

**T.C.**  
**ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ SÜPERKRİTİK CO<sub>2</sub> İLE**  
**ÇALIŞAN BİRLEŞİK GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN**  
**İNCELENMESİ**

**Şefika YILDIRIM**

**Danışman**  
**Prof. Dr. Önder KIZILKAN**

**ISPARTA - 2019**



© 2019 [Şefika YILDIRIM]

## TEZ ONAYI

### GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ SÜPERKRİTİK CO<sub>2</sub> İLE ÇALIŞAN BİRLEŞİK GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

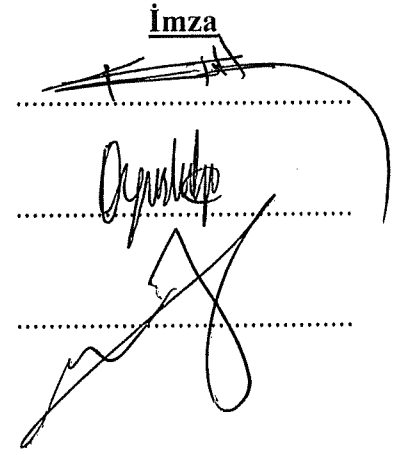
Şefika YILDIRIM tarafından hazırlanan bu tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Başkan** Prof. Dr. Önder KIZILKAN  
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

**Üye** Doç. Dr. Can Özgür ÇOLPAN  
Dokuz Eylül Üniversitesi

**Üye** Dr. Öğr. Üyesi Ergün KORKMAZ  
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

**İmza**



Yukarıdaki Jüri kararı Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../... tarih ve ...../..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

**Prof.Dr. Yusuf UÇAR**  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYANI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezime ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

24/07/2019

**Şefika YILDIRIM**



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ .....	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	14
3.1. Parabolik Oluk Tipi Güneş Kolektörü .....	14
3.2. Brayton Çevrimi .....	17
3.3. Organik Rankine Çevrimi (ORC).....	23
3.4. İş Akışkanı CO <sub>2</sub> .....	27
3.5. Güneş Enerjisi Destekli CO <sub>2</sub> ile Çalışan Birleşik Güç Sistemi .....	36
3.6. Modelleme Denklemleri.....	38
3.7. Güneş Enerjisi Destekli Birleşik Sistem Termodinamik Analizi .....	42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	70

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

# GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ SÜPERKRİTİK CO<sub>2</sub> İLE ÇALIŞAN BİRLEŞİK GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

Şefika YILDIRIM

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Önder KIZILKAN

Üzerinde yaşadığımız dünyada gün geçtikçe nüfus artmaktadır. Artan nüfusa bağlı olarak gelişen teknoloji ile sürekli yeni enerji tüketim sahaları açılmaktadır. Bu enerji tüketim sahaları, termal enerjinin yanı sıra güç enerjisi alanında da ihtiyacın artmasına sebep olmuştur. Güç üretiminin çoğunlukla fosil yakıtlı santrallerden sağlanması, çevre kirliliğini arttırmakta ve küresel ısınmayı hızlandırıcı etkenlere sebep olmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda havaya bırakılan atık ısı küresel ısınmayı hızlandırıcı etkiye sahiptir. Bu sebeplerden ötürü alternatif güç üretim sistemleri üzerindeki çalışmalar büyük önem kazanmıştır. Özellikle atık ısı geri kazanımı, güneş enerjisi, jeotermal enerji gibi düşük sıcaklıkta enerji üretim sistemleri üzerine birçok araştırma yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında güneş enerjisi destekli birleşik güç üretimin sisteminin termodinamik incelemesi yapılmıştır. Sistemde iş akışkanı olarak süperkritik CO<sub>2</sub> (R744) kullanılmaktadır. Birleşik güç üretim sistemi, parabolik oluk tipi kolektör sistemi, gaz çevrimi ve organik buhar çevriminden oluşmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında, parabolik kolektörün termal modellemesi yapılmış ve belirli dizayn parametreleri için güneş enerjisi hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalardan elde edilen veriler ışığında gaz çevrimi ve organik buhar çevriminin termodinamik analizleri yapılmıştır. Termodinamik analizlerde önce birinci kanun analizi yapılmış ve sistemin çalışma şartları hesaplanmıştır. Daha sonra ikinci kanun analizi yapılarak sistem elemanlarının ekserji kayıpları tespit edilmiş ve sistemin ekserji verimi hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular tablo ve grafikler halinde karşılaştırmalı olarak tezde verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş Enerjisi, Birleşik Güç Üretim Sistemi, CO<sub>2</sub>, Gaz çevrimi, Organik Rankine Çevrimi

2019, 70 sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF SOLAR ASSISTED COMBINED POWER GENERATION SYSTEM WORKING WITH SUPERCRITICAL CO<sub>2</sub>**

**Şefika YILDIRIM**

**Isparta University of Applied Sciences  
The Institute of Graduate Education  
Department of Energy Systems Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Önder KIZILKAN**

Due to the rapid increase in world's population, developing technologies lead rising of energy consumption. These energy consuming processes also cause an increase in requirements of thermal energy and power generation. Power generation is mainly supplied from fossil fuels, which causes environmental problems such as global warming. In addition, waste heat released from the processes at high temperatures contribute to this undesirable condition. For these reasons, number of studies on alternative power generation methods have been increased. These studies include particularly power generation studies for moderate temperature utilization such as waste heat recovery, solar energy and geothermal energy.

In this study, investigation of solar assisted integrated power generation system was carried out. Supercritical CO<sub>2</sub> (R744) was used as working fluid. Integrated power generation system was consisted of parabolic trough collectors, a gas cycle and an organic vapor cycle. At the first stage of the study, thermal modelling of the parabolic trough collector was carried out and for specific design parameters, solar energy calculations were done. With the results of the solar energy modelling, thermodynamic analyses of gas and organic vapor cycle were carried out. During the thermodynamic calculations, the first law analysis was applied to the whole system and the working conditions of the system were determined. Then, second law analysis of the system was carried out in order to determine the exergy destruction rates of each system component with exergy efficiencies. The obtained results given in the forms of tables and figures comparatively.

**Key Words:** Solar energy, Combined power generation system, CO<sub>2</sub>, Gas cycle, Organic rankine cycle

**2019, 70 pages**

## **TEŐEKKÖR**

Bu tez alıőmamda bana her tűrlű bilgi desteęini saęlayan Danıőman Hocam Prof. Dr. Őnder KIZILKAN'a, bir dűnem danıőmanlıęımı űstlenen Prof. Dr. Ali Kemal YAKUT'a ve bana yardımı dokunan dięer bűtűn bűlűm hocalarıma teőekkűr ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

**Şefika YILDIRIM**  
ISPARTA, 2019





## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Kaynak bazında toplam nihai enerji tüketimi.....	2
Şekil 1.2. Kaynak bazında toplam nihai enerji tüketimi dağılımı a) 2000 yılı, b) 2016 yılı .....	2
Şekil 1.3. Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü .....	3
Şekil 1.4. Türkiye’nin güneş enerji potansiyeli.....	6
Şekil 1.5. Türkiye global radyasyon değerleri (KWh/m <sup>2</sup> -gün) ve güneşlenme süreleri (h) .....	6
Şekil 3.1. Parabolik oluklu güneş kolektörü teknik resmi .....	16
Şekil 3.2. Parabolik oluklu güneş kolektörü .....	16
Şekil 3.3. Brayton çevrimi (açık çevrim).....	18
Şekil 3.4. İdeal Brayton çevrimi (kapalı çevrim) .....	18
Şekil 3.5. İdeal Brayton çevrimi T-s diyagramı .....	19
Şekil 3.6. İdeal Rankine çevrimi .....	24
Şekil 3.7. İdeal Rankine çevrimi T-s diyagramı.....	25
Şekil 3.8. Süperkritik ORC sistemi T-s diyagramı.....	26
Şekil 3.9. CO <sub>2</sub> faz diyagramı.....	29
Şekil 3.10. Saf maddeler için basınç-sıcaklık diyagramı, süperkritik faz gösterimi.....	30
Şekil 3.11. Süperkritik durum gösterimi.....	30
Şekil 3.12. CO <sub>2</sub> akışkanının özgül ısısının sıcaklıkla değişimi.....	31
Şekil 3.13. CO <sub>2</sub> sıkıştırılabilirlik faktörü .....	33
Şekil 3.14. S-CO <sub>2</sub> güç sisteminin kullanıldığı alanlar .....	34
Şekil 3.15. Farklı güç santrallerinin türbin giriş sıcaklığına göre termal verimlerinin gösterimi.....	34
Şekil 3.16. Denizaltı ekipman bölümü.....	36
Şekil 3.17. Birleşik güç çevrimi .....	36
Şekil 4.1. Birleşik güç üretim sisteminin P-h diyagramı .....	53
Şekil 4.2. Birleşik güç üretim sisteminin T-s diyagramı .....	54
Şekil 4.3. BC türbin giriş basınç değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi.....	56
Şekil 4.4. BC kompresör giriş basınç değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi .....	56
Şekil 4.5. ORC türbin giriş basınç değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi.....	57
Şekil 4.6. ORC pompa giriş basıncı değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi .....	57
Şekil 4.7. Güneş ışınım şiddeti ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi .....	58
Şekil 4.8. Güneş ışınım şiddeti değişimi ile sistem enerji ve BC verimi değişimi.....	58
Şekil 4.9. BC türbin giriş sıcaklık değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi.....	59
Şekil 4.10. ORC türbin giriş sıcaklık değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi .....	59
Şekil 4.11. Toplam ekserji verimi-basınç oranı değişim grafiği .....	60
Şekil 4.12. Toplam enerji verimi-basınç oranı değişim grafiği.....	61
Şekil 4.13. Toplam ekserji yıkımı-basınç oranı değişim grafiği .....	61



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1. 31 Aralık 2018 sonu itibariyle Türkiye elektrik kurulu gücü .....	3
Çizelge 3.1. Kapalı Brayton çevrimlerinde kullanılabilen bazı akışkanlar.....	20
Çizelge 3.2. Bazı organik akışkanların özellikleri.....	22
Çizelge 3.3. Yaygın olarak bilinen soğutucu akışkanların çevresel özellikleri .	28
Çizelge 3.4. Yaygın olarak bilinen soğutucu akışkanların termodinamiksel özellikleri.....	28
Çizelge 4.1. Analizlerde kabul edilen değerler .....	52
Çizelge 4.2. Birleşik güç üretim sisteminin hesaplanan özellikleri.....	53
Çizelge 4.3. CO <sub>2</sub> iş akışkanı için sistemin ekserji yıkımları .....	55



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

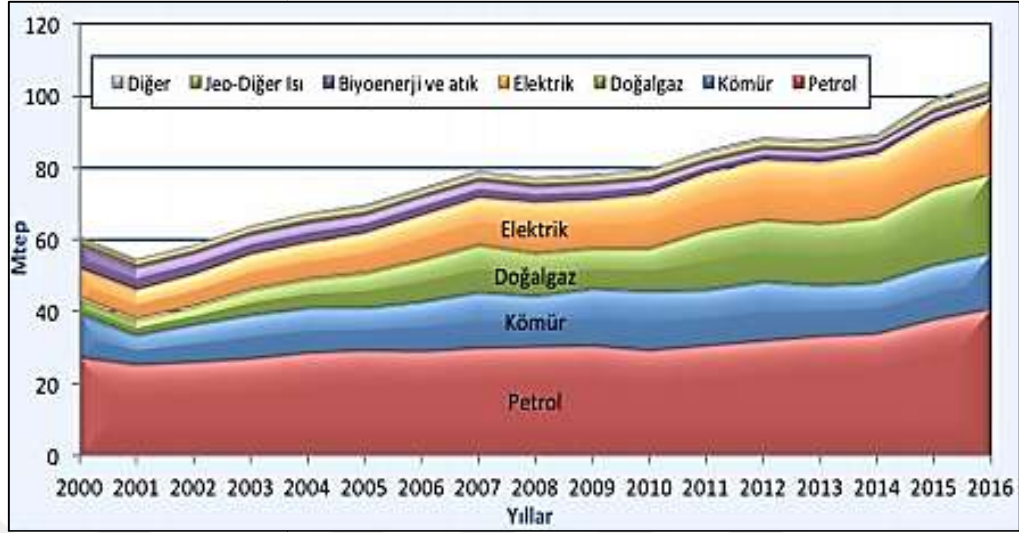
$A_a$	Gölgelenmiş alan
$A_g$	Kolektör cam örtü alanı
$A_r$	Absorber alanı
BC	Brayton çevrimi
$c_p$	Özgül ısı
$D_o$	Kolektör boru dış çapı
$D_i$	Kolektör boru iç çapı
$e$	Özgül ekserji
$\dot{E}_x$	Ekserji
$\dot{E}_{x_{dest}}$	Ekserji yıkımı
$\dot{E}_{x_Q}$	Isı ekserjisi
$\dot{E}_{x_W}$	İş ekserjisi
$F'$	Kolektör verim faktörü
$F_R$	Isı kayıp faktörü
$g$	Yer çekimi ivmesi
$h$	Özgük entalpi
$h_c$	Isı taşınım katsayısı
$h_{fi}$	Akışkan ısı iletim katsayısı
$h_r$	Isı ışıınım katsayısı
$k$	Isıl iletkenlik katsayısı
$m$	Kütle
$\dot{m}$	Kütleli debi
Nu	Nusselt sayısı
ORC	Organik Rankine çevrimi
P	Basınç
Re	Reynold Sayısı
$r_w$	Geri iş oranı
$s$	Özgül entropi
S	Güneş ışıınım şiddeti
$\dot{S}_{gen}$	Entropi üretimi
$\dot{Q}$	Isı
$\dot{Q}_u$	Kullanılabilir enerji
T	Sıcaklık
$T_0$	Referans sıcaklığı
$T_a$	Hava sıcaklığı
$T_g$	Cam örtü sıcaklığı
$T_{sun}$	Güneş sıcaklığı
$U_0$	Toplam ısı transfer katsayısı
$U_L$	Toplam ısı kayıp katsayısı
$v$	Özgül hacim
V	Hacim
$\dot{W}$	İş
$\eta$	Verim
$\varepsilon$	Etkinlik değeri
$\varepsilon_g$	Cam örtü yayılım katsayısı
$\varepsilon_r$	Absorber boru yayılım katsayısı
$\sigma$	Stefan Boltzman sabiti

## 1. GİRİŞ

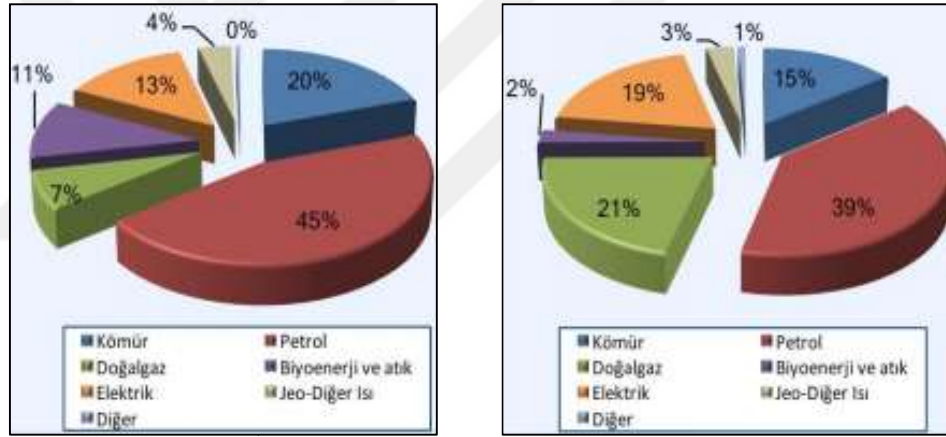
Enerji en genel anlamıyla iş yapabilme gücüdür. Bir varlık değil teorik bir kavramdır. İlk olarak Yunancada en (iç) ile ergon (iş) kelimelerinin bir araya gelmesiyle oluşmuştur. Dolayısı ile enerji içerde oluşan bir 'iç iş' olarak adlandırılabilir. Sözcük daha sonraları sosyal bir nitelik kazanmış olup iş üretme becerisi, dinamizm, kuvvet, kudret, etkinlikle eş anlamlı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Başka bir tanımlamaya göre ise madde ve maddeler sisteminin iş yapabilme yeteneği olan enerji hareket sağlayan güç anlamındadır. Geçmişten günümüze bütün üretim faaliyetlerinde belli bir enerji kaynağı kullanılmıştır. Bu enerji insanın emeği olabileceği gibi, başka kaynaklar da olabilir (Akova, 2016; Şen, 2002).

Gelişen ülkeler, enerji politikalarını değişen enerji piyasalarına entegre ederek içinde buldukları artan enerji tüketimlerini kaydadeğer ölçüde azaltmaya çalışmaktadır. Bunu sağlamak için ise enerji kullanımında verimliliği arttıracak ve enerji yoğunluğunu düşürecek önlemleri almayı hedeflemektedirler. Bu ülkeler yaptıkları çalışmalarda, sadece alternatif kaynak arayışında bulunmamış, artan enerji tüketim piyasasını da kontrol altına almaya çalışmış ve ekonomik olarak da bu piyasayı optimum koşullara getirmeyi amaçlamışlardır. Oluşan bu amaç doğrultusunda çalışmalarını geliştirmişlerdir (Şahin, 2012).

Ülkemizde toplam enerji tüketimi kaynak bazında incelendiğinde; petrol, kömür, doğalgaz ve elektrik kaynaklarının ön plana çıktığı görülmektedir (Şekil 1.1, Şekil 1.2). Bu dört kaynağın 2000 yılında toplam nihai enerji tüketimi içerisindeki payları % 85 iken 2016 yılına gelindiğinde bu oran % 94'e kadar yükseldiği görülmüştür. Bu oranın artmasında özellikle enerji kaynağı olan doğalgaz ve enerji kaynaklarının bir dönüşümü olan elektriğin etkisi büyüktür. 16 yıllık dönemde doğalgaz tüketimi yıllık bazda ortalama %10.7'lik artış ile toplam nihai enerji tüketimi içerisindeki en hızlı artışı gerçekleştirmiştir. Elektrik tüketimi ise aynı dönem için yıllık bazda ortalama % 5.6 oranında artış göstermiştir. Bu sayede doğalgazın 2000 yılında % 7 olan payı 2016 yılında % 21'e, elektrik tüketiminin payı ise % 13'ten % 19'a çıkmıştır. Petrol ve kömür tüketimi ise artış göstermiş olmasına rağmen toplam nihai enerji tüketimi içerisindeki payları azalmıştır (Anonim, 2018a).

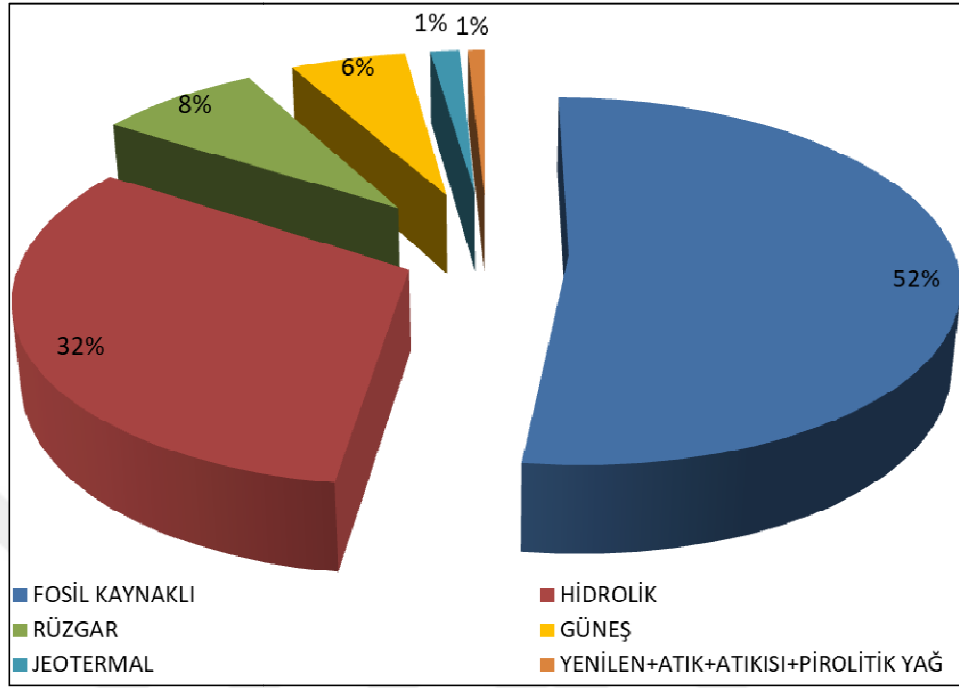


Şekil 1.1. Kaynak bazında toplam nihai enerji tüketimi (Anonim, 2018a)



Şekil 1.2. Kaynak bazında toplam nihai enerji tüketimi dağılımı a) 2000 yılı, b) 2016 yılı (Anonim, 2018a)

Şekil 1.3'te Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu gücü verilmiştir. Şekilde, fosil kaynakların halen % 52 ile enerji üretimimizin büyük bölümünü oluşturduğu görülmektedir. Fosil yakıtlar, kömür, doğalgaz gibi kaynaklar olup Türkiye'deki kurulun gücün daha detaylı hali Çizelge 1.1'de verilmiştir. Fosil kökenli yakıtlar yakıt olarak kullanıldıklarında çevreye zehirli gaz salınımı yapmaktadırlar. Bu durum Türkiye gibi Kyoto Protokolü vb. antlaşmalar imzalayan ülkeler için dezavantaj arz etmektedir. Bu sebeple Şekil 1.3'te görülen fosil kaynaklı enerji oranının yüzdeler alanını düşürmemiz gerekmektedir. Böylece hem çevreyi korumak adına hem de yaptığımız antlaşma şartlarına uymak adına önemli adımlar atmış oluruz. Bunun için en iyi adım ise yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirlik oranını artırmak olacaktır.



Şekil 1.3. Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü (Anonim, 2019a)

Çizelge 1.1. 31 Aralık 2018 sonu itibariyle Türkiye elektrik kurulu gücü (Anonim, 2019a)

Yakıt Cinsi	Kurulu Güç (MW)	Oran (%)	Santral sayısı
Fuel-oil + nafta + motorin	294.0	0.3	11
Yerli kömür(taş kömürü + linyit + asfaltit)	10203.5	11.5	31
İthal kömür	8793.9	9.9	11
Doğalgaz + lng	22437.8	25.3	251
Yenilen+atık+atıkısı+pirolitik yağ	738.8	0.8	127
Çok yakıtlılar katı+sıvı	697.1	0.8	22
Çok yakıtlılar sıvı+dgaz	3443.2	3.9	48
Jeotermal	1282.5	1.4	48
Hidrolik barajlı	20536.1	23.2	118
Hidrolik akarsu	7747.7	8.7	524
Rüzgâr	6942.3	7.8	175
Güneş	81.7	0.1	9
Termik (lisanssız)	300.5	0.3	104
Rüzgar (lisanssız)	63.1	0.1	74
Hidrolik(lisanssız)	7.6	0.0	11
Güneş (lisanssız)	4981.2	5.6	5859
<b>Toplam</b>	<b>88550.8</b>	<b>100.0</b>	<b>7423</b>

Ülkelerin nüfusu arttıkça, teknolojileri geliştikçe, refah düzeyi yükseldikçe elektriğe olan ihtiyaçları da artmakta dolayısıyla güç üretim santrallerine olan ihtiyaç da artmaktadır. Küresel ısınmanın giderek arttığı dünyamızda yapılacak santrallerin

çevreye en az zarar verecek şekilde yapılması önem arz etmektedir. Hem artan enerji talepleri hem de fosil kökenli yakıtların tükenebilir olması, genel olarak alternatif enerji kaynakları arayışının hızla artmasına neden olmaktadır. Alternatif enerji kaynakları deyince akla ilk olarak yenilenebilir enerji kaynakları gelmektedir. Yenilenebilir enerji, bir sonraki gün doğada aynen var olabilen ya da çevrede devamlı olarak yinelenen enerji akımlarının nitel ve nicel özellikleri bozulmayacak şekilde kullanımı sayesinde ortaya çıkan enerji türüdür. Yenilenebilir enerji yüksek enerji talebi karşısında enerji güvenliği sağlamada ve karbon salınımını azaltmada etkin rol oynadığı için dünya gündeminin merkezine oturmuştur. Son zamanlarda, ülkemizde de üzerinde yoğunlaşılacak yenilenebilir enerji kaynakları ve çevre politikaları, yenilenebilir enerji alanında önemli bir ülke konumuna gelmek isteyen Türkiye için önemli bir fırsattır. İlk yatırım maliyetleri diğer kaynaklarla kıyaslandığında yüksek olan yenilenebilir enerji kaynakları uzun vadede düşünüldüğünde, ekonomik ve çevresel etkiler gözönüne alındığında oldukça kazançlı ve sürdürülebilir kaynaktır (Durgun vd., 2018).

