

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

1,5 KW GÜCÜNDE ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNİN PARAMETRİK  
TASARIMI, TERMODİNAMİK ANALİZİ, PROTOTİP İMALATI VE TESTİ

İbrahim GÜNAYDIN

AĞUSTOS 2016

**Makina Anabilim Dalında** İbrahim GÜNAYDIN tarafından hazırlanan 1,5 KW GÜCÜNDE ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNİN PARAMETRİK TASARIMI, TERMODİNAMİK ANALİZİ, PROTOTİP İMALATI VE TESTİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Yahya DOĞU  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU \_\_\_\_\_

Üye (Danışman) : Prof. Dr. Yahya DOĞU \_\_\_\_\_

Üye : Prof. Dr. Ali ERİŞEN \_\_\_\_\_

31/08/2016

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### 1,5 KW GÜCÜNDE ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNİN PARAMETRİK TASARIMI, TERMODİNAMİK ANALİZİ, PROTOTİP İMALATI VE TESTİ

GÜNAYDIN, İbrahim

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yahya DOĞU

Ağustos 2016, 78 sayfa

Bu tez çalışmasında, reküperatörlü bir ORC (Organic Rankine Cycle – Organik Rankine Çevrimi) sisteminin tasarımı, termodinamik analizleri prototip sistem imalatı ve testleri gerçekleştirildi. Bu amaçla; türbindeki net güç çıkışı 1,5 kW olan bir ORC sistemi; farklı kaynak sıcaklıkları için (sıcak kaynak: 90°C, 100°C ve 110°C ve soğuk kuyu: 15°C) tasarlandı. Termodinamik çevrim analizleri Cycle-Tempo v. 5.1 ve Refprop v. 9.0 programları kullanılarak farklı organik akışkanlar (R236ea, R245ca, R245fa ve R365mfc) ve farklı türbin izentropik verimleri (%60, %70, %80) için yapıldı. Ayrıca aşırı kızdırma sıcaklığının (5°C, 10°C ve 15°C) etkisi de incelendi. Analizler sonucunda en yüksek ORC verimi R365mfc akışkanında elde edildi. Türbin izentropik veriminin artması ORC verimini arttırırken, aşırı kızdırma sıcaklığı ORC verimini azalttı. Isı kaynağı sıcaklığı arttıkça, ORC veriminin arttığı görüldü. Tüm analizlerden elde edilen en yüksek ORC verimi (110°C ısı kaynağı sıcaklığı, %80 izentropik verim, 5°C aşırı kızdırma sıcaklığı ve R365mfc akışkanı için) %10,4 olarak hesaplandı. En düşük ORC verimi ise (90°C ısı kaynağı sıcaklığı, %60 izentropik verim, 15°C aşırı kızdırma sıcaklığı ve R236ea akışkanı için) %4,7 olarak hesaplandı.

Ardından, prototip test sistemi kuruldu ve testler yapıldı. Test sisteminde kolay temin edilebilirliği nedeniyle çevrim akışkanı olarak R245fa kullanıldı. Tüm test sisteminin tasarımı ve analizleri; piyasadan hazır raf ürünleri (ısı eşanjörü,

pompa, türbin, vb.) kullanılarak prototip sistemin kurulması dikkate alınarak yapıldı. Testler yapıldı ve analiz ve test sonuçlarının uyumluluğu karşılaştırıldı.

**Anahtar kelimeler:** Organik Rankine Çevrimi (ORC), ORC Test Sistemi, ORC, Akışkan Seçimi, R245fa, ORC Termodinamik Analizi ve Tasarımı, Scroll Expander, ORC Sistem Testi.



## ABSTRACT

### PARAMETRIC DESIGN, THERMODYNAMIC ANALYSIS AND PROTOTYPE PRODUCTION AND TESTING OF 1,5 kW ORGANIC RANKINE CYCLE

GÜNAYDIN, İbrahim

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

M.Sc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yahya DOĞU

August 2016, 78 pages

In this thesis, a recuperated ORC (Organic Rankine Cycle) system was designed, its thermodynamics and thermal-flow analysis was performed, and furthermore, a complete prototype system was manufactured and tested. For this purpose; an ORC system at a net turbine power output of 1.5 kW was designed for different source temperature (hot source at 90°C, 100°C and 110°C, and cold sink at 15°C). Thermodynamic cycle analysis was performed for various organic fluids (R236ea, R245ca, R245fa, and R365mfc) and various turbine isentropic efficiencies (60%, 70%, and 80%) by using Cycle-Tempo v. 5.1 and Refprop v. 9.0 software. In addition, effects of various superheating temperatures (5°C, 10°C and 15°C) were also investigated. Analyses results show that R365mfc fluid yields the highest ORC efficiency. ORC efficiency increases with turbine isentropic efficiency while decreases with superheating temperature. The increasing heat source temperature also yields higher ORC efficiency. From all analyses, the highest ORC efficiency is calculated as 10.4% (for 110°C heat source temperature, 80% isentropic efficiency, 5°C superheating temperature and R365mfc fluid). The lowest ORC efficiency is 4.7% (90°C heat source temperature, 60% isentropic efficiency, 15°C superheating temperature and R236ea fluid).

Then the prototype test system was set up and tests were performed. R245fa was used as the cycle fluid in the prototype test system due ease of availability. All design and analysis steps were performed by considering a prototype system to be manufactured by using ready shelf products in the market (heat exchangers, pumps, turbines, etc.). The prototype system was installed and tested. Then, compatibility of analysis and test results was compared.

**Keywords:** Organic Rankine Cycle (ORC), ORC Test System, ORC Working Fluid Selection, R245fa Thermodynamics Analysis and Design of ORC, Scroll Expander, Test of ORC System.



## TEŞEKKÜR

Tezimi hazırlarken bana yol gösteren, olumlu tavırlarıyla beni sürekli teşvik eden, engin bilgisini her daim paylaşıp mesai kavramı gözetmeden bana yardım eden, kariyerimde bana yol gösteren ve bu günlere gelmemi sağlayan, sadece tez süresince değil, bana her zaman ve her konuda danışmanlık eden çok değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Yahya DOĞU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Lisans eğitimim sırasında özverili bir şekilde bize yardım eden hocalarıma, özellikle de enerjimi bize sevdiren çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ali ERİŞEN'e çok teşekkür ederim.

MAKİM A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Tacettin İLERİ'ye ve TECHNOVISION A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Mehmet Fikret USLU'ya yaptığı maddi ve manevi destekler ile bu çalışmanın tamamlanmasını mümkün kıldığı için teşekkür ederim.

Her şeyi borçlu olduğum aileme, hayatımın bütün bölümlerinde yanımda oldukları, maddi ve manevi destekleri, sonsuz anlayışları ve gösterdikleri karşılıksız sevgi için minnetlerimi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak, yüksek lisans eğitimimin başlamasında vesile olan, bu süreçte beni her zaman yapabildiğinin en iyisini yaparak destekleyen, tezimin tamamlanması için en az benim kadar heyecanlanan sevgili eşim Hacer Sema GÜNAYDIN'a, gösterdiği sonsuz anlayış ve yardımları için şükranlarımı sunar, teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	x
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Literatür taraması .....	2
1.2. Amaç ve kapsam .....	5
<b>2. ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ (ORC)</b> .....	7
2.1. Rankine çevrimi (RC) : Temel prensip .....	7
2.2. Organik Rankine çevrimi (ORC) .....	7
2.2.1. Temel Organik Rankine çevrimi (ORC) .....	9
2.2.2. Reküparatörlü Organik Rankine çevrimi (ORC) .....	9
2.3. ORC iş akışkanları .....	10
2.4. ORC uygulama alanları .....	11
2.4.1. Atık ısı uygulamaları .....	11
2.4.2. Solar uygulamalar .....	12
2.4.3. Jeotermal uygulamalar .....	13
2.4.4. Biyokütle uygulamaları .....	13
<b>3. ORC TASARIMI VE ANALİZİ</b> .....	14
3.1. Tasarım parametreleri .....	14
3.1.1. Isı kaynağı sıcaklığı .....	14
3.1.2. Soğuk kuyu sıcaklığı .....	14
3.1.3. Aşırı kızdırma ve aşırı soğutma.....	15
3.1.4. Çevrim akışkanı .....	15
3.1.4.1. Akışkanların termofiziksel özellikleri .....	16



3.1.4.2. Akışkanların çevresel özellikleri .....	16
3.1.4.3. Potansiyel organik akışkanlar .....	17
3.1.4.4. Çevrim akışkanının seçimi .....	18
3.1.5. ORC sistem elemanlarının verimleri ve kayıplar .....	20
3.1.5.1. Türbin-jeneratör verimi .....	20
3.1.5.2. Pompa-motor verimi .....	21
3.1.5.3. Akış kayıpları .....	21
3.1.5.4. Isıl kayıplar .....	21
3.2. ORC termodinamik analizi .....	22
3.2.1. Analiz adımlarının belirlenmesi ve incelenmesi .....	22
3.2.2. Genel verim hesabı .....	25
3.2.3. İkinci kanun analizi .....	25
3.2.4. ORC termodinamik analiz .....	26
3.2.5. Termodinamik analiz sonuçları .....	29
3.3. Termodinamik analiz sonuçlarının yorumlanması .....	47
<b>4. ORC TEST DÜZENEĞİ</b> .....	<b>49</b>
4.1. ORC test düzeneği .....	49
4.1.1. Buharlaştırıcı .....	52
4.1.2. Yoğuşturucu .....	53
4.1.3. Reküparatör .....	54
4.1.4. Türbin .....	54
4.1.5. Pompa .....	56
4.1.6. Yardımcı elemanlar .....	57
4.1.6.1. Gözetleme camı .....	57
4.1.6.2. Selenoid vanalar .....	57
4.1.6.3. Sıvı deposu .....	58
4.1.6.4. Sıvı filtresi .....	59
4.1.6.5. Kontrol panosu .....	60
4.2. Ölçüm cihazları ve tekniği .....	61
4.2.1. Sıcaklık ve basınç ölçümü .....	61
4.2.2. Debi ölçümü .....	62
4.2.3. Elektriksel ölçümler .....	62
4.2.3.1. Türbinde üretilen güç ölçümü .....	62

4.2.3.2. Pompada tüketilen güç ölçümü .....	62
4.3. Sonuçlar ve Değerlendirmeler .....	63
4.3.1. Testlerde ölçülen değerler için termodinamik analizler .....	64
4.3.2. ORC veriminin türbin giriş sıcaklığı ile değişimi .....	64
4.3.3. ORC veriminin aşırı kızdırma sıcaklığı ile değişimi .....	68
4.3.4. İkinci kanun veriminin türbin giriş sıcaklığı ile değişimi .....	69
4.3.5. İkinci kanun veriminin aşırı kızdırma sıcaklığı ile değişimi.....	70
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	72
<b>KAYNAKLAR</b> .....	75



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

### Sayfa

3.1. ORC’de kullanılabilir potansiyel akışkanların çevresel ve termodinamik özellikleri.....	19
3.2. Termodinamik analiz parametreleri.....	30
3.3. R236ea akışkanı için analiz sonuçları.....	37
3.4. R245ca akışkanı için analiz sonuçları.....	38
3.5. R245fa akışkanı için analiz sonuçları.....	39
3.6. R365mfc akışkanı için analiz sonuçları.....	40
4.1. Testlerde ölçülen ve hesaplanan değerler.....	65
4.2. Testlerde ölçülen değerler kullanılarak elde edilen analiz sonuçları.....	66
4.3. Testler ve test analizlerinde ölçülen ve hesaplanan değerler.....	67

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Son yıllardaki ORC ile ilgili yayınların toplam yayın sayısına oranı.....	3
2.1. İdeal Rankine çevrimi şeması ve T-s diyagramı .....	7
2.2. Organik akışkanların farklı basınçlardaki doyma sıcaklıkları.....	8
2.3. Temel ORC çevrim şeması ve T-s diyagramı .....	9
2.4. Reküperatörlü ORC çevrim şeması ve T-s diyagramı .....	10
2.5. ORC akışkanlarının doymuş buhar eğrisinin eğimine göre T-s diyagramları ve sınıflandırması. a) kuru, b) izentropik, c) ıslak .....	10
3.1. Organik akışkan seçiminde kullanılan algoritma akış şeması.....	18
3.2. Seçimi yapılan ORC akışkanlarının T-s diyagramları.....	20
3.3. Cycle-Tempo programında oluşturulan reküperatörlü ORC şeması .....	28
3.4. R236ea akışkanı için Cycle-Tempo çevrim şeması.....	31
3.5. R245ca akışkanı için Cycle-Tempo çevrim şeması.....	32
3.6. R245fa akışkanı için Cycle-Tempo çevrim şeması .....	33
3.7. R365mfc akışkanı için Cycle-Tempo çevrim şeması .....	34
3.8. R245fa akışkanı için aşırı kızdırma sıcaklıklarına göre T-s diyagramı .....	35
3.9. R245fa akışkanı için kaynak sıcaklıklarına göre T-s diyagramı .....	36
3.10. Isı kaynağı sıcaklığına göre Carnot verimi ve ORC verimi .....	42
3.11. ORC veriminin ısı kaynağı sıcaklığına ve çevrim akışkanına göre değişimi ...	42
3.12. ORC veriminin aşırı kızdırma sıcaklığına, çevrim akışkanına ve sıcak kaynak sıcaklığına göre değişimi .....	43
3.13. ORC veriminin türbin izentropik verimine, çevrim akışkanına ve sıcak kaynak sıcaklığına göre değişimi .....	44
3.14. Isı kaynağı sıcaklığına göre ikinci kanun veriminin değişimi.....	45
3.15. Aşırı kızdırma sıcaklığına göre ikinci kanun veriminin değişimi .....	46
3.16. Türbin izentropik verimine göre ikinci kanun veriminin değişimi.....	46
4.1. Test düzeneğinin fotoğrafı .....	50
4.2. Test düzeneğinin şematik resmi .....	51

4.3. Buharlaştırıcı fotoğrafı.....	52
4.4. Yoğuşturucu fotoğrafı.....	53
4.5. Reküperatör fotoğrafı.....	54
4.6. Türbin olarak kullanılan spiral kompresörün fotoğrafı.....	55
4.7. Scroll kompresörün çalışma prensibi.....	55
4.8. Pompa fotoğrafı.....	56
4.9. Gözetleme camı temsili fotoğrafı.....	57
4.10. Selenoid vanaların fotoğrafı.....	58
4.11. Sıvı deposunun fotoğrafı.....	59
4.12. Sıvı filtresinin fotoğrafı.....	59
4.13. Kontrol panosunun fotoğrafı.....	60
4.14. Test 570 ölçüm cihazının fotoğrafı.....	61
4.15. Elektrik sayacının fotoğrafı.....	63
4.16. ORC veriminin türbin giriş sıcaklığı ile değişimi için test ve test analizi sonuçları.....	68
4.17. ORC veriminin aşırı kızdırma sıcaklığı ile değişimi için test ve test analizi sonuçları.....	69
4.18. İkinci kanun veriminin türbin giriş sıcaklığı ile değişimi için test ve test analizi sonuçları.....	70
4.19. İkinci kanun veriminin aşırı kızdırma sıcaklığı ile değişimi için test ve test analizi sonuçları.....	71

## SİMGELER DİZİNİ

$T_{\text{sıcak kaynak}}$	Isı kaynağı sıcaklığı
$T_{\text{soğuk kuyu}}$	Soğuk kuyu sıcaklığı
$T_e$	Buharlaşma sıcaklığı
$T_c$	Yoğuşma sıcaklığı
$P$	Basınç
$P_e$	Buharlaşma basıncı
$P_c$	Yoğuşma basıncı
$s$	Entropi
$h$	Entalpi
$\varphi$	Özgül ekserji
$\eta$	Verim
$\eta_{\text{exergy}}$	İkinci kanun verimi
$\eta_{\text{ts}}$	Türbin izentropik verimi
$\eta_{\text{M}}$	Türbin mekanik verimi
$\eta_{\text{E}}$	Türbin elektriksel verimi
$\eta_{\text{Carnot}}$	Carnot verimi
$Q$	Isıl debi
$E$	Ekserji
$\dot{m}$	ORC sistemi kütleli debisi
$\Delta T_{\text{ak}}$	Aşırı kızdırma sıcaklığı
$\Delta T_{\text{as}}$	Aşırı soğutma sıcaklığı
$W$	Güç
$W_t$	Türbinde üretilen güç
$W_p$	Pompada harcanan güç
$W_{\text{net}}$	Sistemde üretilen net güç
$V$	Voltaj
$I$	Akım
$P_{\text{kr}}$	Kritik basınç
$T_{\text{kr}}$	Kritik sıcaklık
$Pr$	Genişleme oranı
$g$	Giriş
$\ç$	Çıkış

## 1. GİRİŞ

Özellikle son yıllarda enerjinin kritik bir dünya denge unsuru olması ve enerji verimliliği ve çevreci yaptırımların artması ile ORC (Organic Rankine Cycle – Organik Rankine Çevrimi) teknolojisi atık ısı ve yenilenebilir enerji (güneş, jeotermal, biyokütle, vb.) gibi düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elektrik üretmek amacıyla araştırmaların ilgi odağı olmaktadır.

ORC teknolojisi düşük sıcaklığa sahip ısı kaynaklarından elektrik üretmek amacıyla ortaya konmuştur. Çevrimde kullanılan iş akışkanı su yerine organik akışkanlar olması sebebiyle bu ismi almıştır. ORC, Rankine Cycle (RC) ile aynı çalışma prensibine sahiptir.

Son yıllarda enerji verimliliğinin, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımının önemi artmıştır. Bunun sebebi, kömür, doğalgaz, fuel-oil gibi yeraltı enerji kaynaklarının giderek azalması, elektrik enerjisi ihtiyacının da giderek artmasıdır. Yeraltı enerji kaynaklarının verimli kullanılması ile yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde etkin rol oynaması; düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarının elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile mümkün olabilir. Bunun sağlanabilmesi için ORC teknolojisinin yaygınlaşması ve aktif olarak kullanılması gerekmektedir. ORC; biokütle, güneş enerjisi, jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretilmesi için uygundur. Ayrıca, endüstride birçok alanda ortaya çıkan ve etkin olarak kullanılmadan çevreye atılan atık ısılar da, ORC ile elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

ORC teknolojisinin diğer bir özelliği, kojenerasyon ve trijenerasyona uygunluğudur. Mevcut olan ısı kaynağından elektrik üretilirken ihtiyaç olan ısıtma enerjisi veya soğutma enerjisi de sağlanabilir.

Dünyanın artan enerji ihtiyacının karşılanması ve daha çevreci enerji üretimlerinin ortaya konması doğrultusunda atık ısıların değerlendirilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı için ORC teknolojisinin kullanımına yönelik birçok çalışma dünya çapında devam etmektedir. Ticari ORC ürünleri henüz boy göstermeye başlamasına rağmen yoğun araştırmalar devam etmektedir.

Bu tez kapsamında, ORC tasarımı, termodinamik analizleri, prototip sistem imalatı ve testleri gerçekleştirildi. Tez çalışması, 1,5 kW gücündeki bir ORC

sisteminin tasarımı ve testi olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Tezde, ilk olarak ORC teknolojisinin temel prensipleri hakkında genel bilgi Bölüm 2’de verildi. Potansiyel kullanım alanları, sistemde kullanılan ekipmanlar, farklı ORC sistemlerinin yapılandırılmaları açıklandı.

