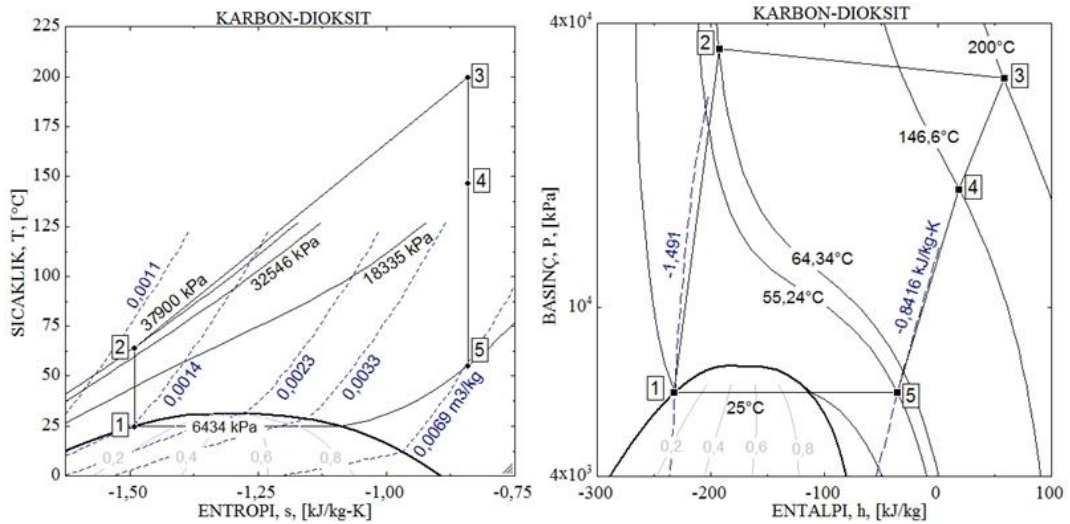


Ek Şekil 2.16. 16 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

EK-2 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

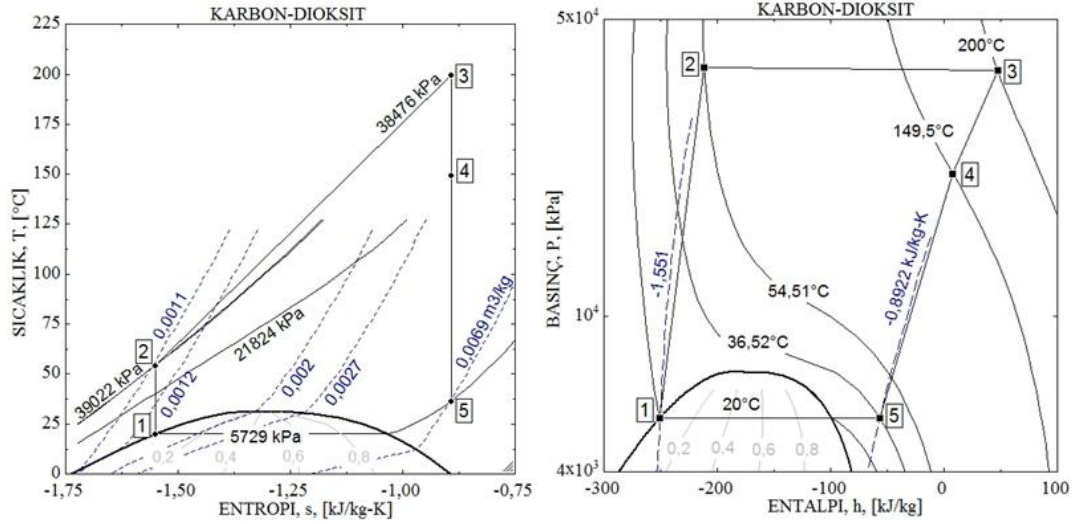


Ek Şekil 2.17. 17 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

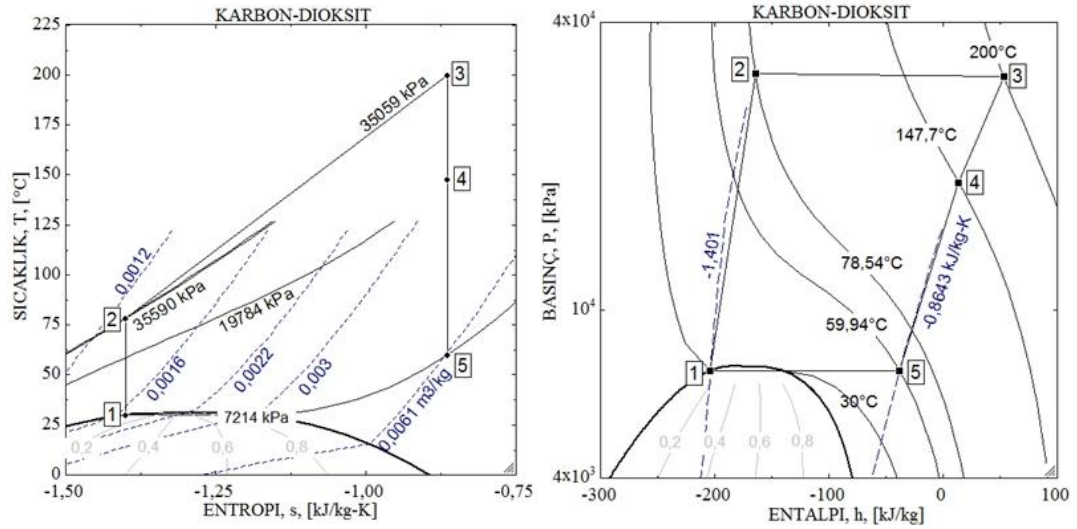


Ek Şekil 2.18. 18 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

EK-2 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

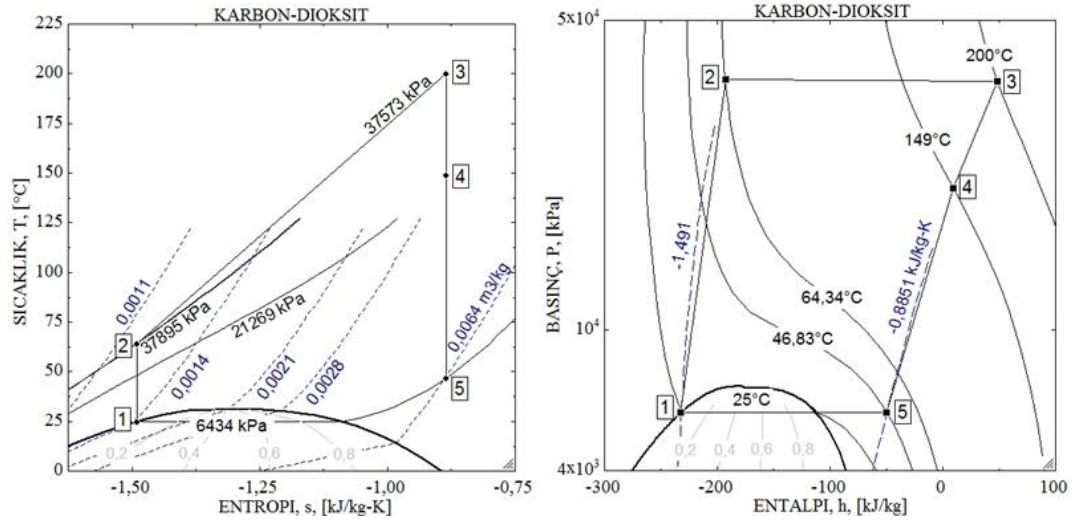


Ek Şekil 2.19. 19 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

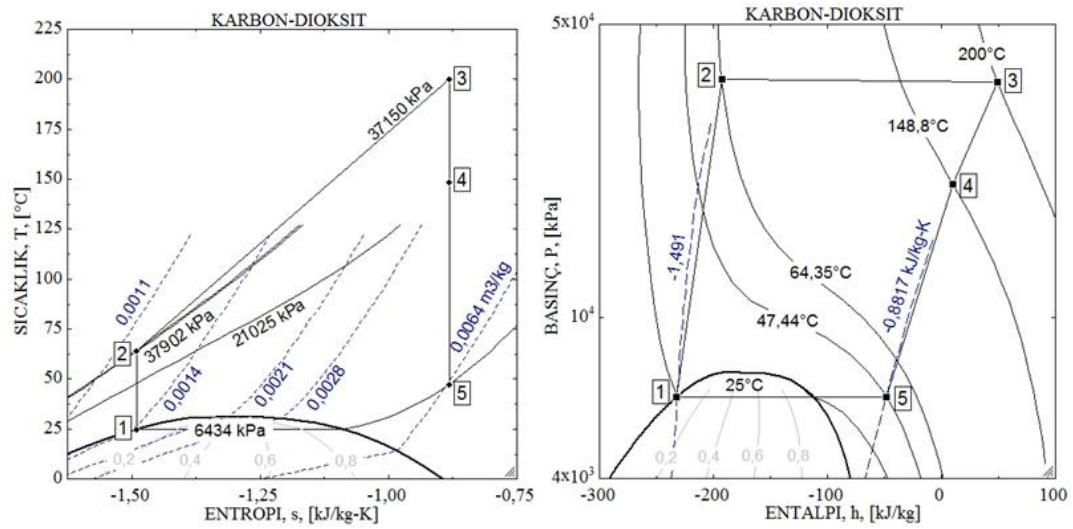


Ek Şekil 2.20. 20 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

EK-2 (Devam) Farklı rezervuar koşulları için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