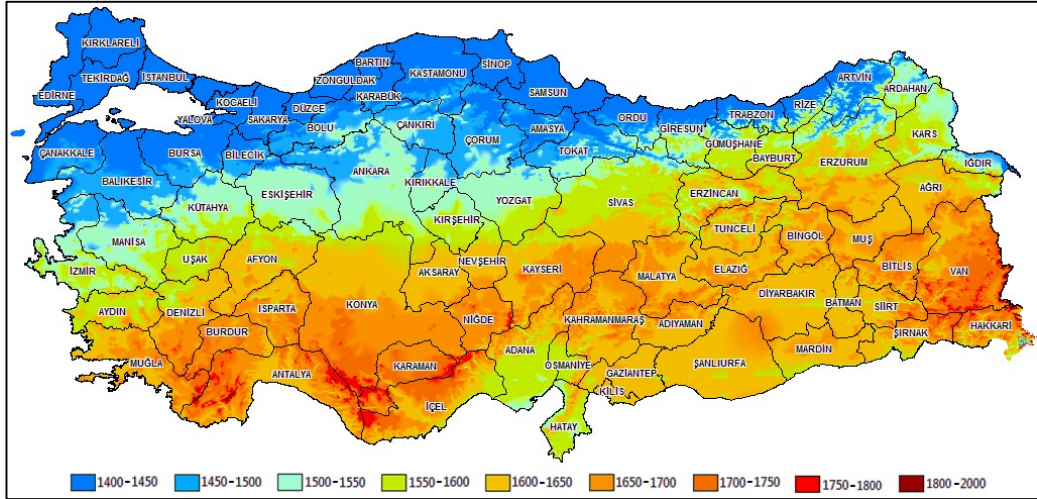
Yenilenebilir enerji kaynakları, çevre dostu, tükenmeyen ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Bu nedenle 21. yüzyılda en önemli enerji kaynaklarından birisi olacağı kabul edilmektedir (Kumbur vd., 2005). Yenilenebilir enerji kaynakları içinde ise güneş enerjisi gelecek için en önemli alternatif enerji kaynaklarının başında yer almaktadır ve kullanımı, gerek dünyada ve gerekse ülkemizde her geçen gün artmaktadır (Kızılkıran ev Akbaş, 2016).

Dünyadaki madde ve enerji akışları güneş enerjisi sayesinde mümkün olabilmektedir. Başlıca enerji kaynağı olan Güneş'in ışınım enerjisi, yer ve atmosfer sistemindeki fiziksel oluşumları etkilemektedir. Güneş, yeryüzüne her saat 1014 kWh'lik enerji yayar. Bu durum güneşin ne kadar büyük bir enerji kaynağı olduğunu ispatlamaktadır. Rüzgâr, deniz dalgası, okyanusta sıcaklık farkı ve biyokütle enerjileri, güneş enerjisinin değişim geçirmiş biçimleridir. Güneş enerjisi, doğadaki su döngüsünün gerçekleşmesinde de rol oynayarak, akarsu gücünü yaratmaktadır. Fosil yakıtların da biyokütle niteliğindeki materyallerde birikmiş güneş enerjisi olduğu kabul edilmektedir. Doğal enerji kaynaklarının pek çoğunun kökeni olan güneş enerjisinden, ısıtma ve elektrik elde etme gibi amaçlarla doğrudan yararlanılmaktadır (Varınca ve Gönüllü, 2006; Altun, 2010).

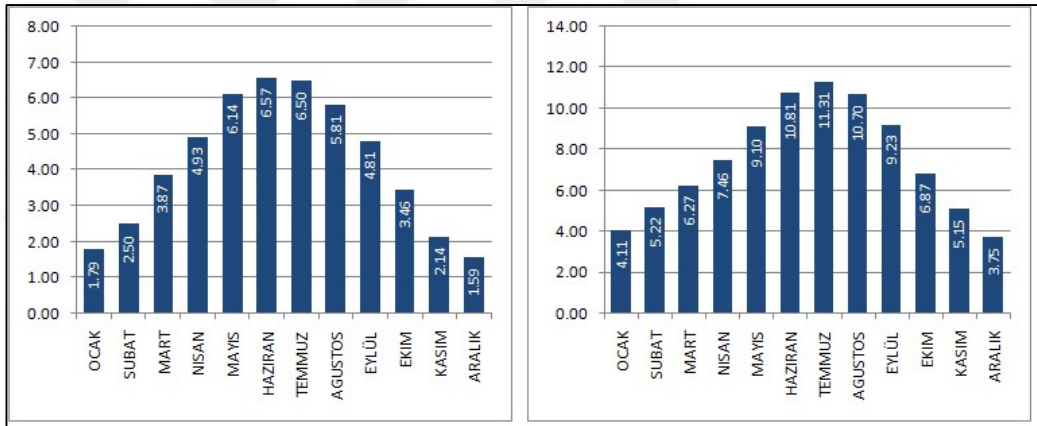


Güneş 1.4 milyon km çapıyla dünyanın 110 katı büyüklüğünde ve Dünya'dan 150 milyon km uzaklıkta yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı bir yıldız olma özelliğine sahiptir. Yüzev sıcaklığı yaklaşık 6.000 K olup iç bölgelerindeki sıcaklığın  $8 \times 10^6$  K ile  $40 \times 10^6$  K arasında değiştii tahmin edilmektedir. Doğal ve sürekli bir füzyon reaktörü olan güneş enerjisi, Güneş'in çekirdeğinde bulunan 4 hidrojen gazının 1 helyuma dönüşmesi ile açığa çıkmaktadır. Güneş'te her saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmekte ve kaybolan 4 milyon ton kütle karşılığı  $3.86 \times 10^{26}$  J enerji açığa çıkmakta ve bu enerji ışıvım şeklinde uzaya yayılmaktadır. Toplam enerji rezervi  $1.785 \times 10^{47}$  J olan Güneş Dünya için sonsuz bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Güneş enerjisi uzaya ve gezegenlere elektromanyetik ışıvım biçiminde yayılmaktadır. Dünya dışında güneş enerjisinin şiddeti yaklaşık olarak  $1370 \text{ W/ m}^2$  dir ancak atmosfer bu enerjinin bir kısmını uzaya yansıtmaktadır. Bundan dolayı Dünya'ya ulaşan ışıvım  $0-1100 \text{ W/ m}^2$  arasında değişmektedir. Dünya'ya Güneş'ten gelen enerji, Dünya'da bir yılda kullanılan enerjinin yaklaşık 20 bin katı kadardır (Varınca vd., 2006).

Türkiye'de de son yıllarda yeni gelişmelere bağlı olarak ekonomik büyümeler artmış böylece yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yatırımlar da artmış ve fosil kökenli yakıtların kullanımını önceki yıllara oranla azalmaya başlamıştır. Bunun en önemli sebeplerinden bir tanesi Türkiye, kuzey yarım kürede ve orta kuşak enlemlerinde bulunmaktadır buna dayalı olarak güneş enerji potansiyeli oldukça yüksektir ve verimli kullanılabilir güneş ışıvım şiddeti potansiyeline sahiptir. Şekil 1.4'te görüleceği üzere ülkemizin özellikle güney ve doğu bölgeleri yüksek güneş enerji potansiyeline sahiptir. Ayrıca, ülkemizin global radyasyon değerleri ile güneşlenme süreleri Şekil 1.5.'te verilmiştir. Global radyasyon değelerinden de anlaşılacağı üzere Ülkemiz on iki ay boyunca güneş enerji potansiyeline sahiptir.



Şekil 1.4. Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli (kWh/m<sup>2</sup>ay) (Anonim, 2018b)



Şekil 1.5. Türkiye global radyasyon değerleri (KWh/m<sup>2</sup>-gün) ve güneşlenme süreleri (h) (Anonim, 2018b)

2010 yılı başlarına kadar ülkemizde güneş enerjisi, genellikle sıcak su elde etme amacıyla kullanılmaktaydı. Güneş enerji potansiyelimiz elektrik enerjisi üretiminde yeteri kadar verimli kullanılmamaktaydı (Çukurçayır ve Sağır, 2008). Fakat son yıllarda gerek devlet teşvikleri ve gerekse alternatif enerji kaynaklarının öneminin artması neticesinde, zamanla ülkemizde güneş ve rüzgar gibi yenilebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi hızlı bir artış yakalamıştır. Türkiye Elektrik İletim A.Ş.'nin raporlarına göre 31 Aralık 2018 sonu itibariyle ülkemizdeki toplam elektrik üretimi kurulu gücü 88550.8 MW'ta yükselmiş ve bunun % 6'sını güneş enerjisi teşkil etmektedir.

Güneş enerjisinden elektrik üretimi, 2 farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlardan ilki ışığın doğrudan elektrik enerjisine çevrilmesi esasına göre fotovoltaik güneş pili teknolojileri (PV)'dir. PV hücreler, yarı-iletken malzemeler olup güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirirler. PV güneş hücrelerinin elektrik üretim verimleri yapısal özelliklerine göre değişmekte olup % 5 ile % 30 arasındadır. Güneş enerjisinden elektrik üretmenin bir diğer yolu ise, güneş enerjisinin, ısı enerjisi formunda bir iş akışkanına aktarılması ve çevrim santrallerinde ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi şeklindedir. Güneş enerjisi, doğrusal veya noktasal yoğunlaştırıcı sistemler kullanılarak odaklanır ve iş akışkanı kızgın buhar haline getirilerek enerji üretimi yapılır (İşler, 2018). Özellikle, su yerine düşük sıcaklıklarda buharlaşabilen organik akışkanların kullanıldığı Organik Rankine çevrimleri (ORC) sayesinde, düşük sıcaklıklarda enerji üretimi hızla yaygınlaşmıştır. Her ne kadar ticari olarak PV'lerden elektrik üretimi kadar olmasada, güneş enerjisi kullanılarak ORC ile elektrik üretimi, gerek araştırmacıların ve gerekse ticari firmaların ilgi odağı haline gelmiştir.

Son yıllarda gelişen teknolojiyle beraber, güneş kuleleri hakkında yapılan araştırmalarda büyük ilerlemeler sağlanmıştır ve bu sistemler ile yüksek sıcaklıklara erişilebilmektedir. Güneş kulelerinde, güneş ışınları kule tepesine monte edilmiş olan ısı değiştiricisine (toplayıcı) yoğunlaştırılarak ısı değiştiricisindeki akışkan yüksek sıcaklıklara ısıtılır. Son yıllarda yapılan bir çalışmada, Quero vd. (2014) İspanya'da kurmuş oldukları deneysel güneş toplayıcısı modeli ile sistemde dolaşan akışkanı 800 °C'lere kadar ısıtmayı başarmışlar ve yüksek sıcaklıktaki iş akışkanını bir gaz çevrimine entegre ederek güneş enerjisi destekli gaz çevrimi modeli geliştirmişlerdir. Isıtılan akışkanın enerjisi daha sonra gaz çevriminde ön ısıtma işleminde kullanılmakta olup gerekli enerjinin büyük bir kısmı güneşten sağlanmaktadır (Kızılkın ve Akbaş, 2016).

Enerji üretiminde, yenilenebilir enerji türleri gibi temiz, tükenmeyen enerji kaynaklarının kullanımı, çevresel etkiler açısından da büyük önem arz etmektedir. Sadece bu enerji türlerinin kullanımı değil, aynı zamanda termal güç santrallerinde kullanılan iş akışkanının seçimi de, gerek sistem performansı ve gerekse çevresel etkiler açısından son derece önemlidir. Ozon tabakasının korunması, ve küresel ısınmanın engellenmesi için, ekolojik olarak güvenli, doğal olarak tabir edilen iş

akışkanlarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bu bağlamda, birçok ülkenin katılımıyla Kyoto Protokolü imzalanmış ve bu protokolle, sera etkisi yapan gazlardan dolayı oluşan emisyonların azaltılması için sınırlayıcı önlemler alınmıştır. Sera etkisi emisyonlarını azaltmanın bir yolu da termal sistemlerde, karbondioksit (CO<sub>2</sub>), amonyak, hidrokarbonlar gibi doğal akışkanlar kullanmak ve var olan sistemleri de bu tür akışkanlarla çalışacak şekilde yenileme yapmaktır. Doğal akışkanlar arasında, iş akışkanı olarak CO<sub>2</sub> kullanımı özellikle 1990'lardan sonra giderek artış göstermiş ve bu tarihten itibaren birçok projeler geliştirilmiştir. Özellikle CO<sub>2</sub>'nin yanmaz, zehirsiz ve çevresel olarak güvenli olmasının yanında kritik basınç ve sıcaklığının diğer akışkanlara göre düşük olması, düşük sıcaklıklarda kritik üstü duruma çok çabuk erişebilmesi gibi bazı termodinamik özellikleri nedeniyle kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu düşük kritik sıcaklığa sahip olması nedeniyle, CO<sub>2</sub> kullanılan santraller, 200 °C gibi düşük sıcaklıkta bile çalışabilmektedir. Dolayısıyla güneş enerjisi destekli güç santrallerinde son derece elverişli bir iş akışkanıdır (Zhang vd., 2006a; 2006b; 2006c; Yamaguchi vd., 2006).

Bu tez çalışmasının amacı, güneş enerjisi destekli, gaz ve buhar çevriminden oluşan birleşik güç üretimi tasarlamak ve sistemin performansını termodinamik açıdan incelemektir. Tasarlanan sistemin gerekli ısı ihtiyacı, parabolik oluk tipi kolektörler yardımıyla güneş enerjisinden sağlanacaktır. Sistemde iş akışkanı olarak süperkritik karbondioksit (S-CO<sub>2</sub>) kullanılmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında, sistem modelleme parametreleri belirlenecek ve daha sonra parabolik kolektörün termal modellemesi yapılacaktır. Sisteme entegre edilmiş ve CO<sub>2</sub> ile çalışan kapalı Brayton çevrimi ve organik Rankine çevrimi tasarım parametreleri belirlenecek daha sonra belirli parametreler ışığında enerji ve ekserji analizi yapılacaktır. Enerji analizi ile sistem performansı belirlenecek, ekserji analizi ile sistem elemanlarının ekserji kayıpları tespit edilerek ekserji verimi hesaplanacaktır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Güneş enerjisi destekli entegre gaz ve buhar çevrimleri ile ilgili çalışmalar oldukça yeni bir konudur. Özellikle bu tip sistemlerde CO<sub>2</sub> iş akışkanının kullanımı ise son derece ilgi çekici bir hal almıştır. Literatürde, konu ile ilgili genel çalışmalara bakıldığında, özellikle son 10-15 yılda CO<sub>2</sub> iş akışkanı kullanılan organik Rankine çevrimi (ORC) çalışmalarına rastlamak mümkündür. Bu yıllarda gerek teorik ve gerekse deneysel birçok çalışma ile karşılaşmaktadır. CO<sub>2</sub> ile çalışan kapalı Brayton çevrimleri hakkında ise yapılmış çalışma adedi azdır ve bu çalışmalar genelde teorik olarak kalmıştır. Güneş enerjisi destekli entegre gaz-buhar çevrimleri hakkında ise yapılmış çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Aşağıda, S-CO<sub>2</sub> kullanılan güneş enerjisi destekli enerji üretim sistemleri hakkında yapılan bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Khan ve Atikol (2018), çalışmalarında iki farklı S-CO<sub>2</sub> kaynaklı Brayton çevrimine parabolik güneş kolektörü entegre ederek karşılaştırmışlardır. Bunlardan bir tanesi yeniden sıkıştırmalı ve yeniden ısıtmalı iken diğeri sadece yeniden ısıtmalı bir sistemdir. Çalışmanın sonucunda yeniden sıkıştırmalı ve ısıtmalı çevrimin termal verimini %47.7 bulmuşlarken yeniden sıkıştırmalı sistemin termal verimini yaklaşık %45.02 olarak bulmuşlardır. Bu sisteme parabolik güneş kolektörü entegre edildiğinde ise tüm sistemin verimi yeniden sıkıştırmalı yeniden ısıtmalıda yaklaşık olarak %36.37 iken, sadece yeniden sıkıştırmalı sistemde %27.5'tir.

Tozlu vd., (2018), çalışmalarında, organik Rankine çevrimi entegre edilmiş S-CO<sub>2</sub>'nin aracı akışkan olarak kullanıldığı bir gaz türbin çevrimi modeli gerçekleştirmişlerdir. Analizlerinde, ASPEN Plus ve EES programlarını kullanmışlardır. Analiz sonuçlarında, elektrik üretim kapasitesi 1530,88 kW, enerji ve ekserji verimleri %23,30 ve %59,60 olarak bulmuşlardır. Ayrıca, sistemin termoeconomik analizini yapmışlardır, analiz neticesinde sistemin amortisman süresini 4,09 yıl olarak bulmuşlardır.

Zhang vd., (2018), çalışmalarında kömür yakıtlı boylere iş akışkanının giriş sıcaklığı S-CO<sub>2</sub> çevriminde buhar çevrimine göre daha yüksek olduğu ve bu sebeple de reküperatörler önceden daha fazla ısıtılabilceği göz önüne almışlardır. İlk önce kömürle çalışan güç santrali için tasarlanmış CO<sub>2</sub>'li Brayton döngüsünün şirket içi

kodunu geliştirmişler daha sonra da hem kazanın hem de S-CO<sub>2</sub> çevriminin kapsamlı analizine dayanarak baca gazı egzoz ısısının daha verimli kullanılacağı geliştirilmiş çevrim önermişlerdir. 31 MPa/ 600 °C/ 620 °C koşulları için maximum net verimi % 45.96'dan % 50.71 gibi optimize edilmiş bir değere yükseltmişlerdir. Bu değerler aynı parametrelerde son teknoloji ürünü ultra süperkritik buhar güc santrallerinden daha yüksektir.

Özturan (2017), IdeaLab tarafından yakın zamanda geliştirilen, Süperkritik Karbondioksit (S-CO<sub>2</sub>) Brayton güc çevrimi tabanlı havadan bağımsız tahrik (Air Independent Propulsion / AIP) denizaltı güc sistemi ile ilgili çalışmasında süperkritik CO<sub>2</sub> Brayton çevrimi ile Rankine çevrimini kıyaslamış ve Brayton çevriminin dönüşüm verimliliğinin daha fazla olduğunu belirtmiştir. S-CO<sub>2</sub> Brayton çevriminin buharlı rankine çevriminin yerini alacağını ifade etmiştir. Brayton çevriminde, sistem akışkanı olarak S-CO<sub>2</sub>'nin kullanılması belirli bir termik girdiyi elektrige dönüştürmek için daha az iş gereksinimi sağladığını bu durumun da yakıt maliyetini düşürdüğünü belirtmiştir.

Diken (2016), araştırmasında S-CO<sub>2</sub> ile basit Brayton ve Rankine çevrimi dizaynlarında 60°C, 80°C, 100°C, 120°C'lik düşük ısılar kullanmıştır. Brayton çevrimi üzerinde CO<sub>2</sub> ile çok aşamalı sıkıştırma ve ara soğutma, Rankine çevriminde CO<sub>2</sub> ile türbinden çıkan gaz kullanmıştır. Rankine çevriminde ara buhar alınan türbinden çıkan gazın en yüksek verimliliğe sahip olduğu en iyi model olarak bulunmuştur. Bu sonuç ORC n-pentan ile kıyaslandığında ORC'nin veriminde oldukça az düşüş olduğunu gözlemlemiş. Bu sonuçta olsa bile düşük dereceli sıcaklıkta CO<sub>2</sub> ile güc üretimi mümkün olduğunu görmüştür.

Zhang (2016), çalışmalarında, teorik olarak güneş enerjisinden faydalanarak Rankine çevriminin çalışmasını sağlayan bir sistem tasarlamış ve termodinamik analizini yapmışlardır. İş akışkanı olarak CO<sub>2</sub> kullanmışlardır. Sistemde CO<sub>2</sub>'den ilk olarak elektrik enerjisi elde etmek için ikinci olarak yüksek dereceli ısı gücü ve düşük dereceli ısı gücü olarak yararlanmışlardır. Tasarladığı bu sistemde hem ısı hem güc eldesi mümkündür. CO<sub>2</sub> ile elde edilen güc diğer iş akışkanlarından elde edilen güçten daha fazla çıkmıştır. Güneşin durumuna göre yıllık ortalama elektriksel

verim %11.4, ısı verimi %36.2'dir. Çalışmada güneş radyasyonunu, kolektör alanını ve debiyi artırarak verimlerin artırılabilirliğini gözlemişlerdir.

Ergün (2016), çalışmalarında Organik Rankine Çevriminin çalışma prensibi anlatmışlardır.

Özturan (Anonim, 2018c), çalışmalarında sıkıştırılmış karbondioksit kullanan güç üretim sistemi ile ilgili savunma sanayi adına yaptığı çalışmalarda bu güç üretim sistemi hayata geçirildiğinde denizaltıların şnorkelsiz su altında kalma süresinin nükleer denizaltı seviyesine çıkacağını açıklamışlardır. Nükleer güç ile çalışan denizaltı teknolojilerini her ülke üretememektedir. Nükleer yakıt kullanan sistemlere eşdeğer sıkıştırılmış karbondioksit kullanan güç üretim sistemi ise bu noktada bizlere avantaj sağlamaktadır. Karbondioksit gazı sıkıştırılarak çok büyük güçlerin elde edilmesine sebep olmaktadır. Sistem parça boyutları kıyaslandığında ise normal motor ve güç sistemlerine göre 25 kat daha küçük olduğunu açıklamalarında ifade etmişlerdir. Bu da sistemin devreye alınma süresini büyük boyutlara kıyasla daha da artırmaktadır. Su altındaki ses olarak ise dizel motorun sesi 2.000 km'den duyulurken karbondioksitin yakıt olarak kullanıldığı sistem 100 km öteden ancak duyulabiliyor ki bu durum karbondioksit gazını yalıtım özelliğinin ne kadar gelişmiş olduğunu göstermektedir.

Bayrakçı vd. (2015), çalışmalarında tek ve çift kademeli CO<sub>2</sub>'li ısı pompalarını karşılaştırmış çift kademeli kompresör kullanımının, performans ve enerji maliyeti bakımından daha verimli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Çift kademeli sistemin enerji maliyetini daha düşük ve performansını daha yüksek olarak bulmuşlardır. Ayrıca CO<sub>2</sub>, çevreci bir gaz olmasının da sistem ve çevre için avantaj oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Moghanlou (2014), çalışmasında 500 °C altındaki atık ısılarından düşük enerji verimliliğinden dolayı az yararlanıldığını ancak bu düşük dereceli ısılardan süperkritik CO<sub>2</sub> sayesinde faydalanılabileceğinden bahsetmiştir. Brayton çevriminde iş akışkanı olarak süperkritik CO<sub>2</sub>'yi güç üretiminde kullanmıştır. Sadece güç üretiminde değil aynı zamanda otomotiv, uçak sanayisi gibi sanayi kollarında da kullanılmaktadır. Atık ısının çıkış sıcaklığı araştırmalar göz önüne alınarak cam ve

metal endüstrisinde 300-400 °C, petrokimya rafineri endüstrisinde 150 °C, yiyecek ve içecek endüstrisinde bu değeri 80 °C olarak bulunmuştur. Endüstrinin bu kadar hızlı geliştiği dünyamızda düşük sıcaklıktaki atık ısı enerji kullanımını verimliliği adına kullanılabilir hale getirilmelidir. Bu hem küresel ısınmanın azalması adına olumlu yönde atılmış bir adım hem de atık ısının verimli kullanımından dolayı enerji verimliliğini artırıcı yönde bir çalışma olur.