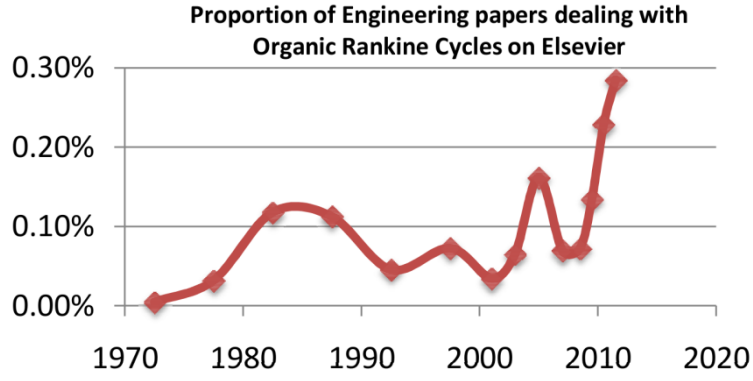
Bölüm 3’de, ORC sisteminin tasarım parametreleri ve tasarım aşamaları ayrıntılı olarak açıklandı. Önemli bir konu olan organik akışkan seçimi için belirlenen ölçütler açıklandı ve bu ölçütlere göre akışkan seçimi yapıldı. Bu bölümde farklı organik akışkanlar için 1,5 kW kurulu güçte ve 90°C, 100°C ve 110°C sıcaklıklarına sahip ısı kaynakları için ORC sisteminin verimleri termodinamik analizler yapılarak incelendi. Aşırı kızdırma, aşırı soğutma, türbin izentropik verimi gibi önemli parametrelerin değişimine göre reküperatörlü ORC sistemlerinin verimleri teorik olarak incelendi.

Bölüm 4’de ise, R245fa akışkanı kullanılarak kurulan bir ORC test prototipinden elde edilen sonuçlar incelendi. Üç farklı ısı kaynağı sıcaklığı için (90°C, 100°C ve 110°C) elde edilen test sonuçları, Bölüm 3’de açıklanan termodinamik analiz yöntemi ile karşılaştırıldı.

## **1.1. Literatür Taraması**

ORC teknolojisi ilk olarak 1961 yılında güneş enerjisinden elektrik üretmeye yönelik olarak kullanılmıştır [1]. O yıllarda yoğunlukla elektrik üretimi için kömürlü termik santraller kullanıldığı için ORC teknoloji de fazla gelişmemiştir. Fakat özellikle 2010 yılından sonra ORC teknolojisi hakkındaki yayınlar büyük oranda artmıştır. Şekil 1.1’de Elsevier yayınevi dergilerinde yayınlanan makalelerin toplam sayısının ORC ile ilgili olanlara oranı gösterilmiştir [2]. ORC için en önemli işlemlerden biri ısı kaynağı sıcaklıklarına göre uygun organik akışkanın seçilmesidir.





**Şekil 1.1.** Son yıllardaki ORC ile ilgili yayınların toplam yayın sayısına oranı.

Wang ve arkadaşları düşük sıcaklıklara sahip solar panellerle beslenen ORC sistemi için R245fa akışkanı kullanarak bir çalışma yapmışlardır [3]. Qui ve arkadaşları ise ısı kaynağı olarak biomass yakıt kullanan bir ORC sisteminin n-pentane, HFE7100 ve HFE7000 olmak üzere üç farklı kuru akışkan ile elde edilen verim değerlerini incelemişlerdir [4]. Bu çalışmada aşırı kızdırma ve aşırı soğutma işlemlerinin ORC sisteminin verimine iyi yönde etki yapmadığı belirtilmiştir.

Tian ve arkadaşları [5] toplam 20 farklı akışkanı incelemiştir ve aralarından en verimli olanlarının R245fa, R141b ve R123 olduğunu belirtmişlerdir. Chen ve arkadaşları toplam 35 akışkanın incelendiği bir çalışma yapmışlar ve ORC'de kullanılabilir akışkanları, ısı kaynağı sıcaklığı veya ısıl debi gözetmeden, akışkanların fiziksel özelliklerine göre incelemişlerdir [6]. Saleh ve arkadaşları ise 31 akışkanın dahil edildiği bir çalışmada, 30°C yoğuşma ve 100°C buharlaşma sıcaklığında, 1 MW türbin gücü için sistem verimlerini incelemişlerdir [7].

Bu tez çalışmasında ise toplam 12 organik akışkan arasından 4 tanesi bazı ölçütlere göre seçilecek ve bu akışkanlar için 90°C, 100°C ve 110°C olmak üzere üç farklı ısı kaynağı sıcaklığında performans değerlendirmesi yapılacaktır.

Organik akışkanlar, sıcaklık-entropi diyagramlarındaki doymuş buhar eğrilerinin eğimine göre üç farklı şekilde nitelendirilmiştir. Bunlar kuru, ıslak ve izentropik akışkanlardır. Doymuş buhar çizgisinin eğimi negatif olan akışkanlar ıslak, pozitif olanlar kuru ve sonsuz olanlar ise izentropik akışkanlar [8] olarak isimlendirilmektedir. ORC sistemleri için izentropik ve kuru akışkanların daha uygun olduğu belirlenmiştir [7]. Çünkü bu akışkanlar türbinde izentropik genişleme işlemi

sırasında yoğuşmazlar ve böylece türbin içinde sıvılaşma olmaz [8]. Ayrıca bu akışkanların kullanıldığı sistemde aşırı kızdırma işlemine gerek duyulmaz [9-11]. Kuru akışkanların tercih edildiği sistemlerde, ısıl verimin en yüksek değerinde olması için akışkanın türbin girişinde doymuş buhar olması gerekir [12-15]. Bu tez çalışmasında bu parametrenin ORC performansına etkisi 5°C, 10°C ve 15°C olmak üzere üç farklı aşırı kızdırma değeri için incelenmiştir.

Küçük kapasiteli (0-10 kW) ORC sistemlerinde türbin yerine, piyasada hazır olarak bulunabilen spiral (scroll), vidalı (screw) ya da kayar paletli (sliding vane) tipi kompresörler ters yönde çalıştırılarak kullanımı oldukça yaygındır. Soğutma sektöründe kullanılan bu kompresörler modifiye edilerek türbin görevinde kullanılabilirler. Kolay bulunabilir olmaları ve maliyetlerinin az olması, küçük kapasiteli ORC sistemleri için bu kompresörleri cazip bir ürün haline getirmiştir. Yapılan çalışmalarda [16-20] bu genişleticilerin izentropik verimlerinin yaklaşık %50-%80 aralığında olduğu belirtilmiştir.

ORC sisteminde türbin izentropik verimi, sistem verimini büyük ölçüde etkilemektedir. İzentropik verim değerinin sistem verimine etkisini raporlayan birçok çalışma mevcuttur. Lemort ve arkadaşları [21] R245fa akışkanı kullanarak scroll (spiral) genişletici ile ORC test sistemi kurmuşlar ve expanderin izentropik veriminin %71 olabileceğini belirtmişlerdir. R245fa akışkanı ve scroll expander kullanılarak yapılan başka bir çalışmada ise izentropik verim değerinin %82' ye kadar ulaştığı rapor edilmiştir [22]. Bu şartlar ısı kaynağı sıcaklığının 105°C sıcaklıkta olduğu durum için sağlanmıştır. Isı kaynağının sıcaklığının 105°C'den az ya da fazla olması durumunda ise scroll expanderin izentropik veriminin azaldığı görülmüştür. Quoilin [23], R123 akışkanı kullandığı ORC test sisteminde var olan scroll genişleticinin %68 izentropik verimle çalıştığını belirtmiştir.

Isı kaynağı sıcaklığı ORC sistemlerinde verimin değerini belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Isı kaynağı sıcaklığı ne kadar yüksek olursa sistemin verimi de o kadar yüksek olur. Günaydın ve arkadaşları [24] R245fa akışkanı için yaptıkları çalışmada, ısı kaynağı sıcaklığının %23 artması ile (90°C-110°C) sistem veriminin %24, %50 artması ile (90°C-135°C) sistem veriminin %50 arttığını kaydetmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında R245fa akışkanı ve scroll expander kullanılarak 1,5kW kurulu gücünde bir ORC sisteminin tasarımı ve termodinamik analizi yapılmıştır ve sistemin test prototipi kurularak testler yapılmıştır.

## 1.2. Amaç ve Kapsam

ORC sistem tasarımında organik akışkan belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Akışkan seçimi öncelikli olarak ısı kaynaklarının sıcaklığına bağlıdır. Mevcut kaynak sıcaklığında en verimli akışkanın seçilmesi sistemin verimli olması açısından önemli bir basamaktır.

Bu çalışmada öncelikli amaç düşük sıcaklıklı ısı kaynakları için (90°C, 100°C ve 110°C) uygun akışkanları belirlemek ve seçilen üç farklı ısı kaynağı değeri için bu akışkanların arasından en verimli olanı belirlemektir. Bu amaca ulaşmak için temel olarak bir ORC sisteminin termodinamik tasarım aşamaları ortaya konmuştur. Sonrasında, belirlenen tasarım aşamalarına göre belirlenen farklı organik akışkanlar için performans analizleri yapılmıştır. Termodinamik çevrim analizleri Cycle-Tempo v. 5.1 ve Refprop v. 9.0 programları kullanılarak yapıldı. Bu analizlerin sonucuna göre uygun akışkan seçilmiştir. ORC sisteminin analizi Bölüm 3’de incelenmiştir.

İkincil amaç ise seçilen bir organik akışkan için 1,5kW gücünde ORC sisteminin test düzeneğinin kurulması ve yapılan termodinamik analizlerin deneysel olarak doğrulanmasıdır. Doğrulamanın gerçekleştirilmesi için test düzeneğinde üretilen elektrik miktarını, gerçekleşen ısı geçişlerini, harcanan elektrik miktarını, basınç ve sıcaklıkları ölçmeye yönelik elemanlar ile sistemin istenilen şartlarda çalıştırılabilmesini sağlayan kontrol elemanları da bulunacaktır. Test sisteminin ayrıntılı açıklaması Bölüm 4’de yapılmıştır.

Bu tez kapsamında, bir ORC sisteminin tasarımı, termodinamik analizleri, sistem prototipi imalatı ve testi gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında genel olarak takip edilen çalışma adımları aşağıda listelenmiştir.

- 1) Literatür çalışması
- 2) ORC tasarım parametrelerinin belirlenmesi
- 3) Uygun organik akışkan seçimi

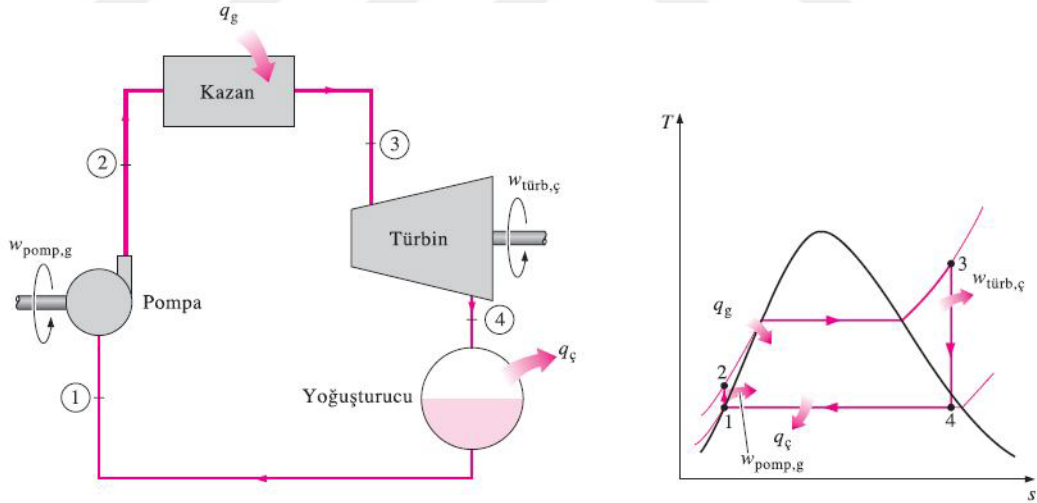
- 4) Sistem elemanlarının verim ve kayıplarının tahmini
- 5) ORC termodinamik analizlerinin yapılması
- 6) Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi
- 7) Sistemdeki elemanların kapasitelerinin belirlenmesi
- 8) Sistem test şemasının hazırlanması
- 9) Sistemin bileşenlerinin bir araya getirilerek prototoip sistemin kurulması
- 10) Testlerin yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi



## 2. ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ (ORC)

### 2.1. Rankine Çevrimi (RC): Temel Prensi

Rankine Çevrimi, bilindiği gibi buharlı güç santrallerinde kullanılan termodinamik çevrim modelidir. Bu çevrimde kullanılan iş akışkanı sudur. İdeal bir Rankine çevriminin şeması ve T-s (sıcaklık-entropi) diyagramı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Pompada basınçlandırılan sıvı fazdaki su buharlaştırıcıya gönderilir. Burada sabit basınçta ısı kaynağından suya ısı transferi gerçekleşir ve su gaz fazına dönüşür. Gaz fazındaki basınçlı su türbine gönderilir ve türbin kanatlarına dönme hareketi kazandırır. Böylece ısıl enerji mekanik enerjiye dönüşür. Türbinden çıkan gaz fazındaki su artık enerjisini tüketmiş ve çürük buhar durumuna gelmiştir. Bu halde yoğuşturucuya gönderilen su kalan ısını da çevreye atarak yoğuşur ve tekrar sıvı fazına geçer. Böylece, su tekrar pompaya gönderilebilir duruma gelmiş ve çevrim tamamlanmış olur.



Şekil 2.1. İdeal Rankine çevrimi şeması ve T-s diyagramı.

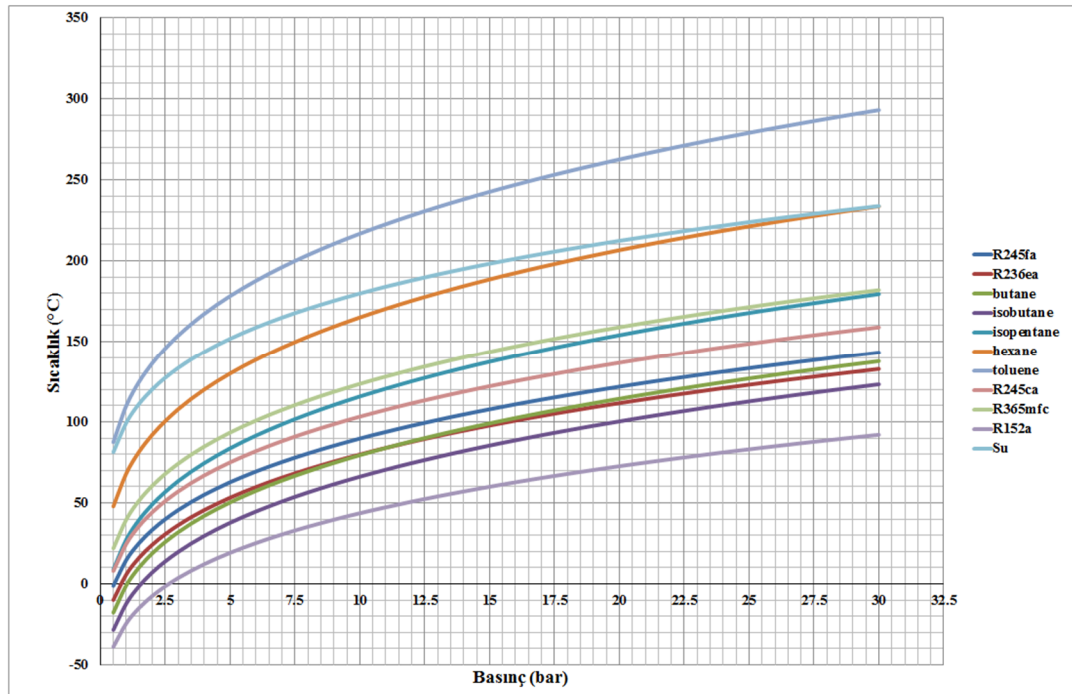
### 2.2. Organik Rankine Çevrimi (ORC)

Organik Rankine Çevrimi (ORC) düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elektrik üretimi amacıyla kullanılan termodinamik bir çevrimdir ve RC ile aynı

çevrime sahiptir. Temel prensip olan RC ile aynı şekilde çalışmasına karşılık kullanılan iş akışkanı, çevrime ismini de veren organik akışkanlardır. ORC’de çevrimdeki iş akışkanı olarak su yerine daha düşük sıcaklıklarda buharlaşabilen ve yoğunlaşabilen organik akışkanlar kullanılır. ORC’de kullanılan bazı iş akışkanlarının farklı basınçlardaki doyma sıcaklıkları Şekil 2.2’de verilmiştir. ORC çevrimlerinde ısı geri kazanım eşanjörü(rekuperatör) kullanılmasına bağlı olarak incelenebilir.

ORC ile RC aynı temel prensip üzerinde birleşeler de bazı farklılıklar göstermektedirler. ORC düşük sıcaklıklardaki ısı kaynaklarından (75°C-350°C) elektrik üretmek amacıyla tasarlandığı için kullanılan akışkanlar nispeten düşük sıcaklık ve basınçlarda gaz fazına dönüşebilen organik akışkanlardır. Bunun sonucu olarak da sistemde kullanılan elemanlar farklılık göstermektedir.

Boyut ve kapasite olarak ise ORC, RC'ye göre daha düşük kapasitelerde ve daha düşük boyutlardadır. Bu farklılık kullanım alanlarının da farklı olmasını beraberinde getirir. RC için kömür, doğalgaz, sıvı yakıt vb. kaynaklar gerekirken, ORC ise atık ısılar, güneş enerjisi, jeotermal enerji ya da biyokütle kaynaklarını kullanır.

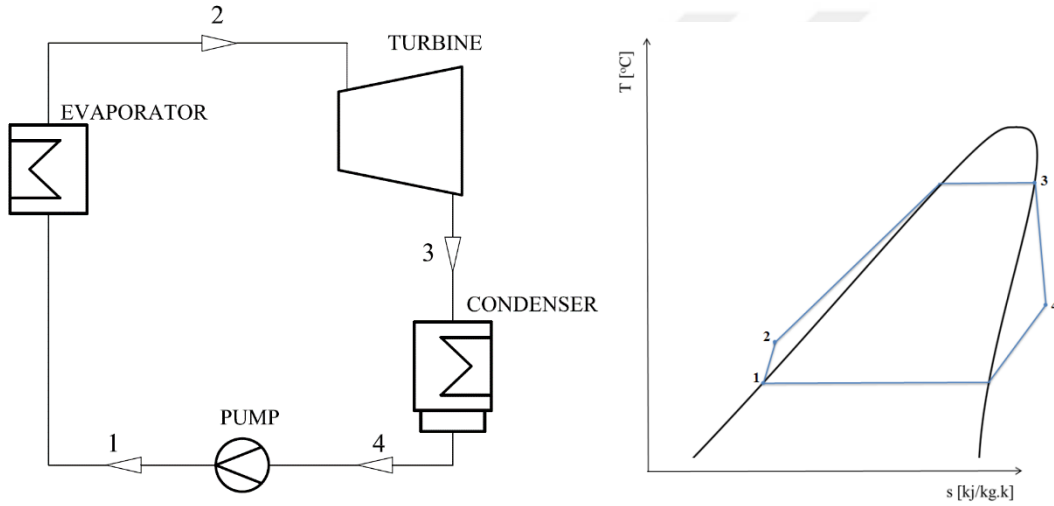


Şekil 2.2. Organik akışkanların farklı basınçlardaki doyma sıcaklıkları.