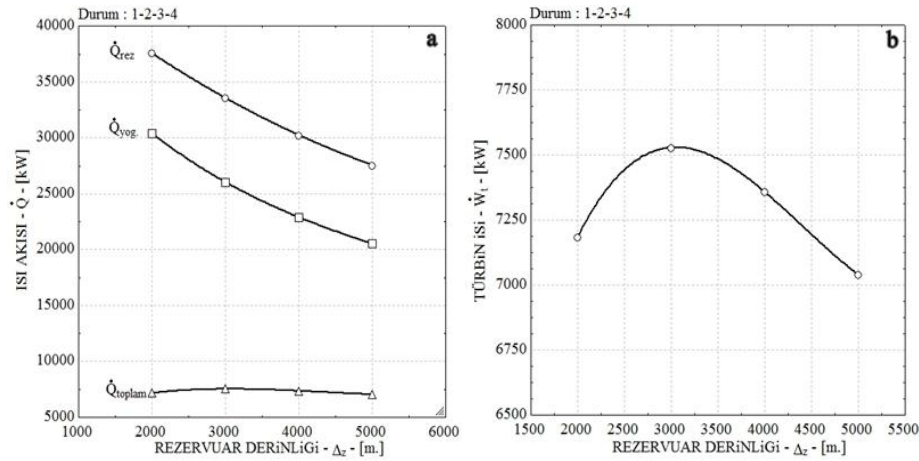


Ek Şekil 2.21. 21 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksidin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

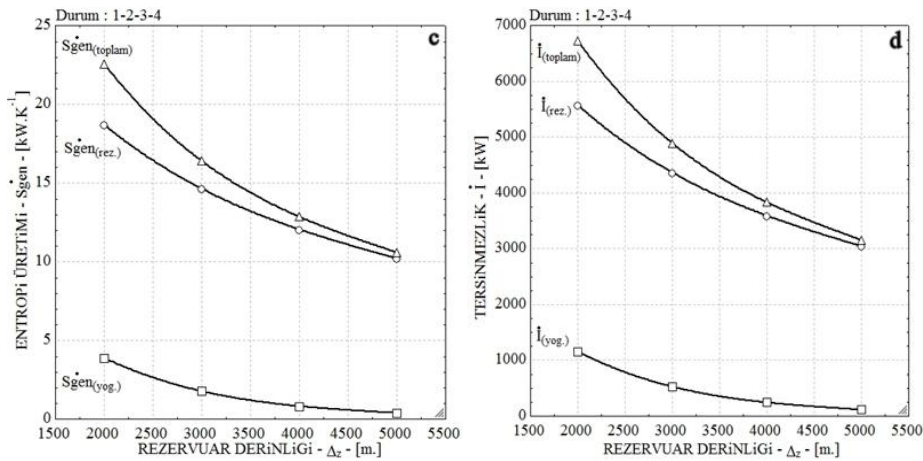


Ek Şekil 2.22. 22 Numaralı rezervuar koşullarına göre iş akışkanı olarak karbon-dioksidin kullanıldığı jeotermal enerji kaynaklı güç çevriminin T-s ve P-h diyagramı

EK-3 Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar

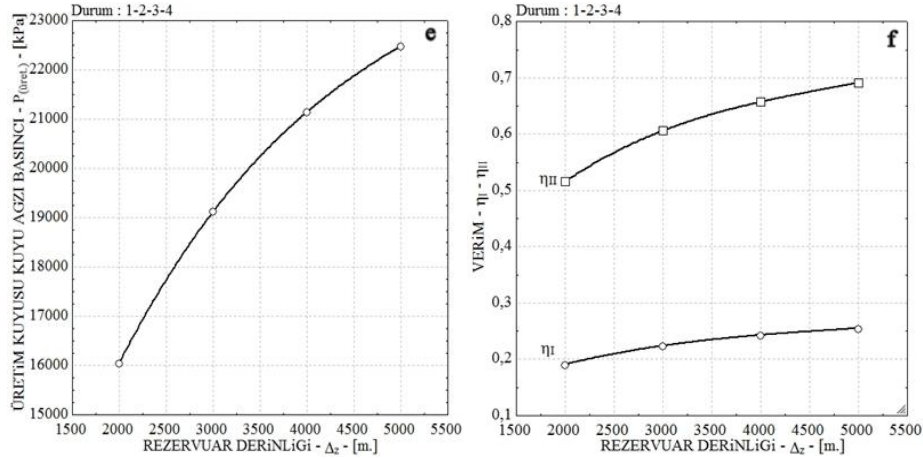


Ek Şekil 3.1a. Rezervuar durumu 1-2-3-4 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar derinliklerine göre değişen termodinamik özellikleri, a. Farklı rezervuar derinliklerinde yoğusturucu ve rezervuarda meydana gelen ısı akısı miktarı, b. Farklı rezervuar derinliklerinde türbinden elde edilen işin değişim miktarı

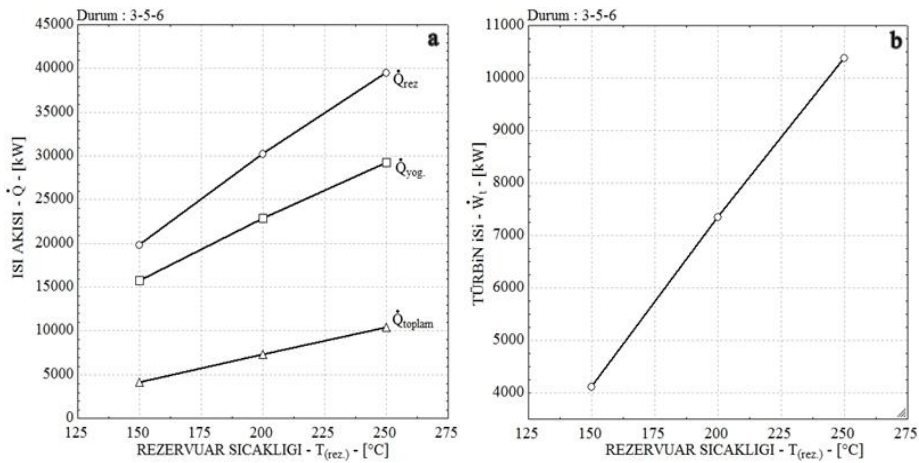


Ek Şekil 3.1b. Rezervuar durumu 1-2-3-4 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar derinliklerine göre değişen termodinamik özellikleri, c. Farklı rezervuar derinliklerinde yoğusturucuda ve rezervuarda meydana gelen entropi üretimi miktarı, d. Farklı rezervuar derinliklerinde yoğusturucuda ve rezervuarda meydana gelen tersinmezlik miktarı

EK-3 (Devam) Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar

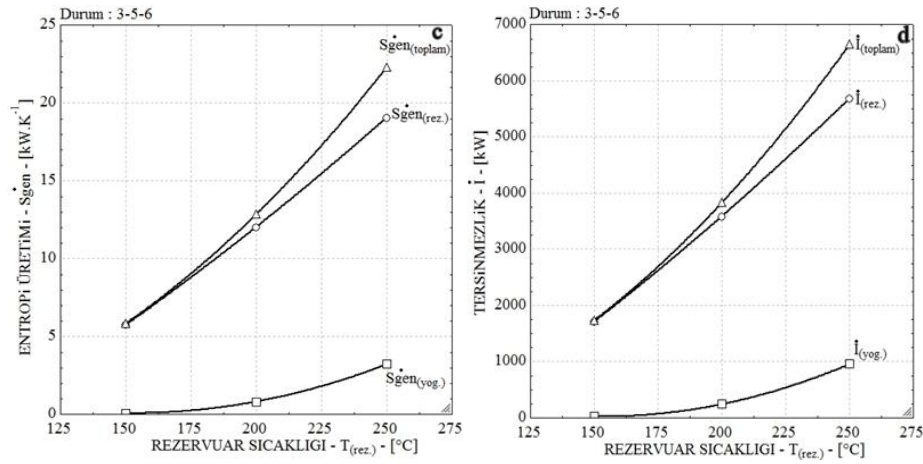


Ek Şekil 3.1c. Rezervuar durumu 1-2-3-4 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar derinliklerine göre değişen termodinamik özellikleri, e. Farklı rezervuar derinliklerinde üretim kuyusu, kuyu ağzından elde edilen basıncın değişim miktarı, f. Farklı rezervuar derinliklerinde çevrimin birinci ve ikinci kanun veriminde meydana gelen değişim miktarı