Tüysüz (2013), çalışmasında bir kritiküstü termik santralin 1. ve 2. yasa analizleri yapmıştır.

Yalçınkaya ve Bıyıklıoğlu (2012), çalışmalarında iş akışkanı olarak karbon-dioksit kullanan bir güç çevrimi tasarlamışlar ve jeotermal enerji kaynaklı bir güç üretim sisteminin termodinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çevrimi işletmede, jeotermal enerjiyi iş akışkanına doğrudan aktarmış ve karbon-dioksit, kritik üstü bölgede işletilerek önerilen sistemin uygulanabilirliğini araştırmışlardır.

Şahin (2012), analizinde İskenderun'da bulunan yakıt olarak kömür kullanılan Atlas İskenderun Termik Santrali'nin süperkritik koşullarda nominal tasarım verilerine göre enerji ve ekserji analizlerini yapmıştır. Ayrıca süperkritiklik hakkında detaylı bilgi vermektedir.

Alan (2011), çalışmasında, çift kademeli kritik üstü çalışan bir CO<sub>2</sub> çevriminin enerji tasarruf potansiyelini teorik olarak incelemiştir. Evaporatör ve gaz soğutucu basınçları değişken parametreler olarak seçmiş, soğutma tesir katsayısının genişleme valfi yerine genişleme türbini kullanılması halinde değişimi incelemiş ve tersinmezlik analizi yapmıştır. Değişken parametreler olarak tersinmezlik analizi için kompresör izentropik verimi ve expander izentropik verimi kullanmış. Sonuçları grafiksel olarak sunmuş ve tartışmıştır. Genişleme türbini kullanımının genişleme valfi kullanımına göre enerji açısından daha avantajlı olduğu görülmüştür.

Kurtuluş (2011), çalışmasında, derin dondurucu bölmesine sahip ev tipi buzdolaplarında buharlaşma sıcaklığının -30 °C civarında olması nedeniyle, -10 °C'tan daha düşük sıcaklıkları incelemiş ve bu sıcaklıklar için optimum egzoz basıncı değerlerinin gözlemlemiştir. Projenin deneysel kısmında, ticari olarak temin



edilen CO<sub>2</sub> kompresörünün performansının belirlenmesi için deneysel bir sistem kurulmuş ve kompresör performans karakteristikleri deneysel olarak elde etmiştir. Proje kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, kompresör performansının karakterize edilebilmesi için “kalorimetre” adı verilen kompresör performans deney düzeneğini hazırlamıştır. Bu tür bir sistem ile kompresör giriş ve çıkış basıncı, ortam sıcaklığı, aşırı soğuma ve aşırı kızdırma sıcaklıklarının hassas olarak kontrol edilerek kompresör soğutma kapasitesi ve soğutma etkinlik katsayısını deneysel olarak tespit etmiştir.

Zhang vd., (2007), çalışmasında güneş enerjisi ile çalışan CO<sub>2</sub>'li Rankine çevriminin termodinamik analizini yapmışlardır. Çevrim güç üretimi, sıcak ve soğuk su sağlamada kullanılmıştır. CO<sub>2</sub> süpekritik durumda iş akışkanı olarak kullanmışlardır. CO<sub>2</sub> bazlı Rankine çevriminin performansını araştırmak için teorik analiz yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda CO<sub>2</sub>'in iş akışkanı olarak kullanılabileceği ve 250 °C sıcaklıktan düşük sıcaklıklarda çalıştığında maksimum verim elde etmişlerdir. Güneş enerjisi ile çalışan CO<sub>2</sub> döngüsünden hem güç üretimi hem de ısı enerjisi elde etmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, teorik olarak tasarlanan parabolik oluk tipi kolektörlü Brayton ve ORC'den oluşan birleşik sistemin esasları açıklanacaktır. Açıklamalarda öncelikle, entegre sistemi oluşturan her bir alt sistem tanıtılacak, daha sonra iş akışkanını CO<sub>2</sub> hakkında gerekli bilgiler verilecek ve termodinamik dizayn esasları incelenerek her bir sistem elemanına enerji ve ekseji analizi uygulanacaktır.

#### 3.1. Parabolik Oluk Tipi Güneş Kolektörü

Güneş enerjisini kullanılabilir forma dönüştürebilen pek çok güneş enerjisi sistemi yer almaktadır. Genellikle termal enerjinin kullanılabilir formunda yoğunlaştırıcı güneş kolektörleri kullanılır. Bunun sebebi güneş enerjisinden dönüştürülen termal enerjinin ısı kayıplarına neden olan kolektör yüzeyini küçülterek kolektör verimliliğini artırıp daha ekonomik ve daha verimli güneş enerji sistemini kullanmaktır. Uygulamalarda genellikle yoğunlaştırılmış güneş enerji santralının iki kısımdan oluştuğu var sayılmaktadır. Bunlardan ilki güneş enerjisinin toplanmasını ve ısıya dönüşmesini sağlayan güneş kolektör alanı, ikincisi ise bu ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren güç bloğudur. Yoğunlaştırıcı tip güneş enerji santralleri çeşitlerinin içinde ise hem ekonomik hem de verimlilik açısından daha iyi olması açısından parabolik tip güneş enerji santralleri tercih edilmektedir (Acar, 2014). Parabolik oluk tipi güneş kolektörleri güneş enerjisinden yüksek sıcaklık elde etmeyi sağlamaktadır (Şanlı,2010).

Yoğunlaştırıcı güneş santrallerinin enerji verimliliği açısından uygun tasarımını yapabilmek için güneş kolektörlerinin optimum koşullarını belirlemek gerekmektedir. Optimum koşulların sağlanmak istenmesinin sebebi çalışma sıcaklığının arttıkça ısı değiştirici, türbin ve jeneratör kısmının verimi artarken kolektör alanındaki kayıpların da artmasına sebep olup verimi azaltmasıdır. Bu yüzden kullanacağımız türbin giriş sıcaklığına uygun olarak parabolik güneş kolektörünün optimum miktarı belirlenmesi gerekmektedir ve düzenek bu şekilde kurulmalıdır (Acar, 2014).

Güneş kolektöründeki net ısı miktarını etkileyen parametreler:

- Direkt normal güneş ışınımı (DNI),

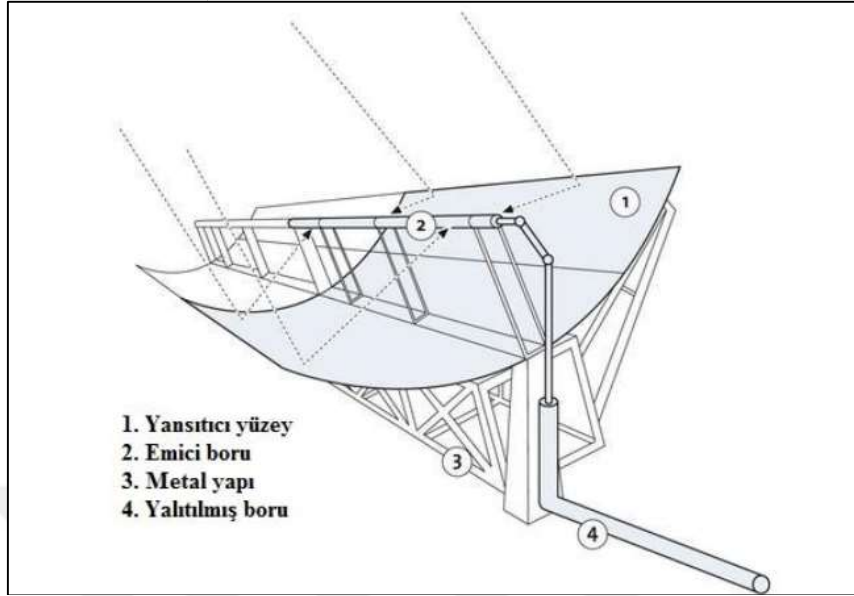
- Çevre sıcaklığı,
- Nem,
- Rüzgâr hızı,
- Kolektör boyutu ve sayısı,
- Isı transfer akışkanı, güneş enerji santraline giriş sıcaklığı, hacimsel akış oranı,
- Kayıplar (termal, optik ve diğer...) (Acar, 2014).

Parabolik oluklu güneş kolektörünün yüksek verimliliğe sahip olmasının en önemli sebebi üzerinde bulundurduğu doğrusal alıcıdır. Doğrusal alıcı, seçici-emici dış yüzey kaplamasına sahip, silindirik simetride paslanmaz çelikten bir emici tüptür, aynı zamanda kolektörün ısı toplayıcısıdır ve güneş enerjisini yüksek derecede emerek düşük ısı yayma özelliğine sahiptir.

Parabolik oluklu güneş kolektöründe bulunan başlıca elemanlar:

- Parabol şeklinde bir yansıtıcı yüzey,
- toplama kısmında bulunan emici boru,
- emici boruyu çevreleyen cam örtü,
- ısı transfer akışkanı,
- sistemi taşıyan bir gövdedir (Şekil 3.1-2).

Parabolik oluklu güneş kolektöründe akışkana enerji aktarımı şu şekilde olmaktadır: Öncelikle güneşten gelen ışınlar yansıtıcı yüzeye ulaşır. Parabolik oluklu güneş kolektöründe yansıtıcı yüzey oluk şeklindedir ve parabolün merkezinde toplayıcı bir kısım bulunmaktadır. Bir eksen boyunca uzanan toplayıcı kısımdaki emici boruda yüzey ışınlarının yoğunlaşması sağlanmaktadır. Bu sıralama sonucu oluşan olaylar sonucunda emici boruda bulunan iş akışkanına enerji aktarımı sağlanmış ve akışkanın sıcaklığı yükseltilmiş olur. Sıcaklığı yükselen bu iş akışkanı direkt ya da indirekt olarak buhar ya da elektrik üretimi yapılmasına sebep olmaktadır (Şanlı,2010).



Şekil 3.1. Parabolik oluklu güneş kolektörü teknik resmi (Şanlı,2010)



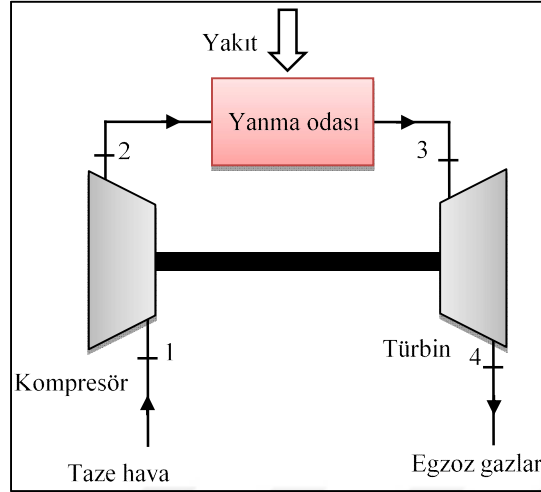
Şekil 3.2. Parabolik oluklu güneş kolektörü (Şanlı,2010)

### 3.2. Brayton Çevrimi

Brayton çevrimi ilk olarak 1870'li yıllarda George Brayton tarafından, kendi geliştirdiği yağ yakan pistonlu motorlarda kullanılmak üzere öne sürülmüştür. Bugün Brayton çevriminin kullanımı, sıkıştırma ve genişlemenin aksenel kompresörler ve türbinlerin olduğu gaz türbinleriyle ibarettir. Gaz türbinleri genel olarak açık çevrimle çalışırlar. Her ne kadar ticari olarak çok yaygınlaşmasada kapalı çevrim gaz santralleri de mevcuttur (Çubuğuuzun, 2006).

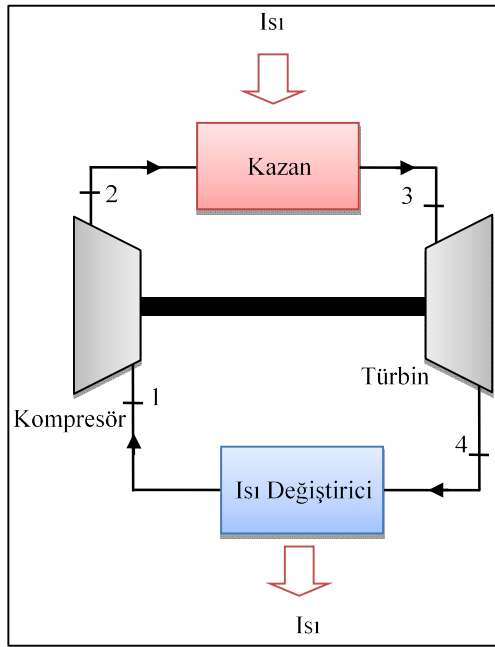
Gaz türbinleri boyut avantajlarıyla birlikte, enerji santrallerinden ulaşım ve askeri araçlara, yüksek hızlı jetlerden helikopterlere, gemilerden tanklara ve lokomotiflere, otomobillerden motosikletlere kadar geniş bir kullanım alanı ve güç spektrumu sağlamaktadırlar. Gaz türbinlerini, çoğu uygulamadaki en güçlü rakibi olan diesel motorlara göre daha çevreci yapan ve güç yoğunluğunu arttıran önemli karakteristikleri yanmanın sürekli ve ortalama bir sıcaklıkta gerçekleşmesidir. Sıcaklıkların düşük olması nedeniyle gaz türbinleri diesel motorlardaki gibi güçlü konstrüksiyonlara ihtiyaç duymamakta ve daha hafif olabilmektedirler. Bunların yanında gaz türbinlerini daha çevreci yapan diğer bir özellik, çalışabildikleri yakıtların çok geniş bir spektrumda olmasıdır (Kayadelen, 2014).

Açık çevrime göre çalışan bir Brayton çevriminde çevre koşullarındaki hava, kompresör tarafından sıkıştırılarak basıncı ve sıcaklığı artar (Şekil 3.3). Yüksek basınçlı hava daha sonra yanma odasına girer ve hava ile beraber yakıt karışımı sabit basınçta yanar. Yanma sonunda oluşan yüksek sıcaklıktaki gazlar türbinden geçerek türbin çarklarını tahrik eder ve mekanik enerji elde edilir. Türbinden basıncı düşürerek çıkan egzoz gazları atmosfere atılır. Çevrim bu şekilde devam eder (Cengel ve Boles, 2006).

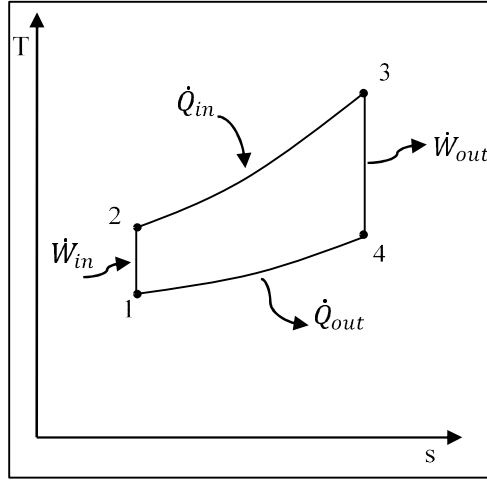


Şekil 3.3. Brayton çevrimi (açık çevrim)

Brayton Çevrimi, yukarıda da bahsedildiği üzere açık bir çevrim olmasına rağmen hesaplamaları kolaylaştırmak için yanma işleminin yerini sabit basınçta bir dış kaynaktan ısı girişi, egzoz işleminin yerini de sabit basınçta çevre havaya ısı atılması işlemi alır ve bu şekilde ideal Brayton çevrimi olarak tanımlanır (Şekil 3.4). Şekilde gösterilen ideal Brayton çevriminin T-s diyagramı ise Şekil 3.5’de gösterilmiştir (Cengel ve Boles, 2006):



Şekil 3.4. İdeal Brayton çevrimi (kapalı çevrim)



Şekil 3.5. İdeal Brayton çevrimi T-s diyagramı

İş akışkanının kapalı bir çevrimde dolaştığı bu ideal çevrim aşağıda sıralanan dört içten tersinir hal değişiminden oluşur.

- 1-2 İzentropik Sıkıştırma
- 2-3 Sabit Basıncıta Isı Girişi
- 3-4 İzentropik Genişleme
- 4-1 Sabit Basıncıta Isı Çıkışı

Nükleer santrallerin riskleri ve fosil yakıt kullanımının neden olduğu çevresel problemler elektrik üretim planlamalarını zorlaştırmaktadır ve bu problemler elektrik üretim maliyetlerine de yansımakta, elektriğin bir enerji taşıyıcısı olarak rekabet gücünü zayıflatmaktadır (Kayadelen, 2014). Bu durumlar karşısında organik akışkanlar ile çalışan ve güneş enerjisi destekli kapalı Brayton çevrimi, enerji üretim alanlarında yeni bir alternatif olabilir.

Kapalı gaz çevrimleri 65-70 yıl önce, buharlı güç santrallerine kıyasla belirli oranda daha yüksek verimde enerji üreterek başarı elde etmişlerdir. Daha sonraları helyumun kullanıldığı yüksek sıcaklıklarda çalışan ve gaz-soğutucu kullanılan santraller, özellikle Avrupa'da ilgi çekmiştir. Günümüzde ise, bazı güneş enerjisi uygulamaları haricinde, kapalı Brayton çevrimi sadece akademik çalışmalarda incelenmektedir. Bunun temel nedeni, modern buhar santrallerine kıyasla, termodinamik ve ekonomik açıdan rekabet gücünün zayıflamış olmasıdır (Angelino ve Invernizzi, 2001).

İlk prototip kapalı gaz çevrimi İsviçre'nin Zürich kentinde inşa edilen AK-36 santralidir. Santralde iş akışkanı olarak hava kullanılmıştır ve ısı enerjisi petrol ile sağlanmaktadır. Türbin giriş sıcaklığı 650 °C, elektrik üretim kapasitesi 2 MW ve verimi ise yaklaşık % 30'dur. Santral biraz karmaşık bir yapıya sahiptir. Hava ile çalışan son kapalı gaz çevrimi ise 1985 yılında inşa edilen 5 MW kapasitesindeki bir santraldir. Daha sonraları, özellikle yüksek sıcaklıklara sahip nükleer kapalı gaz çevrimleri için helyum önerilmiştir. Bunun yanında, her daim, farklı çalışma koşullarına göre farklı akışkanlar da göz önüne alınmış ve incelenmiştir. Bu akışkanlar, helyum (genellikle büyük çaptaki santrallerde), argon, nitrojen, CO<sub>2</sub> ve bazı karışımlardır. Bu akışkanlar ile yapılan tüm kapalı gaz çevrimi uygulamalarında, akışkanlar her zaman ideal gaz durumundadır. Kapalı Brayton çevrimlerinde kullanılan bazı akışkanlar Çizelge 3.1'de verilmiştir (Invernizzi, 2017).

Çizelge 3.1. Kapalı Brayton çevrimlerinde kullanılabilen bazı akışkanlar (Invernizzi, 2017).

Fluid	Kritik sıcaklık (K)	Kritik basınç (bar)	Kritik sıkıştırılabilirlik faktörü	Molekül ağırlığı
Helyum (He)	5.19	2.27	0.301	4.004
Nitrojen (N <sub>2</sub> )	126.2	33.98	0.289	28.014
Hava	132.5	37.7	0.28	28.96
Argon (Ar)	150.86	48.98	0.291	39.948
Etilen (CH <sub>2</sub> =CH <sub>2</sub> )	282.34	50.41	0.282	28.054
Ksenon (Xe)	289.74	58.4	0.286	131.29
Heksafloroetan (CF <sub>3</sub> -CF <sub>3</sub> )	293.04	30.39	0.277	138.12
Karbondiyoksit (CO <sub>2</sub> )	304.12	73.74	0.274	44.01
Etan (CH <sub>3</sub> -CH <sub>3</sub> )	305.32	48.72	0.279	30.07
Sülfür heksaflorid (SF <sub>6</sub> )	318.72	37.6	0.282	164.056

Literatürde kapalı Brayton çevriminin birçok avantajı belirtilmektedir. Aşağıda, en önemli avantajları özetlenmektedir (Anheden, 2000):

1. Geniş uygulama alanı. Elektrik enerjisi üretimi, gemi makineleri, uzay güç sistemleri, denizaltılar ve otobüs ve tren taşımacılığı.
2. Farklı tür ısı enerjisi kaynaklarına kolayca adapte olma. Kömür, odun, biomass, çöpler gibi kirli olarak nitelendirilen yakıtlar, kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan ısı, güneş enerjisi, nükleer ısı kaynakları.



3. Basınçlandırılmış yakıtta gerek yoktur. Yakıt ile iş akışkanı arasında direk temas olmadığından yakıtın basınçlandırılması gerekmez. Bu da sıkıştırma işlemi için tasarruf sağlar.
4. Operasyonel yakıt esnekliği. Kapalı Brayton çevrimi ısı kaynağı kolaylıkla değiştirilebilir.
5. Farklı çalışma akışkanları kullanabilme. Termodinamik ve nakil özellikleri uygun olduktan sonra havadan başka gazlar kullanılabilir. Örneğin, nitrojen, CO<sub>2</sub>, helyum, argon, kripton, xenon.
6. İş akışkanının temiz olması. İş akışkanı kapalı ortamda olduğundan yakıt ile beraber gelebilecek nemden ve yabancı maddelerden korunmuş durumdadır. uzak kalma imkanı vardır. Ayrıca, bu yabancı maddelerin sistem elemanlarına vermesi muhtemel zararların da önüne geçilir.
7. Tüm sistemin basınçlandırılabilmesi. Böylece, türbin, ısı değiştiricisi gibi sistem elemanları daha küçük boyutlarda seçilebilir. Ekipman boyutlarının küçülmesi, yatırım maliyetlerini de düşürecektir. Ayrıca yüksek basınç, iş akışkanının ısı transfer özelliklerini arttırır.
8. Yüksek verimde, kısmi yüklerde çalışabilme. Basınçlandırılmış kapalı çevrimde, enerji üretimi, türbin giriş sıcaklığını oynamak yerine, basıncın düşürülmesiyle kolayca yapılabilir. Bu durumda hacimsel debi sabit kalırken sadece kütleli debi değişir ve böylece sabit türbin giriş sıcaklığı ile geniş güç aralıklarında yüksek aerodinamik performans elde edilebilir.
9. İş akışkanı muhafaza edilir. Bazı durumlarda, iş akışkanının atmosfere salınması çevresel açıdan istenmeyen bir durumdur. Kapalı çevrimlerde, gaz sürekli sistemde muhafaza edilir.

Bununla beraber, yukarıda sayılan avantajlar, yanında mutlaka belli oranda dezavantajlar da getirmektedir. Belirli bir uygulama için seçilen kapalı çevrim gaz türbini, mutlaka aşağıdaki parametreleri göz önüne alınarak ekonomik açıdan da uygun olmalıdır (Anheden, 2000):

- Isıl kaynak, yüksek sıcaklık ısı değiştiricisi ile beraber
- Yüksek basınca ve sıcaklığa dayanıklı sistem elemanları
- Isı değiştiricileri

- İş akışkanı gaz yönetim sistemi

Günümüzde, ise daha çok akademik olarak ilgi duyulan kapalı Brayton çevrimleri üzerine yapılan çalışmalar daha çok düşük sıcaklık uygulamalarından ibarettir. Güneş enerjisi destekli sistemler üzerinde çalışmalar literatürde mevcuttur. Düşük sıcaklık kapalı Brayton çevrimi uygulamaları için özellikle süperkritik akışkan olarak adlandırılan ve kritik sıcaklığı düşük olan akışkanlar üzerine çalışmalar devam etmektedir. Çizelge 3.2’de, bir önceki çizelgeden farklı olarak, son dönemlerde üzerinde çalışmalar yapılan organik iş akışkanlarının özellikleri verilmiştir. Bu akışkanlar, dikkate değer gerçek gaz etkisi göstermektedir ve sadece elektrik üretiminde kullanılabilecekleri gibi elektrik ve ısı üretiminde de kullanılabilirler. Bununla beraber, bu organik akışkanların ısı kararlılık sınırlarından dolayı maksimum çalışma sıcaklıklarını kısıtlamaktadır. Bu akışkanlar içerisinde, yapılan belirli testlere göre, HFC-23, HFC-125 ve HFC-134a 350-400 °C’ye kadar yüksek sıcaklıktan etkilenmemektedirler. Hidrokarbonlar (etan, propan ve bütan) 300–350 °C üzerinde kararlı duramazlar (Invernizzi, 2013).