### 2.2.1. Temel Organik Rankine Çevrimi (ORC)

Teorik olarak temel ORC çevrimi RC'de olduğu gibi türbin, pompa, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu olmak üzere dört ana elemandan oluşur. Temel ORC şeması ve T-s diyagramı Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Çevrimde aşağıda sıralanan 4 hal değişimi bulunmaktadır:

- 1-2 arası evaporatörde sabit basınçta gaz fazına geçme
- 2-3 arası türbinde genişleme
- 3-4 arası yoğuşturucuda sabit basınçta sıvı fazına geçme
- 4-1 arası pompada basınçlandırma



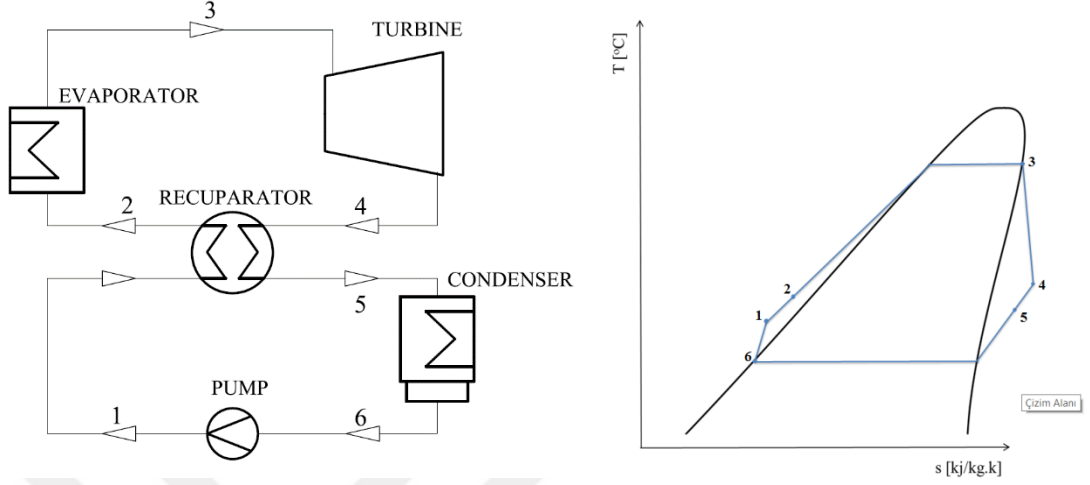
Şekil 2.3. Temel ORC çevrim şeması ve T-s diyagramı.

### 2.2.2. Reküperatörlü Organik Rankine Çevrimi

ORC' de reküperatör olarak isimlendirilen bir ısı eşanjörü ile ısı geri kazanımı yapmak mümkündür. Böyle bir ORC sisteminin şeması ve T-s diyagramı Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Reküperatörlü ORC' de aşağıdaki hal değişimleri gerçekleşmektedir:

- 1-2 arası sıvı fazındaki akışkanın gaz fazındaki akışkandan ısı alması
- 2-3 arası evaporatörde sabit basınçta gaz fazına geçme
- 3-4 arası türbine genişleme

- 4-5 arası gaz fazındaki akışkanın sıvı fazındaki akışkana ısı vermesi
- 5-6 arası yoğuşturucuda sabit basınçta sıvı fazına geçme
- 6-1 arası pompada basınçlandırma



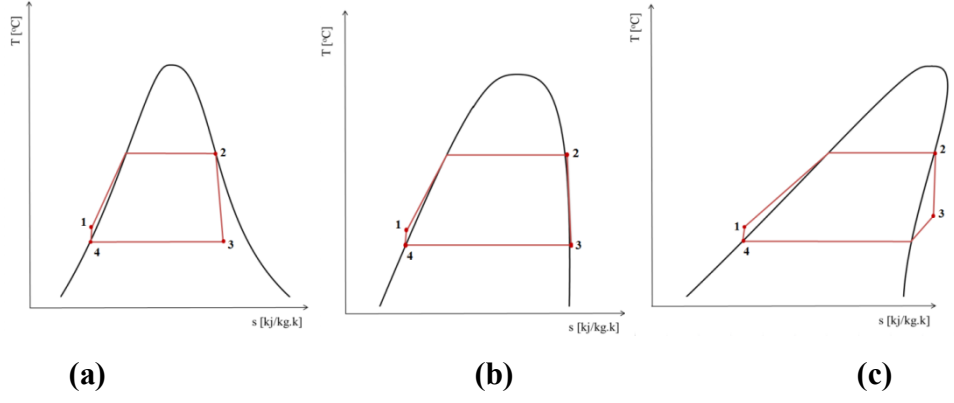
Şekil 2.4. Reküperatörlü ORC çevrim şeması ve T-s diyagramı.

### 2.3. ORC İş Akışkanları

ORC’de kullanılan iş akışkanlarının en temel özelliği düşük sıcaklıklarda buharlaşabilme özellikleridir. Bu sayede suyun ihtiyaç duyduğu yüksek sıcaklıklı ısı kaynaklarına ihtiyaç kalmadan elektrik üretimi mümkün olmaktadır.

Akışkanlar doymuş buhar eğrisinin eğimine göre Şekil 2.5’de gösterildiği gibi ıslak, kuru ve izentropik olmak üzere üç grupta incelenir. Akışkanların T-s diyagramlarındaki doyma eğrilerinin eğimi pozitif olduğunda akışkan kuru, negatif olduğunda ıslak ve sonsuz olduğunda ise izentropik olarak isimlendirilir.





**Şekil 2.5.** ORC akışkanlarının doymuş buhar eğrisinin eğimine göre T-s diyagramları ve sınıflandırması. **(a)** Kuru, **(b)** İzentropik, **(c)** Islak

Yapılan çalışmalarda ORC sistemleri için kuru ve izentropik akışkanlar daha uygun olduğu belirtilmiştir [1,2]. Islak akışkanlarda türbinde genişleme sonunda akışkanın ıslak buhar fazına geçmesi söz konusudur ve bu da türbine zarar verir. Bunu önlemek için ıslak akışkanların kullanıldığı sistemlerde aşırı kızdırma işlemi uygulanmalıdır. Fakat kuru veya izentropik akışkanlarda türbinde genişleme işlemi sırasında ıslak buhar fazına geçme olayı görülmez. Böylece hem aşırı kızdırma işleminin yapılmasına gerek kalmaz, hem de akışkan türbine doymuş buhar fazında girmesi mümkün olacağı için, aynı ısı kaynağı sıcaklığında kuru ve izentropik akışkanlar ıslak akışkanlara göre türbine daha yüksek basınçla girerler. Sonuç olarak aşırı kızdırma işlemi yapılmadığında sistemdeki maksimum basınç ile minimum basınç arasındaki basınç farkı daha fazla olacağından sistem verimi daha yüksek olacaktır. Carcasci ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada [14] toluene, benzene, cyclohexane ve cyclopentane akışkanlarını aşırı kızdırma ile ve aşırı kızdırma olmadan incelemiş ve sonuç olarak cyclopentane haricinde diğer akışkanların aşırı kızdırma işlemi olmadığında daha iyi performans sergilediğini göstermişlerdir. Bu bilgilere dayanarak bu çalışmada yapılan bütün analizler ve sonrasında gerçekleştirilen prototip imalatı reküperatörlü ORC sistemi dikkate alınarak yapılmıştır.

## 2.4. ORC Uygulama Alanları

ORC birçok düşük sıcaklıktaki kaynağı kullanarak elektrik üretiminde kullanılabilir. ORC uygulama alanları alt başlıklarda irdelenmiştir.

#### **2.4.1. Atık Isı Uygulamaları**

ORC sıcaklık seviyesi düşük birçok atık ısı ile çalıştırılabilir. Bu atık ısı uygulamalarına bazı örnekler aşağıdaki gibi sayılabilir.

*Fabrika Baca Gazı Atık Isısı:* Fabrikalarda genel işletme şatlarında bacalarda çok miktarda atık ısı çevreye atılmaktadır. Özellikler seramik, şişe-cam, çimento ve demir-çelik fabrikalarında çok miktarda atık ısının çevreye atıldığı bilinmektedir. Baca gazlarının sıcaklıkları genelde 100°C-300°C arasındadır ve RC ile çalışan buharlı güç santralinin verimli çalışmasına imkân verecek değerde değildir. Bununla birlikte bu sıcaklık seviyeleri ORC kullanımı için oldukça uygundur.

*İçten Yanmalı Motorların Atık Isısı:* Benzin, fuel-oil, doğalgaz, biyogaz gibi yakıtlar kullanarak çalışan içten yanmalı motorlar yüksek sıcaklıklarda egzoz gazı üretirler. Aynı zamanda bu motorların soğutma suları 90°C sıcaklığındadır. Motordan çıkan egzoz gazı ve motor soğutma suyu ORC için yeterli bir ısı kaynağı olmaktadır. ORC teknolojisinin binek ve ticari taşıtlarda kullanımına yönelik birçok araştırma halen devam etmektedir.

*Doğalgaz kompresör İstasyonları Atık Isısı:* Büyük kapasiteli doğalgaz boru hatlarında, doğalgaz çok uzun mesafelere taşındığı için belirli mesafelerde doğalgaz basınçlandırma istasyonları kurulur. Buralarda kullanılan kompresörler yüksek kapasitelidir ve yüksek basınç sağlarlar. Basınçlandırma işlemi sırasında kompresörler ısınır ve işlemin verimli gerçekleşebilmesi için soğutma işlemine tabii tutulurlar. Bu işlem sonucunda da çevreye atılması gereken atık ısı ortaya çıkar. ORC, buradaki atık ısıyı elektrik enerjisine çevirmek için kullanılabilir.

#### **2.4.2. Solar Uygulamalar**

Güneş enerjisi, son yıllarda üstünde çok fazla çalışmanın yapıldığı bir konudur. Teknolojinin devamlı gelişmesi ile birlikte güneşten yüksek sıcaklıklarda termal yağ veya su elde edebilen sistemler de üretilmiştir. Bu sistemlerde 350°C

sıcaklığa kadar ulaşabilen termal yağ ve su üretilebildiğinden ORC ile birlikte kullanılabilirler. Ayrıca ORC elektrik enerjisinin yanında termal enerji de sağladığı için PV (photo-voltaic) sistemlere alternatif olma özelliğine sahip bir sistemdir. ORC, güneşten elektrik ve termal enerji elde etmek için en uygun sistemlerden biridir. Son yıllarda güneş enerjisi ile birlikte ORC kullanımı hakkında birçok çalışma yapılmış, bazı bölgelerde ORC ile çalışan solar enerji santralleri kurulmuştur.

#### ***2.4.3. Jeotermal Uygulamalar***

Jeotermal kaynaklar ülkemizde ege bölgesinde yoğun bir şekilde bulunmaktadır. Sıcaklığı genelde 90 -200°C arasında olan bu kaynaklar konut ısıtmalarında hali hazırda kullanılmaktadır. Fakat bu kaynaklardan aynı zamanda elektrik üretmek de mümkündür. Jeotermal kaynaklardan ORC ile elektrik üretimi ülkemizde son zamanda yaygınlaşan bir yöntemdir. Jeotermal enerjide ORC kullanımı dünyada da çok yaygın olup birçok çalışmaya konu olmuştur.

#### ***2.4.4. Biyokütle Uygulamaları***

Biyokütle canlılardan ya da onların atıklarından elde edilen enerji kaynaklarıdır. Bu enerjiden biyogaz, biyodizel gibi yakıtlar elde edilir ve bu yakıtlar endüstriyel amaçlı kullanılırlar. Fakat bu yakıtların yanması sonucu oluşan alev sıcaklığı fosil yakıtlara göre daha düşük olmaktadır. Bu sebeple biyokütle enerjisi fosil yakıtlara ek olarak ya da katkı maddesi olarak kullanılırlar. Ayrıca bu yakıtlar için üretilen özel kazanlarda yanmadan açığa çıkan ısı enerji 350°C sıcaklıkta termal yağ veya suya aktarılabilir. Bu sebeple biyokütle enerjisi ORC için uygun bir ısı kaynağıdır. Özellikle elektrik ve ısı enerjilerinin birlikte ihtiyaç duyulduğu alanlarda ORC biyokütle ile kullanım için uygundur.

### 3. ORC TASARIMI VE ANALİZİ

#### 3.1. Tasarım Parametreleri

Bir ORC sisteminin tasarımına başlarken tasarım parametrelerinin detaylı olarak incelenmesi ve seçilmesi gerekir. İlk olarak belirlenmesi gereken parametre, sistemde kullanılacak sıcak ve soğuk ısı kaynakların sıcaklığı ve niteliği olmaktadır. Daha sonra bu sıcaklık değerlerine göre maksimum güç ve verimin elde edileceği iş akışkanının belirlenmesi gerekir. Bu aşamada mevcut akışkanlar arasından seçim yapılırken, akışkanın kritik sıcaklığı ve basıncı, çevresel faktörler, yanıcılık ve zehirleyicilik gibi bazı özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Akışkan seçimi için ayrıntılı açıklama daha sonra yapılacaktır. İş akışkanının seçiminden sonra sistemin termodinamik olarak modellenmesi ve analiz edilmesi gerekir. Sistem performansını belirlemek için ihtiyaç duyulan veriler bu termodinamik analiz modelinin çözümü sonucunda elde edilen veriler olacaktır.

##### 3.1.1. Isı Kaynağı Sıcaklığı

Isı kaynağı sıcaklığı ORC tasarımının en önemli parametrelerinden biridir. Çünkü sistemin ulaşabileceği maksimum verim ısı kaynağı sıcaklığına bağlıdır. Ayrıca sistemde kullanılacak iş akışkanının belirlenmesi de ısı kaynağı sıcaklığına bağlıdır. Bu tez çalışmasında, düşük sıcaklık uygulaması için sıcak kaynak sıcaklığı 90°C, 100°C ve 110°C olarak seçilmiştir.

##### 3.1.2. Soğuk Kuyu Sıcaklığı

ORC sisteminde türbinden çıkan düşük enerjili buharın kullanılmayan enerjisi yoğuşturucu yardımı ile çevreye aktarılır. Bu esnada akışkan buhar fazından sıvı fazına geçer ve çevrim tamamlanmış olur. Bu işlem teorik olarak sabit basınç altında gerçekleşir. Bilindiği gibi buharlı güç santrallerinde çevrimin verimi artırmak için yoğuşturucu basıncı mümkün olan en alt basınca indirgenmelidir [27]. Bu

prensip ORC sistemleri için de geçerlidir. Bu sebeple soğuk kuyu sıcaklığı mümkün olan en alt sıcaklıkta olmalıdır.

Bu tez çalışmasındaki prototip test sisteminde soğuk kuyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Bu sebeple soğuk kuyunun sıcaklığı sabit değildir. Fakat farklı zamanlara göre şebeke suyu sıcaklığının değerleri göz önüne alındığında soğuk kuyu sıcaklığı yaklaşık 15°C olarak alınmıştır.

### **3.1.3. Aşırı Kızdırma ve Aşırı Soğutma**

Aşırı kızdırma değeri, buharlaştırıcı çıkışındaki çevrim akışkanının sıcaklığı ile çevrim akışkanının buharlaştırıcı basıncındaki doyma sıcaklığı arasındaki farktır.

$$\Delta T_{ak} = T_3 - T_{evaporatör-doyma} \quad (1)$$

Yapılan çalışmalarda aşırı kızdırma değerinin artırılmasının sistemin verimliliğini azalttığı görülmüştür [2, 11, 12]. Fakat buharlaştırıcıdan çıkan çevrim akışkanının belirli sebeplerle (ısı ya da basınç kaybı) gaz fazından tekrar sıvı fazına geçmesi türbine sıvının gitme ihtimalini doğurur. Bu sebeple bir miktar aşırı kızdırma işlemi gerçekleşmesine izin verilir ve türbine giden akışkanın gaz fazında olması sağlanır. Fakat bu parametre sistem performansını etkilediği için optimum bir değerde olması gereklidir. Bu sebeple, tez çalışması kapsamında, buharlaştırıcıda aşırı kızdırma değerinin 5°C, 10°C ve 15°C olacağı kabul edilecektir. Bu üç farklı değerde sistem performansı belirlenecek ve aşırı kızdırma değerinin optimum olduğu nokta belirlenecektir.

Aşırı soğutma değeri de aşırı kızdırma değerine benzer olarak, yoğuşturucu çıkışındaki çevrim akışkanının sıcaklığı ile çevrim akışkanının yoğuşturucu basıncındaki doyma sıcaklığı arasındaki farktır.

$$\Delta T_{as} = T_6 - T_{kondenser-doyma} \quad (2)$$

Aşırı soğutma değerinin artırılmasının yoğuşturucu yükünü arttırdığı ve sistem performansını azalttığı yapılan çalışmalarda belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında aşırı soğutma değeri 5°C olarak sabit tutulacaktır.

### **3.1.4. Çevrim Akışkanı**

ORC sisteminin üst ve alt sıcaklık limitleri belirlendikten sonra uygun akışkan seçimi için analizlere başlanabilir. Uygun akışkan seçimi için ilk olarak mevcut akışkanların  $T_{kr}$  değerleri incelenmelidir. Sistemde süperkritik bölgeye geçilmemesi için seçilecek akışkanın  $T_{kr}$  değeri ısı kaynağının sıcaklığından daha fazla olmalıdır. Bu sınırlamaya göre mevcut akışkanlar içinden bir kısmı seçim dışında kalmış olur.

Bu adımdan sonra geriye kalan organik akışkanların termofiziksel ve çevresel özellikleri belirlenmelidir. ODP (Ozone Depletion Potential) ve GWP (Global Warming Potential) değerleri ile zehirleyicilik ve yanıcılık özellikleri akışkanın kullanılabilirliğini derecelendiren önemli kavramlardır. Çevresel özellikler değerlendirildikten sonra ikinci eleme işlemi gerçekleştirilir. Böylece mevcut organik akışkanların geriye kalan kısmı için termodinamik analiz hesapları yapılabilir. Çevrim akışkanı seçimi aşağıdaki adımlarda ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

#### *3.1.4.1. Akışkanların Termofiziksel Özellikleri*

Termodinamik hesaplamalarda kullanılacak olan entalpi, entropi, yoğunluk gibi termofiziksel özelliklerin hesaplanması için Refprop v.9.0 yazılımı kullanılacaktır.

#### *3.1.4.2. Akışkanların Çevresel Özellikleri*

Bir ORC sisteminde kullanılacak akışkanın termodinamik performansının yanında çevresel etkilerine de bakılmalıdır. Bilindiği gibi yaygın olarak kullanılan R134a, R404A, R507A gibi soğutucu gazlar atmosfere belli bir miktarda zarar vermektedirler. Bu zararların miktarlarının belirlenmesi için birçok çalışma yürütülmekte ve bazı uluslararası anlaşmalar ile bu gazlardan bazılarının kullanımı yasaklanmakta, ithalat ve ihracatına müsaade edilmemektedir. Avrupa Birliği Komisyonu'nun aldığı kararlar neticesinde HCFC-22 (R22) olarak bilinen ve dünya genelinde çok yaygın olarak kullanılan soğutucu gazının, 2001 yılı başından itibaren yeni cihazlarda kullanımı yasaklanmıştır.