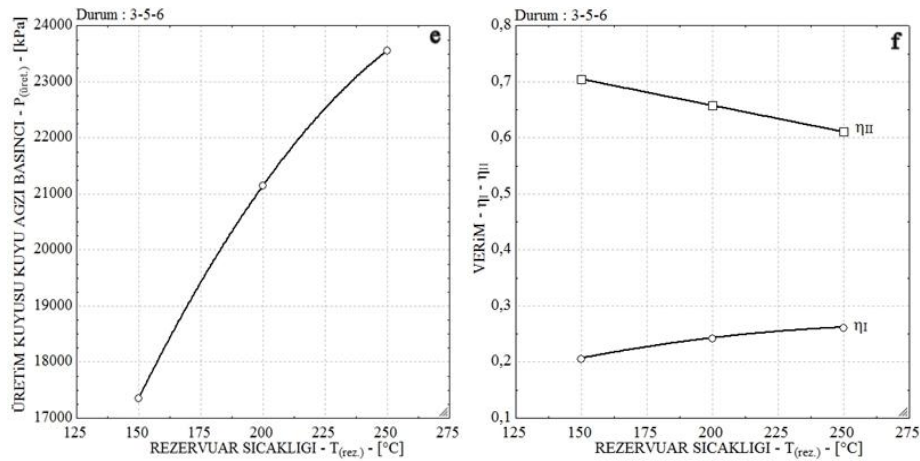


Ek Şekil 3.2a. Rezervuar durumu 3-5-6 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar sıcaklıklarına göre değişen termodinamik özellikleri, a. Farklı rezervuar sıcaklıklarında yoğunlaştırıcı ve rezervuarda meydana gelen ısı akısı miktarı, b. Farklı rezervuar sıcaklıklarında türbinden elde edilen işin değişim miktarı

EK-3 (Devam) Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar

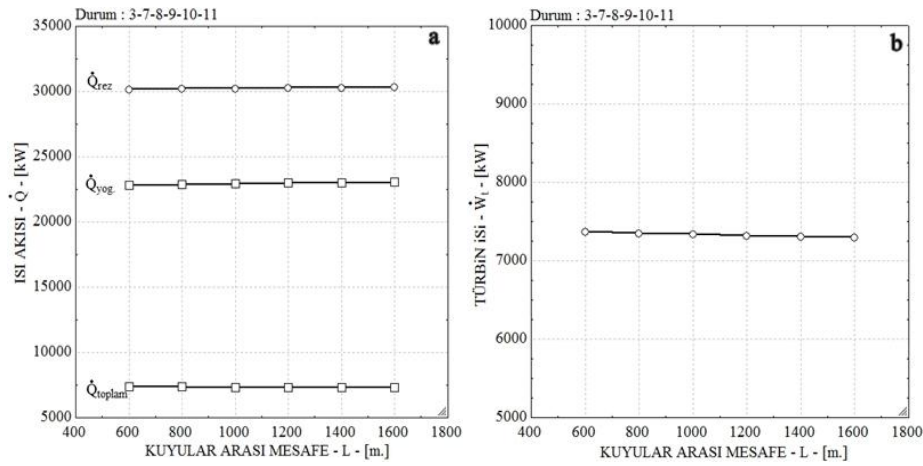


Ek Şekil 3.2b. Rezervuar durumu 3-5-6 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar sıcaklıklarına göre değişen termodinamik özellikleri, c. Farklı rezervuar sıcaklıklarında yoğusturucuda ve rezervuarda meydana gelen entropi üretimi miktarı, d. Farklı rezervuar sıcaklıklarında yoğusturucuda ve rezervuarda meydana gelen tersinmezlik miktarı

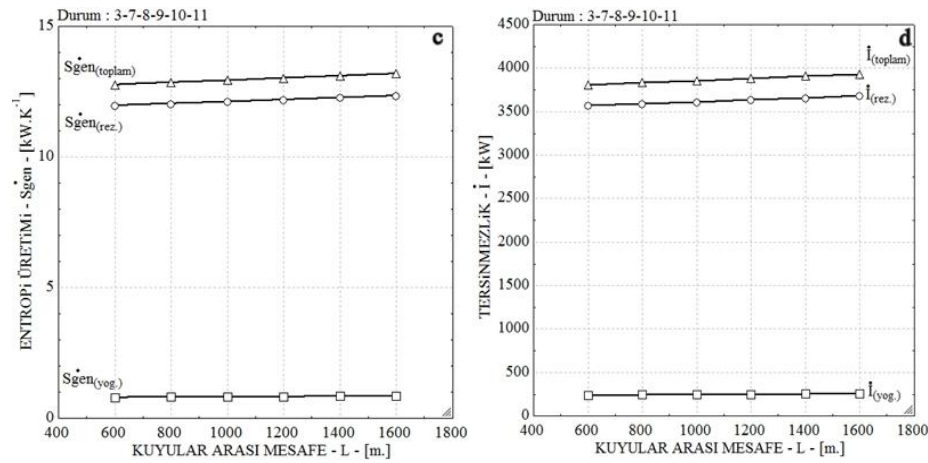


Ek Şekil 3.2c. Rezervuar durumu 3-5-6 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar sıcaklıklarına göre değişen termodinamik özellikleri, e. Farklı rezervuar sıcaklıklarında üretim kuyusu, kuyu ağzından elde edilen basıncın değişim miktarı, f. Farklı rezervuar sıcaklıklarında çevrimin birinci ve ikinci kanun veriminde meydana gelen değişim miktarı

EK-3 (Devam) Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar

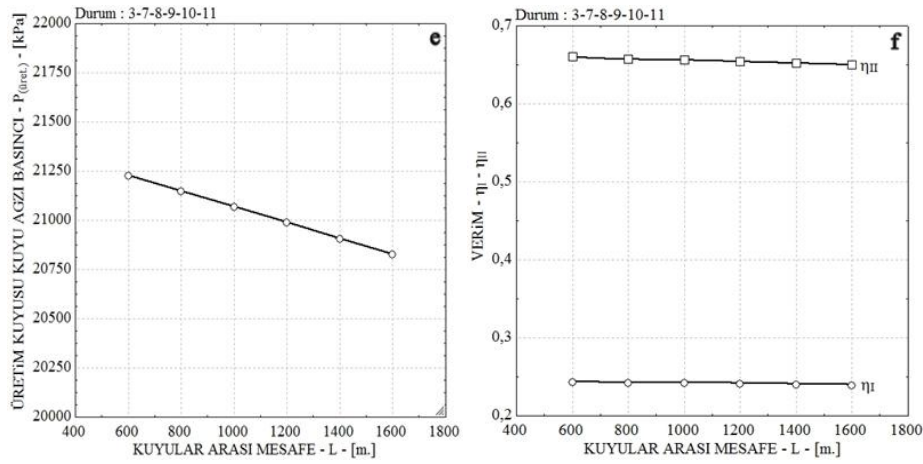


Ek Şekil 3.3a. Rezervuar durumu 3-7-8-9-10-11 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kuyular arası mesafelerine göre değişen termodinamik özellikleri, a. Kuyular arası mesafenin değişmesi ile yoğusturucu ve rezervuarda meydana gelen ısı akısı miktarı, b. Kuyular arası mesafenin değişmesi ile türbinden elde edilen işin miktarı

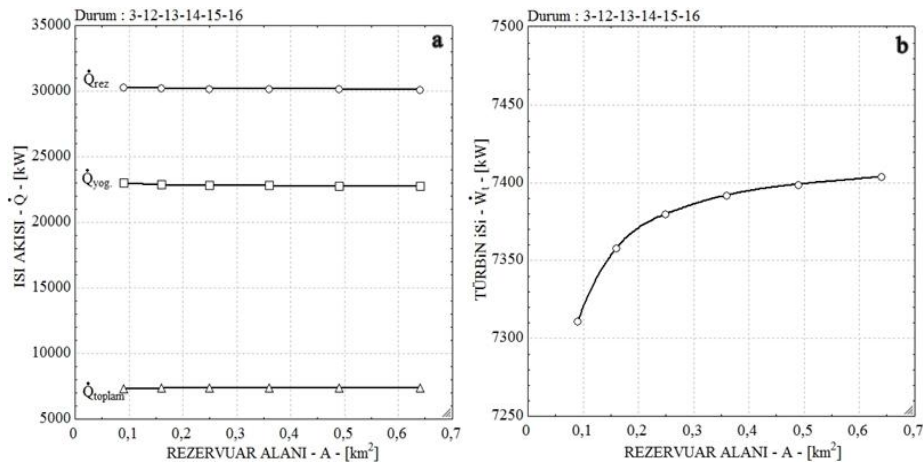


Ek Şekil 3.3b. Rezervuar durumu 3-7-8-9-10-11 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kuyular arası mesafelerine göre değişen termodinamik özellikleri, c. Kuyular arası mesafenin değişmesi ile yoğusturucuda ve rezervuarda meydana gelen entropi üretimi miktarı, d. Kuyular arası mesafenin değişmesi ile yoğusturucuda ve rezervuarda meydana gelen tersinmezlik miktarı