Çizelge 3.2. Bazı organik akışkanların özellikleri (Invernizzi, 2013)

Fluid	Kritik sıcaklık (°C)	Kritik basınç (bar)	Molekül ağırlığı
Karbon dioksit (CO <sub>2</sub> )	30.97	73.74	44.01
HFC 23 <sup>a</sup>	25.82	48.36	70.014
Etan	32.17	48.72	30.07
Sülfür heksaflorid (SF <sub>6</sub> )	45.57	37.6	146.056
HFC 125 <sup>b</sup>	66.02	36.15	120.022
R 218 <sup>c</sup>	71.95	26.8	188.02
HFC 32 <sup>d</sup>	78.11	58.05	52.024
Propan	96.68	48.72	44.097
HFC 134a <sup>e</sup>	101.11	40.59	102.032
Oktaflorosiklobütan (C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> )	115.22	27.78	200.031
Bütan	151.97	37.96	58.123

<sup>a</sup> Trifluoromethane

<sup>b</sup> 1,1,1,2,2-Pentafluoroethane

<sup>c</sup> Octafluoropropane (C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>)

<sup>d</sup> Difluoromethane

<sup>e</sup> 1,1,1,2-Tetrafluoroethane

Yukarıda verilen akışkanların yüksek sıcaklıklardaki olumsuz davranışları, esasen güneş enerjisi destekli gaz çevrimi için son derece uygun bir avantaja dönüşebilir. Çünkü güneş enerjili sistemlerde, eğer güneş kulesi kullanılmayacaksa, bu sıcaklıklara çıkmak çok zordur ve dolayısıyla güneş enerjisinden düşük sıcaklıklarda

enerji üretimi için yukarıdaki akışkanlar ile kapalı gaz çevrimi uyum içinde kullanılabilir.

### 3.3. Organik Rankine Çevrimi (ORC)

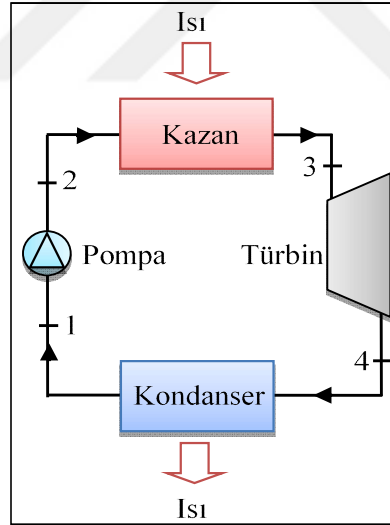
Dünyada elektrik üretiminin büyük bir kısmı buharlı güç santrallerinden sağlanmaktadır. Bundan dolayı ısı veriminde sağlanacak küçük iyileştirmeler dahi yakıt tüketiminde önemli tasarruflar sağlayabilir. Bu nedenle buharlı güç santrallerinin ısı verimini artırmaya ve çevreye daha az zarar vererek bu işi yapma yönünde fikirler ortaya çıkarılmaktadır (Cengel ve Boles, 2006).

Rankine çevrimi adını İskoç bilim adamı William John Macquord Rankine'den almıştır. Rankine çevrimi, termik güç üretim santrallerinde yaygın olarak kullanılan buharla elde edilen enerjiyi açıklamaktadır. Şöyle ki Rankine çevrimi sabit basınç altında bir iş akışkanı aracılığı ile ısı enerjisinin işe dönüştüğü termodinamik bir süreçtir. Akışkan buharlaştırılıp elektrik üreten bir jeneratöre sahip olan türbinden genişletilerek enerji üretilmektedir. Elde edilen güç, bir sıcak ve bir soğuk kaynak arasında oluşan sıcaklık farkına bağlıdır. Sıcaklık farkı ne kadar yüksekse mekanik enerjiden elektrik enerjisine dönüşme verimi daha fazla elde edilebilmektedir. (Anonim 2019c,d). Rankine çevrimi buhar türbinli sistemlerin performanslarını tahmin etmek için kullanılan bir çevrim çeşididir. Rankine çevrimi idealleşmiş bir ısı makinası çevrimidir. Bunun nedeni akışkanın faz değişimi sürerken ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektedir. İdeal Rankine çevriminde pompa ve türbin izentropiktir. Bu durum pompa ve türbinin entropi üretmemesine sebep olacağından iş maksimum olacaktır.

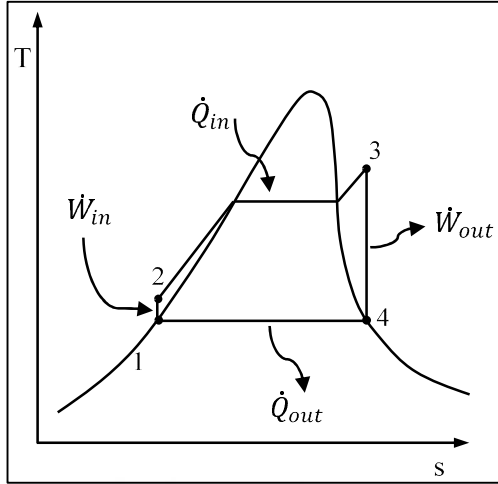
Gerçek Rankine çevriminde ise akışkanın sistemde bir sürtünme kaybı ve çevreye olan bir ısı kaybı vardır. Bu durumda tersinmezlikler oluşturur. Buhar kazanında sisteme ısı verilmesinin temel sebebi bu tersinmezlikler sonucu oluşan ısı kaybını azaltıp türbin çıkış gücünün tersinmezlikler oluşmadan önceki gücüne döndürülmesini sağlamaktır.

İdeal Rankine çevriminde izentropik sıkıştırma yaparken entalpiler eşittir. İzentropik genişleme yaparken de entalpiler eşit kabul edilmektedir. Burdaki amaç pompa ve türbindeki tersinmezlikleri hesap etmemektir. Böylece maximum iş bulunmuş olur. Ayrıca Şekil 3.6'ya bakıldığında 4 noktada akışkan ıslak buhar halinde olacağından kuruluk derecesi kavramı ortaya çıkmaktadır. Bu durum T-s diyagramında da görülmektedir (Şekil 3.7).

Tersinmezlikler göz önüne alınacak olursa akış sürtünmesi çevrim borularında kayıplara neden olacaktır. Bundan dolayı buhar kazandan daha az basınçta çıkar. Yine kayıplardan dolayı türbine kazan çıkışından daha düşük basınçta giriş yapar. Bu kayıpların karşılanabilmesi için suyun pompadan çıkış basıncının idealinkinden bir miktar daha fazla olması gerekmektedir. Bu da daha büyük bir pompa ve pompalama gücü anlamına gelmektedir. Bu durumlar ideal durum ile gerçek durum arasındaki farka neden olmuştur.



Şekil 3.6. İdeal Rankine çevrimi



Şekil 3.7. İdeal Rankine çevrimi T-s diyagramı

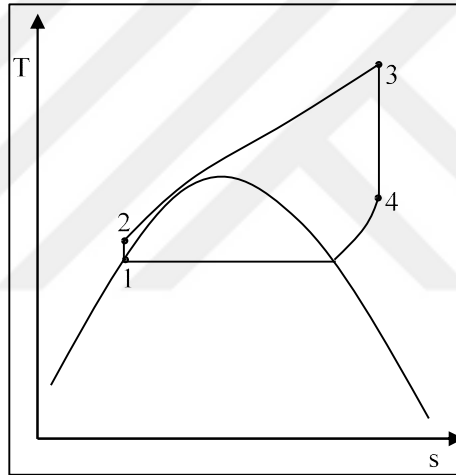
Organik rankine çevrimi (ORC), atık ısıyı elektrığe dönüştüren düşük ve orta sıcaklıktaki ısı kaynaklarının değerlendirildiği sistemlerdendir. Bu teknoloji dünyanın her yerinde başarılı bir şekilde uygulanan Rankine ilkesine dayalıdır. Organik rankine çevrimi ile rankine çevrimi arasındaki temel fark kullanılan akışkan türüdür. ORC sistemlerde organik iş akışkanı kullanılırken, rankine çevriminde su kullanılmaktadır (Bilgiç vd., 2016). Ayrıca organik akışkan suya göre daha düşük sıcaklıkta buharlaşmaktadır. Bundan dolayı ORC'ler Rankine çevrimine göre daha düşük sıcaklıklarda elektrik enerjisi üretmeye olanak sağlamaktadır. ORC teknolojisi, 90° C atık ısı tahliye eden tüm atık ısı sıcaklıkları için uygundur. Atık ısı, farklı süreçlerden kaynaklanabilir;

- Yoğunlaştırıcı güneş enerji sistemleri
- Dizel motorların egzoz gazları
- Endüstriyel süreçteki atık ısı
- Derin jeotermal enerji
- Biyokütle tarafından üretilen sıcaklık ( Ağırkaya 2015; Anonim 2019c ).

Basit bir ORC, ideal rankine çevrimindeki gibi 4 ana elemandan oluşmaktadır. Bunlar pompa, buharlaştırıcı, organik türbin ve yoğuşturucudur. Organik akışkanın öncelikle pompa aracılığı ile basıncı artırılarak ısı değiştiricisine gönderilir. Bu ısı değiştiricisi yenilenebilir herhangi bir enerji kaynağından aldığı ısı enerjisini organik akışkana aktarır. Böylece organik akışkanın mevcut durumu yüksek basınç ve

sıcaklık olmuş olur. Daha sonra mekanik türbine gönderilerek mekanik işe dönüştürülmüş olur. En son olarak yeniden yoğuşturucuya gönderilir ve döngü yeniden başlar.

Süperkritik ORC sistemlerinde ise, organik akışkan kendi kritik sıcaklık noktasının üzerinde bir sıcaklık noktasında çalışır. Çevrim gerçekleşirken süperkritik noktaya ulaşmak için organik akışkan önce türbinde genişler, ısısını atarak yoğuşur ve alt basınç bölgesine ulaşır. Ardından akışkanın basıncı birden artar. Ardından süperkritik noktaya ulaşır. Süperkritik ORC Sistemi T-s diyagramı Şekil 3.8’de gösterilmiştir (Ergün vd., 2016).



Şekil 3.8. Süperkritik ORC sistemi T-s diyagramı

ORC sistemlerinin verimlerinin artışı sağlayan en önemli parametrelerden birisi organik olarak kullanılacak olan akışkanın seçimi olmuştur. Bu akışkanda olması gereken önemli parametreler şu şekilde sıralanabilmektedir:

- Sıfır veya pozitif eğimli doyma eğrisi ( $ds/dt$ ).
- Buharlaşma gizli ısısı.
- Yüksek yoğunluk (sıvı/buhar fazı).
- Yüksek özgül ısı.
- Uygun kritik parametreler (sıcaklık, basınç).
- Kabul edilebilir yoğuşma ve buharlaşma basıncı (>1 bar ve <25 bar).
- İyi ısı transfer özellikleri (düşük viskozite, yüksek termal iletkenlik).

- İyi termal ve kimyasal kararlılık (yüksek sıcaklıklarda sabit olması).
- Malzemelerle uyumlu olması.
- Yüksek termodinamik performans (yüksek verim).
- Güvenlik karakteristiğinin iyi olması (zehirsiz ve yanıcı).
- Düşük çevre etkisi (Düşük ODP, GWP).
- Düşük maliyet ve iyi derecede uygulanabilirlik (Ergün vd., 2016).

### 3.4. İş Akışkanı CO<sub>2</sub>

1980'li yıllardan itibaren yapılan çalışmalar ile beraber, çevre bilincinin artması sonucu dünyanın önde gelen ülkeleri toplanarak Montreal ve Kyoto Protokollerini devreye sokmuşlardır. Bu durum güç çevrim santralleri için de alternatif iş akışkanı arayışlarına sebep olmuştur.

Termal sistemlerde kullanılan iş akışkanlarının termodinamik performansının yanında çevresel etkileri de büyük önem arz etmektedir. Birçok akışkanın çevresel etkilerinden dolayı kısıtlandığı son yıllarda, karbondioksit üstün özelliklerinden dolayı hem soğutma sistemlerinde hem de güç çevrimlerinde kullanılmaya başlanmıştır. CO<sub>2</sub>'nin tercih edilmesindeki başlıca sebepler ise aşağıda verilmiştir:

- Kritik basıncının suyun 1/3 kadar olması yani düşük basınçta kolaylıkla kritik basınca ulaşması,
- İlgili sıcaklık aralığı boyunca bilinen bir kimyasal tepkime göstermemesi,
- Çevreci,
- Sıkıştırılabilir,
- Yanıcı olmayan,
- Ucuz ve bol bulunan bir akışkan olması,
- Yüzey gerilim katsayısı ve buharlaşma entalpisi düşük olması,
- Toksik ve korozif olmaması (Anonim, 2019b).

ODP bir gazın ozon tabakasına verebileceği zararı ifade etmektedir ve bağıl bir değer olarak bulunur. GWP ise CO<sub>2</sub>'in GWP'si 1 kabul edilerek belli zaman sürecinde bir sera gazının çevreye küresel ısınma etkisini CO<sub>2</sub>'e bağıl olarak belirleyen değerdir.

CO<sub>2</sub>'in ozon tüketme potansiyeli sıfırdır (ODP=0) ve küresel ısınmaya doğrudan etkisi çok düşük seviyededir (GWP=1) (Türkkan vd., 2017).

Bazı soğutucu akışkanların ODP ve GWP açısından değerlendirilmesi Çizelge 3.3'te verilmiştir. CO<sub>2</sub>'nin zararlı çevresel etkilerinin diğer gazlara kıyasla oldukça düşük olduğu Çizelge 3.3'ten görülmektedir. Çizelge 3.4 ise bazı soğutucu akışkanların karşılaştırmalı olarak termofiziksel özellikleri verilmiştir. Bu özelliklerde de görüleceği üzere CO<sub>2</sub> akışkanının özellikleri soğutma sistemlerinde ve güç üretim sistemlerinde kullanılmaya çok uygundur.

Çizelge 3.3. Yaygın olarak bilinen soğutucu akışkanların çevresel özellikleri (Türkkan vd., 2017)

Soğutucu Akışkan	Soğutucu Akışkan Sınıfı	ODP	GWP
R 11	CFC	1	4600
R 12	CFC	0.73	10600
R 22	HCFC	0.034	1700
R 134a	HFC	0	1300
R 410a	HFC	0	1980
R 404a	HFC	0	3780
R 407c	HFC	0	1650
R 507a	HFC	0	3850
R 744 (CO <sub>2</sub> )	Doğal akışkan	0	1
R717 (NH <sub>3</sub> )	Doğal akışkan	0	<1

ODP : R11 = 1 kabul edilmiştir.

GWP : CO<sub>2</sub> = 1 kabul edilmiştir.

Çizelge 3.4. Yaygın olarak bilinen soğutucu akışkanların termofiziksel özellikleri (Türkkan vd., 2017)

Soğutucu Akışkan	T <sub>c</sub> (°C)	P <sub>c</sub> (kPa)	Sıvı yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>[a]</sup>	Gaz yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>[b]</sup>	Isıl kapasite (kJ/kg) <sup>[a]</sup>	Hacimsel kapasite (kJ/m <sup>3</sup> ) <sup>[a]</sup>	Isı iletim katsayısı (W/mK) <sup>[a]</sup>
R 134a	101.1	4059	1298.9	13.9	1.3	2774	0.09
R 410a	72.1	4901.2	1174.4	28.8	1.5	6566	0.10
R 404a	72.1	3734.8	1154.8	29.9	1.3	4954	0.07
R 744 <sup>[c]</sup>	30.98	7370.3	934.3	94.2	2.5	22089	0.11
R717 <sup>[c]</sup>	132.3	11333	640.3	3.3	4.4	4193	0.56

<sup>[a]</sup> -1.1 °C 'deki doymuş sıvı

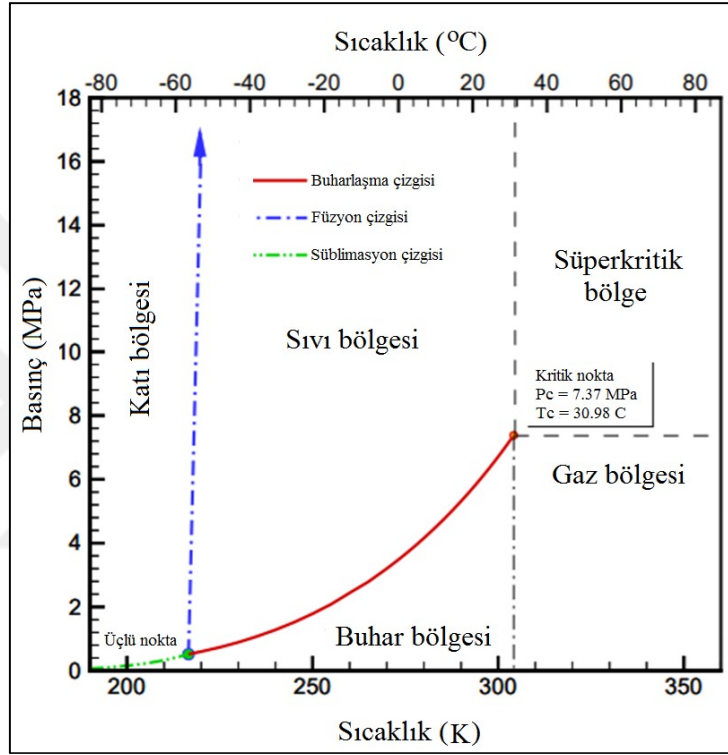
<sup>[b]</sup> -1.1 °C 'deki doymuş buhar

<sup>[c]</sup> R 744 (CO<sub>2</sub>), R717 (NH<sub>3</sub>)

Üçlü nokta adı verilen hal değişim grafiğinde CO<sub>2</sub> akışkanı katı, sıvı ve gaz fazlarında dengede bulunmaktadır (Şekil 3.9). Soğutma uygulamalarında CO<sub>2</sub> akışkanı için üçlü nokta ve kritik nokta önemlidir. Çünkü sistemde katılaşma

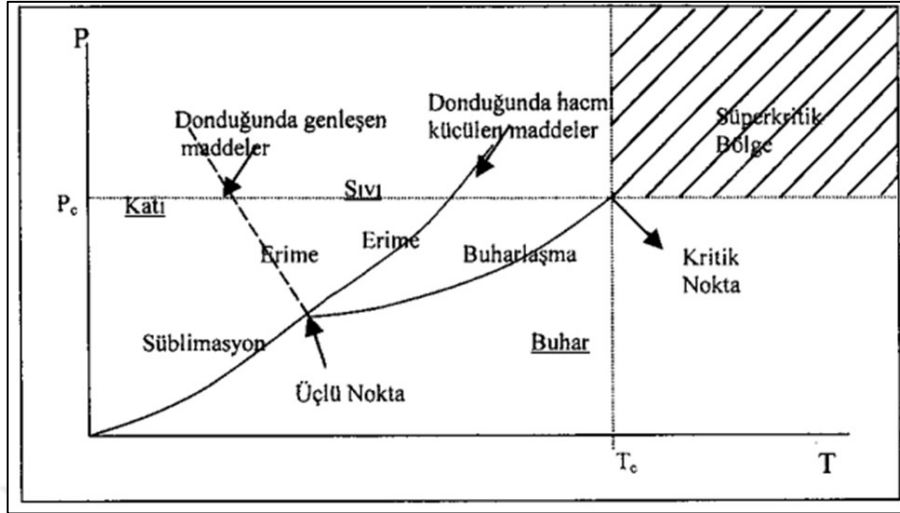


meydana gelebilmekte ve sistem parçaları zarar görebilmektedir. Bu noktalar dikkate alınarak çevrim elemanlarında kullanılacak malzemelerin mukavemetleri ve malzemenin cinsi belirlenmelidir. CO<sub>2</sub> gazı için üçlü nokta basıncı 517.77 kPa ve sıcaklığı -56.56 °C olup sistemin evaporatörü asla bu noktaya yakın çalıştırılmamalıdır (Türkkın vd., 2017).

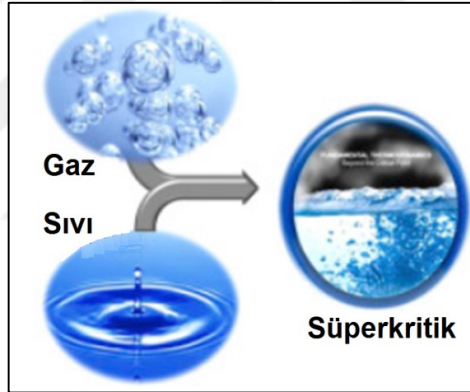


Şekil 3.9. CO<sub>2</sub> faz diyagramı (Garcia, 2003)

Her madde kritik bir sıcaklığa ( $T_c$ ) ve basınca ( $P_c$ ) sahiptir. Maddenin kritik sıcaklık ve basıncı gaz ve sıvı fazlarının bir arada bulunduğu en yüksek sıcaklık ve basınçtır (Şekil 3.10). Madde katı, sıvı, gaz olmak üzere 3 gruba ayrılır ancak maddeye kritik sıcaklık ve basıncın üzerine çıkacağı koşullar uygulandığında süperkritik akışkan olarak adlandırılan farklı bir durum ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.11). Bir süperkritik akışkanın en önemli özelliği basınç ve sıcaklığa bağlı olarak değişen yoğunludur (Çolak ve Tülek, 2003).



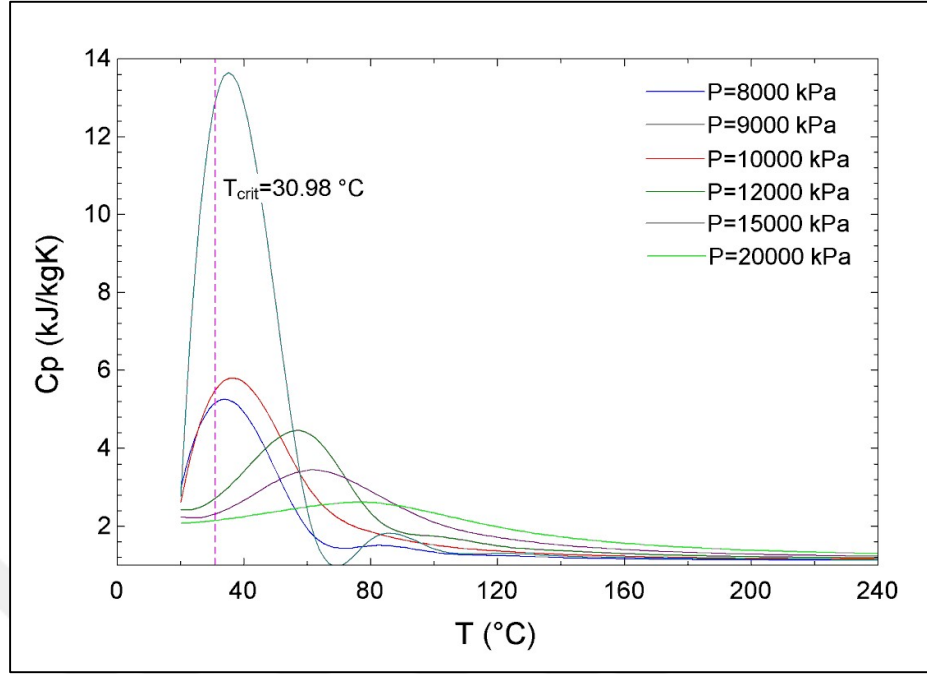
Şekil 3.10. Saf maddeler için basınç-sıcaklık diyagramı, süperkritik faz gösterimi (Çolak ve Tülek, 2003 )



Şekil 3.11. Süperkritik durum gösterimi (Ahn vd., 2015)

Süperkritik CO<sub>2</sub> (S-CO<sub>2</sub>), kritik basınç ve kritik sıcaklık noktasının üzerinde tutulan karbondioksitin akışkan halidir. Bu noktada yoğunluk bir sıvıinkine benzer. Bu durum kompresörün ihtiyaç duyduğu pompalama gücünün önemli ölçüde azalmasını sağlar ve böylece termal enerji-elektrik enerjisi dönüşüm veriminin kayda değer miktarda artması sağlanabilmektedir (Özturan , 2017).