Bu gazların çevreye verdiği zararları sayısal olarak ifade edebilmek için Global Warming Potential (GWP-Küresel Isıtma Potansiyeli) ve Ozone Depletion Potential (ODP-Ozon Delme Potansiyeli) olmak üzere iki kıstas oluşturulmuştur. Bu değerler organik akışkanların çevreye etkilerini ifade eden en yaygın iki kavramdır.

*Global Warming Potential (GWP)*: Bu değer bir organik akışkanın küresel ısınmaya yaptığı etkiyi ifade eder. GWP, bir akışkanın birim kütlesinin atmosferde tuttuğu ısı miktarı ile CO<sub>2</sub>'in birim kütlesinin atmosferde tuttuğu ısı miktarına oranlanması ile hesaplanır [25]. Verilen bir GWP değeri belirtilmiş bir zaman dilimi için hesaplanır. Bu sebeple GWP değeri söylenirken hangi zaman dilimine ait olduğu belirtilmelidir. Bu tez çalışmasında akışkanların GWP değerleri bir seçim ölçütü olarak kullanılacaktır. Küresel ısınmaya olumsuz yönde etki eden akışkanlar için hesaplama yapılmayacaktır. Avrupa birliği tarafından yapılan çalışmalarda 2022 yılı itibariyle ticari amaçlı sistemlerde GWP değeri 1500'den az olan gazların kullanılması gerektiği öngörülmüştür [28].

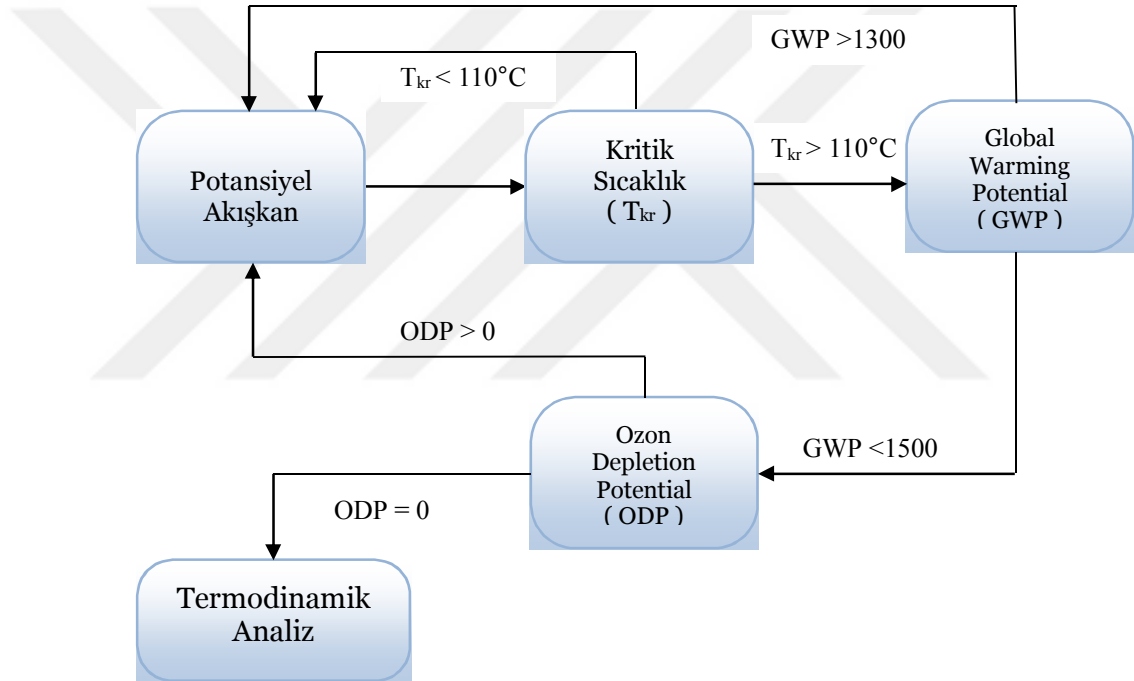
*Ozone Depletion Potential (ODP)*: Akışkanların çevresel etkileri incelenirken bahsedilen önemli değerlerden olan ODP, akışkanın ozon tabakasına verdiği zararı, R-11 akışkanın ozon tabakasına verdiği zarar ile karşılaştırarak ifade eden sayısal bir değerdir. Bir kilogram R-11'in ozon delme potansiyeli "1" olarak standart hale getirilmiştir. Diğer akışkanların ODP değerleri, R-11'e oranla ne kadar delme potansiyeline sahip olduklarını belirtir. Örneğin; R-113 isimli akışkanın ODP değeri 0,8 olarak bilinmektedir. Bu değer, R-113'ün R-11'den 4/5 oranına daha az ozon delme potansiyeline sahip olması anlamına gelir. Ozon delme potansiyeline sahip akışkanların kullanımı hem çevre için tehlikeli hem de tedarik edilmesinin zor olacağı düşünüldüğü için bu tez çalışmasında akışkan seçimi yapılırken ODP değeri sıfırdan farklı olan akışkanlar seçimin dışında bırakılacaktır.

#### 3.1.4.3. Potansiyel Organik Akışkanlar

Mevcut çok sayıdaki organik akışkanlar içinden seçim yapılabilmesi için yukarıda belirtilen ölçütler esas alınarak potansiyel akışkanların belirlenmesi gereklidir. Şekil 3.1'de gösterilen algoritma, potansiyel akışkanların belirlenmesi için kullanılacaktır. Öncelikle organik akışkanın kritik sıcaklığı belirlenerek, hedeflenen

ısı kaynağı sıcaklığına uygunluğu incelenecektir. Eğer kritik sıcaklık maksimum ısı kaynağı sıcaklığı olan  $110^{\circ}\text{C}$  değerinden küçük ise, bu akışkanın seçime dahil edilmeyecektir. Eğer sıcaklık değeri  $110^{\circ}\text{C}$  değerinden büyük ise bir sonraki adım olarak GWP değerine bakılacaktır. Maksimum GWP değeri bu çalışmada 1500 (100 yıllık zaman dilimi için) olarak belirlenmiştir. Ozon tabakasını delme potansiyeline sahip akışkanlar da seçim dışında bırakılacaktır.

Bu algoritma ile Çizelge 1’de listelenen akışkanlar değerlendirilerek bu ölçütleri sağlayan akışkanlar termodinamik analizi yapılmak üzere belirlenecektir. Potansiyel ORC akışkanlarının çevresel ve termofiziksel özellikleri de ( $T_{kr}$ ,  $P_{kr}$ , GWP ve ODP) Çizelge 3.1’de listelenmiştir.



**Şekil 3.1.** Organik akışkan seçiminde kullanılan algoritma akış şeması.

#### 3.1.4.4. Çevrim Akışkanının Seçimi

Çizelge 1’de listelenen ORC’ de kullanılabilir potansiyel 28 akışkan arasından R227ea, propylene, R1234yf ve R1234ze akışkanları kritik sıcaklıklarının  $110^{\circ}\text{C}$ ’den düşük olması sebebiyle elenmiştir. R124 akışkanı ise ODP değerinin sıfırdan büyük olması sebebiyle elenmiştir. Ayrıca yanıcı özelliği bulunan



akışkanlarda elenmiştir. Yanıcı akışkanların kullanılması durumunda yangın veya patlama riski vardır. Bunun yanında, yanıcı özelliği olan akışkanların kullanılması durumunda özel önlemler alınmalıdır. Yangın ve sağlık önlemleri alınabilse bile bu işlemler ekstra maliyet anlamına gelir. Bu sebeple yanıcı akışkanlar çevrim akışkanı olarak seçilmemiştir.

Bu durumda Çizelge 1’de bulunan 28 akışkan arasından yapılan elemelerden sonra termodinamik analizlerinin yapılmasına karar verilen akışkanlar şunlardır;

- 1) R236ea
- 2) R245ca
- 3) R245fa
- 4) R365mfc

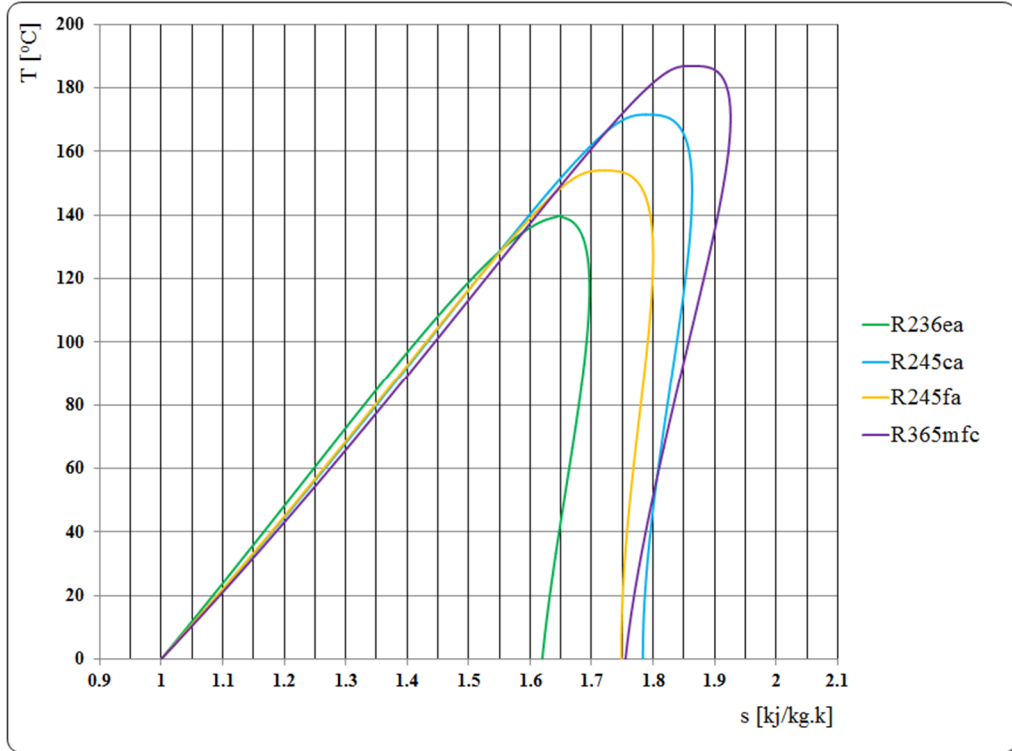
**Çizelge 3.1.** ORC’ de kullanılabilir potansiyel akışkanların çevresel ve termodinamik özellikleri.

Akışkan İsmi	Kimyasal Formül	T <sub>kr</sub> [°C]	P <sub>kr</sub> [bar]	ODP	GWP [100 yıl]	Yanıcılık özelliği	
1	R152a	F <sub>2</sub> HC-CH <sub>3</sub>	113.26	45.168	0	124	Yanıcı
2	R236ea	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	139.29	35.02	0	1100	Yanıcı Değil
3	R245ca	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> F <sub>5</sub>	174.42	39.25	0	693	Yanıcı Değil
4	R245fa	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> F <sub>5</sub>	154.01	36.51	0	950-1050	Yanıcı Değil
5	R365mfc	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> F <sub>5</sub>	186.85	32.66	0	782	Yanıcı Değil
6	butane	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	151.9	37.9	0	3.3	Yanıcı
7	isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	134.66	36.29	0	3.3	Yanıcı
8	isopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	187.2	33.8	0	11	Yanıcı
9	neopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	160.59	31.96	0	11	Yanıcı
10	cyclopropane	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	125.15	55.797	0	3	Yanıcı
11	dimethylether	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	127.23	53.368	0	1	Yanıcı
12	Trifluoroiodomethane	CF <sub>3</sub> I	123.29	39.53	0	0.4	Yanıcı
13	perfluoropentane	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	147.1	20.45	0	7500	Yanıcı
14	perfluorobutane	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	113.18	23.234	0	8000	Yanıcı
15	R124	CHClFCF <sub>3</sub>	122.28	36.243	0.04	550	Yanıcı Değil
16	R227ea	CF <sub>3</sub> CHFCF <sub>3</sub>	101.75	29.25	0	3220	Yanıcı Değil
17	R263fa	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	124.92	32	0	9810	Yanıcı Değil
18	transbutane	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	155.46	40.273	0	3	Yanıcı
19	RC318	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	115.23	27.775	0	10000	Yanıcı Değil
20	propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	91.061	45.55	0	2	Yanıcı
21	R1234yf	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	94.7	33.822	0	4	Yanıcı Değil
22	R1234ze	C <sub>3</sub> F <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	109.37	36.363	0	7	Yanıcı Değil
23	toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	318.6	41.26	0	3	Yanıcı
24	pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	196.55	33.71	0	3	Yanıcı
25	octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	296.17	24.97	0	0	Yanıcı
26	nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	321.4	22.81	0	0	Yanıcı
27	hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	234.67	30.34	0	0	Yanıcı
28	heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	266.98	27.36	0	0	Yanıcı

Bu akışkanların termodinamik analizleri tamamlandıktan sonra sonuçlar değerlendirilecek ve test düzeneğinde kullanılacak olan akışkan belirlenecektir. Şekil 3.2’de bu akışkanların T-s diyagramları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi bu akışkanlar kuru akışkanlar sınıfındadır.

### 3.1.5. ORC Sistem Elemanlarının Verimleri ve Kayıplar

Analizler yapılmadan önce sistemi oluşturan elemanların verim değerlerinin yaklaşık da olsa belirlenmesi gerekir. Böylece analiz sonuçları mümkün olduğunca gerçek koşullardaki performans değerlerine yaklaşabilir.



Şekil 3.2. Seçimi yapılan ORC akışkanlarının T-s diyagramları.

#### 3.1.5.1. Türbin-Jeneratör Verimi

Türbin verimi ORC sistemlerinin verimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bu sebeple türbin veriminin analizlerden önce gerçek şartlara uygun tahmin edilmesi gerekir. Bu tez çalışmasında; izentropik verim prototipte kullanılacak türbin için kesin bilinmediğinden %60, %70 ve %80 alınarak hesaplamalar yapılacaktır. Böylece bu parametrenin komple sistem verimi üzerindeki etkisi de ortaya konacaktır.

Ayrıca türbin ile jeneratör arasındaki bağlantı elemanında meydana gelecek mekanik kayıplar 0,9 ve jeneratörün dönme gücünü elektriksel güce dönüştürme verimi de 0,95 olarak yaklaşık belirlenmiştir. Böylece, türbin-jeneratör ikilisinin genel verimi denklem 3'deki gibi hesaplanır.

$$\eta_{türbin} = \eta_{ts} \cdot \eta_M \cdot \eta_E \quad (3)$$

#### 3.1.5.2. Pompa-Motor Verimi

Basınçlandırma işlemi için kullanılacak olan pompanın izentropik verimi 0,8 olarak belirlenmiştir. Pompa ile elektrik motoru arasındaki bağlantı elemanındaki mekanik kayıplar 0,8 ve elektrik motorunun elektriksel verimi de 0,95 olarak analize dahil edilmiştir.

#### 3.1.5.3. Akış Kayıpları

Tüm ORC hattını oluşturan elemanlardaki ve borulamalarda oluşacak sürtünme kaynaklı basınç kayıpları analizlerde dikkate alınmamış ve ihmal edilmiştir. Bu kayıpların termodinamik analizler tamamlandıktan sonra nihai sistem tasarımı için hesaplanması daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

#### 3.1.5.4. Isıl Kayıplar

Komple sistem elemanları yalıtılacağından çevreye olan ısı kayıpları küçük kabul edilerek hesaba katılmamıştır.

## 3.2. ORC Termodinamik Analizi

### 3.2.1. Analiz Adımlarının Belirlenmesi ve İncelenmesi

Tez çalışması kapsamında reküperatörlü ORC teknolojisi inceleneceğinden aşağıda bu çevrimin analiz adımları listelenmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi reküperatörlü bir ORC sisteminde altı ana işlem yani hal değişimi vardır:

- 1-2 arası sıvı fazındaki akışkanın gaz fazındaki akışkandan ısı alması
- 2-3 arası evaporatörde sabit basınçta gaz fazına geçme
- 3-4 arası türbine genişleme
- 4-5 arası gaz fazındaki akışkanın sıvı fazındaki akışkana ısı vermesi
- 5-6 arası yoğuşturucuda sabit basınçta sıvı fazına geçme
- 6-1 arası pompada basınçlandırma

Bu işlemler için temel seviyede yapılacak termodinamik analizler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

#### **1-2 Arasında Reküperatörde Isı Geçişi (Yüksek Basınç Bölgesi):**

Reküperatörde, türbinden çıkan yüksek sıcaklıklı gaz fazındaki akışkandan, pompadan çıkan düşük sıcaklıklı sıvı fazındaki akışkana ısı geçişi olur. Pompadan çıkıp buharlaştırıcıya gönderilen sıvı fazındaki akışkan bir miktar ısındığı için, buharlaştırıcıda daha az enerjiye ihtiyaç duyar. Böylece reküperatör sistemin verimini arttırmış olur.

Reküperatörde gerçekleşen ısı geçişi için kinetik ve potansiyel enerjilerin değişmediği kabul edilerek termodinamiğin 1. kanunu uygulanırsa;

$$Q - W = \dot{m} \cdot (h_c - h_g) \quad (4)$$

Reküperatör elemanının çevre ile ısı alış-verişi yapamayacak şekilde yalıtıldığı düşünülürse ve herhangi bir iş alış verişi de olmadığından denklem aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$Q_{reküperatör} = \dot{m} \cdot (h_c - h_g) \quad (5)$$

(5) nolu denklem reküparatörün yüksek basınç tarafına uygulanırsa;

$$Q_{reküparatör} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (6)$$

denklemini elde edilir.

### **2-3 Arasında Buharlaştırıcıda Sabit Basınçta Gaz Fazına Geçiş:**

Buharlaştırıcıda sıcak kaynağın sahip olduğu ısı, basınçlı çevrim akışkanına aktarılarak sıcaklığının artması ve buharlaşması sağlanır. Buharlaştırıcıda de ısı geçişinin sadece çevrim akışkanına aktarıldığı, yalıtıldığı ve kinetik, potansiyel enerjilerin değişmediği kabulü yapılmıştır. Denklem (7) kullanılarak buharlaştırıcıdaki ısı geçişi hesaplanabilir;

$$Q_{evaporatör} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (7)$$

Buharlaştırıcıda gerçekleşen ısı geçişi değeri, aynı zamanda sıcak kaynağı oluşturan akışkan debisinin hesaplanması için de kullanılır;

$$Q_{evaporatör} = \dot{m}_{sıcak kaynak} \cdot (h_{sıcak kaynak-giriş} - h_{sıcak kaynak-çıkış}) \quad (8)$$

### **3-4 Arasında Türbinde Genişleme:**

Bu hal değişimi çevrimin en önemli adımı olarak nitelendirilebilir. Burada, nihai amaç olan elektrik üretimini gerçekleştiren türbinde genişleme işlemi olmaktadır. Türbin için, kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ile türbinden çevreye olan ısı transferi de ihmal edilerek termodinamiğin 1. kanunu uygulandığında türbin teorik işi;

$$W_{türbin} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4) \quad (9)$$

olarak denklemini ile hesaplanır. Burada, türbinin izentropik verimi göz önünde bulundurulmalıdır. Bir türbinin izentropik verimi, türbinin gerçekte ürettiği güç ile izentropik şartlar altında ürettiği güce oranıdır;

$$\eta_{türbin-izentropik} = \frac{W_{türbin}}{W_{türbin-izentropik}} = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_{4s})} \quad (10)$$

denklemini ile hesaplanır.