EK-3 (Devam) Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar

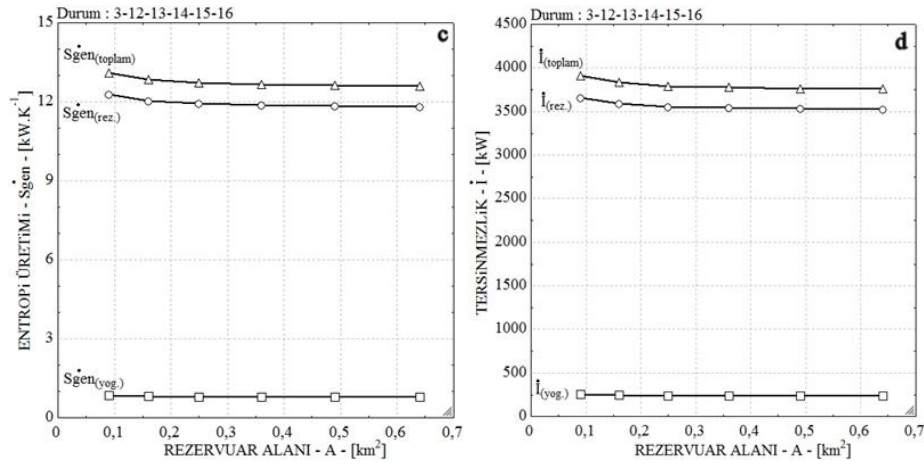


Ek Şekil 3.3c. Rezervuar durumu 3-7-8-9-10-11 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kuyular arası mesafelerine göre değişen termodinamik özellikleri, e. Kuyular arası mesafenin değişmesi ile üretim kuyusu, kuyu ağzından elde edilen basıncın değişim miktarı, f. Kuyular arası mesafenin değişmesi ile çevrimin birinci ve ikinci kanun veriminde meydana gelen değişim miktarı

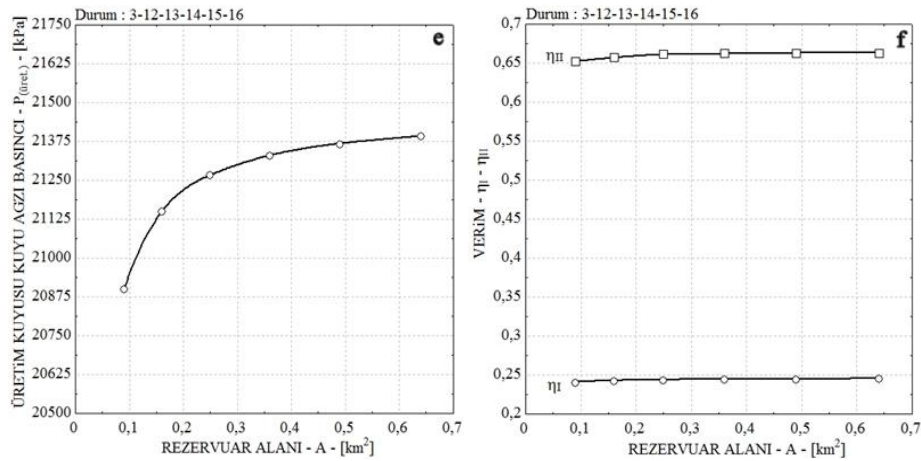


Ek Şekil 3.4a. Rezervuar durumu 3-12-13-14-15-16 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar alanlarına göre değişen termodinamik özellikleri, a. Farklı rezervuar alanlarında yoğunlaştırıcı ve rezervuarda meydana gelen ısı akısı miktarı, b. Farklı rezervuar alanlarında türbinden elde edilen işin değişim miktarı

EK-3 (Devam) Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar

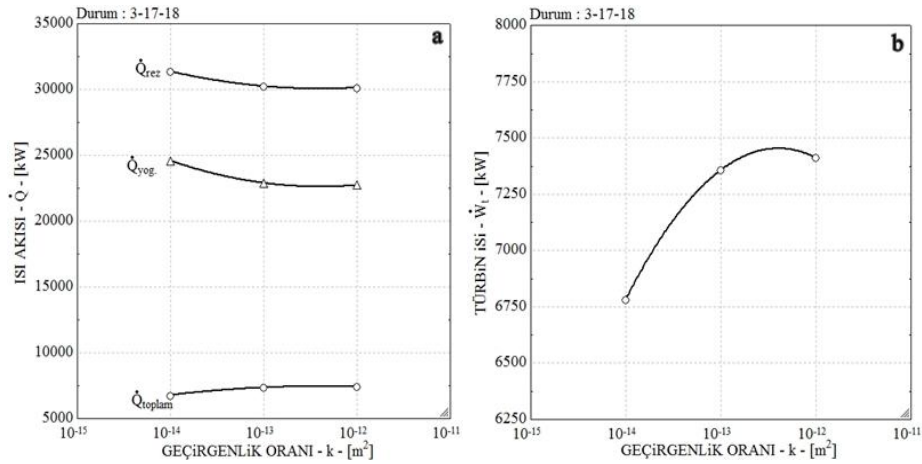


Ek Şekil 3.4b. Rezervuar durumu 3-12-13-14-15-16 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar alanlarına göre değişen termodinamik özellikleri, c. Farklı rezervuar alanlarında yoğuşturucuda ve rezervuarda meydana gelen entropi üretimi miktarı, d. Farklı rezervuar alanlarında yoğuşturucuda ve rezervuarda meydana gelen tersinmezlik miktarı

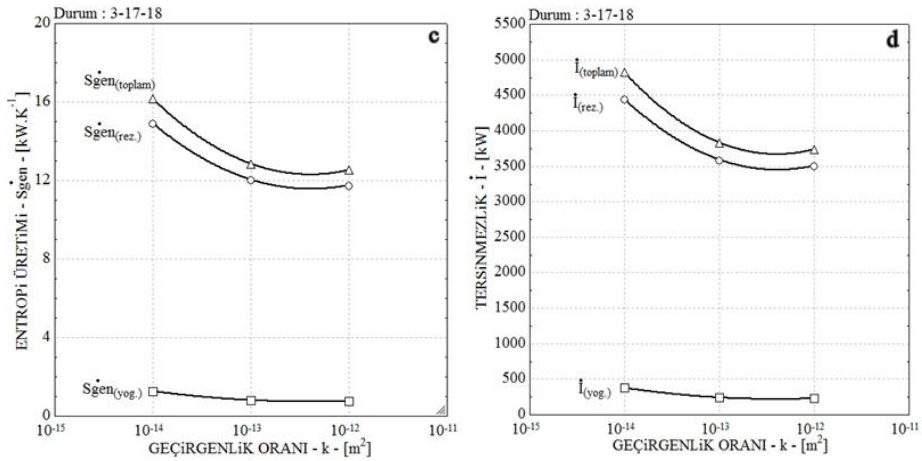


Ek Şekil 3.4c. Rezervuar durumu 3-12-13-14-15-16 için hesaplanan çevrimlerin, farklı rezervuar alanlarına göre değişen termodinamik özellikleri, e. Farklı rezervuar alanlarında üretim kuyusu, kuyu ağzından elde edilen basıncın değişim miktarı, f. Farklı rezervuar alanlarında çevrimin birinci ve ikinci kanun veriminde meydana gelen değişim miktarı

EK-3 (Devam) Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar

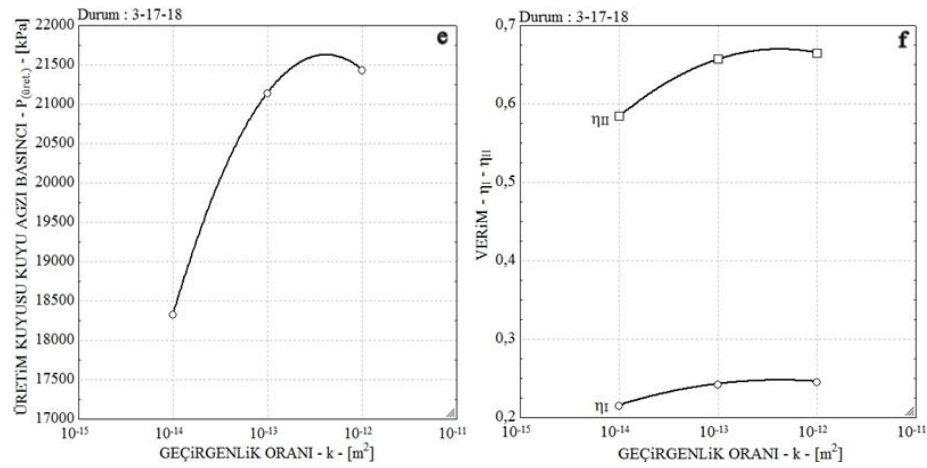


Ek Şekil 3.5a. Rezervuar durumu 3-17-18 için hesaplanan çevrimlerin, farklı geçirgenlik oranlarına göre değişen termodinamik özellikleri, a. Farklı geçirgenlik oranlarında yoğunlaştırıcı ve rezervuarda meydana gelen ısı akışı miktarı, b. Farklı geçirgenlik oranlarında türbinden elde edilen işin değişim miktarı