CO<sub>2</sub> akışkanın süperkritik bölgede termofiziksel özellikleri çok karmaşık bir durum gösterir. Özellikle özgül ısı değeri süperkritik nokta yakınlarında sıcaklıkla beraber çok fazla değişim göstermektedir (Şekil 3.12). Bu CO<sub>2</sub>'ye ait özellikler nedeniyle süperkritik CO<sub>2</sub>'nin ısı transfer katsayısı sıvı ve gaz fazındaki değerlere göre oldukça iyidir. Ayrıca süperkritik sıcaklık ve basınç değerlerinin düşük olması nedeniyle bu noktaya kolayca ulaşılacağı için sistem performansı da artacaktır (Niu, vd., 2011).



Şekil 3.12. CO<sub>2</sub> akışkanının özgül ısısının sıcaklıkla değişimi

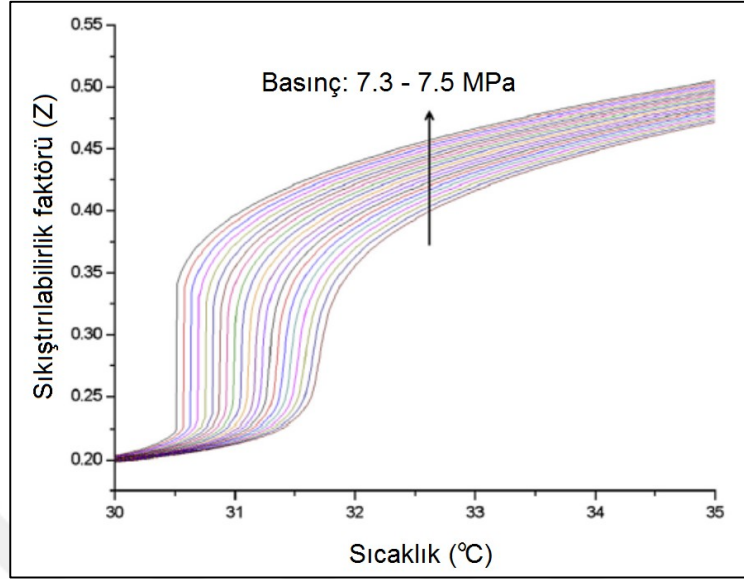
İş akışkanının kritik nokta üzerinde çalıştığı, yani iş akışkanının kritik basınç ve kritik sıcaklık noktasının üzerinde olduğu santraller kritiküstü termik santrallerdir. Bu santrallerde akışkan kritik noktasında buharlaşma gizli ısısı almadan buharlaşacağı için birim iş elde etmek için harcanacak ısı miktarı azalmaktadır. Böylece termik verim yükselecek, çevresel ve yakıt maliyetleri azalacak ve kullanıcılar daha ucuz elektrik maliyetine sahip olacaktır. Kritiküstü termik santrallerde, termik verimi artırmak amacıyla santrallerde kullanılan ara buhar çekme, besleme suyu ısıtıcısı kullanma, ara kızdırma gibi birçok yöntem de kritiküstü basınçta kullanılabilir (Tüysüz, 2013).

Suyun kritik nokta basıncının üstündeki basınçlarda sıcaklığı arttırılsa bile su için bir kaynama noktası olmamakta ve su, yaş buhar fazına geçmeden doğrudan kuru buhar haline dönüşmektedir. Ultra-süperkritik santraller 600 °C ve üstü sıcaklıklarda çalışabilirken süperkritik santrallerde 24.5 MPa basınç ve 540-570 °C sıcaklıklarda kızgın buhar üretilebilmektedir. Kritik-altı buhar çevrimleri ise 15 ile 18 MPa basınç ve 540 ile 565 °C sıcaklığında kızgın buhar üretebilmektedir. Bir kritik-altı santralin ultra-süperkritik koşullara çevrilmesi ile verimde 4 ila 6 % 'lık bir artış sağlanabilmektedir (Şahin, 2012).

Bütün maddeler bir dereceye kadar sıkıştırılabilir. Yani belirli bir madde miktarına uygulanan sıkıştırıcı kuvvetteki bir değişim madde hacminde daima bir değişim meydana getirmektedir. Sıkıştırma esnasında akışkana hiç ısı verilmemişse veya akışkandan alınmamışsa ve sürtünme yoksa bu durum izentropik hacimsel modülü olarak adlandırılır.

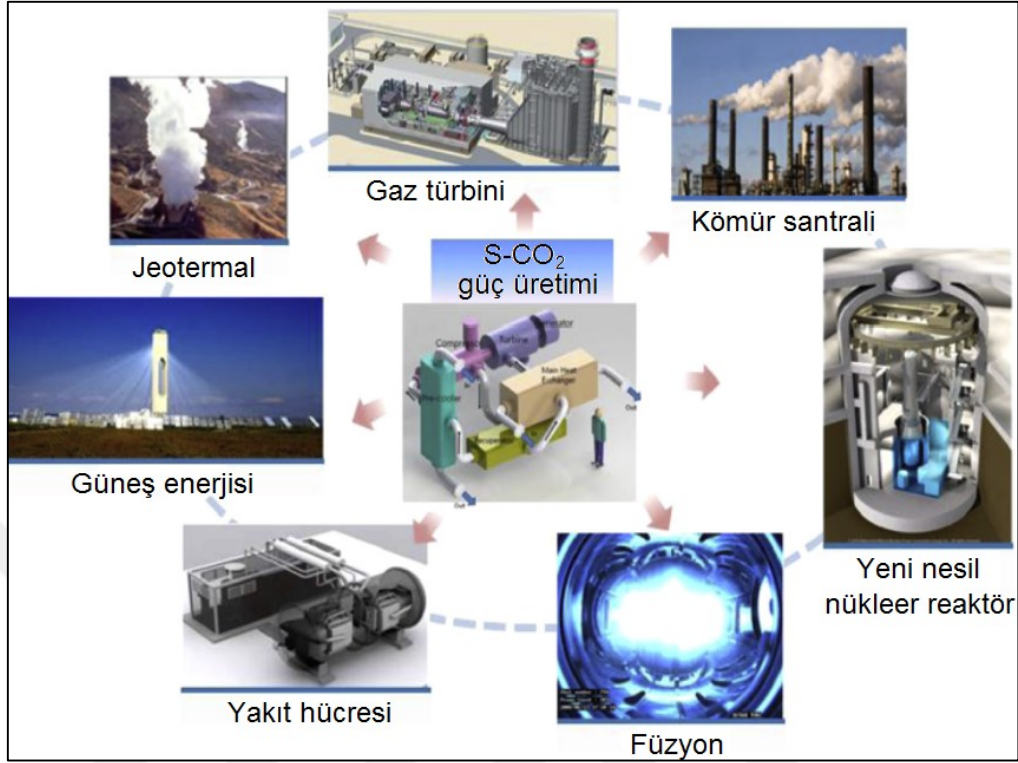
CO<sub>2</sub> için bir diğer önemli parametre sıkıştırılabilirlik oranıdır. Sıkıştırılabilirlik oranı (Z) ideal gaz ile karşılaştırıldığında bir akışkanın moleküler hacimsel oranı olarak tanımlanmaktadır. Yani akışkanın ne kadar ideal bir gaz koşulundan saptığını gösterir. Sıkıştırma oranı, aynı zamanda kompresör çıkış basıncının kompresör giriş basıncına bölümüne eşittir. Sıkıştırma oranı gaz türbini hızıyla artacak veya azalacaktır. Hız ve yoğunluk kompresör boyunca basınç artışında bir etkiye sahiptir. Kompresör giriş sıcaklığı aynı zamanda kompresör boyunca basınç artışı üzerinde bir etkiye sahiptir.

Karbondioksitin sıkıştırılabilirlik oranı 0.2 ile 0.5 arasında değişmektedir (Şekil 3.13). Bu gösteriyor ki CO<sub>2</sub> sıkıştırılabilir ve kompresörün enerji tüketimi azaltılarak, enerji verimliliğinin artması sağlanabilir. Ayrıca S-CO<sub>2</sub> aynı sıcaklıktaki buhar ile karşılaştırıldığında daha az aşındırma yapar. Böylece S-CO<sub>2</sub> var olan potansiyel türbin giriş sıcaklığını artırır. Bu durum da verimde bir miktar artmaya neden olur. Sıvı kritik noktaya yakın sıkıştırılmaz hale gelir.

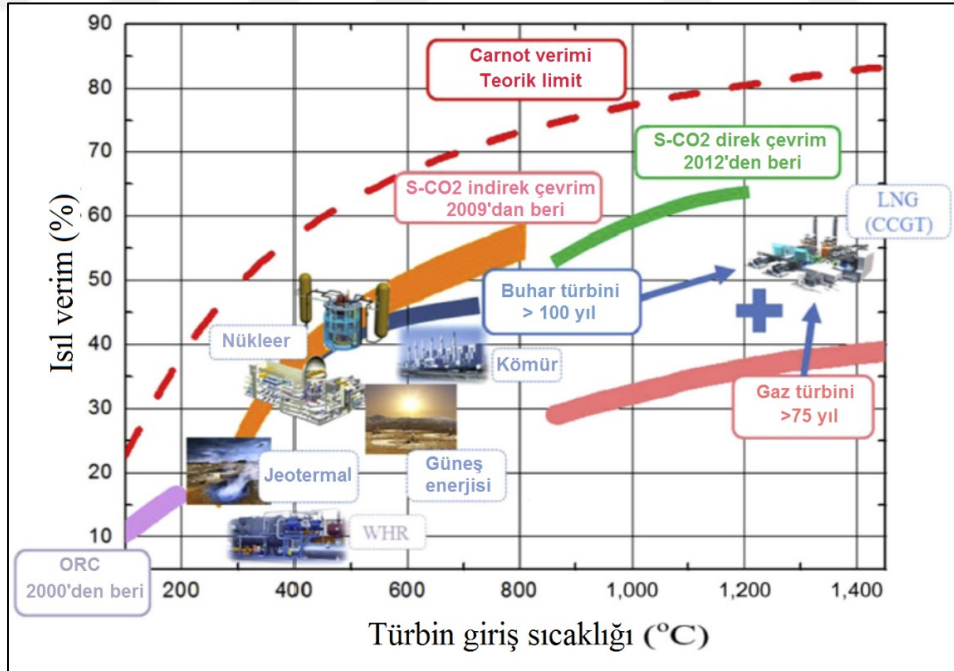


Şekil 3.13. CO<sub>2</sub> sıkıştırılabilirlik faktörü (Lee, vd., 2014)

Moghanlou (2014), bir çalışmasında 500 °C derecenin altındaki atık ısılarından, düşük enerji verimliliğinden dolayı az yararlanıldığından ancak bu düşük dereceli ısılarından faydalanılabileceğinden bahsetmiştir. Brayton çevriminde iş akışkanı olarak süperkritik S-CO<sub>2</sub>'yi güç üretiminde kullanmıştır. Sadece güç üretiminde değil aynı zamanda otomotiv, uçak sanayisi gibi sanayi kollarında da kullanıldığını ifade etmiştir. Atık ısının cam ve metal endüstrisinde 300-400 °C, petrokimya rafineri endüstrisinde 150 °C, yiyecek ve içecek endüstrisinde bu değer 80 °C olarak ifade edilmiştir (Şekil 3.14 ve Şekil 3.15). Endüstrinin bu kadar hızlı geliştiği dünyamızda düşük sıcaklıktaki atık ısı enerji kullanımını verimliliği adına daha kullanılabilir hale getirilmelidir. Bu küresel ısınmanın azalması adına olumlu yönde atılmış bir adım olacaktır.



Şekil 3.14. S-CO<sub>2</sub> güç sisteminin kullanıldığı alanlar (Ahn vd., 2015)



Şekil 3.15. Farklı güç santrallerinin türbin giriş sıcaklığına göre termal verimlerinin gösterimi (Ahn vd., 2015)

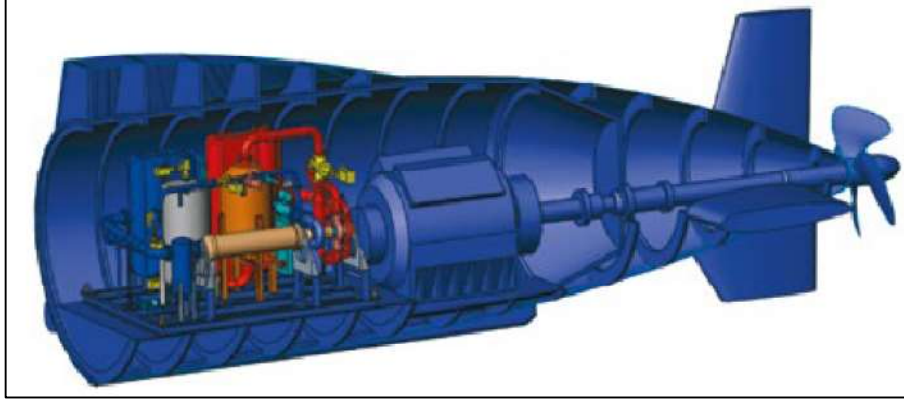
Nükleer santraller enerji dönüşümü için avantaj olmakla beraber nükleer enerji ile eşit güçler elde edeceğimiz ve çevreye hemen hemen hiç zararı olmayan alternatif enerji kaynaklarımızda mevcut olarak bulunmaktadır.

Özturan (Anonim, 2018c) ve birkaç mühendisin sıkıştırılmış karbondioksit kullanan güç üretim sistemi ile ilgili savunma sanayi adına yaptığı çalışmalarda bu güç üretim sistemi hayata geçirildiğinde denizaltıların şinorkelsiz su altında kalma süresinin nükleer denizaltı seviyesine çıkacağı açıklanmıştır. Projedeki güç sistemi çalışma olarak buharlı üretim yapan sistemlere benzerlik göstermektedir ve buhar yerine karbondioksit gazı kullanılmaktadır. Sıcak gaz süper kritik bölge olarak adlandırılan alanda bir kompresör vasıtasıyla sıkıştırılıp sisteme uygun olarak tasarlanmış, bir ısıtıcı vasıtası ile basınçlandırılmış gaz ısıtılıyor. Süper kritik alan olarak ifade edilen bölgede sıcaklık 700 derecenin üzerine kadar çıkartılabiliyor ve ısınmış basınçlı gaz türbin vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüşüyor. Daha sonra elektrik enerjisine dönüştürülerek ana tahrik motoruna iletilmektedir.

Almanya, Fransa ve İsveç gibi ülkelerde üretilen denizaltı modelleri genellikle dizel motorlara sahiptir ve denizaltında kalma süreleri ortalama 5 gündür. Nükleer güç ile çalışan denizaltı teknolojilerini her ülke üretememektedir. Nükleer yakıt kullanan sistemlere eşdeğer sıkıştırılmış karbondioksit kullanan güç üretim sistemi ise bu noktada alternatif güç enerjisi olarak avantaj sağlamaktadır. Karbondioksit gazı sıkıştırılarak çok büyük güçlerin elde edilmesine sebep olmaktadır. Sistem parça boyut bazında kıyaslandığında ise normal motor ve güç sistemlerine göre 25 kat daha küçük olduğu açıklamalarında yaptıkları deneyleri dayanak göstererek ifade etmişlerdir (Şekil 3.16). Bu da sistemin devreye alınma süresini büyük boyutlara kıyasla daha da azaltmaktadır.

Su altındaki ses olarak ise dizel motorun sesi 2 bin km'den duyulurken karbondioksitin yakıt olarak kullanıldığı sistem 100 km öteden ancak duyulabilmektedir. Bu durum karbondioksit gazını yalıtım özelliğinin gelişmiş olduğunu ortaya koymaktadır. Nükleer yakıtlı denizaltılar ile kıyaslandığında ise nükleer yakıtlı denizaltı maliyetine göre S-CO<sub>2</sub> sıkıştırma ile yapılan denizaltıların maliyeti daha az olarak hesap edilen arge çalışmaları yapılmıştır (Anonim, 2018c).

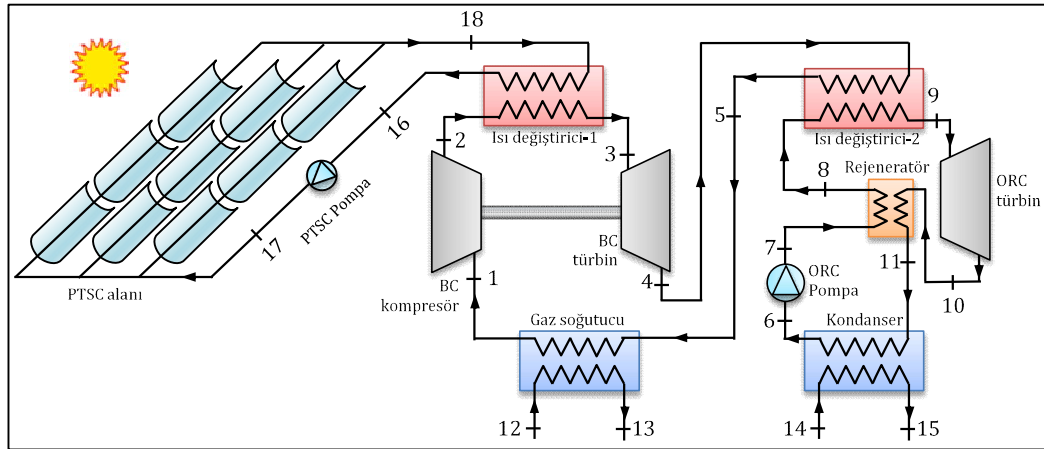




Şekil 3.16. Denizaltı ekipman bölümü (Özturan, 2017)

### 3.5. Güneş Enerjisi Destekli CO<sub>2</sub> ile Çalışan Birleşik Güç Sistemi

Birleşik güç çevrim santrallerinde amaç atık ısıdan olduğunca optimum şartlarda faydalanıp bunu verime yansıtabilmektir. Şekil 3.17’de birleşik güç çevrim santrali tasarlanmış ve bunların termodinamik analizi yapılmıştır. Güneş enerjisi sisteminden (PTSC) elde edilen ısının Brayton çevrimine ısı değiştirici-1 ile geçişi sağlanmıştır. Burada Brayton çevrimine verilen ısı kompresörde basıncın ve sıcaklığın artmasıyla artan ısı, miktarını PTSC sisteminden aktarılan ısı ile daha da artırmıştır. Böylece türbine güç üretimi için girecek olan akışkanın sıcaklığını artırmış dolayısı ile Brayton çevriminden tek başına elde edilebilecek verimin üstünde bir verim elde edilmiştir. Brayton Çevrimi veriminin artması sistem veriminin artmasını da sağlamaktadır. Kompresörde sıkıştırılan gaz-hava karışımı, kazandaki gazlar, gaz türbininde genişleyerek iş üretmektedirler.



Şekil 3.17. Birleşik güç çevrimi



Brayton çevriminin türbininden çıkan atık ısı ısı değiştirici-2 yardımıyla ORC sisteminin türbinine giren ısı miktarının artmasını sağlamıştır. Bu durum da türbin çarklarının bir miktar daha hızlı dönmesini sağlamış ve üretilen güç miktarını artırmıştır bu da sistemin veriminin artmasına sebep olmuştur. Böylece atık ısıların hem çevreye olan zararı bir miktar artırılmış olup hem de çevrimde kullanılarak sistemin enerji verimliliği optimum koşullara çıkartılmıştır. Sistemde ısı değiştiricilerinden aktarılan ısı ekstra bir yakıt yakmadan ek iş sağlamaya, türbin verimlerinin ve güç üretiminin artmasına sebep olmaktadır.

Şekil 3.17'deki birleşik çevrimli güç santralının PTSC alanı olarak adlandırılan parabolik oluklu güneş enerji santralinde Therminol VP1 sentetik ısı tranfer akışkanı kullanılmıştır. Geriye kalan bütün çevrimde ise süperkritik karbondioksitin sıvı ve gaz hallerinden faydalanılmıştır. Brayton çevrimindeki kompresör S-CO<sub>2</sub> izentropik olarak sıkıştırarak basıncının ve sıcaklığının artmasını sağlamıştır. Kompresörden çıkan ısı enerjisine, PTSC sisteminden gelen enerji sabit basınç altında eklenerek sıcaklığı artırmış buna bağlı olarakta ısı değiştirici-1'den çıkacak olan enerjinin artışı sağlanmıştır. Türbine kendi kapasitesinin üstünde bir enerji girişi olmuş, izentropik olarak genişlemiş ve mekanik enerji elektrik enerjisine dönüşmüştür. Enerji üretimi Brayton çevriminde gerçekleştikten sonra atık ısı ORC çevriminin türbinine gidecek olan enerjiyi artırmak üzere ısı değiştiricisi-2'ye gönderilir. Pompada izentropik olarak sıkıştırılan S-CO<sub>2</sub>'nin sıcaklığı özgül hacminde meydana gelen azalma nedeniyle bir miktar artmıştır. Rejeneratör'e ORC türbini atık ısılarından gelen enerji ile pompadan gelen enerji ısıyı bir miktar artırılmıştır. Pompadan gelen enerji ile Brayton çevrimi atık ısılarından gelen enerji birleşerek ORC türbinine gelmeden önce kızgın buhar haline gelmiş ve ORC türbini izentropik olarak genişleyerek elektrik enerjisi üretimi gerçekleşmiştir. Rejeneratör de kullanıldıktan sonra geriye kalan atık ısı kondansere gönderilerek izentropik olarak soğuk iş akışkanının ısıtılması sağlanmıştır. Aynı durum gaz soğutucuya gelen atık ısı içinde geçerlidir. Kondanser tarafından sıvı hale getirilen S-CO<sub>2</sub> tekrardan pompaya sabit sıcaklıkta gönderilir.

### 3.6. Modelleme Denklemleri

Termodinamiğin 1. Yasası deneysel gözlemlere dayanarak enerjinin var veya yok edilemeyeceğini sadece bir biçimden diğerine dönüşebileceğini ispatlamaktadır. Bu yasanın diğer adı enerjinin korunumu ilkesidir. 19. yy.da Joule tarafından yapılan deneylere aykırı bir sonuç bulunamadığı için Termodinamiğin 1. Yasası olarak adlandırılır. Bu yasa enerjinin niceliği ile ilgilenmektedir (Cengel ve Boles, 2006).

Kütlenin korunumu yasasından ;

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (3.1)$$

Enerjinin Korunumu İlkesine Göre ;

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} \quad (3.2)$$

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_{in} \left( h_{in} + \frac{V_{in}^2}{2} + gz_{in} \right) = \dot{W} + \sum \dot{m}_{out} \left( h_{out} + \frac{V_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) \quad (3.3)$$

Termodinamiğin ikinci yasaı enerjinin niceliği olduğu kadar niteliğinin de olduğunu öne sürer. Bu durumdan dolayı ekserji kavramı ortaya çıkmıştır. Bir sistem ne kadar çok enerji üretirse üretsin yararlanılabileceği ölçüde verimlidir. Geriye kalan enerji ekserjik olarak yıkım kabul edilmektedir.