#### **4-5 Arasında Reküparatörde Isı Geçişi (Alçak Basınç Bölgesi):**

Daha önce bahsedildiği gibi reküparatörde sistem içinde bir ısı geçişi vardır. Denklem (5), reküparatörün alçak basınç tarafına uygulanırsa;

$$Q_{reküparatör} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_5) \quad (12)$$

denklemini elde edilir.

#### **5-6 Arasında Yoğuşturucu Sabit Basınçta Sıvı Fazına Geçişi:**

Türbinde enerjisini dönme gücü üretmek için kullanan çevrim akışkanı, daha sonra reküparatörde geriye kalan enerjisini aktarır ve nihai olarak ta yoğuşturucuda çevreye ısı atarak sıvılaşır. Böylece sıvı fazındaki akışkan pompaya gönderilebilir. Yoğuşturucudaki ısı geçişi aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir;

$$Q_{kondenser} = \dot{m} \cdot (h_5 - h_6) \quad (13)$$

Yoğuşturucudaki ısı geçişi kullanılarak soğuk kuyudaki akışkan için kütleli debi de aşağıdaki denklemden hesaplanabilir.

$$Q_{kondenser} = \dot{m}_{soğuk kaynak} \cdot (h_{soğuk kaynak-giriş} - h_{soğuk kaynak-çıkış}) \quad (14)$$

#### **6-1 Arasında Pompada Basınçlandırma:**

Bu adım çevrimin son adımıdır. Pompaya gelen düşük basınçlı sıvı fazındaki akışkan basınçlandırılmış şekilde buharlaştırıcıya gönderilir. Böylece çevrim tamamlanmış olur. Pompanın güç gereksinimi kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ile çevreye olan ısı geçişi ihmal edilerek aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$W_{pompa} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_6) \quad (15)$$

Pompanın izentropik verimi de aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$\eta_{pompa-izentropik} = \frac{W_{pompa-izentropik}}{W_{pompa}} = \frac{(h_{1s} - h_6)}{(h_1 - h_6)} \quad (16)$$

### 3.2.2. Genel Verim Hesabı

Çevrimden elde edilen net gücün bu gücü üretmek için harcanan toplam güce oranı genel verimi ifade eder ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$\eta_{ORC} = \frac{W_{net}}{Q_{evaporatör}} = \frac{W_{türbin} - W_{pompa}}{Q_{evaporatör}} \quad (17)$$

### 3.2.3. İkinci Kanun Analizi

#### *Sistemdeki elemanların ikinci kanun analizi*

Çevrimde kullanılan elemanların ikinci kanun verimleri ve sistemin ikinci kanun analizi aşağıda incelenmiştir. İkinci kanun verimi, sistemde elde edilen kullanılabilir net güç ile potansiyel kullanılabilir net gücün oranıdır. Aşağıdaki formül ile kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edildiği durum için özgül ekserji hesaplanabilir.

$$\varphi = (h - h_0) - T_0(s_1 - s_0) \quad (18)$$

Toplam ekserji ise özgül ekserji ile debinin çarpılmasıyla bulunur;

$$E = \dot{m} \cdot \varphi \quad (19)$$

#### Buharlaştırıcı:

Buharlaştırıcıdaki ısı geçişi sırasındaki ekserji değişimi, aşağıdaki ifade ile hesaplanır

$$E_{evaporatör} = \dot{m}_{sıcak\ kaynak} \cdot (\varphi_{sıcak\ kaynak-giriş} - \varphi_{sıcak\ kaynak-çıkış}) \quad (20)$$

Aynı zamanda bu ekserji miktarı sistemin kullanabileceği maksimum enerji miktarı, yani sisteme giren toplam ekserji miktarını ( $E_{giren}$ ) temsil eder.

#### Yoğuşturucu:

Yoğuşturucuda gerçekleşen ısı geçişi sırasında oluşan ekserji miktarı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir;

$$E_{kondenser} = \dot{m}_{soğuk\ kuyu} \cdot (\varphi_{soğuk\ kaynak-çıkış} - \varphi_{soğuk\ kaynak-giriş}) \quad (21)$$

#### Reküpator:

Reküpārataörde düşük basınçlı taraftan yüksek basınçlı tarafa ısı geçişi gerçekteşir. Isı geçişi sırasında tersinmezlikler sebebi ile yaşanan ısı kaybının miktarı reküpārātörün ikinci kanun analizi ile açıklanabilir;

$$\eta_{exergy-reküpārātör} = \frac{E_2-E_1}{E_4-E_5} \quad (22)$$

Pompa:

Pompanın ikinci kanun verimi şu şekilde ifade edilir;

$$\eta_{exergy-p} = \frac{W_{tr}}{W_p} \quad (23)$$

Bu ifade, pompada iş yapılırken ihtiyaç duyulan tersinir gücün, gerçekte güce oranıdır.

Türbin:

Türbinin ikinci kanun verimi şu şekilde ifade edilir;

$$\eta_{exergy-t} = \frac{W_{tr}}{W_p} \quad (24)$$

Türbinde üretilen gerçekte gücün, tersinir durumda üretilecek işe oranı türbinin ikinci kanun verimi değerini verir.

### ***ORC sisteminin ikinci kanun analizi***

Bir ORC sisteminden elde edilen yararlı iş, türbinde üretilen gerçekte güçtür. ORC sisteminin kullandığı potansiyel enerji yani sistemin ekserjisi ise, buharlaştırıcıda sisteme giriş yapan ekserji miktarıdır. Bu iki değerlerin oranı ORC sisteminin ikinci kanun verimini ifade eder. Böylece, mevcut olan potansiyel gücün hangi oranda kullanılabilir işe dönüştürüldüğü de anlaşılır.

$$\eta_{exergy-ORC} = \frac{W_{net}}{E_{giren}} \quad (25)$$

### ***3.2.4. ORC Termodinamik Analiz***

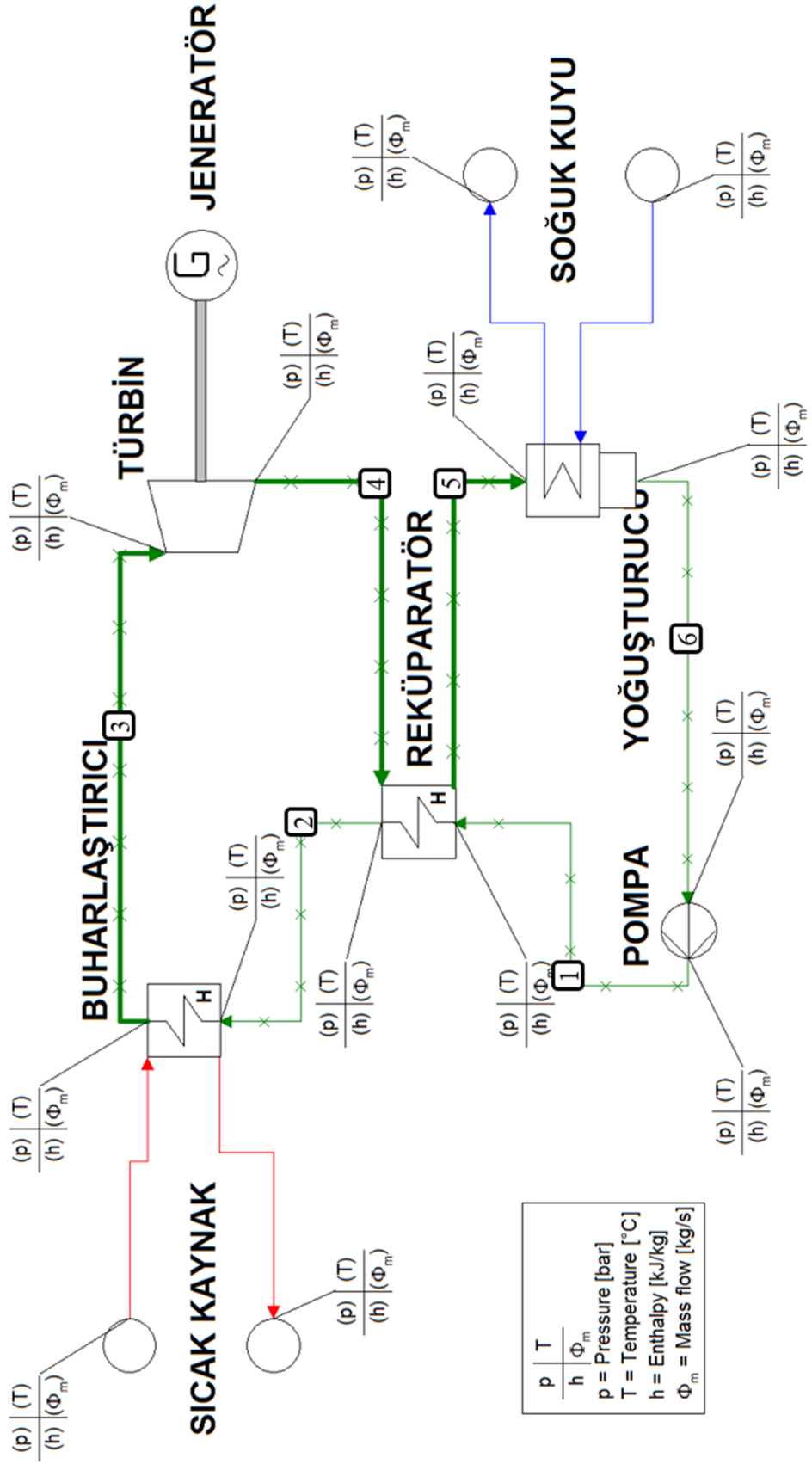
Termodinamik çevrim analizleri Cycle-Tempo v. 5.1 ve Refprop v. 9.0 programları kullanılarak yapılmıştır. Cycle-Tempo programı; buharlı ve gazlı güç üretim sistemleri, ısı pompaları ve soğutma çevrimlerinin termodinamik çevrim



analizini yapan ve verimliliğini hesaplayan bir termodinamik çevrim analizi programıdır. Kazan, türbin, ısı değiştirici, pompa, ısı kaynağı, yoğuşturucu vb. gibi yaygın olarak kullanılan elemanlar kütüphanesinde hazır bulunmaktadır. Bu sayede kütüphane elemanları kullanılarak ve birbirleriyle bağlantıları yapılarak hızlı bir şekilde çevrim modellemesi ve analizi yapılabilmektedir. Ayrıca, programda; çevrimde kullanılan akışkanların termodinamik özelliklerini hesaplamaya yarayan bir akışkan kütüphanesi modülü de bulunmaktadır. Bu modülde su, hava, baca gazları, gibi sıklıkla kullanılan akışkanlar bulunmaktadır. Bunun yanında, Cycle-Tempo programı, akışkan kütüphanesi daha geniş olan Refprop programının veritabanı ile eşleştirilerek birçok organik akışkanın da özelliklerini hesaplama için imkan tanınmaktadır. Böylece birçok organik akışkan için analizlerin yapılması mümkün olmaktadır. Şekil 3.3’de Cycle-Tempo programının arayüzünde bu çalışmada kullanılan çevrim için oluşturulmuş reküperatörlü temel ORC sisteminin şematik görüntüsü verilmiştir.

ORC termodinamik analizlerinde genel olarak kullanılan kabuller aşağıda listelenmiştir.

- 1) Türbin-Jeneratör verimi: Analizler türbin izentropik verimi %60, 70 ve 80 olmak üzere üç farklı değer için yapılmıştır. Jeneratördeki mekanik-elektrik güç dönüşümünün verimi %95 ve jeneratör türbin bağlantısındaki mekanik kayıplar ise %90 kabul edilmiştir.
- 2) Pompa-Motor verimi: Pompa izentropik verimi %80, mekanik kayıplar %80 ve mekanik-elektrik güç dönüşümü sırasındaki verim de %95 olarak analizlere dahil edilmiştir.
- 3) Akış kayıpları: Sistemde oluşacak basınç kayıpları ihmal edilmiştir.
- 4) Isı kayıpları: Sistemden çevreye gerçekleşecek ısı kayıpları ihmal edilmiştir.



Şekil 3.3. Cycle-Tempo programında oluşturulan reküperatörlü ORC şeması.

### 3.2.5 Termodinamik Analiz Sonuçları

ORC tasarımında etkili olan dört farklı tasarım parametresi için termodinamik analizler yapılmıştır. Bu inceleme parametreleri ve değerleri aşağıda listelenmiş ve Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

- 1) Çevrim akışkanı
  - a) R236ea
  - b) R245ca
  - c) R245fa
  - d) R365mfc
- 2) Isı kaynağı sıcaklığı
  - a) 90°C
  - b) 100°C
  - c) 110°C
- 3) Aşırı kızdırma sıcaklığı
  - a) 5°C
  - b) 10°C
  - c) 15°C
- 4) Türbin izentropik verimi
  - a) %60
  - b) %70
  - c) %80

Türbin net gücü 1,5kW olarak hedeflenmiş ve bu değerinde sabit tutulmuştur. Ayrıca tüm analizlerde şebeke suyu kullanılacağı düşüncesiyle soğuk kaynak sıcaklığı 15°C’de sabit tutulmuştur ve buna bağlı olarak ısı eşanjörü verimleri de dikkate alınarak kondenzasyon sıcaklığı 35°C olarak sabit alınmıştır. Reküperatör çıkışındaki buhar sıcaklığı kondenzasyon sıcaklığı olan 35°C dikkate alınarak 40°C olarak tanımlanmıştır. Prototipte kullanılacak pompa dikkate alınarak pompa genel verimi %60 olarak alınmıştır.

Termodinamik analizler sonucunda ORC sistemindeki tüm noktalardaki özellikler ve Çizelge 3.2 listelenen tüm sistem performans değerleri hesaplanmıştır.

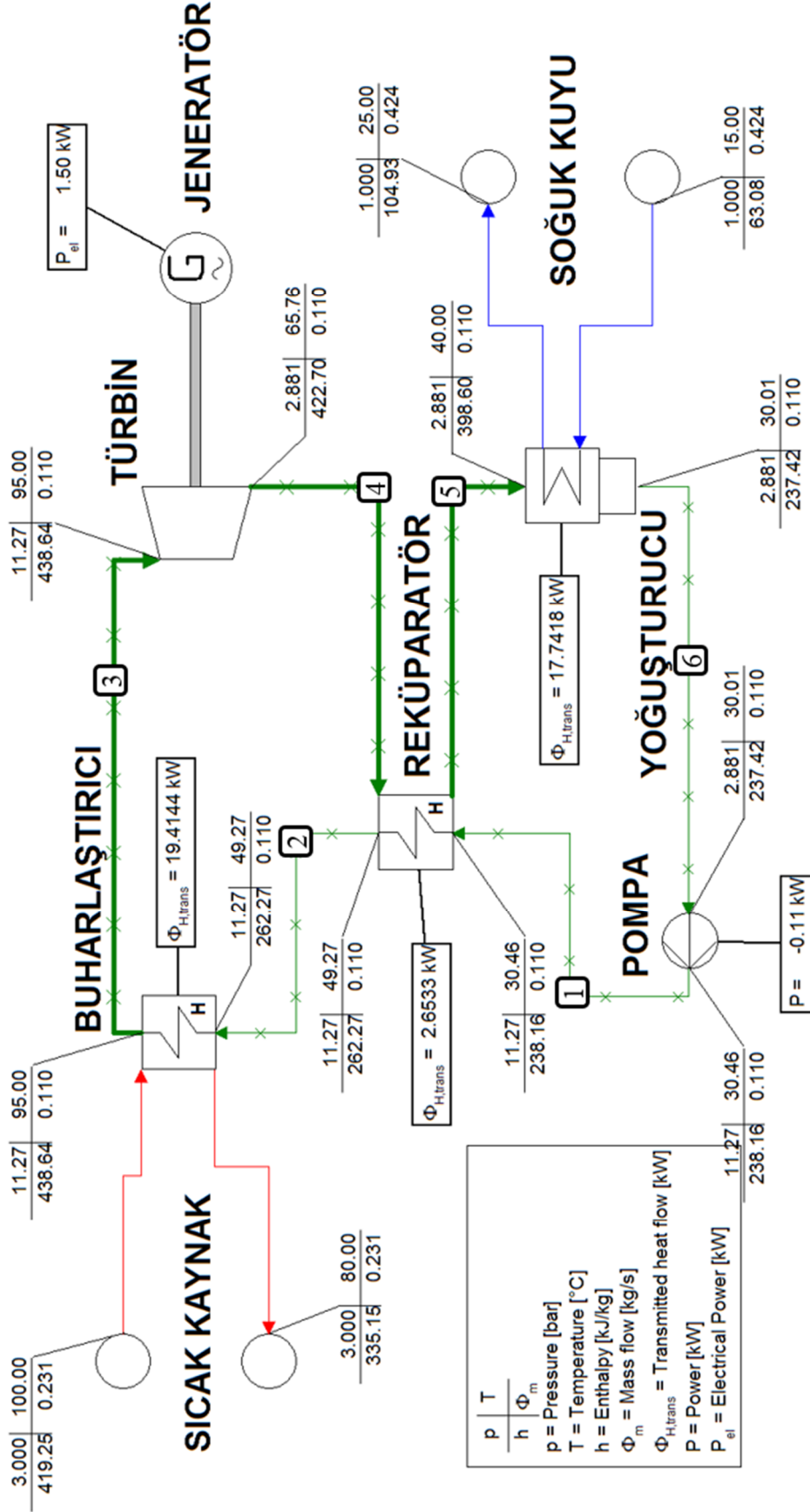
Her bir akışkan için Cycle-Tempo programında termodinamik ORC şeması oluşturulmuştur. Temsili olarak R245fa akışkanının Cycle-Tempo’da oluşturulan

çevrim şeması Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Bu şemadaki çevrimde incelenen parametre değerleri; sıcak kaynak sıcaklığı 100°C, aşırı kızdırma sıcaklığı 10°C türbin izentropik verimi %60 şeklindedir. Ayrıca yine analizi yapılan bu ORC için çevrimin T-s diyagramı farklı aşırı kızdırma sıcaklıkları ve ısı kaynağı sıcaklıkları için sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da çizilmiştir. Bu T-s diyagramlarında temsili olarak kaynak sıcaklıkları için Carnot çevrimi de gösterilmiştir.