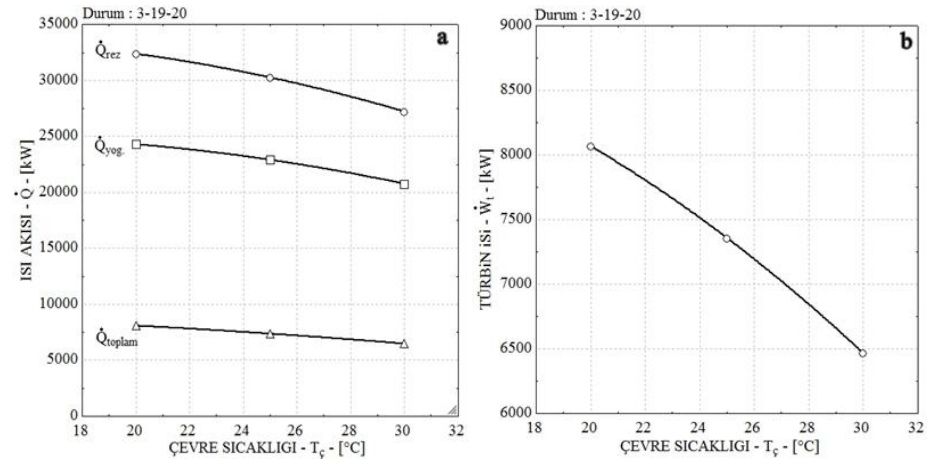


Ek Şekil 3.5b. Rezervuar durumu 3-17-18 için hesaplanan çevrimlerin, farklı geçirgenlik oranlarına göre değişen termodinamik özellikleri, c. Farklı geçirgenlik oranlarında yoğunlaştırıcı ve rezervuarda meydana gelen entropi üretimi miktarı, d. Farklı geçirgenlik oranlarında yoğunlaştırıcı ve rezervuarda meydana gelen tersinmezlik miktarı

EK-3 (Devam) Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar

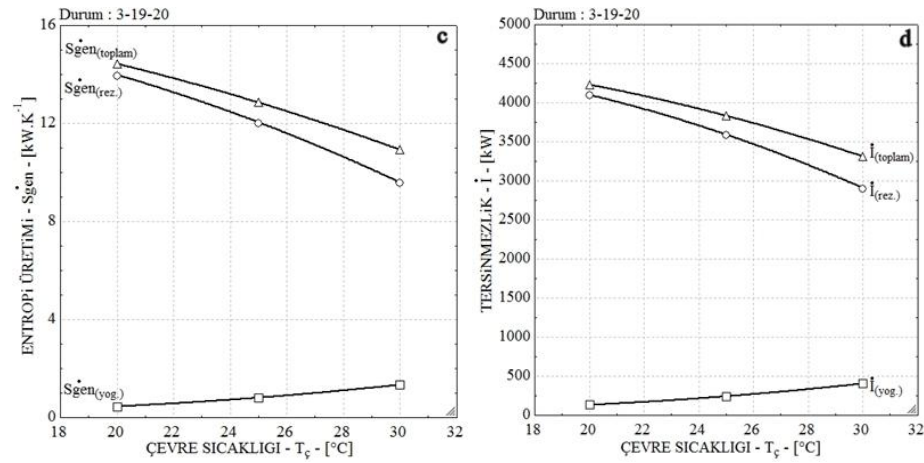


Ek Şekil 3.5c. Rezervuar durumu 3-17-18 için hesaplanan çevrimlerin, farklı geçirgenlik oranlarına göre değişen termodinamik özellikleri, e. Farklı geçirgenlik oranlarında üretim kuyusu, kuyu ağzından elde edilen basıncın değişim miktarı, f. Farklı geçirgenlik oranlarında çevrimin birinci ve ikinci kanun veriminde meydana gelen değişim miktarı

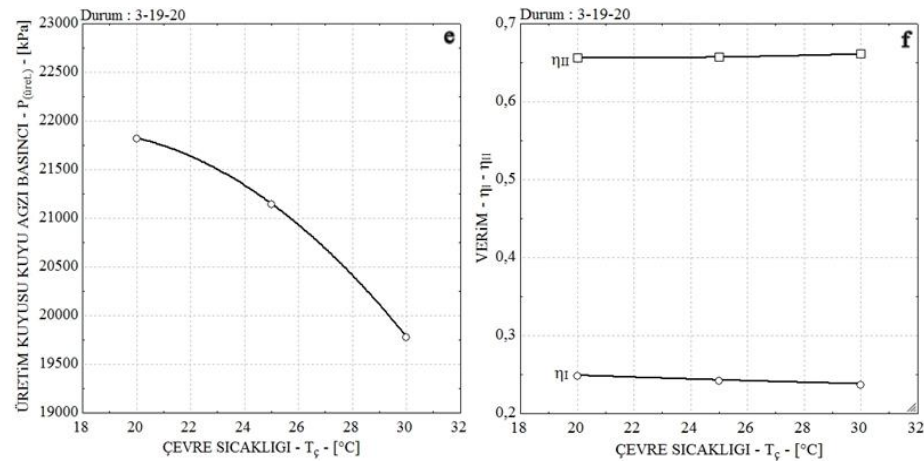


Ek Şekil 3.6a. Rezervuar durumu 3-12-13-14-15-16 için hesaplanan çevrimlerin, farklı çevre sıcaklıklarına göre değişen termodinamik özellikleri, a. Farklı çevre sıcaklıklarında yoğunlaştırucu ve rezervuarda meydana gelen ısı akısı miktarı, b. Farklı çevre sıcaklıklarında türbinden elde edilen işin değişim miktarı

EK-3 (Devam) Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar

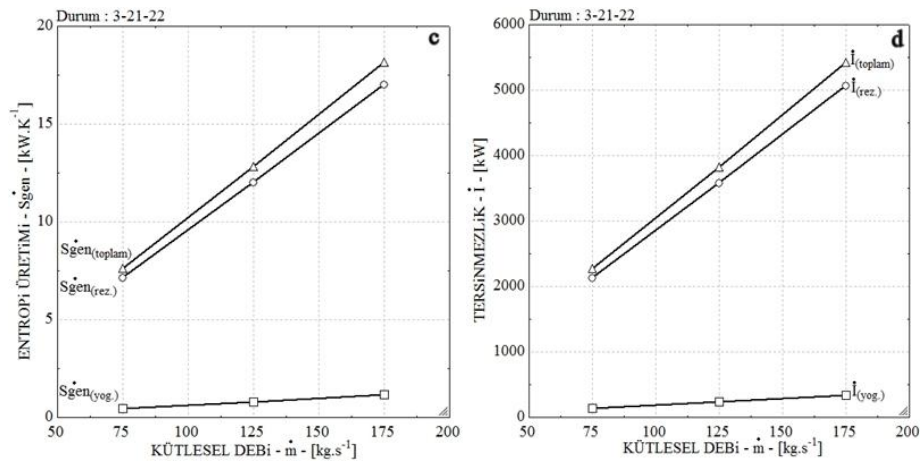
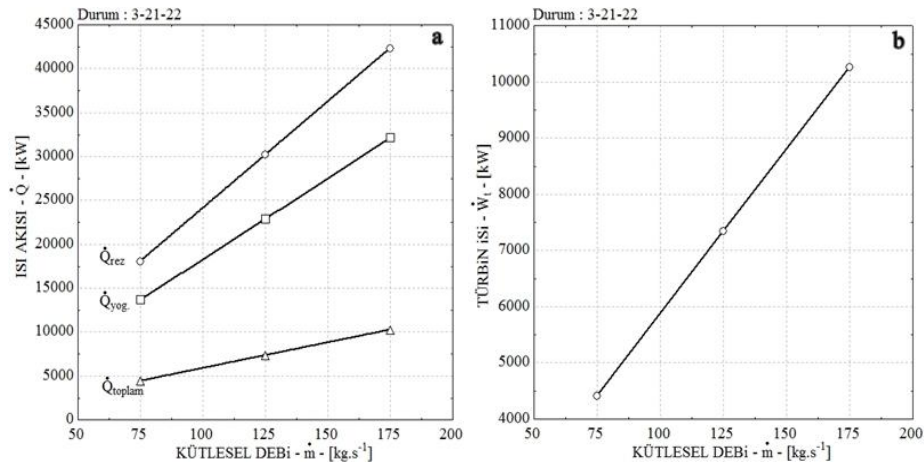