Sistemin Ekserji Dengesi :

$$\sum \dot{E}x_{in} = \sum \dot{E}x_{out} + \sum \dot{E}x_{dest} \quad (3.4)$$

$$\dot{E}x_Q - \dot{E}x_W = \sum \dot{m}_{out} e_{out} - \sum \dot{m}_{in} e_{in} + \dot{E}x_{dest} \quad (3.5)$$

$$\dot{E}x_{dest} = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (3.6)$$

$$\dot{E}x_Q = \dot{Q} \left( \frac{T - T_0}{T} \right) \quad (3.7)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (3.8)$$

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3.9)$$

Burada;  $\dot{E}x_Q$  ısı ekserjisini,  $\dot{E}x_{dest}$  ekserji yıkımını,  $\dot{E}x_W$  iş ekserjisini,  $T_0$  referans durum sıcaklığını,  $e$  spesifik ekserji (akış ekserjisi, termomekaniksel ekserji),  $\dot{S}_{gen}$  entropi üretimini ifade etmektedir.

PTSC Sisteminde Oluşan Enerji Dengeleri (Singh ve Mishra, 2018);

$$\dot{Q}_u = F_R [SA_a - A_r U_L (T_{in} - T_0)] \quad (3.10)$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (3.11)$$

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_r U_L} \left[ 1 - \exp \left( \frac{-A_r U_L F'}{\dot{m} c_p} \right) \right] \quad (3.12)$$

Burada  $\dot{Q}_u$  kullanılabilir enerjiyi,  $F_R$  ısı kayıp faktörü,  $S$  güneş ışınım şiddetini,  $A_a$  gölgelenmemiş toplam alanı,  $A_r$  alıcı alanını,  $U_L$  kolektörün ısı kayıp katsayısını,  $\dot{m}$  terminol kütleli debisini ifade etmektedir.

$$F' = \frac{U_0}{U_L} \quad (3.13)$$

Burada  $F'$  kolektör verim faktörü,  $U_0$  toplam ısı transfer katsayısı,  $U_L$  kolektörün ısı kayıp katsayısı aşağıdaki eşitlikten bulunur:

$$U_L = \left[ \frac{A_r}{(h_{c,c-a} + h_{r,c-a}) A_g} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (3.14)$$

Burada  $A_g$  kolektör cam alanı olarak ifade edilmiştir.

$$h_{c,c-a} = \frac{Nu_{air}k_{air}}{D_g} \quad (3.15)$$

Burada  $h_{c,c-a}$  PTSC tüpünün iç kısmından dışarıya olan taşınım,  $h_{r,c-a}$  parabolik kolektör tüpünden havaya olan ışıınım miktarını göstermektedir.

$$0.1 < Re < 1000 \text{ ise ; } Nu_{air} = 0.4 + 0.54Re^{0.52} \quad (3.16)$$

$$1000 < Re < 50000 \text{ ise ; } Nu_{air} = 0.3 + Re^{0.6} \quad (3.17)$$

Burada Re Reynold Sayısı, Nu Nusselt sayısı, k termal iletkenlik katsayısını ifade etmektedir.

$$h_{r,c-a} = \varepsilon_g \sigma (T_g + T_a)(T_g^2 + T_a^2) \quad (3.18)$$

$$h_{r,r-c} = \frac{\sigma(T_r + T_g)(T_r^2 + T_g^2)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{A_r}{A_g} \left( \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)} \quad (3.19)$$

$$T_g = \frac{A_r h_{r,r-c} + A_g (h_{r,c-a} + h_w) T_a}{A_r h_{r,r-c} + A_g (h_{r,c-a} + h_w)} \quad (3.20)$$

Burada  $\varepsilon_r$  alıcı yayılım değeri,  $\varepsilon_g$  cam örtü yayılım değeri,  $T_g$  örtü sıcaklığı,  $\sigma$  Stefan Boltzman sabitini belirtmektedir.

$$U_0 = \left[ \frac{1}{U_L} + \frac{D_0}{h_{fi} D_i} + \frac{D_0 \ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right)}{2k_{tube}} \right]^{-1} \quad (3.21)$$

Burada  $h_{fi}$  akışkanın ısı transfer katsayısı,  $D_i$  kolektör tüpünün iç çapı,  $D_0$  kolektör tüpünün dış çapı,  $k$  tüp termal iletim katsayısını,  $U_0$  tüm ısı transfer katsayıları toplamını ifade etmektedir.

$$h_{fi} = \frac{Nu_{fi} k_{fi}}{D_i} \quad (3.22)$$

$$Re > 2300 \text{ ise } Nu_{fi} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3.23)$$

$$Re < 2300 \text{ ise } Nu_{fi} = 4.364 \quad (3.24)$$

$$\dot{E}x_{solar} = SA_a \left( 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_0}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_0}{T_{sun}} \right) \right) \quad (3.25)$$

Burada  $\dot{E}x_{solar}$  güneşten gelen maximum yararlı işi ifade etmektedir ve  $T_{sun}=5739$  K'dir (Tiwari, 2002).

$$\dot{E}x_0 = \frac{\dot{Q}_u}{T_{18} - T_{17}} \left[ (T_{18} - T_{17}) - \left( T_0 \ln \frac{T_{18}}{T_{17}} \right) \right] \quad (3.26)$$

Burada  $\dot{E}x_0$  PTSC sisteminin iş akışkanının brayton çevrimine aktardığı enerjiyi ifade etmektedir(Sahoo vd., 2016).

$$\eta = \frac{\dot{E}_{out}}{\dot{E}_{in}} \quad (3.27)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} = \frac{\dot{E}x_{dest}}{\dot{E}x_{in}} \quad (3.28)$$

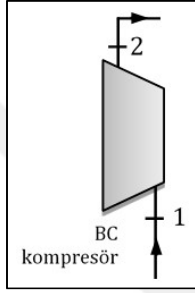
$$\eta_{PTSC} = \frac{\dot{E}x_0}{\dot{E}x_{solar}} \quad (3.29)$$

Burada  $\eta$  enerji verimini,  $\eta_{ex}$  ekserji verimini,  $\eta_{PTSC}$  PTSC sistem verimini ifade etmektedir.

### 3.7. Güneş Enerjisi Destekli Birleşik Sistem Termodinamik Analizi

Bu bölümde, daha önce verilen enerji ve ekserji denge denklemleri, birleşik güç üretim sisteminin tüm elemanlarına uygulanmıştır. Her bir sistem elemanı için kütle dengesi, enerji dengesi, ekserji dengesi ve entropi dengesi aşağıda verilmiştir.

#### *Kompresör*



Kütle dengesi:

$$\dot{m}_B = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (3.30)$$

Enerji dengesi:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_{C,Brayton} = \dot{m}_2 h_2 \quad (3.31)$$

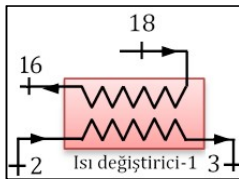
Ekserji dengesi:

$$\dot{m}_1 e_{x,1} + \dot{W}_{C,Brayton} = \dot{m}_2 e_{x,2} + \dot{E}x_{dest,C,Brayton} \quad (3.32)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{m}_1 s_1 + \dot{S}_{gen,C,Brayton} = \dot{m}_2 s_2 \quad (3.33)$$

#### *Isı Değiştirici-1*



Kütle dengesi:

$$\dot{m}_{\text{therminol}} = \dot{m}_{16} = \dot{m}_{18} \quad (3.34)$$

Enerji dengesi:

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{18} h_{18} = \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_3 h_3 \quad (3.35)$$

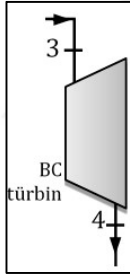
Ekserji dengesi:

$$\dot{m}_{18} e_{x,18} + \dot{m}_2 e_{x,2} = \dot{m}_{16} e_{x,16} + \dot{m}_3 e_{x,3} + \dot{E}x_{\text{dest,HEX1}} \quad (3.36)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{m}_{18} s_{18} + \dot{m}_2 s_2 + \dot{S}_{\text{gen,HEX1}} = \dot{m}_{16} s_{16} + \dot{m}_3 s_3 \quad (3.37)$$

### **BC Türbin**



Kütle dengesi:

$$\dot{m}_B = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (3.38)$$

Enerji dengesi:

$$\dot{m}_3 h_3 + \dot{W}_{\text{T,Brayton}} = \dot{m}_4 h_4 \quad (3.39)$$

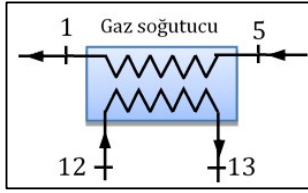
Ekserji dengesi:

$$\dot{m}_3 e_{x,3} + \dot{W}_{\text{T,BC}} = \dot{m}_4 e_{x,4} + \dot{E}x_{\text{dest,T,BC}} \quad (3.40)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{m}_3 s_3 + \dot{S}_{\text{gen,T,BC}} = \dot{m}_4 s_4 \quad (3.41)$$

### Gaz soğutucu



Kütle dengesi:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_5 \quad (3.42)$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \quad (3.43)$$

Enerji dengesi:

$$\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{13} h_{13} \quad (3.44)$$

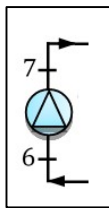
Ekserji dengesi:

$$\dot{m}_5 e_{x,5} + \dot{m}_{12} e_{x,12} = \dot{m}_1 e_{x,1} + \dot{m}_{13} e_{x,13} + \dot{E}_{x,dest,GasCooling} \quad (3.45)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_{12} s_{12} + \dot{S}_{gen,GasCooling} = \dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_{13} s_{13} \quad (3.46)$$

### ORC Pompa



Kütle dengesi:

$$\dot{m}_{ORC} = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad (3.47)$$

Enerji dengesi:

$$\dot{m}_6 h_6 + \dot{W}_{P,ORC} = \dot{m}_7 h_7 \quad (3.48)$$



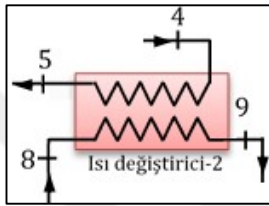
Ekserji dengesi:

$$\dot{m}_6 e_{x,6} + \dot{W}_{P,ORC} = \dot{m}_4 e_{x,4} + \dot{E}x_{dest,P,ORC} \quad (3.49)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{m}_6 s_6 + \dot{S}_{gen,P,ORC} = \dot{m}_7 s_7 \quad (3.50)$$

### *Isı Değiştirici-2*



Kütle dengesi:

$$\dot{m}_B = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (3.51)$$

$$\dot{m}_{ORC} = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (3.52)$$

Enerji dengesi:

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_9 h_9 \quad (3.53)$$

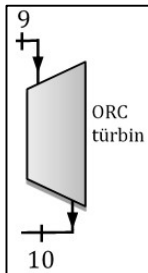
Ekserji dengesi:

$$\dot{m}_4 e_{x,4} + \dot{m}_8 e_{x,8} = \dot{m}_5 e_{x,5} + \dot{m}_9 e_{x,9} + \dot{E}x_{dest,HEX2} \quad (3.54)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{m}_4 s_4 + \dot{m}_8 s_8 + \dot{S}_{gen,HEX2} = \dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_9 s_9 \quad (3.55)$$

### *ORC Türbin*



Kütle dengesi:

$$\dot{m}_{\text{ORC}} = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (3.56)$$

Enerji dengesi:

$$\dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{W}_{\text{T,ORC}} \quad (3.57)$$

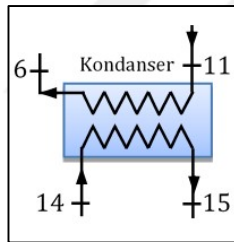
Ekserji dengesi:

$$\dot{m}_9 e_{x,9} + \dot{W}_{\text{T,ORC}} = \dot{m}_{10} e_{x,10} + \dot{E}x_{\text{dest,T,ORC}} \quad (3.58)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{\text{gen,T,ORC}} = \dot{m}_{10} s_{10} \quad (3.59)$$

### **Kondanser**



Kütle dengesi:

$$\dot{m}_{\text{ORC}} = \dot{m}_6 = \dot{m}_{11} \quad (3.60)$$

$$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{15} \quad (3.61)$$

Enerji dengesi:

$$\dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{15} h_{15} \quad (3.62)$$

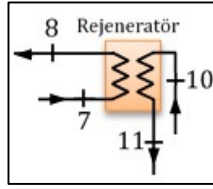
Ekserji dengesi:

$$\dot{m}_{11} e_{x,11} + \dot{m}_{14} e_{x,14} = \dot{m}_6 e_{x,6} + \dot{m}_{11} e_{x,11} + \dot{E}x_{\text{dest,cond}} \quad (3.63)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{m}_{11} s_{11} + \dot{m}_{14} s_{14} + \dot{S}_{\text{gen,cond}} = \dot{m}_6 s_6 + \dot{m}_{11} s_{11} \quad (3.64)$$

### Rejeneratör



Kütle dengesi:

$$\dot{m}_{\text{ORC}} = \dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \quad (3.65)$$

Enerji dengesi:

$$\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{11} h_{11} \quad (3.66)$$

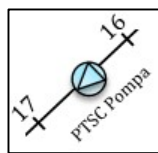
Ekserji dengesi:

$$\dot{m}_7 e_{x,7} + \dot{m}_{10} e_{x,10} = \dot{m}_8 e_{x,8} + \dot{m}_{11} e_{x,11} + \dot{E}_{x,\text{dest,Rej}} \quad (3.67)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_{10} s_{10} + \dot{S}_{\text{gen,Rej}} = \dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_{11} s_{11} \quad (3.68)$$

### PTSC Pompa



Kütle dengesi:

$$\dot{m}_{\text{Therminol}} = \dot{m}_{16} = \dot{m}_{17} \quad (3.69)$$

Enerji dengesi:

$$\dot{m}_{16} h_{16} + \dot{W}_{\text{P,PTSC}} = \dot{m}_{17} h_{17} \quad (3.70)$$

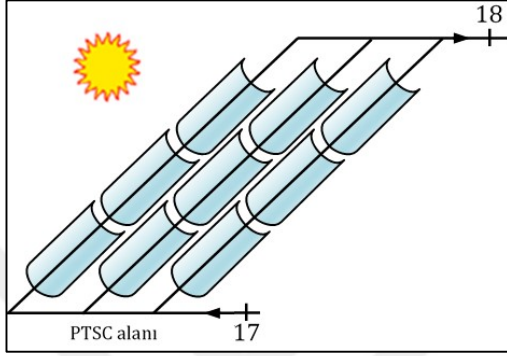
Ekserji dengesi:

$$\dot{m}_{16} e_{x,16} + \dot{W}_{\text{P,PTSC}} = \dot{m}_{17} e_{x,17} + \dot{E}_{x,\text{dest,P,PTSC}} \quad (3.71)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{m}_{16}s_{16} + \dot{S}_{gen,P,PTSC} = \dot{m}_{17}s_{17} \quad (3.72)$$

**PTSC**



Kütle dengesi:

$$\dot{m}_{Therminol} = \dot{m}_{17} = \dot{m}_{18} \quad (3.73)$$

Enerji dengesi:

$$\dot{m}_{17}h_{17} + \dot{Q}_u = \dot{m}_{18}h_{18} \quad (3.74)$$

Ekserji dengesi:

$$\dot{m}_{17}e_{x,17} + \dot{E}x_{solar} = \dot{m}_{18}e_{x,18} + \dot{E}x_{dest,PTSC} \quad (3.75)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{m}_{17}s_{17} + \dot{S}_{gen,PTSC} = \dot{m}_{18}s_{18} \quad (3.76)$$

Yukarıda elde edilen denge denklemleri kullanılarak her bir sistem elemanının kapasitesi aşağıda çıkarılmıştır.

$$\dot{Q}_{HEX1} = \dot{Q}_U \quad (3.77)$$

$$\dot{Q}_{HEX1} = \dot{m}_B(h_3 - h_2) \quad (3.78)$$

Burada  $\dot{Q}_{HEX1}$  brayton çevrimine giren ısı enerjisini belirtmektedir.

$$\dot{W}_{T,BC} = \dot{m}_B(h_3 - h_4) \quad (3.79)$$

Burada  $\dot{W}_{T,BC}$  brayton çevriminin türbin gücünü belirtmektedir.

$$\dot{Q}_{out,BC} = \dot{m}_B(h_5 - h_1) \quad (3.80)$$

Burada  $\dot{Q}_{out,BC}$  brayton çevriminden çıkan ısı enerjisini belirtmektedir.

$$\dot{W}_{C,BC} = \dot{m}_B(h_2 - h_1) \quad (3.81)$$

Burada  $\dot{W}_{C,BC}$  brayton çevrimi kompresör işini belirtmektedir.

$$\dot{W}_{Net,BC} = \dot{W}_{T,BC} - \dot{W}_{C,BC} \quad (3.82)$$

Burada  $\dot{W}_{Net,BC}$  Brayton çevrimindeki net işi ifade etmektedir.

$$\eta_{th,BC} = \frac{\dot{W}_{Net,BC}}{\dot{Q}_{in,BC}} \quad (3.83)$$

Burada  $\eta_{th,Brayton}$  brayton çevrimi verimini ifade etmektedir.

$$\dot{W}_{P,ORC} = \dot{m}_R(h_7 - h_6) \quad (3.84)$$

Burada  $\dot{W}_{P,ORC}$  ORC sisteminin pompa gücünü ifade etmektedir.

$$\dot{Q}_{Rej} = \dot{m}_R(h_8 - h_7) \quad (3.85)$$

$$\dot{Q}_{HEX2} = \dot{m}_B(h_4 - h_5) \quad (3.86)$$

Burada  $\dot{Q}_{Rej}$  ORC çevriminden kazanılan ısı enerjisi miktarını,  $\dot{Q}_{HEX2}$  ise brayton çevriminden aktarılan ısı enerjisi miktarını ifade etmektedir.

$$\dot{W}_{T,ORC} = \dot{m}_R(h_9 - h_{10}) \quad (3.87)$$

Burada  $\dot{W}_{T,ORC}$  ORC sisteminin türbin gücünü ifade etmektedir.

$$\dot{Q}_{out,ORC} = \dot{m}_R(h_{11} - h_6) \quad (3.88)$$

Burada  $\dot{Q}_{out,ORC}$  ORC sisteminde kondanserden çıkan ısı miktarını ifade etmektedir.

$$\dot{W}_{Net,ORC} = \dot{W}_{T,ORC} - \dot{W}_{P,ORC} \quad (3.89)$$

Burada  $\dot{W}_{net,ORC}$  ORC sisteminin net işini ifade etmektedir.

Rejeneratör enerji dengesi için etkinlik değeri aşağıda verilmiştir;

$$\varepsilon_{Rej} = \frac{T[10]-T[11]}{T[10]-T[7]} \quad (3.90)$$

Burada  $\varepsilon_{Rej}$  ORC sistemindeki rejeneratörün etkinlik sayısını ifade etmektedir.

$$\eta_{th,ORC} = \frac{\dot{W}_{net,ORC}}{\dot{Q}_{HEX}} \quad (3.91)$$

Burada  $\eta_{th,ORC}$  ORC sistemindeki ısı verimi ifade etmektedir.

$$\eta_{toplam} = \frac{\dot{W}_{Net,BC} + \dot{W}_{Net,ORC}}{\dot{Q}_{HEX1}} \quad (3.92)$$

Sistemin toplam enerji verimi  $\eta_{toplam}$  ifade edilmiştir.

Ayrıca türbin, pompa ve kompresör için izentropik verim değerleri aşağıda belirtilmiştir:

$$\eta_{is,C,BC} = \frac{h_{2,is} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (3.93)$$

$$\eta_{is,T,BC} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,is}} \quad (3.94)$$

$$\eta_{is,P,ORC} = \frac{h_{7,is} - h_6}{h_7 - h_6} \quad (3.95)$$

$$\eta_{is,T,ORC} = \frac{h_9 - h_{10}}{h_9 - h_{10,is}} \quad (3.96)$$

Yukarıdaki isentropik verim ifadelerinde,  $h_{2,is}$ ,  $h_{4,is}$ ,  $h_{7,is}$  ve  $h_{10,is}$  ifadeleri, izentropik durum için ilgili noktalarda özgül entalpiyi ifade etmektedir.



#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Güneş Enerji destekli güç üretim santrali güneş enerji santrali, Brayton ve Organik Rankine çevriminden oluşmaktadır. Birleşik çevrimli güç üretim sisteminin verimi sadece güneş enerjisinin veya Brayton ve Rankine Çevrimlerinin ayrı ayrı ele alınan verimlerine göre daha yüksektir. Sistem veriminin ekstra yakıt yakmadan temiz bir enerji olan güneş enerjisi ve Brayton ve Organik Rankine Çevrimlerinin türbinlerinden çıkan atık ısı ile artırılmasının sağlanması çevre kirliliğinin azalmasına etken olmakla birlikte ekonomik olarak yakıt tasarrufu sağlamaktadır.

Yapılan analizlerde, öncelikle güneş ışınımı değeri  $800 \text{ W/m}^2$  alınmış ve birleşik güç üretim sisteminin tüm noktalarının özellikleri belirlenmiştir. Analizlerde, Brayton çevrimi  $\text{CO}_2$  debisi  $1.5 \text{ kg/s}$ , Rankine çevrimi  $\text{CO}_2$  debisi  $1.6 \text{ kg/s}$ , soğutma suyu debisi  $6 \text{ kg/s}$ , kollektörlerde dolaşan ısı transferi akışkanı debisi  $1.6 \text{ kg/s}$ , toplam kollektör uzunluğu ise  $200 \text{ m}$  olarak alınmıştır. Ayrıca, kabul edilen diğer parametreler Şe Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Analizlerde kabul edilen değerler

Sistem Elemanı	İsentropik verim $\eta_{is}$	Etkinlik değeri $\epsilon$
PTSC Cam Örtü		0.87
PTSC Alıcı		0.85
REC		0.8
HEX		0.85
BC pompa	0.93	
BC türbin	0.9	
ORC pompa	0.93	
ORC türbin	0.9	

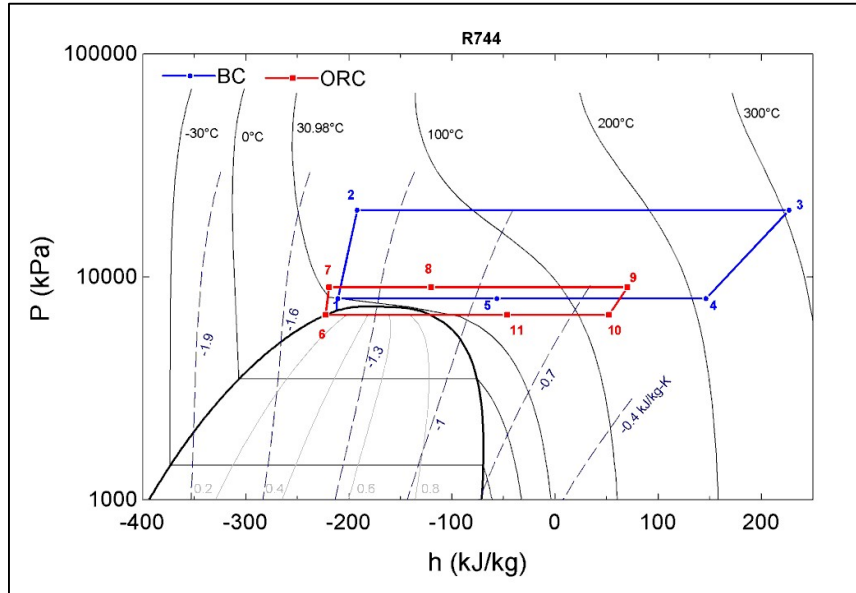
Çizelge 4.1’de verilen kabuller kullanılarak yapılan hesaplamalarda, her bir nokta için tespit edilen termodinamik özellikler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Ayrıca birleşik güç üretim sisteminin P-h ve T-s diyagramları Şekil 4.1 ve 4.2’de gösterilmiştir.