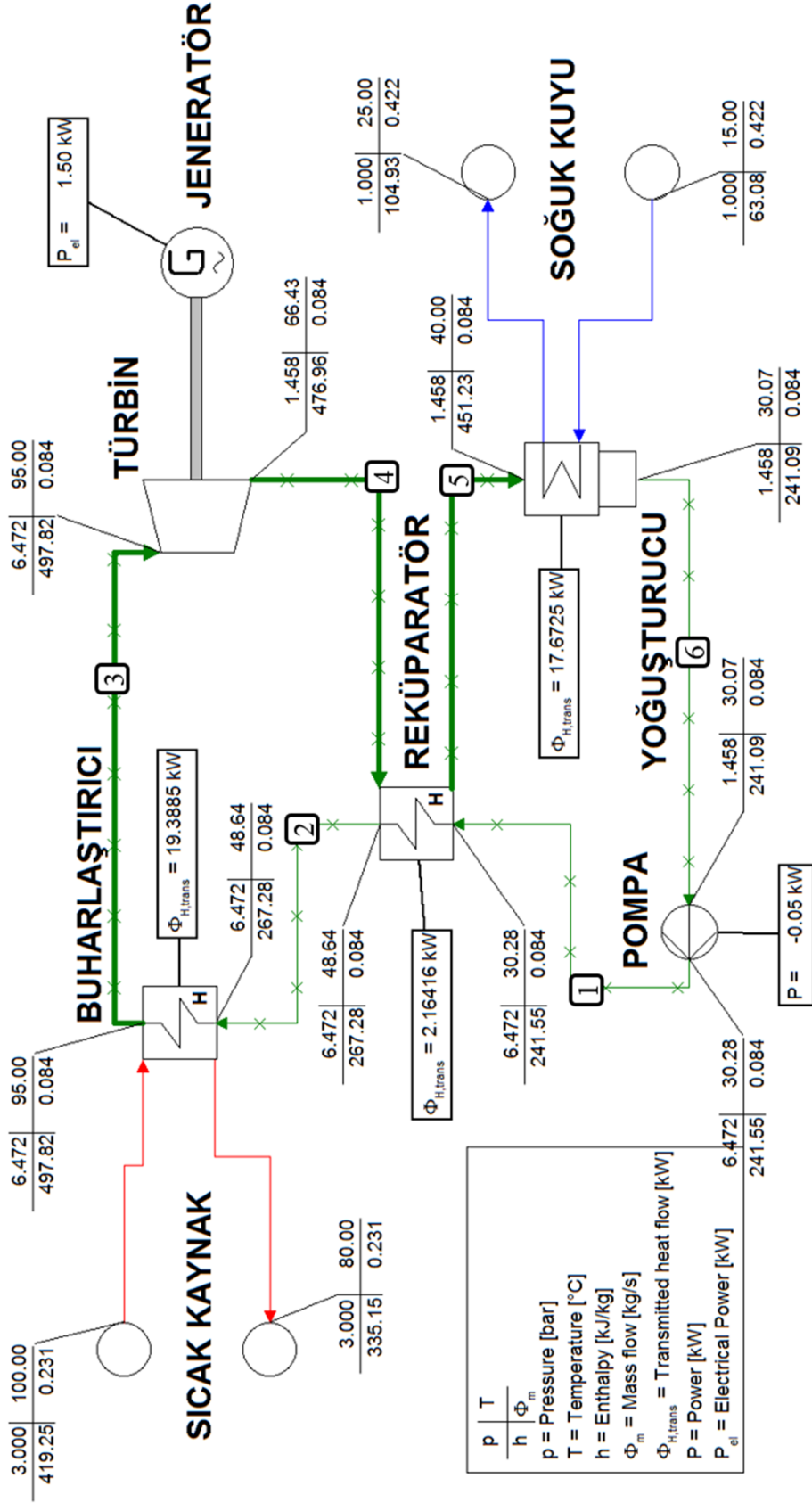
Çizelge 3.2’deki analiz matrisinden de görüldüğü gibi her bir akışkan için 27 adet analiz olmak üzere 4 akışkan için toplamda 108 adet analiz yapılmıştır. Tüm analiz sonuçları, incelenen R236ea, R245ca, R245fa ve R365mfc akışkanları için sırası ile Çizelge 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6’da tablo halinde verilmiştir. Bu çizelgelerde verilen termodinamik analiz sonuçları incelenerek genel grafikler çizilmiş ve sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Termodinamik analiz parametreleri.

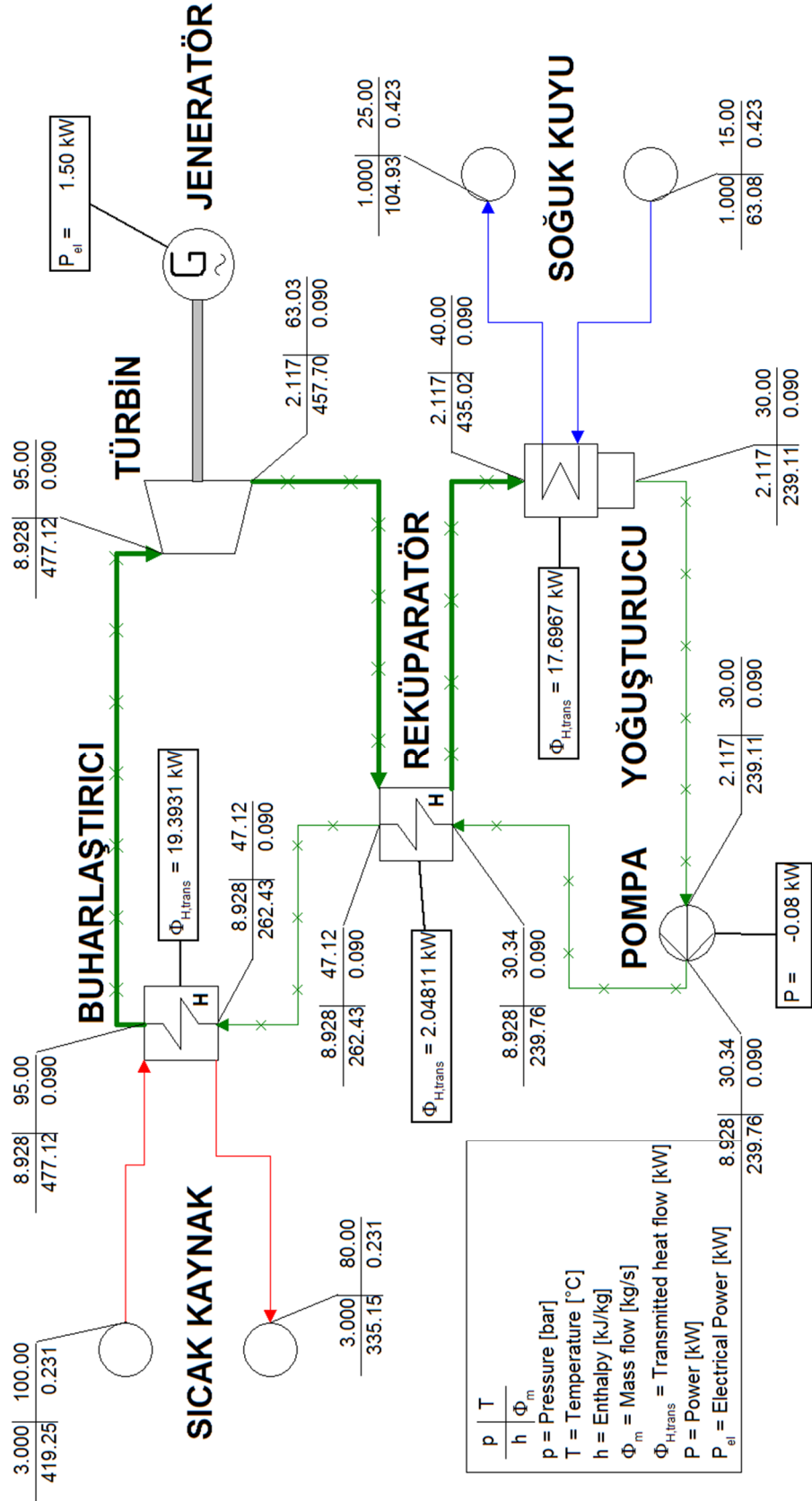
TASARIM PARAMETRELERİ													
Bağımsız Değişkenler							Sabit Değerler						
Çevrim Akışkanı	Isı Kaynağı Sıcaklığı $T_{HS}$ [°C]	Türbin İzentropik Verimi $\eta_{ts}$ [%]	Aşırı Kızdırma Sıcaklığı $\Delta T_{ak}$ [°C]	Türbin Gücü $W_t$ [kW]	Kondenzasyon Sıcaklığı $T_c$ [°C]	Reküpatorör Buhar Çıkış Sıcaklığı $T_5$ [°C]	Pompa Verimi $\eta_p$ [%]						
R236ea	90°C	%60	5°C	1.5 kW	35°C	40°C	%60						
R245ca	100°C	%70	10°C										
R245fa	110°C	%80	15°C										
R365mfc													
HESAPLANAN DEĞERLER													
Pompa Gücü $W_p$ [kW]	Net Çevrim Gücü $W_{net}$ [kW]	ORC Verimi $\eta_{ORC}$ [%]	Carnot Verimi $\eta_{Carnot}$ [%]	Evaporasyon Basıncı $P_e$ [bar]	Kondenzasyon Basıncı $P_c$ [bar]	Evaporasyon Sıcaklığı $T_e$ [°C]	Evaporator Kapasitesi $Q_e$ [kW]	Kondenser Kapasitesi $Q_c$ [kW]	Pompa Çıkış Sıcaklığı $T_1$ [°C]	Reküpatorör Sıvı Çıkış Sıcaklığı $T_2$ [°C]	Türbin Giriş Sıcaklığı $T_3$ [°C]	Türbin Çıkış Sıcaklığı $T_4$ [°C]	Kütleli Debi $\dot{m}$ [kg/s]



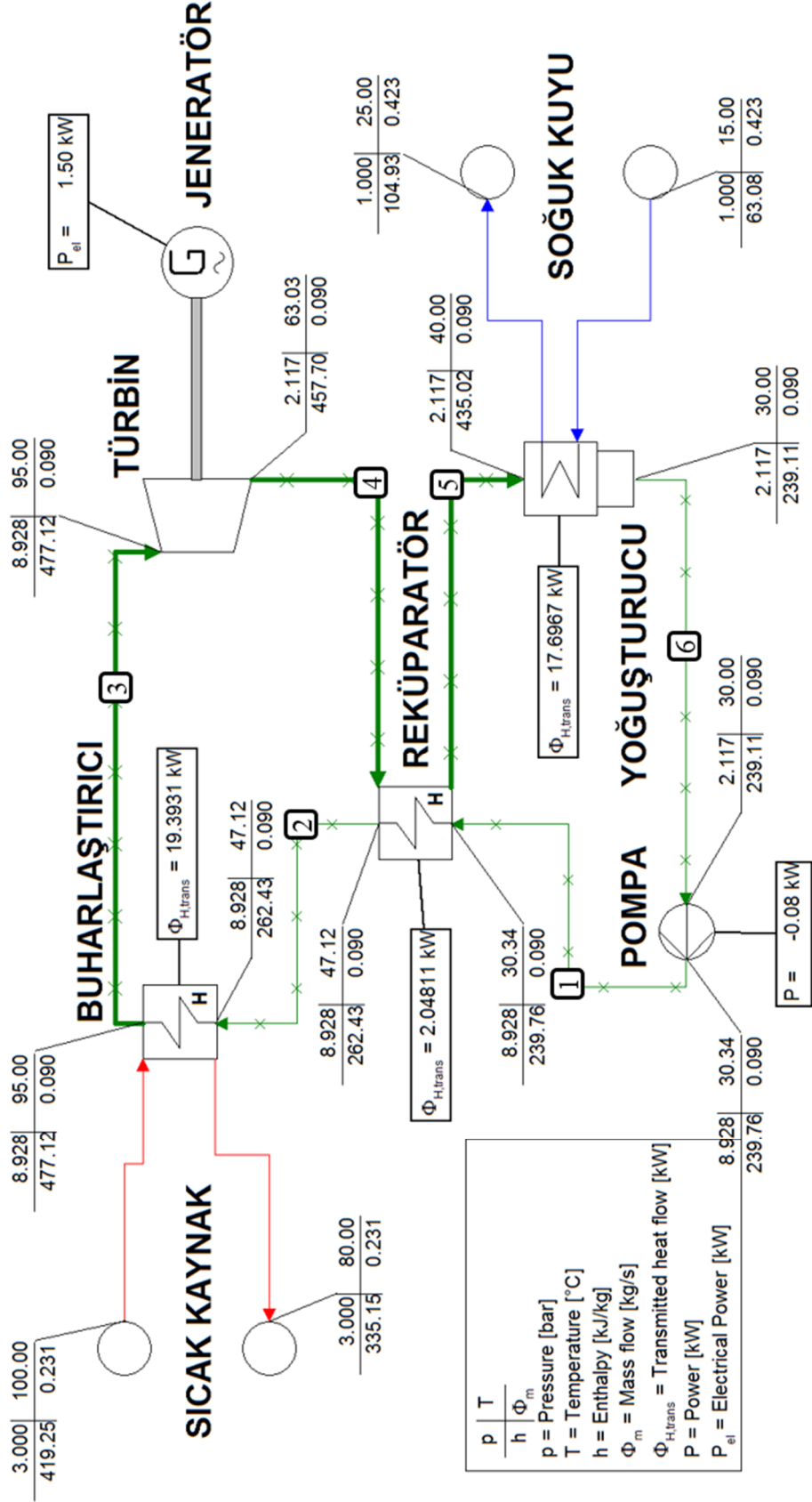
Şekil 3.4. R236ea akışkanı için Cycle-Tempo çevrim şeması.



Şekil 3.5. R245ca akışkanı için Cycle-Tempo çevrim şeması.

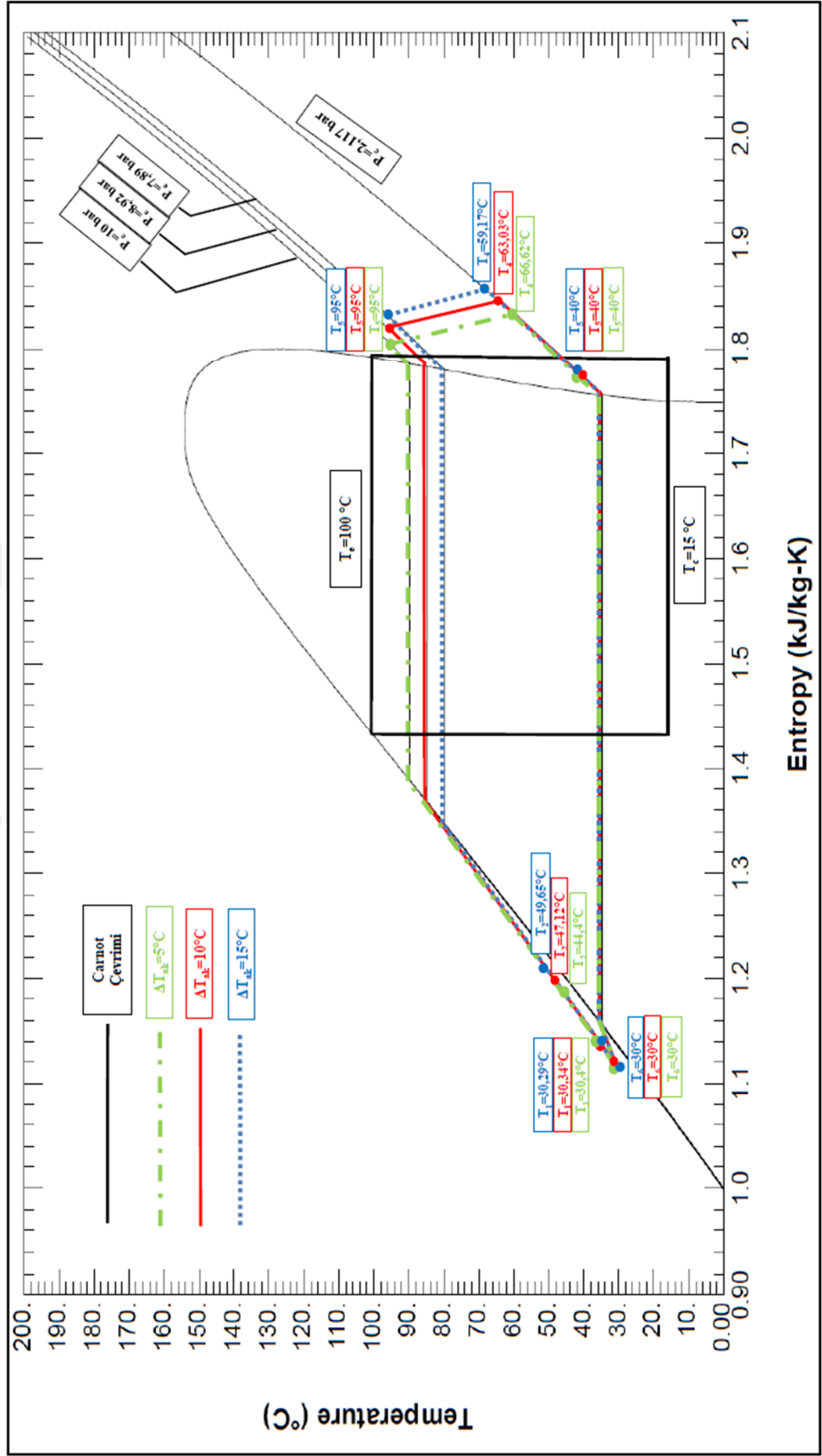


Şekil 3.6. R245fa akışkanı için Cycle-Tempo çevrim şeması.

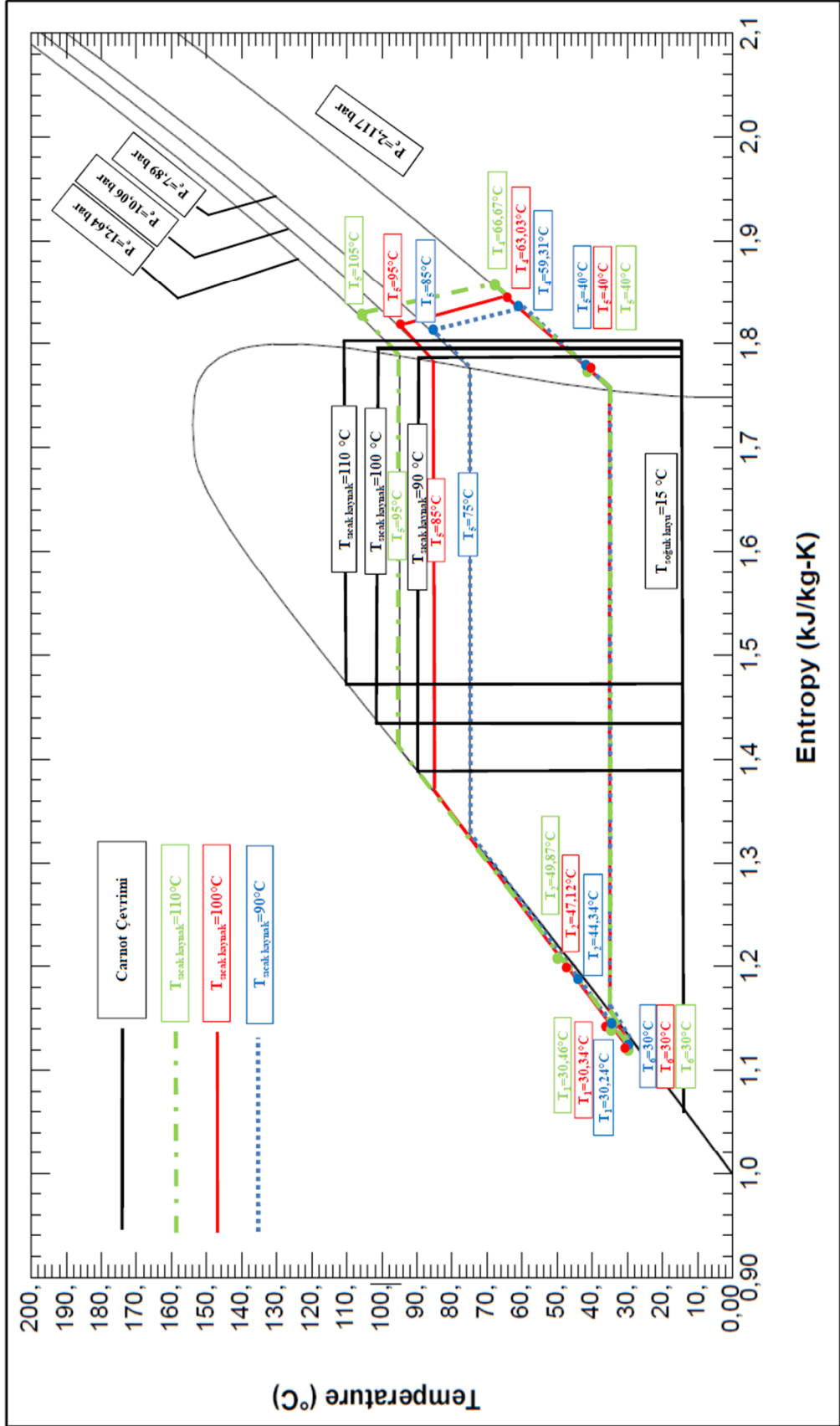


Şekil 3.7. R365mfc akışkanı için Cycle-Tempo çevrim şeması.