Ek Şekil 3.6b. Rezervuar durumu 3-12-13-14-15-16 için hesaplanan çevrimlerin, farklı çevre sıcaklıklarına göre değişen termodinamik özellikleri, c. Farklı çevre sıcaklıklarında yoğuşturucuda ve rezervuarda meydana gelen entropi üretimi miktarı, d. Farklı çevre sıcaklıklarında yoğuşturucuda ve rezervuarda meydana gelen tersinmezlik miktarı

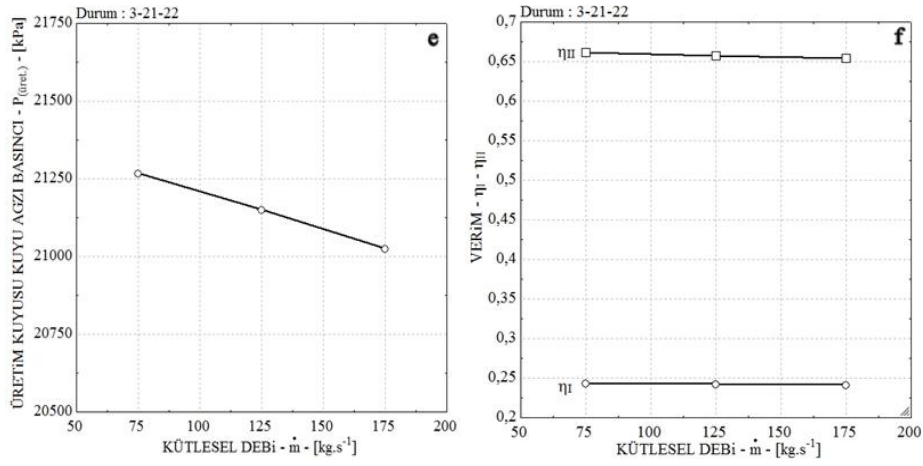


Ek Şekil 3.6c. Rezervuar durumu 3-12-13-14-15-16 için hesaplanan çevrimlerin, farklı çevre sıcaklıklarına göre değişen termodinamik özellikleri, e. Farklı çevre sıcaklıklarında üretim kuyusu, kuyu ağzından elde edilen basıncın değişim miktarı, f. Farklı çevre sıcaklıklarında çevrimin birinci ve ikinci kanun veriminde meydana gelen değişim miktarı

EK-3 (Devam) Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar



EK-3 (Devam) Farklı rezervuar koşullarındaki her bir çevrim için hazırlanan diğer diyagramlar



Ek Şekil 3.7c. Rezervuar durumu 3-21-22 için hesaplanan çevrimlerin, farklı kütleli debilere göre değişen termodinamik özellikleri, e. Farklı kütleli debi oranlarında üretim kuyusu, kuyu ağzından elde edilen basıncın değişim miktarı, f. Farklı kütleli debi oranlarında çevrimin birinci ve ikinci kanun veriminde meydana gelen değişim miktarı

EK-4 İkili güç çevrimi için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin ve diğer iş akışkanının termodinamik özellikleri

Ek Çizelge 4.1. İkili (Binary) güç çevrimi için karbon-dioksit ve izopentanın çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Akışkan	Faz	Debi	Basınç	Sıcaklık	Entalpi	Entropi	Özgül hacim	Yoğunluk
			kg s^{-1}	kPa	$^{\circ}\text{C}$	kJ kg^{-1}	$\text{kJ}(\text{kgK})^{-1}$	m^3kg^{-1}	kg m^{-3}
1	CO_2	Doymuş sıvı	175,00	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	21486	48,39	-212,5	-1,491	0,001235	809,8
3	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	18455	250	161,3	-0,5375	0,004961	201,6
4	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	14798	226,4	141,7	-0,5375	0,00583	171,5
5	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	6434	144,4	76,51	-0,5375	0,01106	90,44
6	Izopentan	Doymuş sıvı	108,06	76,59	20	-361,3	-1,728	0,001614	619,5
7	Izopentan	Sıkıştırılmış sıvı	108,06	1085	20,35	-359,7	-1,728	0,001612	620,5
8	Izopentan	Doymuş gaz	108,06	1085	120	140,4	-0,3621	0,03185	31,4
9	Izopentan	Gaz	108,06	76,59	51,44	41,89	-0,3621	0,476	2,101

Ek Çizelge 4.2. İkili (Binary) güç çevrimi için karbon-dioksit ve n-pentanın çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Akışkan	Faz	Debi	Basınç	Sıcaklık	Entalpi	Entropi	Özgül hacim	Yoğunluk
			kg s^{-1}	kPa	$^{\circ}\text{C}$	kJ kg^{-1}	$\text{kJ}(\text{kgK})^{-1}$	m^3kg^{-1}	kg m^{-3}
1	CO_2	Doymuş sıvı	175,00	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	21486	48,39	-212,5	-1,491	0,001235	809,8
3	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	18455	250	161,3	-0,5375	0,004961	201,6
4	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	14798	226,4	141,7	-0,5375	0,00583	171,5
5	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	6434	144,4	76,51	-0,5375	0,01106	90,44
6	n-Pentan	Doymuş sıvı	102,65	57,08	20	-13,64	-0,0438	0,001615	619,2
7	n-Pentan	Sıkıştırılmış sıvı	102,65	904,3	20,27	-12,28	-0,0438	0,001613	620
8	n-Pentan	Doymuş gaz	102,65	904,3	120	514,2	1,39	0,03973	25,17
9	n-Pentan	Gaz	102,65	57,08	50,77	409,9	1,39	0,6404	1,561

EK-4 (Devam) İkili güç çevrimi için hesaplanan her bir çevrim noktasındaki karbon-dioksitin ve diğer iş akışkanının termodinamik özellikleri

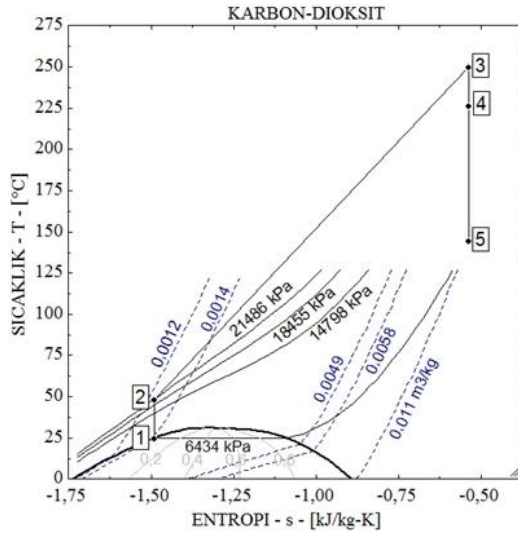
Ek Çizelge 4.3. İkili (Binary) güç çevrimi için karbon-dioksit ve izobutanın çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Akışkan	Faz	Debi	Basınç	Sıcaklık	Entalpi	Entropi	Özgül hacim	Yoğunluk
			kg s^{-1}	kPa	$^{\circ}\text{C}$	kJ kg^{-1}	$\text{kJ}(\text{kgK})^{-1}$	m^3kg^{-1}	kg m^{-3}
1	CO_2	Doymuş sıvı	175,00	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	21486	48,39	-212,5	-1,491	0,001235	809,8
3	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	18455	250	161,3	-0,5375	0,004961	201,6
4	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	14798	226,4	141,7	-0,5375	0,00583	171,5
5	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	6434	144,4	76,51	-0,5375	0,01106	90,44
6	Izobutan	Doymuş sıvı	125,15	302	20	247,2	1,166	0,001798	556,2
7	Izobutan	Sıkıştırılmış sıvı	125,15	2838	21,24	251,8	1,166	0,001786	559,8
8	Izobutan	Doymuş gaz	125,15	2838	120	687,1	2,374	0,0105	95,25
9	Izobutan	Gaz	125,15	302	31,13	601,8	2,374	0,1329	7,525

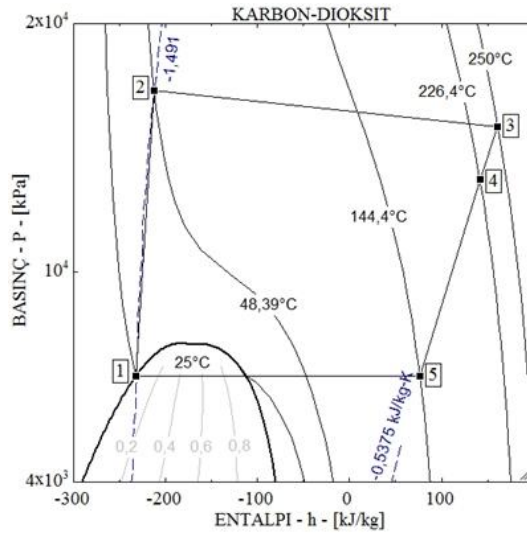
Ek Çizelge 4.4. İkili (Binary) güç çevrimi için karbon-dioksit ve n-butanın çevrim noktalarındaki termodinamik özellikleri