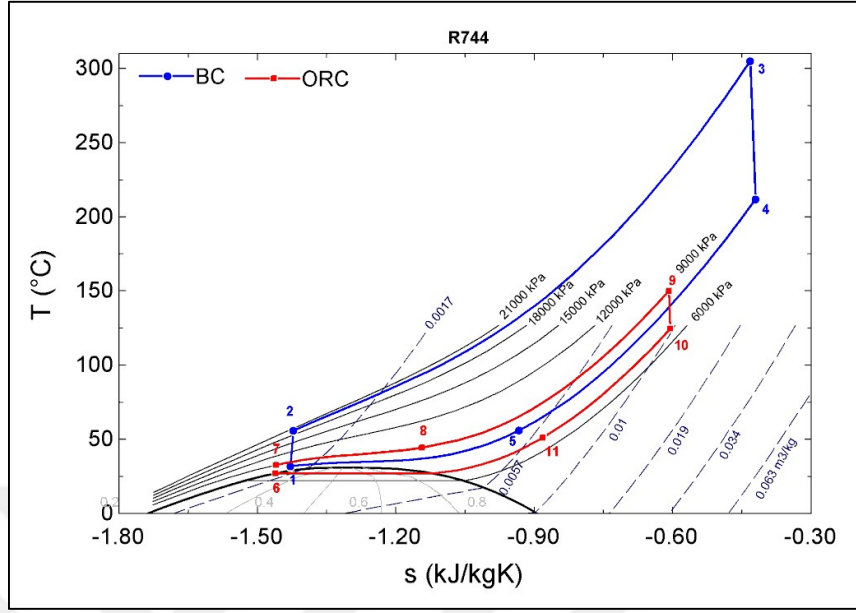
Çizelge 4.2. Birleşik güç üretim sisteminin hesaplanan özellikleri

Akışkan	Faz	Referans Noktası	Çevrim	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Ëx (kw)	e (kJ/kg)
Su		0		20	101.3	83.93	0.2962		
CO <sub>2</sub>		0		20	101.3	-5.18	-0.0166		
CO <sub>2</sub>	Gaz	1	BC	32	8000	-210.9	-1.428	312.1	208.1
CO <sub>2</sub>	Gaz	2	BC	56.01	20000	-192.2	-1.423	337.8	225.2
CO <sub>2</sub>	Gaz	3	BC	305	20000	226.9	-0.4325	531.1	354.1
CO <sub>2</sub>	Gaz	4	BC	212	8000	146.6	-0.42	405	270
CO <sub>2</sub>	Gaz	5	BC	56.09	8000	-56.51	-0.9332	326.1	217.4
CO <sub>2</sub>	Sıvı	6	ORC	27.09	6750	-222.7	-1.461	329.5	205.9
CO <sub>2</sub>	Sıvı	7	ORC	32.79	9000	-219.1	-1.46	334.7	209.2
CO <sub>2</sub>	Gaz	8	ORC	44.35	9000	-120.2	-1.143	344.4	215.2
CO <sub>2</sub>	Gaz	9	ORC	150	9000	70.18	-0.6088	398.4	249
CO <sub>2</sub>	Gaz	10	ORC	124.7	6750	52.12	-0.6054	367.9	229.9
CO <sub>2</sub>	Gaz	11	ORC	51.17	6750	-46.82	-0.8822	339.4	212.1
Su	Sıvı	12	Soğutma	18.79	101.3	78.85	0.2788	0.03168	0.01056
Su	Sıvı	13	Soğutma	37.24	101.3	156	0.5352	6.124	2.041
Su	Sıvı	14	Soğutma	18.79	101.3	78.85	0.2788	0.03168	0.01056
Su	Sıvı	15	Soğutma	41.19	202.7	172.7	0.5881	9.478	3.159
VP-1*	Sıvı	16	PTSC	139.9	200	218.3	0.6277	54.9	34.31
VP-1	Sıvı	17	PTSC	140	600	219	0.6284	55.69	34.81
VP-1	Sıvı	18	PTSC	323.9	400	611.2	1.408	317.4	198.4

\*Therminol VP-1



Şekil 4.1. Birleşik güç üretim sisteminin P-h diyagramı



Şekil 4.2. Birleşik güç üretim sisteminin T-s diyagramı

Brayton Çevrimi'nde kompresörden 56.1 °C 'de çıkan iş akışkanı güneş enerjisinden aktarılan enerji ile türbine 305 °C 'de girmektedir. Bu da türbinin iş yapma kapasitesini artırır ve 120.6 kW güç üretmesini sağlar. Çizelge 4.1'de belirtildiği gibi izentropik verimi 0.93 olan Brayton Çevrimi türbininin çıkan akışkanın sıcaklığı 212 °C'dir. Bu değer, Rankine çevrimini beslemek için oldukça yeterli bir değerdir. Brayton türbininden çıkan akışkan, ısı değiştiricisi-2'ye girerek enerjisinin büyük bölümünü Rankine çevriminde dolaşan akışkana aktarır. Böylece Brayton çevrimindeki CO<sub>2</sub>'nin sıcaklığı 56.9 dereceye düşer. Organik Rankine çevriminin türbin giriş sıcaklığı 150 °C olarak belirlenmiştir. İzentropik verimi 0.93 olan ORC türbininin gücü 28.9 kW olarak hesaplanmıştır.

Yapılan ikinci kanun analiz sonuçlarına göre elde edilen ekserji yıkımları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere, birleşik güç üretim sisteminin toplam ekserji yıkımı 638.28 kW olup, en yüksek ekserji yıkımı parabolik güneş enerjisi kolektörlerinde gerçekleşmiştir. Bunun nedeni, Eşitlik 3.25'ten de görüleceği üzere, PTSC alanının çok fazla olması ve ayrıca kolektörden olan ısı kayıplarıdır. PTSC'den sonra en yüksek ekserji yıkımı sırasıyla, ısı değiştiricisi-1, ısı değiştiricisi-2 ve rejeneratörde gerçekleşmiştir. Dikkat edilecek olursa, tüm bu sistem elemanları ısı değiştiricilerdir ve ekserji yıkımının sebebi, akışkanlar arası ortalama sıcaklık farkının yüksek olmasıdır. Isı değiştiricisinde ekserji yıkımını azaltmanın bir yolu, ısı

değiştiricisi alanını arttırmaktır. Fakat bu durumda da maliyetler artacaktır. Bu nedenle, maliyet, ekserji yıkımı ve alan gibi parametreler göz önüne alınarak optimizasyon yapılmalıdır.

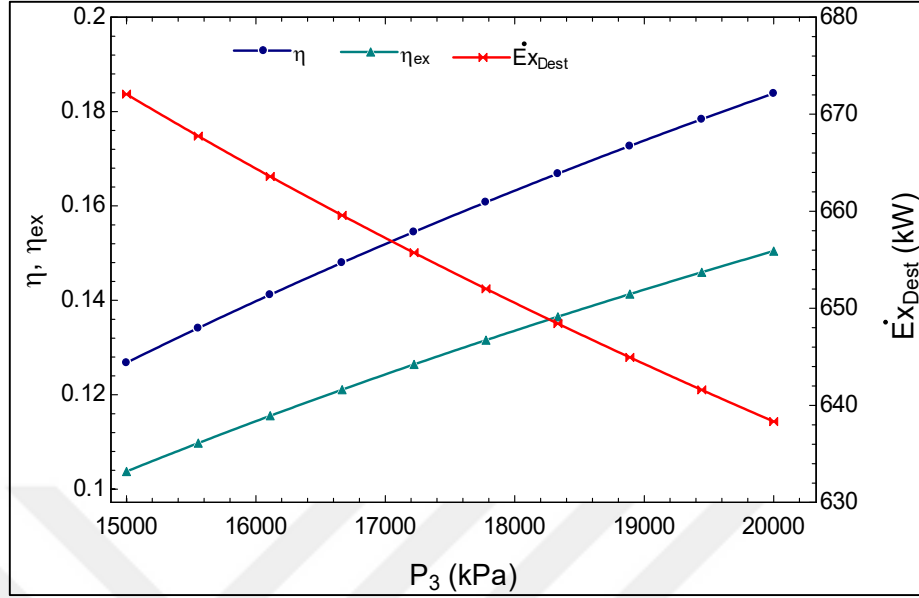
Çizelge 4.3. CO<sub>2</sub> iş akışkanı için sistemin ekserji yıkımları

Sistem elemanı	$\dot{E}x_{dest}$ (kW)
PTSC	506.6
BC kompresör	2.508
Isı değiştiricisi-1	69.14
BC Türbin	5.514
Gas Soğutucu	7.822
Isı değiştiricisi-2	24.94
ORC Türbin	1.605
Rejeneratör	18.79
Kondenser	0.4866
ORC Pompa	0.5536
PTSC Pompa	0.3215
<b>TOPLAM</b>	<b>638.28</b>

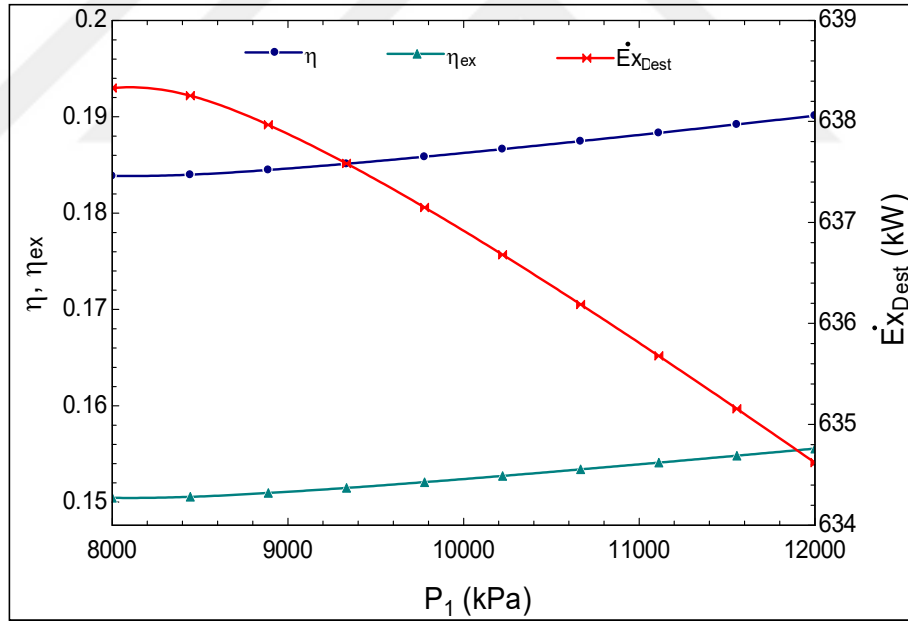
Bu hesaplamalardan sonra sistemin enerji verimi, ekserji verimi ve ekserji yıkımları farklı parametrik ölçütlere göre hesap edilmiş ve sistem üzerine etkisi grafik çizimleri ile gösterilmiştir.

Kompresör giriş basıncı değişimi 15000-20000 kPa arasında değiştirildiğinde Şekil 4.3'te görüldüğü gibi toplam enerji verimi 0.126'dan 0.183'e çıkmaktadır. Toplam ekserji verimi 0.103'den 0.150'ye çıkmıştır. Toplam ekserji yıkımı ise 672.1 kW'den 638.3 kW'ye düştüğü belirlenmiştir.

Şekil 4.4'de ise Brayton türbini giriş basıncının sistem verimine etkisi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi Brayton çevriminin türbin giriş basıncı 8000-12000 kPa arasında değiştirildiğinde toplam enerji verimi 0.183'den 0.190'a artmışken, toplam ekserji verimi 0.150'den 0.155'e artmıştır. Toplam ekserji yıkımı ise 638.3 kW'den 634.6 kW'ya düşmüştür.

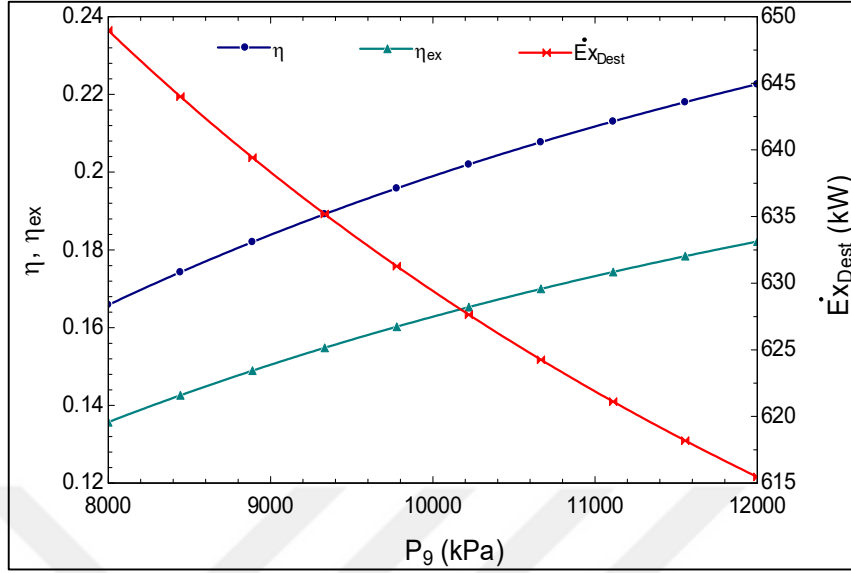


Şekil 4.3. BC türbin giriş basınç değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi



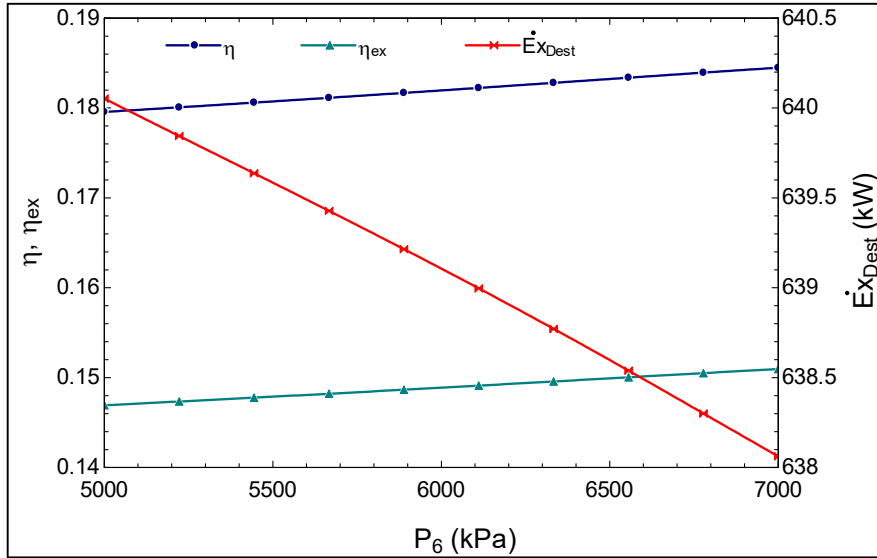
Şekil 4.4. BC kompresör giriş basınç değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi

Organik Rankine çevriminde Şekil 4.5'te gösterildiği gibi pompa giriş basıncı 8000 ile 12000 kPa arasında artırılmış ve sistem performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Basıncın değişmesiyle, enerji verimi 0.165'den 0.222'ye, ekserji verimi 0.135'den 0.182'ye artmıştır. Toplam oluşan tersinmezlik ise 649 kW'den 615.5 kW'ye düşmüştür



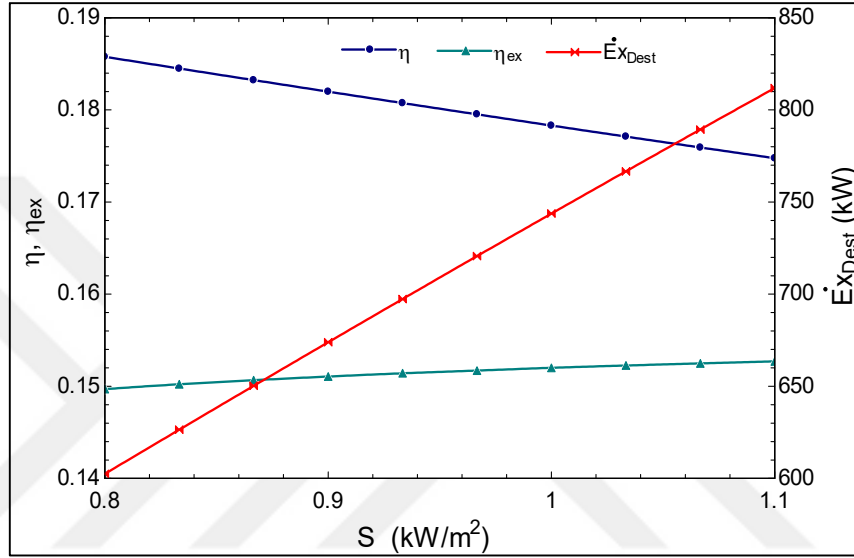
Şekil 4.5. ORC türbin giriş basınç değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi

Organik Rankine çevriminin türbin giriş basıncı Şekil 4.6'da gösterildiği gibi 5000 ile 7000 kPa arasında değiştirildiğinde sistemin toplam enerji verimi 0.179'dan 0.184'e, toplam ekserji verimi 0.146'dan 0.150'ye çıkmıştır. Ekserji veriminde ise 640.1 kW'den 638.1 kW'ye azalmıştır.

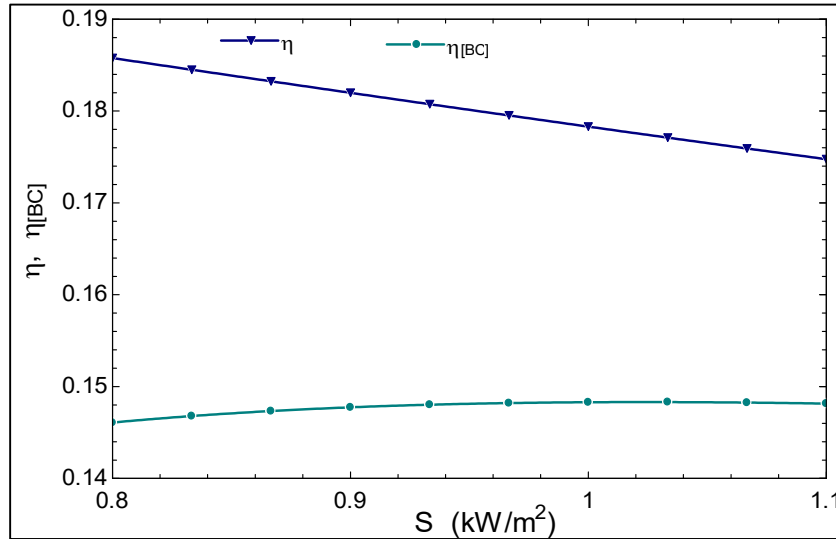


Şekil 4.6. ORC pompa giriş basıncı değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi

Güneş ışınım şiddeti  $800 \text{ W/m}^2$  'den  $1100 \text{ W/m}^2$  'ye arttıkça ekserji veriminin arttığı, ekserji yıkımının arttığı Şekil 4.7 'de görülmektedir. Şekil 4.7'te toplam verim azalmış gibi bir sonuç ortaya çıksada esasen güneş enerjisi Brayton çevrimine etki etmektedir. Bu durum da Şekil 4.8 'deki grafik incelendiğinde güneş ışınım şiddetinin artmasının Brayton çevriminin verimini arttırdığı görülmektedir.

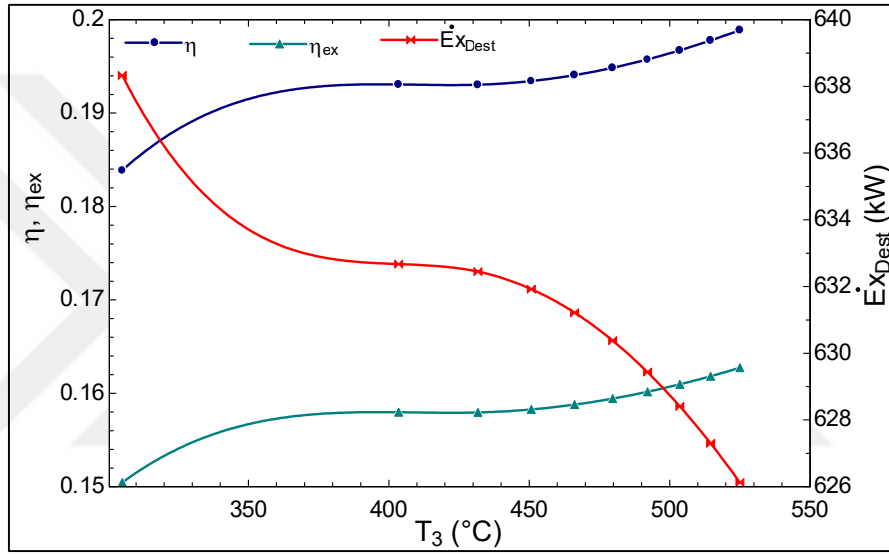


Şekil 4.7. Güneş ışınım şiddeti ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi

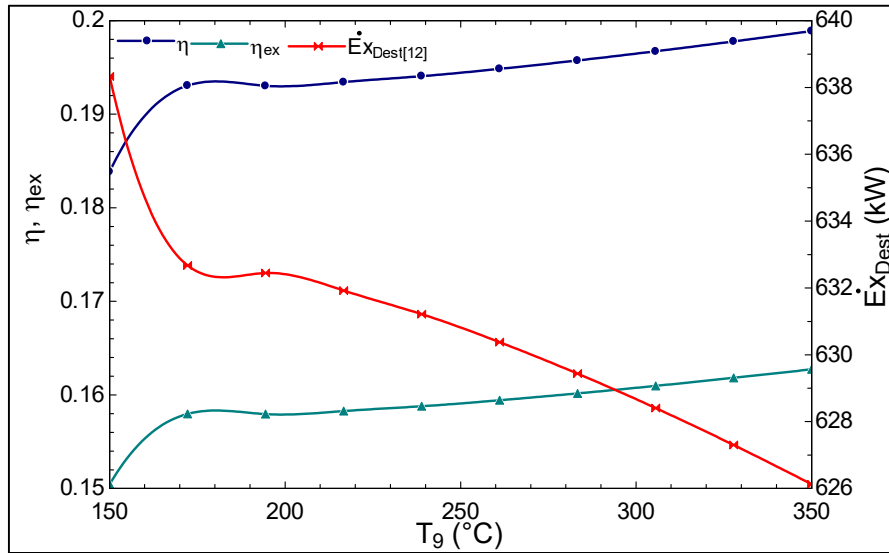


Şekil 4.8. Güneş ışınım şiddeti değişimi ile sistem enerji ve BC verimi değişimi

Brayton çevrimi türbin giriş sıcaklığı sıcaklığı ile sistem parametrelerinin değişimi Şekil 4.9 'da verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere sıcaklık, 305 °C'den 525 °C'ye artırıldığında; sistemin enerji veriminin 0.183'ten 0.198'e çıktığı, ekserji veriminin 0.150'den 0.162'ye arttığı ve ekserjinin 638.3'ten 626.1'e azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.10 'da ORC türbin giriş sıcaklığı 150 °C'den 350 °C'ye artırılmış ve sistemin enerji ve ekserji veriminin arttığı, ekserji yıkımının ise azaldığı tespit edilmiştir.