Şekil 3.8. R245fa akışkanı için aşırı kızdırma sıcaklıklarına göre T-s diyagramı.



Şekil 3.9. R245fa akışkanı için ısı kaynağı sıcaklıklarına göre T-s diyagramı.

**Çizelge 3.3.** R236ea akışkanı için analiz sonuçları.

Akışkan	Isı Kaynağı Sıcaklığı [°C]	Türbin İzotropik Verimi [%]	Aşırı Kızdırma [°C]	$W_t$ [kW]	$W_p$ [kW]	$W_{net}$ [kW]	$E_{giren}$ [kW]	$\eta_{ORC}$ [%]	$\eta_{Carnot}$ [%]	$\eta_{energy}$ [%]	$P_e$ [bar]	$P_c$ [bar]	$T_e$ [°C]	$T_c$ [°C]	$Q_e$ [kW]	$Q_c$ [kW]	$T_1$ [°C]	$T_2$ [°C]	$T_3$ [°C]	$T_4$ [°C]	$T_5$ [°C]	$T_6$ [°C]	$\dot{m}$ [kg/s]	
R236ea	90	60	5	1,5	0,12	1,38	3,875	5,533	15,354	35,61	10,022	2,8812	80	35	24,94	23,28	30,39	45,32	85	60,44	40	30,01	0,144	
			10	1,5	0,11	1,39	4,189	5,167	15,354	33,18	8,88	2,8812	75	35	26,9	25,23	30,33	47,65	85	63,73	40	30,01	0,137	
			15	1,5	0,1	1,4	4,593	4,743	15,354	30,48	7,83	2,8812	70	35	29,52	27,84	30,28	49,78	85	66,76	40	30,01	0,173	
			5	1,5	0,1	1,4	3,366	6,475	15,354	41,59	10,022	2,8812	80	35	21,62	19,95	30,39	43,75	85	58,29	40	30,01	0,124	
			10	1,5	0,09	1,41	3,627	6,052	15,354	38,88	8,88	2,8812	75	35	23,3	21,62	30,33	46,21	85	61,75	40	30,01	0,134	
	100	60	80	5	1,5	0,09	1,41	3,98	5,519	15,354	35,43	7,83	2,8812	70	35	25,55	23,86	30,28	48,49	85	64,97	40	30,01	0,148
				10	1,5	0,09	1,41	2,975	7,365	15,354	47,39	10,022	2,8812	80	35	19,144	17,45	30,39	42,18	85	56,14	40	30,01	0,108
				15	1,5	0,08	1,42	3,21	6,890	15,354	44,24	8,88	2,8812	75	35	20,61	18,92	30,33	44,76	85	59,77	40	30,01	0,117
				5	1,5	0,07	1,43	3,51	6,336	15,354	40,74	7,83	2,8812	70	35	22,57	20,88	30,28	47,19	85	63,18	40	30,01	0,13
				10	1,5	0,15	1,35	3,79	6,365	17,653	35,62	12,632	2,8812	90	35	21,21	19,56	30,53	48,47	95	64,55	40	30,01	0,121
	110	60	80	5	1,5	0,13	1,37	4	6,127	17,653	34,25	11,27	2,8812	85	35	22,36	20,7	30,46	51,01	95	68,16	40	30,01	0,128
				10	1,5	0,12	1,38	4,271	5,784	17,653	32,31	10,022	2,8812	80	35	23,86	22,19	30,39	53,3	95	71,42	40	30,01	0,138
				15	1,5	0,12	1,38	3,293	7,488	17,653	41,91	12,632	2,8812	90	35	18,43	16,47	30,53	46,61	95	62	40	30,01	0,104
				5	1,5	0,11	1,39	3,474	7,158	17,653	40,01	11,27	2,8812	85	35	19,42	17,74	30,46	49,27	95	65,76	40	30,01	0,11
				10	1,5	0,1	1,4	3,699	6,763	17,653	37,85	10,022	2,8812	80	35	20,7	19,02	30,39	51,68	95	69,18	40	30,01	0,118
110	70	80	5	1,5	0,11	1,39	2,917	8,502	17,653	47,65	12,632	2,8812	90	35	16,35	14,67	30,53	44,75	95	59,44	40	30,01	0,091	
			10	1,5	0,1	1,4	3,0832	8,135	17,653	45,41	11,27	2,8812	85	35	17,21	15,52	30,46	47,52	95	63,36	40	30,01	0,096	
			15	1,5	0,09	1,41	3,278	7,692	17,653	43,01	10,022	2,8812	80	35	18,33	16,64	30,39	50,06	95	66,95	40	30,01	0,103	
			5	1,5	0,16	1,34	3,761	7,185	19,831	35,63	15,72	2,8812	100	35	18,65	17,02	30,7	51,39	105	68,31	40	30,01	0,106	
			10	1,5	0,14	1,36	3,876	7,032	19,831	35,09	14,112	2,8812	95	35	19,34	17,69	30,61	54,24	105	72,37	40	30,01	0,11	
110	70	80	15	1,5	0,13	1,37	4,06	6,765	19,831	33,74	12,63	2,8812	90	35	20,25	18,6	30,53	56,73	105	75,92	40	30,01	0,115	
			5	1,5	0,14	1,36	3,267	8,374	19,831	41,63	15,72	2,8812	100	35	16,24	14,59	30,7	49,26	105	65,39	40	30,01	0,091	
			10	1,5	0,12	1,38	3,386	8,200	19,831	40,76	14,112	2,8812	95	35	16,83	15,16	30,61	52,21	105	69,57	40	30,01	0,094	
			15	1,5	0,11	1,39	3,538	7,893	19,831	39,29	12,63	2,8812	90	35	17,61	15,94	30,53	54,81	105	73,27	40	30,01	0,099	
			5	1,5	0,12	1,38	2,895	9,563	19,831	47,67	15,72	2,8812	100	35	14,43	12,76	30,7	47,13	105	62,47	40	30,01	0,079	
110	80	80	10	1,5	0,11	1,39	2,996	9,304	19,831	46,40	14,112	2,8812	95	35	14,94	13,27	30,61	50,17	105	66,77	40	30,01	0,082	
			15	1,5	0,1	1,4	3,132	8,963	19,831	44,70	12,63	2,8812	90	35	15,62	13,95	30,53	52,88	105	70,61	40	30,01	0,087	

**Çizelge 3.4.** R245ca akışkanı için analiz sonuçları.

Akışkan	Isı Kaynağı Sıcaklığı [°C]	Türbin İzotropik Verimi [%]	Aşırı Kızdırma [°C]	$W_t$ [kW]	$W_p$ [kW]	$W_{net}$ [kW]	$E_{giren}$ [kW]	$\eta_{ORC}$ [%]	$\eta_{Carnot}$ [%]	$\eta_{exergy}$ [%]	$P_e$ [bar]	$P_c$ [bar]	$T_e$ [°C]	$T_c$ [°C]	$Q_e$ [kW]	$Q_c$ [kW]	$T_1$ [°C]	$T_2$ [°C]	$T_3$ [°C]	$T_4$ [°C]	$T_5$ [°C]	$T_6$ [°C]	$\dot{m}$ [kg/s]
R245ca	90	60	5	1,5	0,06	1,44	3,862	5,804	15,34	37,29	5,6963	1,4577	80	35	24,81	23,1	30,24	45,28	85	61,69	40	30,06	0,11
			10	1,5	0,05	1,45	4,189	5,384	15,34	34,61	4,9933	1,4577	75	35	26,93	25,22	30,21	47,17	85	64,44	40	30,06	0,12
			15	1,5	0,05	1,45	4,62	4,882	15,34	31,39	4,3583	1,4577	70	35	29,7	27,98	30,18	19,01	85	67,09	40	30,06	0,133
			5	1,5	0,05	1,45	3,353	6,738	15,34	43,24	5,6963	1,4577	80	35	21,52	19,8	30,24	13,39	85	58,99	40	30,06	0,094
			10	1,5	0,04	1,46	3,627	6,258	15,34	40,25	4,9933	1,4577	75	35	23,33	21,61	30,21	45,45	85	61,98	40	30,06	0,103
	100	80	15	1,5	0,04	1,46	3,993	5,679	15,34	36,56	4,3583	1,4577	70	35	25,71	23,98	30,18	47,46	85	64,89	40	30,06	0,114
			5	1,5	0,04	1,46	2,962	7,664	15,34	49,29	5,6963	1,4577	80	35	19,05	17,33	30,24	41,5	85	56,29	40	30,06	0,082
			10	1,5	0,04	1,46	3,21	7,074	15,34	45,48	4,9933	1,4577	75	35	20,64	18,91	30,21	43,72	85	59,51	40	30,06	0,09
			15	1,5	0,03	1,47	3,536	6,473	15,34	41,57	4,3583	1,4577	70	35	22,71	20,98	30,18	45,91	85	62,68	40	30,06	0,1
			5	1,5	0,06	1,44	3,76	6,847	17,64	38,30	7,3247	1,4577	90	35	21,03	19,32	30,31	48,76	95	66,54	40	30,06	0,092
	110	60	10	1,5	0,06	1,44	3,985	6,449	17,64	36,14	6,4718	1,4577	85	35	22,33	20,62	30,27	50,73	95	69,4	40	30,06	0,098
			15	1,5	0,05	1,45	4,286	6,054	17,64	33,83	5,6963	1,4577	80	35	23,95	22,24	30,24	52,62	95	72,13	40	30,06	0,106
			5	1,5	0,06	1,44	3,263	7,882	17,64	44,13	7,3247	1,4577	90	35	18,27	16,56	30,31	46,51	95	63,35	40	30,06	0,079
			10	1,5	0,05	1,45	3,474	7,478	17,64	41,74	6,4718	1,4577	85	35	19,39	17,67	30,27	48,63	95	66,42	40	30,06	0,084
			15	1,5	0,05	1,45	3,714	6,978	17,64	39,04	5,6963	1,4577	80	35	20,78	19,06	30,24	50,68	95	69,38	40	30,06	0,091
110	80	5	1,5	0,05	1,45	2,902	8,945	17,64	49,97	7,3247	1,4577	90	35	16,21	14,49	30,31	44,26	95	60,13	40	30,06	0,069	
		10	1,5	0,04	1,46	3,06	8,498	17,64	47,71	6,4718	1,4577	85	35	17,18	15,46	30,27	46,53	95	63,43	40	30,06	0,074	
		15	1,5	0,04	1,46	3,293	7,935	17,64	44,34	5,6963	1,4577	80	35	18,4	16,68	30,24	48,74	95	66,62	40	30,06	0,079	
		5	1,5	0,07	1,43	3,69	7,772	19,82	38,75	9,2819	1,4577	100	35	18,4	16,7	30,39	52,2	105	71,3	40	30,06	0,08	
		10	1,5	0,07	1,43	3,86	7,429	19,82	37,05	8,2597	1,4577	95	35	19,25	17,55	30,35	54,29	105	74,31	40	30,06	0,084	
110	70	15	1,5	0,07	1,43	4,08	7,048	19,82	35,05	7,3247	1,4577	90	35	20,29	18,58	30,31	56,25	105	77,15	40	30,06	0,088	
		5	1,5	0,06	1,44	3,21	8,985	19,82	44,86	9,2819	1,4577	100	35	16,027	14,32	30,39	49,61	105	67,63	40	30,06	0,068	
		10	1,5	0,06	1,44	3,369	8,597	19,82	42,74	8,2597	1,4577	95	35	16,75	15,04	30,35	51,83	105	70,84	40	30,06	0,072	
		15	1,5	0,05	1,45	3,538	8,225	19,82	40,98	7,3247	1,4577	90	35	17,63	15,93	30,31	53,94	105	73,89	40	30,06	0,076	
		5	1,5	0,06	1,44	2,861	10,112	19,82	50,33	9,2819	1,4577	100	35	14,24	12,53	30,39	47,01	105	63,94	40	30,06	0,06	
110	80	10	1,5	0,05	1,45	2,979	9,751	19,82	48,67	8,2597	1,4577	95	35	14,87	13,16	30,35	49,37	105	67,35	40	30,06	0,063	
		15	1,5	0,05	1,45	3,48	9,265	19,82	41,67	7,3247	1,4577	90	35	15,65	13,93	30,31	51,62	105	70,61	40	30,06	0,066	

**Çizelge 3.5.** R245fa akışkanı için analiz sonuçları.

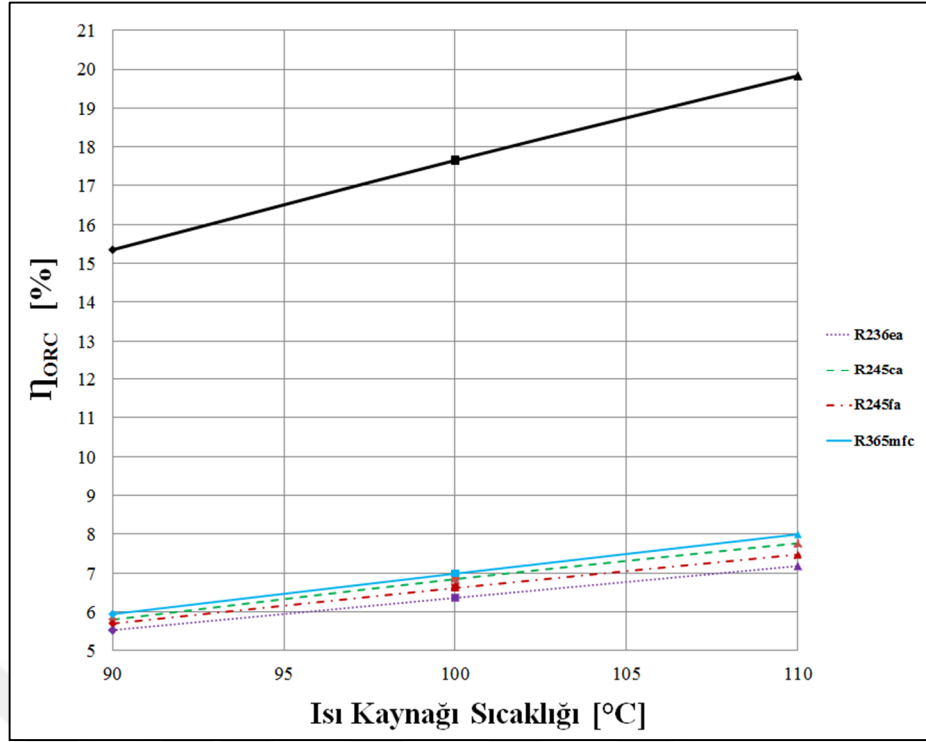
Akışkan	Isı Kaynağı Sıcaklığı [°C]	Türbin İzentropik Verimi [%]	Aşırı Kızdırma [°C]	$W_t$ [kW]	$W_p$ [kW]	$W_{net}$ [kW]	$E_{giren}$ [kW]	$\eta_{ORC}$ [%]	$\eta_{Carnot}$ [%]	$\eta_{leergy}$ [%]	$P_e$ [bar]	$P_c$ [bar]	$T_e$ [°C]	$T_c$ [°C]	$Q_e$ [kW]	$Q_c$ [kW]	$T_1$ [°C]	$T_2$ [°C]	$T_3$ [°C]	$T_4$ [°C]	$T_5$ [°C]	$T_6$ [°C]	$\dot{m}$ [kg/s]	
R245fa	90	60	5	1,5	0,08	1,42	3,875	5,703	15,357	36,65	7,89	2,1172	80	35	24,9	23,21	30,29	43,56	85	58,17	40	30	0,118	
			10	1,5	0,08	1,42	4,176	5,285	15,357	34,00	6,951	2,1172	75	35	26,87	25,18	30,24	46	85	61,62	40	30	0,129	
			15	1,5	0,07	1,43	4,593	4,847	15,357	31,13	6,096	2,1172	70	35	29,5	27,8	30,2	48,29	85	64,86	40	30	0,142	
			5	1,5	0,07	1,43	3,353	6,623	15,357	42,65	7,89	2,1172	80	35	21,59	19,89	30,29	41,75	85	55,66	40	30	0,102	
			10	1,5	0,07	1,43	3,627	6,143	15,357	39,43	6,951	2,1172	75	35	23,28	21,58	30,24	44,34	85	59,31	40	30	0,11	
	100	80	70	15	1,5	0,06	1,44	3,967	5,638	15,357	36,30	6,096	2,1172	70	35	25,54	23,83	30,2	46,79	85	62,77	40	30	0,122
				5	1,5	0,06	1,44	2,975	7,535	15,357	48,40	7,89	2,1172	80	35	19,11	17,4	30,29	39,93	85	53,15	40	30	0,089
				10	1,5	0,06	1,44	3,197	6,994	15,357	45,04	6,951	2,1172	75	35	20,59	18,88	30,24	42,67	85	57	40	30	0,096
				15	1,5	0,05	1,45	3,51	6,427	15,357	41,31	6,096	2,1172	70	35	22,56	20,85	30,2	45,29	85	60,69	40	30	0,106
				5	1,5	0,1	1,4	3,79	6,619	17,656	36,94	10,061	2,1172	90	35	21,15	19,47	30,4	46,55	95	62,15	40	30	0,099
	110	60	70	10	1,5	0,09	1,41	4	6,314	17,656	35,25	8,9278	2,1172	85	35	22,33	20,64	30,34	49,14	95	65,83	40	30	0,105
				15	1,5	0,08	1,42	4,271	5,956	17,656	33,25	7,8931	2,1172	80	35	23,84	22,15	30,29	51,52	95	69,23	40	30	0,113
				5	1,5	0,08	1,42	3,293	7,726	17,656	43,12	10,061	2,1172	90	35	18,38	16,69	30,4	44,4	95	59,17	40	30	0,085
				10	1,5	0,08	1,42	3,474	7,323	17,656	40,88	8,9278	2,1172	85	35	19,39	17,69	30,34	47,12	95	63,03	40	30	0,09
				15	1,5	0,07	1,43	3,699	6,912	17,656	38,66	7,8931	2,1172	80	35	20,69	18,99	30,29	49,65	95	66,62	40	30	0,097
110	80	70	5	1,5	0,07	1,43	2,917	8,773	17,656	49,02	10,061	2,1172	90	35	16,3	14,6	30,4	42,24	95	56,18	40	30	0,075	
			10	1,5	0,07	1,43	3,068	8,324	17,656	46,61	8,9278	2,1172	85	35	17,18	15,48	30,34	45,1	95	60,21	40	30	0,079	
			15	1,5	0,06	1,44	3,278	7,860	17,656	43,93	7,8931	2,1172	80	35	18,32	16,61	30,29	47,77	95	64,01	40	30	0,085	
			5	1,5	0,11	1,39	3,724	7,481	19,833	37,33	12,646	2,1172	100	35	18,58	16,91	30,53	49,43	105	65,96	40	30	0,086	
			10	1,5	0,1	1,4	3,876	7,254	19,833	36,12	11,298	2,1172	95	35	19,3	17,63	30,46	52,22	105	69,95	40	30	0,09	
110	70	80	15	1,5	0,09	1,41	4,063	6,966	19,833	34,70	10,061	2,1172	90	35	20,24	18,56	30,4	54,73	105	73,56	40	30	0,095	
			5	1,5	0,1	1,4	3,25	8,658	19,833	43,08	12,646	2,1172	100	35	16,17	14,49	30,53	46,97	105	62,53	40	30	0,074	
			10	1,5	0,09	1,41	3,369	8,393	19,833	41,85	11,298	2,1172	95	35	16,8	15,11	30,46	49,87	105	66,67	40	30	0,077	
			15	1,5	0,08	1,42	3,538	8,068	19,833	40,14	10,061	2,1172	90	35	17,6	15,91	30,4	52,51	105	70,45	40	30	0,081	
			5	1,5	0,08	1,42	2,878	9,882	19,833	49,34	12,646	2,1172	100	35	14,37	12,68	30,53	44,49	105	59,1	40	30	0,065	
110	80	80	10	1,5	0,08	1,42	2,996	9,517	19,833	47,40	11,298	2,1172	95	35	14,92	13,22	30,46	47,51	105	63,38	40	30	0,068	
			15	1,5	0,07	1,43	3,132	9,155	19,833	45,66	10,061	2,1172	90	35	15,62	13,92	30,4	50,28	105	67,34	40	30	0,071	

Çizelge 3.6. R365mfc akışkanı için analiz sonuçları.