Durum	Akışkan	Faz	Debi	Basınç	Sıcaklık	Entalpi	Entropi	Özgül hacim	Yoğunluk
			kg s^{-1}	kPa	$^{\circ}\text{C}$	kJ kg^{-1}	$\text{kJ}(\text{kgK})^{-1}$	m^3kg^{-1}	kg m^{-3}
1	CO_2	Doymuş sıvı	175,00	6434	25	-232,3	-1,491	0,001405	711,8
2	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	21486	48,39	-212,5	-1,491	0,001235	809,8
3	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	18455	250	161,3	-0,5375	0,004961	201,6
4	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	14798	226,4	141,7	-0,5375	0,00583	171,5
5	CO_2	Kritik-üstü gaz	175,00	6434	144,4	76,51	-0,5375	0,01106	90,44
6	n-Butan	Doymuş sıvı	110,24	208	20	247,1	1,166	0,001728	578,6
7	n-Butan	Sıkıştırılmış sıvı	110,24	2212	20,86	250,6	1,166	0,001721	580,9
8	n-Butan	Doymuş gaz	110,24	2212	120	740,8	2,513	0,0162	61,72
9	n-Butan	Gaz	110,24	208	36,59	642,9	2,513	0,2011	4,972

EK-5 İkili (Binary) güç çevrimi için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

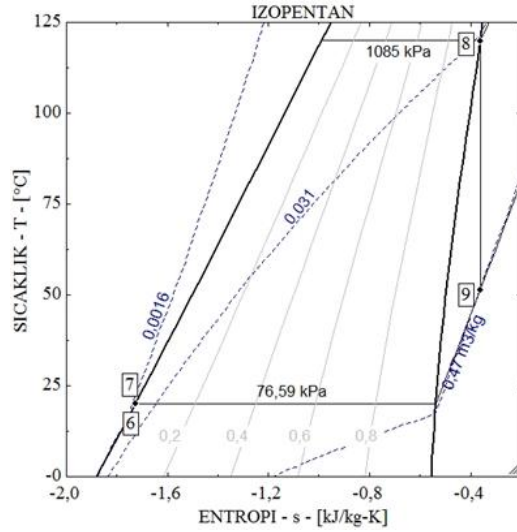


Ek Şekil 5.1. İkili (binary) çevrimde iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı çevrimin T-s diyagramı

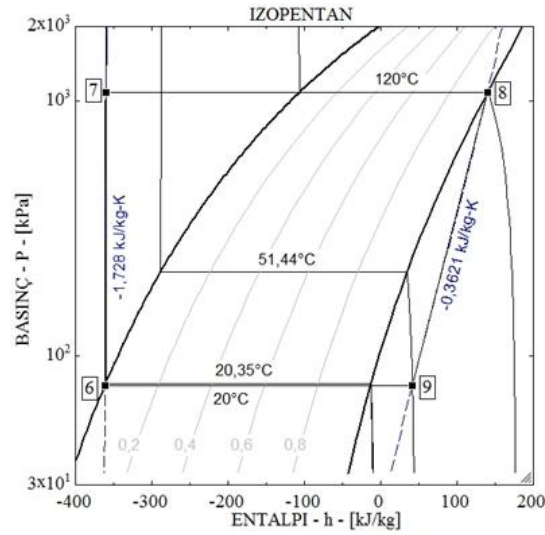


Ek Şekil 5.2. İkili (binary) çevrimde iş akışkanı olarak karbon-dioksitin kullanıldığı çevrimin P-h diyagramı

EK-5 (Devam) İkili (Binary) güç çevrimi için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

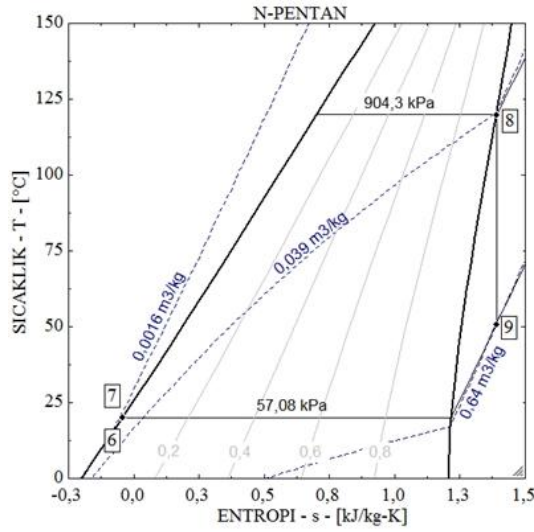


Ek Şekil 5.3. İkili çevrimde iş akışkanı olarak izopentanin kullanıldığı Rankine çevrimine ait T-s diyagramı

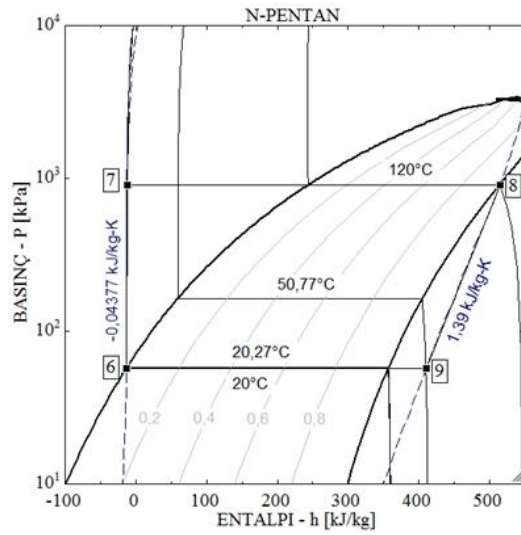


Ek Şekil 5.4. İkili çevrimde iş akışkanı olarak izopentanin kullanıldığı Rankine çevrimine ait P-h diyagramı

EK-5 (Devam) İkili (Binary) güç çevrimi için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

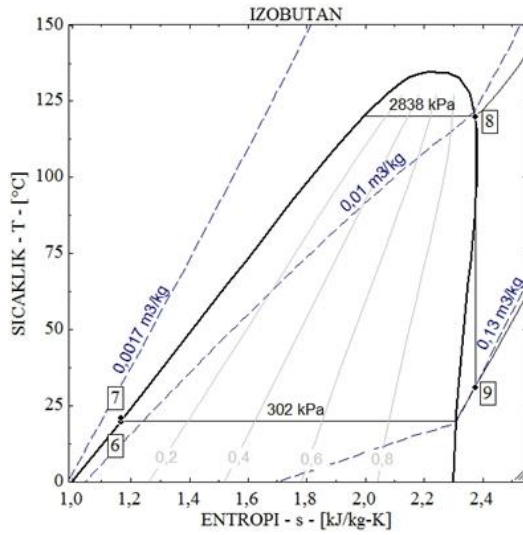


Ek Şekil 5.5. İkili çevrimde iş akışkanı olarak n-pentanin kullanıldığı Rankine çevrimine ait T-s diyagramı

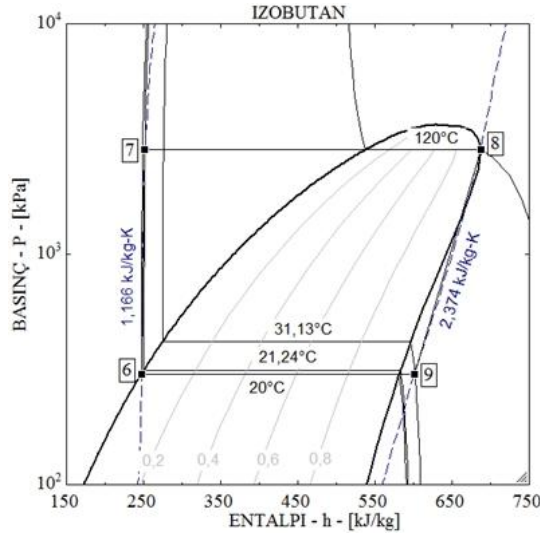


Ek Şekil 5.6. İkili çevrimde iş akışkanı olarak n-pentanin kullanıldığı Rankine çevrimine ait P-h diyagramı

EK-5 (Devam) İkili (Binary) güç çevrimi için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları