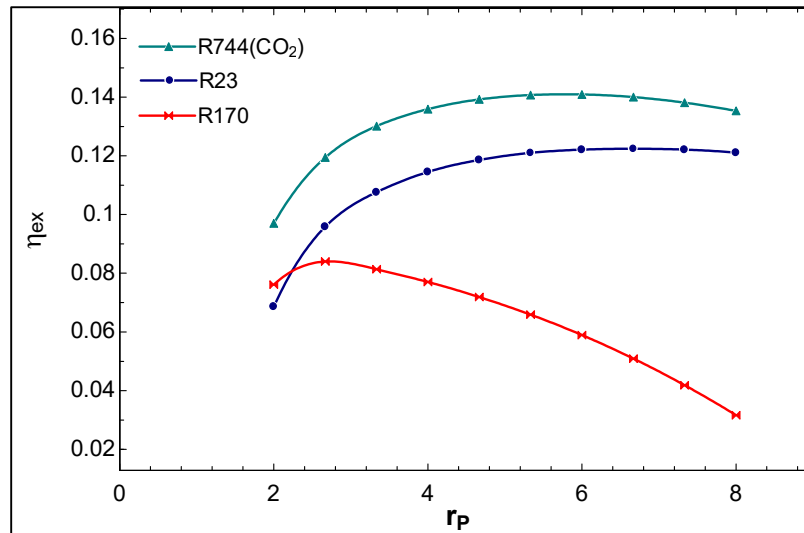
Şekil 4.9. BC türbin giriş sıcaklık değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi



Şekil 4.10. ORC türbin giriş sıcaklık değişimi ile sistem enerji, ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimi

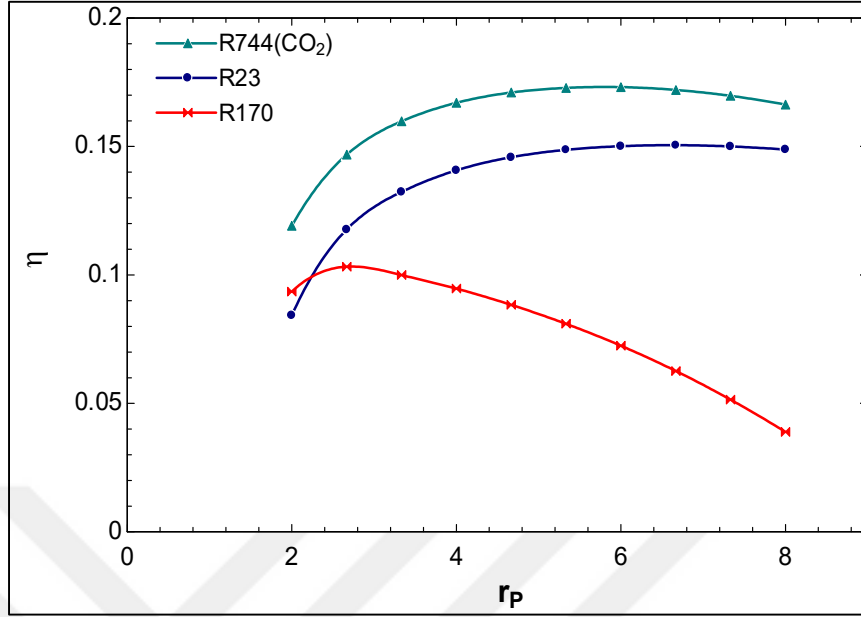
Bu yapılan analizlerden sonra sistem performansını farklı tür iş akışkanları ile de değerlendirerek iş akışkanlarının gaz çevrimindeki performansları kıyaslanmıştır. R744(CO<sub>2</sub>) iş akışkanının yanı sıra R23 ve R170 akışkanları kullanılarak iş akışkanlarının performans analizi, kapalı Brayton çevrimi için yapılmıştır. Bu analizlerde enerji verimi, ekserji verimi, toplam tersinmezlik ve net güç kuvvetleri ile basınç oranının değişimi hesap edilmiştir.

Şekil 4.11'de görüldüğü üzere, basınç oranı 2 ile 8 arasında değiştirildiğinde; R744 iş akışkanı için, toplam enerji verimi 0.119'dan 0.166'ya, toplam ekserji verimi 0.096'dan 0.135'e arttığı (Şekil 4.12) ekserji yıkımının ise 679.6'dan 650.9'a azaldığı (Şekil 4.13), R23 iş akışkanı için toplam enerji verimi 0.084'ten 0.148'e, toplam ekserji verimi 0.068'den 0.121'e arttığı ekserji yıkımının 700.8'den 661.5'e azaldığı, R170 iş akışkanı için, toplam enerji verimi 0.093'ten 0,0388'e, toplam ekserji verimi 0.076'dan 0.031'e arttığı ekserji yıkımının 695.2'den 728.4'e arttığı hesaplanmıştır. Şekil 4.14'te ise basınç oranı değişimi ile Brayton çevrimi güç üretiminin değişimi görülmektedir. Basınç oranı arttıkça güç üretimi R744 ve R23 için artmaktadır ve bu durum basınç oranı 6 olana kadar devam etmektedir. R170 akışkanı için ise durum farklıdır. Bu akışkan için ilk başta güç üretimi küçük bir artış göstermiş daha sonra ise basınç oranı ile beraber düşmektedir. Şekil 4.13'te de görüleceği üzere ekserji yıkımını en az sağlayan akışkan R744 iş akışkanıdır. Bu durum da sistem performansı için büyük avantajlar sağlamaktadır.

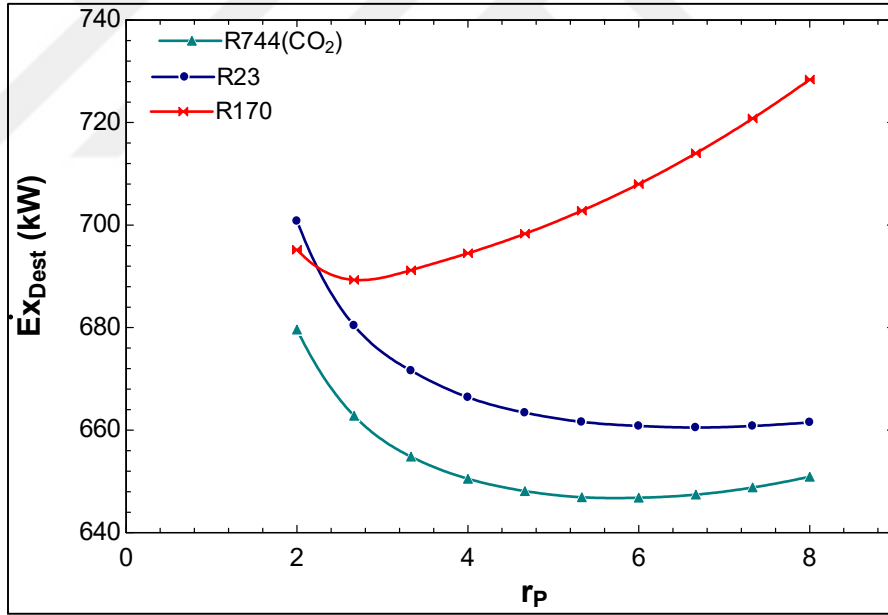


Şekil 4.11. Toplam ekserji verimi-basınç oranı değişim grafiği

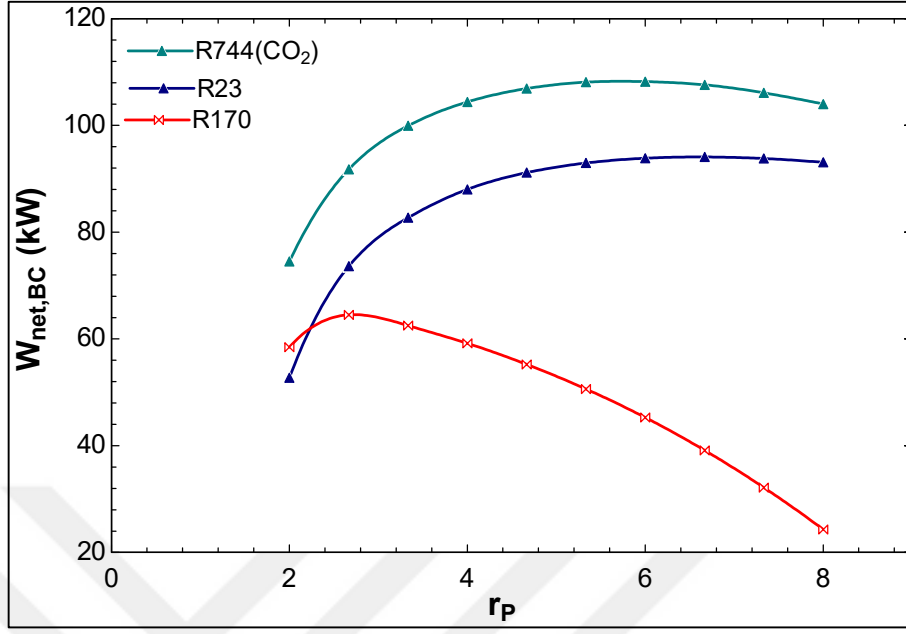




Şekil 4.12. Toplam enerji verimi-basınç oranı değişim grafiği



Şekil 4.13. Toplam ekserji yıkımı-basınç oranı değişim grafiği



Şekil 4.14. BC net güç-basınç oranı değişim grafiği

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemizde her geçen gün nüfus artmaktadır. Artan nüfus miktarı ile doğru orantılı olarak enerji gereksinimi ve enerji güç üretim miktarı da artmaktadır. Bu çalışmada birleşik güç üretim sistemi analizi yapılmıştır. İş akışkanı olarak CO<sub>2</sub> (R744) kullanılmıştır. Enerji verimi Brayton çevrimi için 0.14, ORC için 0.07 olarak hesap edilmiş, toplam sistem enerji verimi ise 0.18 olarak bulunmuştur. Ekserji verimleri Brayton çevrimi için 0.35, ORC için 0.29 olarak tespit edilmiştir. Toplam sistem ekserji verimi ise 0.15 olarak hesap edilmiştir. Brayton Çevrimi gücü 120.6 kW, Rankine Çevrimi gücü 289 kW olarak EES programı ile hesap edilmiştir.

Termodinamiğin ikinci kanunu analizlerine göre sisteme giren ekserji güneş enerjisinden meydana gelen ekserjidir ve 768.3 kW'dır. Sistemden çıkan ekserji ise BC türbin ve ORC türbin tarafından üretilen ekserji, gaz soğutucu ve kondanser tarafından dışarıya atılan ekserji ve ekserji yıkımlarının toplamıdır. Bu değer 769.5 kW olarak dışarıya çıkmıştır. Birleşik güç sisteminin toplam ekserji yıkımı ise 638.28 kW'dır.

Bunların yanında, farklı parametrik çalışmalar yapılarak sistem performansı incelenmiştir. Güneş ışınım şiddeti arttırıldığında tüm sistemin ekserji veriminin ve ekserji yıkımının arttığı, toplam verimin azaldığı tespit edilmiştir. Ancak güneş enerjisi direkt olarak Brayton çevrimi ile bağlantılıdır. Brayton çevrimi ile beraber düşünüldüğünde ise Brayton çevriminin verimini artırdığı dolayısıyla da sistem verimini artırdığı söylenebilir. Ayrıca, kullanılan parabolik oluk tipi güneş kollektörleri ile sağlanan yüksek sıcaklıktaki ısı kaynak, hem elektrik üretimine hem de proses ısısı elde etmeye destek sağlamıştır.

Diğer taraftan, sadece kapalı Brayton çevrimi göz önüne alınarak yapılan analizlerde, 3 farklı süperkritik akışkan için hesaplamalar yapılmıştır. Bu akışkanlar R23, R170 ve R744 yani karbondiksittir. Belirtilen akışkanları kullanılması ile Brayton çevriminin basınç oranı değiştirilmiş ve ekserji verimi, enerji verimi, ekserji yıkımı, Brayton Çevrimi net gücü üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre R744 iş akışkanının (CO<sub>2</sub>) performansının diğer iş akışkanlarına göre iyi olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan bu analizler sonucunda R744 iş akışkanının güç çevrim santralleri için alternatif bir iş akışkanı olarak kullanılmasının verimi artırıcı etkileri olduğu tespit edilmiştir. Güneş enerjisi teknolojilerinin gelişmesi ile, özellikle süperkritik akışkanların kullanıldığı kapalı gaz çevrimleri tekrardan önem kazanmaya başlamıştır. Bunlar arasında düşük kritik basınç ve sıcaklığa sahip olan CO<sub>2</sub>, hem çevresel etkiler, hem kolay bulunabilirlik, hem termal performans ve hemde diğer özellikleri ile bu tür sistemler için umut vaad etmektedir.



## KAYNAKLAR

- Acar, E. (2014). *Bir Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Santrali İçin Organik Rankine Çevrimi Dizaynı Ve Modellemesi*. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü)
- Ağırkay, O. (2015). *Jeotermal Enerji Kaynaklı Organik Rankine Çevriminin Modellenmesi Ve Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü)
- Altun, M. (2010). *Yenilenebilir Enerji Üretiminde Güç Kalitesinin Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Alan A. (2011). *Çift Kademeli CO<sub>2</sub>' Li Soğutma Sistemlerinde Genleşme Türbini Kullanımının Enerji Potansiyeline Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Ahn, Y., Bac, S. J., Kim, M., Cho, S.K., Baik, S., Lee, J.I., Cha, J.E. (2015). Review Of Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycle Technology And Current Status Of Research And Development. *Nuclear Engineering And Technology*, 47(6), 647-661.
- Akova, İ. (2016). *Enerji Kullanımındaki Değişimler*. Nobel Akademik Yayıncılık, İstanbul.
- Angelino, G., Invernizzi, C. (2001). Real gas Brayton cycles for organic working fluids. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A*. 215, 27-38.
- Anheden, M. (2000). *Analysis of Gas Turbine Systems for Sustainable Energy Conversion*. (Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Chemical Engineering and Technology, Sweden)
- Anonim (2018a). <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Anasayfa> (Son erişim tarihi: 10.10.2018)
- Anonim (2018b). [http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g\\_enj\\_tekno.aspx](http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx) (Son erişim tarihi: 16.05.2018)
- Anonim (2018c). <https://tyrannosurusrex.wordpress.com/2016/11/22/tsk-icin-stratejik-bir-guc-uretim-sistemi-yolda/> (Son erişim tarihi: 24.09.2018)
- Anonim (2019a). <https://www.teias.gov.tr> (Son erişim tarihi: 16.04.2019)
- Anonim (2019b). <https://www.foodelphi.com/tag/gaz-ve-superkritik-akiskanlarin-ozellikleri/> (Son erişim tarihi: 21.07.2018)
- Anonim (2019c). <http://upgrade-energy.com/tr/yenilenebilir-enerji-ve-enerji-verimlilik-teknolojileri/organik-rankine-cevrimi-orc/>(Son erişim tarihi: 20.06.2019)

- Anonim (2019d). <https://muhendistan.com/rankine-cevrimi-nedir/> (Son erişim tarihi: 20.06.2019)
- Bayrakçı, H.C., Özgür, A.E., Akdağ, A. (2015). *Aynı Soğutma Yüğü İçin CO<sub>2</sub>'li Isı Pompalarının Enerji Sarfiyatlarının Karşılaştırılması*. IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi. Mayıs 06-09, İzmir.
- Bilgiç H.H., vd. (2016). Deneysel Bir Organik Rankine Çevriminde Yapay Sinir Ağları (YSA) Yardımıyla Güç Tahmini. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(1), 7-17.
- Cengel, Y.A., Boles, M.A. (2006). *Thermodynamics: an engineering approach*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Coşkun, A. (2005). *Gaz Akışkanlı Güç Santrallerinin Verimliliği ve Enerji- Çevre İlişkisi*. (Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Çubuğuuzun, T. (2006). *Gaz Türbinli Gemilerde Ekserji Ve Termodinamik Analiz*. (Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Çukurçayır, M. A., Sağır H. (2008). Enerji Sorunu Çevre ve Alternatif enerji Kaynakları. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 20, 257-278.
- Çolak, N., Tülek, Y. (2003). Süperkritik Akışkan Ekstraksiyonu. *Gıda*, 28(3), 313-320.
- Durgun, B., Durgun, F. (2018). Yenilenebilir Enerji Tüketimi İle Ekonomik Büyüme Arasında Nedensellik İlişkisi: Türkiye Örneği. *International Review Of Economics And Management*, 6 (1), 1-27.
- Diken, M.G. (2016). Using Supercritical CO<sub>2</sub> as A Working Fluid In Brayton And Rankine Cycle with Low Grade Heat. (Master Thesis, The University of Manchester)
- Dincer, I., Rosen, M.A. (2007). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, Elsevier Science, Oxford.
- Ergün, A., vd. (2016). Organik Rankine Çevrimi Prensibi ile Düşük Sıcaklıktaki Kaynaklardan Elektrik Üretim Uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4 , 686-696
- Garcia, J.E. (2003). *Fluid Dynamics of Carbon Dioxide Disposal into Saline Aquifers*. (PhD Thesis, University of California)
- Invernizzi, C.M. (2017). Prospects of Mixtures as Working Fluids in Real-Gas Brayton Cycles. *Energies*, 10, 1649(1-15).

- Invernizzi, C.M. (2013). *Closed Power Cycles, Thermodynamic Fundamentals and Applications*. Springer-Verlag London.
- İşler, G. (2018). *Parabolik Oluk Kolektörleri Ve Merkezi Alıcılı Güneş Kuleleri İle Enerji Üretim Analizi Ve Uygulaması*. (Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Kasap, F. (2011). *CO<sub>2</sub> Akışkanlı Transkritik Soğutma Sistemleri için Gaz Soğutucu Hesaplama Modülünün Geliştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Kayadelen, H.K. (2014). *Gaz Türbinlerinde Su/Buhar Enjeksiyonunun Termoekonomik Performans Ve Emisyonlar Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi Ve Optimizasyonu*. (Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Kızıllan, Ö., Akbaş, Ç. 2016. Güneş Enerjisi Destekli Çok Fonksiyonlu Trijenerasyon Sisteminin Termodinamik Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1), 71-77.
- Kumbur, H., Özer, Z., Özsoy, H.D., Avcı, E.D. (2005). *Türkiye’de Geleneksel ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Potansiyeli ve Çevresel Etkilerinin Karşılaştırılması*. III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi. Ekim 19-21, Mersin, 32-38.
- Kurtuluş, O. (2011). *Soğutucu Akışkan Olarak Karbondioksit Kullanılan Transkritik Çevrimlerin Sayısal Ve Deneysel İncelenmesi*. (Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Khan, M.S., Atikol, U. (2018). *Comparison Of Solar Dish Driven Recompression Supercritical CO<sub>2</sub> Brayton Cycles With Reheat And Without Reheat*. 16th International Conference on Clean Energy (ICCE-2018), May 9-11, Famagusta, North Cyprus.
- Lee, H. J., vd. (2014). *Compatibility Of Candidate Structural Materials in High-Temperature s-CO<sub>2</sub> Environment*. The 4th International Symposium - Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycles, September 9-10, Pittsburgh.
- Moghanlou, S. (2014). *Thermodynamic Study of the Supercritical, Transcritical Carbon Dioxide Power Cycles for Utilization of Low Grade Heat Sources Application*. (MSc Thesis, Eastern Mediterranean University Institute of Graduate Studies and Research).
- Niu, X.D., Yamaguchi, H., Zhang, X.R., Iwamoto, Y., Hashitani, N. (2011). Experimental study of heat transfer characteristics of supercritical CO<sub>2</sub> fluid in collectors of solar Rankine cycle system, *Applied Thermal Engineering*, 31, 1279-1285.

- Özdemir, E. (2017). *Bir Gaz Türbini Çevriminin Termodinamik Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Özturan, H. (2017). Idealab'dan Sessiz Denizaltılar İçin Devrim Yaratacak Teknoloji: S-CO<sub>2</sub> Brayton Güç Çevrimi. <http://www.milscint.com/tr/tanitici-makale-idealabdan-sessiz-denizaltilar-icin-devrim-yaratacak-teknoloji-sco2-brayton-guc-cevrimi/>
- Quero, M., Korzynietz, R., Ebert, M., Jiménez, A.A., del Río, A., Brioso, J.A. (2014). Solugas – Operation experience of the first solar hybrid gas turbine system at MW scale. *Energy Procedia*, 49, 1820 – 1830.
- Sahoo, U., Kumar, R., Pant, P.C., Chaudhary, R. (2016). Resource Assessment For Hybrid Solar-Biomass Power Plant And Its Thermodynamic Evaluation In India. *Solar Energy*, 139 (47–57).
- Sing H., Mishra R.S. (2018). Performance analysis of solar parabolic trough collectors driven combined supercritical CO<sub>2</sub> and organic Rankine cycle. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21, 451-464
- Şanlı G. (2010). *Parabolik Oluk Tipi Güneş Kolektörlerinin Teorik Olarak İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Şahin H.E. (2012). *Kritik-Üstü Tip Bir Buharlı Güç Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü)
- Şen, Z. (2002). *Temiz Enerji ve Kaynakları*. Su Vakfı Yayınları, 16-20, İstanbul.
- Tiwari, G.N. (2002). *Solar Energy: Fundamentals, Desing, Modelling and Applications*. Alpha Science International Limited, Pangbourne.
- Tüysüz, C. (2013). *Bir Kritiküstü Termik Santralde Enerji Ve Ekserji Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Türkkan, B., Çağlayan, A., Onbaşıoğlu, H. (2017). *Karbondioksit Akışkanlı Kanatlı Borulu Buharlaştırıcılarda Boru Özelliklerinin Isıl Kapasiteye Etkisinin İncelenmesi*. 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, Nisan 19-22, İzmir.
- Tozlu, vd. (2018). Organik Rankine Çevrimi Entegre Edilmiş S-CO<sub>2</sub> Kullanılan Bir Gaz Türbin Çevriminin Termodinamik ve Termoekonomik Analizi. *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, 33(3), 917-928.
- Varınca, K.B., Gönüllü, M.T. (2006). *Türkiye'de Güneş Enerjisi Potansiyeli Ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi Ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma*. I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, Haziran 21-23, Eskişehir.



- Yalçınkaya, R., Bıyıklıoğlu, A. (2012). Kritik-Üstü Karbon-Dioksitin Jeotermal Güç Çevriminde Kullanımı Üzerine. *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, 27(3), 557-568.
- Zhang, X.R., Yamaguchi, H., Uneno, D., Fujima, K., Enomoto, M., Sawada, N. (2006). Analysis Of A Novel Solar Energy-Powered Rankine Cycle For Combined Power And Heat Generation Using Supercritical Carbondioxide. *Renewable Energy*, 31, 1839–1854.
- Zhang, X.R., Yamaguchi, H., Uneno, D. (2007). Thermodynamic analysis of the CO<sub>2</sub>-based Rankinecycle poweredby solar energy. *International Journal Of Energy Research*, 31, 1414–1424.
- Zhang, Y., Li, H., Han, H., Bai, W., Yang, Y., Yao, M., Wan, Y. (2018). Improved Design Of Supercritical CO<sub>2</sub> Brayton Cycle For Coal-Fired Power Plant. *Energy*, 155 , 1-14.
- Zhang, X.R., Yamaguchi, H., Fujima, K., Enomoto, M., Sawada, N. (2006a). Study of solar energy powered transcritical cycle using supercritical carbon dioxide, *International Journal of Energy Research*, 30(14), 1117-1129.
- Zhang, X.R., Yamaguchi, H., Uneno, D., Fujima, K., Enomoto, M., Sawada, N. (2006b). Analysis of a novel solar energy-powered Rankine cycle for combined power and heat generation using supercritical carbon dioxide. *Renewable Energy*, 31(12), 1839-1854.
- Zhang, X.R., Yamaguchi, H., Fujima, K., Enomoto, M., Sawada, N. (2006c). A Feasibility Study of CO<sub>2</sub>-Based Rankine Cycle Powered by Solar Energy. *JSME International Journal*, 48(3), 540-547.
- Yamaguchi, H., Zhang, X.R., Fujima, K., Enomoto, M., Sawada, N. (2006). Solar energy powered Rankine cycle using supercritical CO<sub>2</sub>. *Applied Thermal Engineering*, 26(17–18), 2345-2354.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şefika YILDIRIM  
Doğum Yeri ve Yılı : Mersin, 1993  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : sefikayildirim1993@gmail.com



### Eğitim Durumu

Lise : Mersin Hasan Akel Anadolu Lisesi, 2011  
Lisans :SDÜ, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh., 2015

### Mesleki Deneyim

ESC Mühendislik Teknik P.İ.T. San. Tic. Ltd. Şti. 2016-2017  
BP & SHELL ATAŞ Dolum Terminali 2019-..... (halen)

### Yayımlar

Kizilkan, O., Kabul, A., Yildirim, S., Yildirim, G. (2016). *Experimental Analysis of Latent Thermal Energy Storage for Solar Heating Applications: Preliminary Results*. Proceedings of the 8th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEES-8). May 1-4, Antalya, Turkey, 183-189.