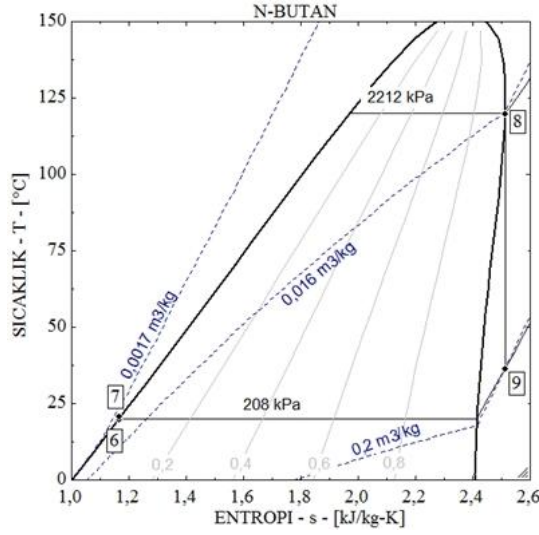


Ek Şekil 5.7. İkili çevrimde iş akışkanı olarak izobutanın kullanıldığı Rankine çevrimine ait T-s diyagramı

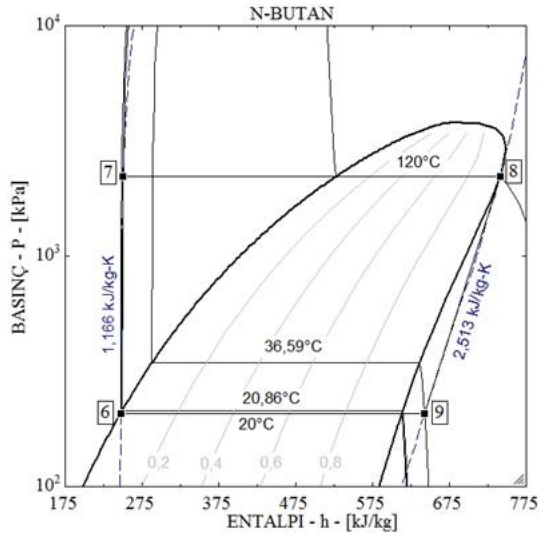


Ek Şekil 5.8. İkili çevrimde iş akışkanı olarak izobutanın kullanıldığı Rankine çevrimine ait P-h diyagramı

EK-5 (Devam) İkili (Binary) güç çevrimi için hesaplanan her bir çevrimin T-s ve P-h diyagramları



Ek Şekil 5.9. İkili çevrimde iş akışkanı olarak n-butanın kullanıldığı Rankine çevrimine ait T-s diyagramı



Ek Şekil 5.8. İkili çevrimde iş akışkanı olarak n-butanın kullanıldığı Rankine çevrimine ait P-h diyagramı

EK-6 Engineering Equation Solver programındaki hesaplamalar için yazılan kodlar

Enjeksiyon kuyusu;

T[1]=

cap=

debi=

epsilon=

z=

g=

s[1]=ENTROPY(CarbonDioxide;T=T[1];X=0)

ro[1]=DENSITY(CarbonDioxide;T=T[1];X=0)

mu[1]=VISCOSITY(CarbonDioxide;T=T[1];X=0)

P[1]=PRESSURE(CarbonDioxide;T=T[1];X=0)

Hiz[1]=((4*debi)/(cap^2*ro[1]*pi))

Reynolds[1]=((ro[1]*Hiz[1]*cap)/(mu[1]))

Surtunme_fak[1]=(((log10(((epsilon/(3,7*cap))^1,11)+(6,9/Reynolds[1]))))*(-1,8))^(-2))

P_kuyu[1]=(surtunme_fak[1]*8*debi*z)/(ro[1]*(pi^2)*(cap^5))/1000

Basinc_fark[1]=(((ro[1]*g*z)/1000)-P_kuyu[1])

P[2]=(P[1]+Basinc_fark[1])

DUPLICATE j=2;101

s[j]=ENTROPY(CarbonDioxide;T=T[1];X=0)

ro[j]=DENSITY(CarbonDioxide;S=S[j];P=P[j])

T[j]=TEMPERATURE(CarbonDioxide;S=S[j];P=P[j])

mu[j]=VISCOSITY(CarbonDioxide;S=S[j];P=P[j])

Hiz[j]=((4*debi)/(cap^2*ro[j]*pi))

Reynolds[j]=((ro[j]*Hiz[j]*cap)/(mu[j]))

Surtunme_fak[j]=(((log10(((epsilon/(3,7*cap))^1,11)+(6,9/Reynolds[j]))))*(-1,8))^(-2))

P_kuyu[j]=(surtunme_fak[j]*8*debi*z)/(ro[j]*(pi^2)*(cap^5))/1000

Basinc_fark[j]=(((ro[j]*g*z)/1000)-P_kuyu[j])

EK-6 (Devam) Engineering Equation Solver programındaki hesaplamalar için yazılan kodlar

```
P[j+1]=(P[j]+Basinc_fark[j])
END
```

Enjeksiyon ve üretim kuyusu arası;

```
l=
k=
h=
w=
T_rez=
b=
sicaklik_artisi=b*((T_rez-T[101])/l)
T[103]=T[101]+sicaklik_artisi
P_rez[102]=((debi*mu[101]*b)/(ro[101]*k*h*w*1000))
P[103]=P[101]-P_rez[102]
DUPLICATE j=103;202
    ro[j]=DENSITY(CarbonDioxide;T=T[j];P=P[j])
    mu[j]=VISCOSITY(CarbonDioxide;T=T[j];P=P[j])
    s[j]=ENTROPY(CarbonDioxide;T=T[j];P=P[j])
    P_rez[j]=((debi*mu[j]*b)/(ro[j]*k*h*w))/1000
    T[j+1]=T[j]+sicaklik_artisi
    P[j+1]=P[j]-P_rez[j]
END
```

Üretim kuyusu;

```
T=
P[1]=
cap=
debi=
epsilon=
```

EK-6 (Devam) Engineering Equation Solver programındaki hesaplamalar için yazılan kodlar

```

z=
g=
s[1]=ENTROPY(CarbonDioxide;T=T;P=P[1])
ro[1]=DENSITY(CarbonDioxide;T=T;P=P[1])
mu[1]=VISCOSITY(CarbonDioxide;T=T;P=P[1])
Hiz[1]=((4*debi)/(cap^2*ro[1]*pi))
Reynolds[1]=((ro[1]*Hiz[1]*cap)/(mu[1]))
Surtunme_fak[1]=(((log10(((epsilon/(3,7*cap))^1,11)+(6,9/Reynolds[1]))))*(-1,8))^(-
2))
P_kuyu[1]=(surtunme_fak[1]*8*debi*z)/(ro[1]*(pi^2)*(cap^5))/1000
Basinc_fark[1]=(((ro[1]*g*z)/1000)+p_kuyu[1])
P[2]=(P[1]-Basinc_fark[1])
T[1]=T
    DUPLICATE j=2;101
    s[j]=ENTROPY(CarbonDioxide;T=T;P=P[1])
    ro[j]=DENSITY(CarbonDioxide;S=S[j];P=P[j])
    T[j]=TEMPERATURE(CarbonDioxide;S=S[j];P=P[j])
    mu[j]=VISCOSITY(CarbonDioxide;S=S[j];P=P[j])
    Hiz[j]=((4*debi)/(cap^2*ro[j]*pi))
    Reynolds[j]=((ro[j]*Hiz[j]*cap)/(mu[j]))
    Surtunme_fak[j]=(((log10(((epsilon/(3,7*cap))^1,11)+(6,9/Reynolds[j]))))*(-
1,8))^(-2))
    P_kuyu[j]=(Surtunme_fak[j]*8*debi*z)/(ro[j]*(pi^2)*(cap^5))/1000
    Basinc_fark[j]=(((ro[j]*g*z)/1000)+P_kuyu[j])
    P[j+1]=(P[j]-Basinc_fark[j])
END

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YALÇINKAYA, Reşit
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 08.03.1984 Adana
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 231 47 31
 e-mail : resityalcinkaya@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Süleyman Demirel Ü. / Mak. Müh. Böl.	2008
Lise	Alanya A.M.E Anadolu Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-2012	Umur-san Mühendislik	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Yalçinkaya R., Bıykoğlu A., “Thermodynamic Analysis of a Power Cycle using Supercritical Carbon-Dioxide under Thermo-siphon Effect,” *X. International HVAC+R Technology Symposium & Fair, The Turkish Society of HVAC and Sanitary Engineers*, İstanbul, 526-535, (2012^a).
2. Bıykoğlu A., Yalçinkaya R., “Effects of Different Reservoir Conditions on CO₂ Power Cycle”, *NuRER 2012 – III. International Conference on Nuclear & Renewable Energy Resource*, İstanbul, (2012).
3. Yalçinkaya R., Bıykoğlu A., “Kritik-üstü Karbon-dioksitin Jeotermal Güç Çevriminde Kullanımı Üzerine”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, (2012^b).

Hobiler

Voleybol, Bilgisayar teknolojileri, Klasik edebiyat.