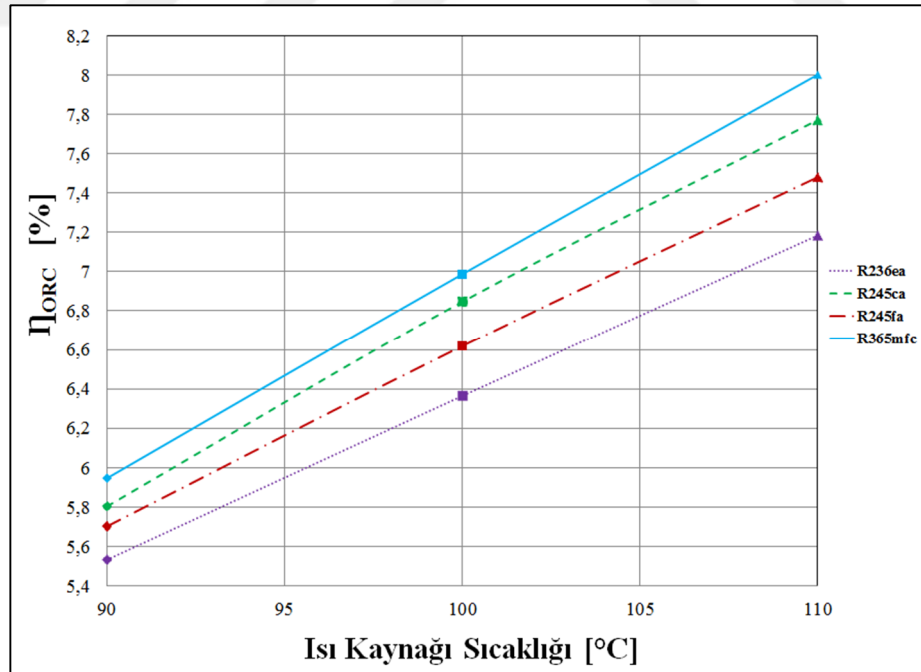
Akışkan	Isı Kaynağı Sıcaklığı [°C]	Türbin İzentropik Verimi [%]	Aşırı Kızdırma [°C]	$W_t$ [kW]	$W_p$ [kW]	$W_{net}$ [kW]	$E_{giren}$ [kW]	$\eta_{ORC}$ [%]	$\eta_{Carnot}$ [%]	$\eta_{energy}$ [%]	$P_e$ [bar]	$P_c$ [bar]	$T_e$ [°C]	$T_c$ [°C]	$Q_e$ [kW]	$Q_c$ [kW]	$T_1$ [°C]	$T_2$ [°C]	$T_3$ [°C]	$T_4$ [°C]	$T_5$ [°C]	$T_6$ [°C]	$\dot{m}$ [kg/s]
R365mfc	90	60	5	1,5	0,04	1,46	3,823	5,947	15,357	38,19	3,5181	0,8375	80	35	24,55	22,83	30,12	48,97	85	65,1	40	30	0,113
			10	1,5	0,04	1,46	4,149	5,468	15,357	35,19	3,0634	0,8375	75	35	26,7	24,97	30,1	50,71	85	67,42	40	30	0,123
			15	1,5	0,03	1,47	4,593	4,985	15,357	32,01	2,6554	0,8375	70	35	29,49	27,76	30,08	52,38	85	69,67	40	30	0,137
			5	1,5	0,03	1,47	3,314	6,905	15,357	44,36	3,5181	0,8375	80	35	21,29	19,56	30,12	47,15	85	62,68	40	30	0,096
			10	1,5	0,03	1,47	3,601	6,355	15,357	40,82	3,0634	0,8375	75	35	23,13	21,4	30,1	49,04	85	65,22	40	30	0,106
	100	70	15	1,5	0,03	1,47	3,967	5,758	15,357	37,06	2,6554	0,8375	70	35	25,53	23,8	30,08	50,89	85	67,7	40	30	0,117
			5	1,5	0,03	1,47	2,936	7,798	15,357	50,07	3,5181	0,8375	80	35	18,85	17,72	30,12	45,32	85	60,25	40	30	0,084
			10	1,5	0,03	1,47	3,184	7,185	15,357	46,17	3,0634	0,8375	75	35	20,46	18,73	30,1	47,38	85	63,01	40	30	0,092
			15	1,5	0,02	1,48	3,51	6,560	15,357	42,17	2,6554	0,8375	70	35	22,56	20,82	30,08	49,4	85	65,72	40	30	0,103
			5	1,5	0,05	1,45	3,714	6,988	17,656	39,04	4,5803	0,8375	90	35	20,75	19,03	30,17	53,32	95	70,79	40	30	0,094
	110	80	10	1,5	0,04	1,46	3,955	6,612	17,656	36,92	4,0225	0,8375	85	35	22,08	20,36	30,14	55,11	95	73,19	40	30	0,1
			15	1,5	0,04	1,46	4,241	6,150	17,656	34,43	3,5181	0,8375	80	35	23,74	22,01	30,12	56,82	95	75,48	40	30	0,109
			5	1,5	0,04	1,46	3,233	8,093	17,656	45,16	4,5803	0,8375	90	35	18,04	16,31	30,17	51,15	95	67,92	40	30	0,08
			10	1,5	0,04	1,46	3,429	7,612	17,656	42,58	4,0225	0,8375	85	35	19,18	17,45	30,14	53,08	95	70,51	40	30	0,086
			15	1,5	0,03	1,47	3,684	7,139	17,656	39,90	3,5181	0,8375	80	35	20,59	18,87	30,12	54,95	95	73,01	40	30	0,093
110	70	5	1,5	0,03	1,47	2,857	9,188	17,656	51,45	4,5803	0,8375	90	35	16	14,27	30,17	48,97	95	65,03	40	30	0,07	
		10	1,5	0,03	1,47	3,038	8,647	17,656	48,39	4,0225	0,8375	85	35	17	15,27	30,14	51,05	95	67,82	40	30	0,075	
		15	1,5	0,03	1,47	3,263	8,059	17,656	45,05	3,5181	0,8375	80	35	18,24	16,51	30,12	53,07	95	70,53	40	30	0,081	
		5	1,5	0,05	1,45	3,639	8,002	19,833	39,85	5,8705	0,8375	100	35	18,12	16,4	30,22	57,69	105	76,48	40	30	0,081	
		10	1,5	0,05	1,45	3,809	7,632	19,833	38,07	5,1951	0,8375	95	35	19	17,28	30,19	59,54	105	78,98	40	30	0,085	
110	80	15	1,5	0,04	1,46	4,029	7,278	19,833	36,24	4,5803	0,8375	90	35	20,06	18,34	30,17	61,3	105	81,33	40	30	0,09	
		5	1,5	0,04	1,46	3,165	9,252	19,833	46,13	5,8705	0,8375	100	35	15,78	14,06	30,22	55,18	105	73,17	40	30	0,069	
		10	1,5	0,04	1,46	3,318	8,832	19,833	44,00	5,1951	0,8375	95	35	16,53	14,81	30,19	57,17	105	75,84	40	30	0,073	
		15	1,5	0,04	1,46	3,504	8,367	19,833	41,67	4,5803	0,8375	90	35	17,45	15,72	30,17	59,07	105	78,39	40	30	0,078	
		5	1,5	0,04	1,46	2,81	10,406	19,833	51,96	5,8705	0,8375	100	35	14,03	12,3	30,22	52,67	105	69,84	40	30	0,061	
110	80	10	1,5	0,04	1,46	2,945	9,946	19,833	49,58	5,1951	0,8375	95	35	14,68	12,96	30,19	54,79	105	72,7	40	30	0,064	
		15	1,5	0,03	1,47	3,115	9,490	19,833	47,19	4,5803	0,8375	90	35	15,49	13,76	30,17	56,84	105	75,44	40	30	0,068	

Termodinamik analiz sonuçlarının listelendiği Çizelge 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6'da sonuçlar kullanılarak, Şekil 3.10'da ısı kaynağı sıcaklığına göre Carnot çevriminin verimi ve incelenen dört akışkan (R236ea, R245ca, R245fa, R365mfc) için termodinamik analizlerden hesaplanan ORC verimi gösterilmiştir. Burada çizilen ORC verimleri, aşırı kızdırma sıcaklığı  $\Delta T_{ak}=5^{\circ}C$  ve türbin izentropik verimi  $\eta_{ts}=\%60$  değerleri içindir. Artan ısı kaynağı sıcaklığı ile hem Carnot verimi ve hem ORC verimi artmaktadır. Carnot verimi ORC veriminden yaklaşık 2,8 kat daha yüksek çıkmıştır. Birinci sebep, kaynak sıcaklıklarına göre ısı geçişinin gerçekleşmesi için kaynak sıcaklıkları ile çevrim akışkanı sıcaklıkları arasında sonlu bir sıcaklık farkının olma zorunluluğudur. Bu sıcaklık farkları Şekil 3.8'deki T-s diyagramında temsili olarak çizilen Carnot çevriminde görülmektedir. İkinci sebep ise türbin ve pompa verimleridir. Bu iki sebep tersinmezliğe neden olmaktadır. Carnot verimi belirlenen kaynak sıcaklıklarında elde edilebilecek en yüksek verimdir.

Yine sonuç çizelgeleri kullanılarak, Şekil 3.11'de ise incelenen dört akışkan (R236ea, R245ca, R245fa, R365mfc) için termodinamik analizlerden hesaplanan ORC veriminin ısı kaynağı sıcaklığına göre değişimi detaylı olarak gösterilmiştir. Yine, burada çizilen ORC verimleri, aşırı kızdırma sıcaklığı  $\Delta T_{ak}=5^{\circ}C$  ve türbin izentropik verimi  $\eta_{ts}=\%60$  değerleri içindir. Tüm akışkanlar için ORC verimi ısı kaynağı sıcaklığı ile artmaktadır. Üç farklı ısı kaynağı sıcaklığı için, üç farklı türbin izentropik verim değerinde ve farklı aşırı kızdırma değeri için en verimli akışkan R365mfc olarak belirlenmiştir. Bu akışkanı sırasıyla R245ca, R245fa ve R236ea takip etmektedir. Ancak, maliyet ve temin edilebilirlik gibi önemli sebeplerden dolayı prototip testlerinde R245fa akışkanı kullanılmıştır.



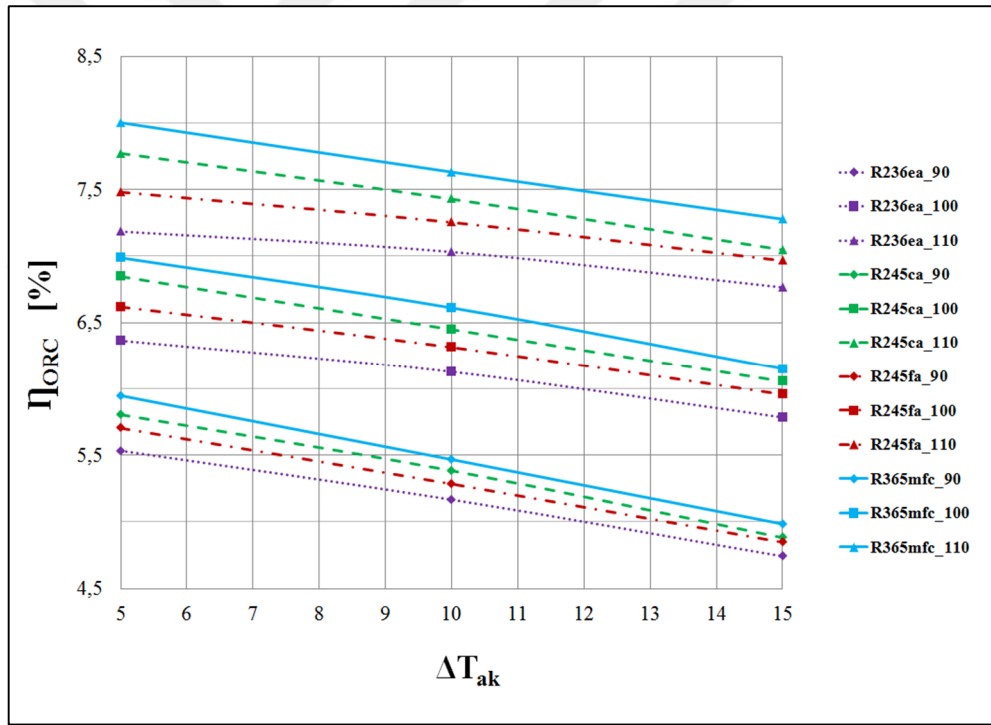
Şekil 3.10. Isı kaynağı sıcaklığına göre Carnot verimi ve ORC verimi.



Şekil 3.11. ORC veriminin ısı kaynağı sıcaklığına ve çevrim akışkanına göre değişimi.



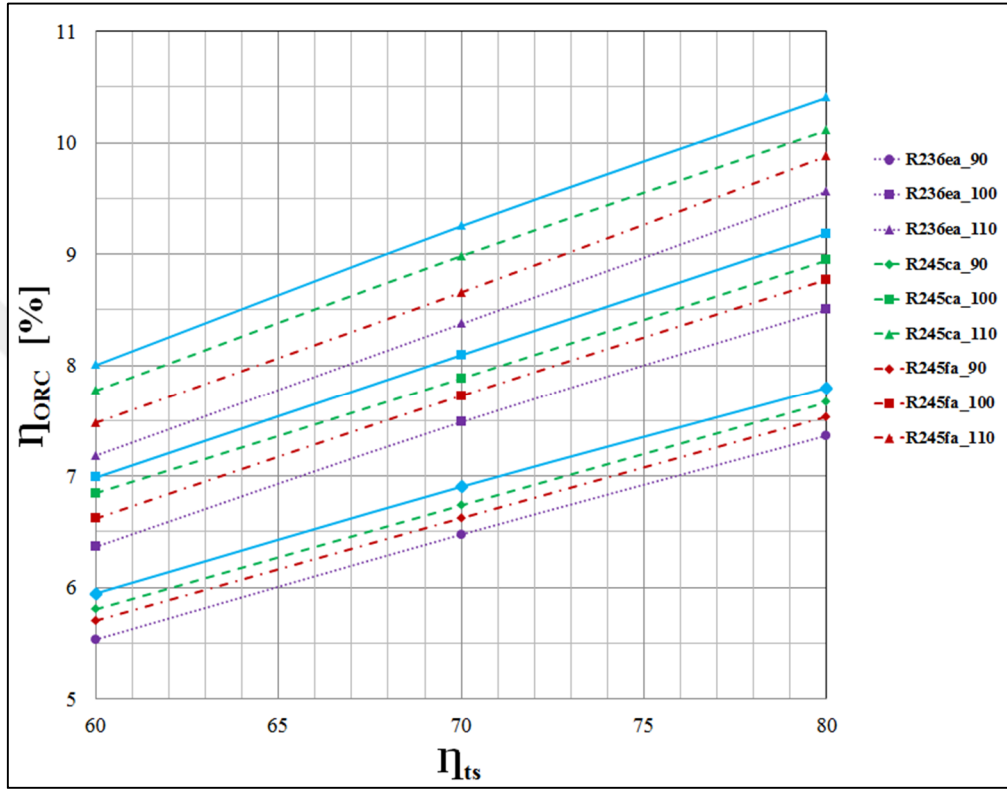
Termodinamik analiz sonuçlarının listelendiği çizelgeler (Çizelge 3.3, 3.4, 3.5, 3.6) kullanılarak, aşırı kızdırma sıcaklığının ORC verimi üzerindeki etkisi incelenen tüm akışkanlar ve tüm sıcak kaynak sıcaklıkları için Şekil 3.12’de grafiklendirilmiştir. Burada çizilen ORC verimleri türbin izentropik veriminin  $\eta_{ts}=\%60$  değeri içindir. Aşırı kızdırma sıcaklığı için pratikte karşılaşılabilecek 3 değer olarak 5°C, 10°C ve 15°C sıcaklıkları seçilmiştir. İncelenen tüm parametreler için ORC verimi artan aşırı kızdırma sıcaklığı azalmaktadır. Bu sebeple aşırı kızdırma sıcaklık değerinin çok iyi belirlenmesi gerekir. Bu değer fazla olması ORC verimini azaltırken, az olması da türbine sıvı gitmesine neden olur. Aşırı kızdırmanın türbine sıvı gitmesini engelleyecek şekilde minimum değerde tutulması en optimum çözüm olarak gözükmektedir.



**Şekil 3.12.** ORC veriminin aşırı kızdırma sıcaklığına, çevrim akışkanına ve sıcak kaynak sıcaklığına göre değişimi.

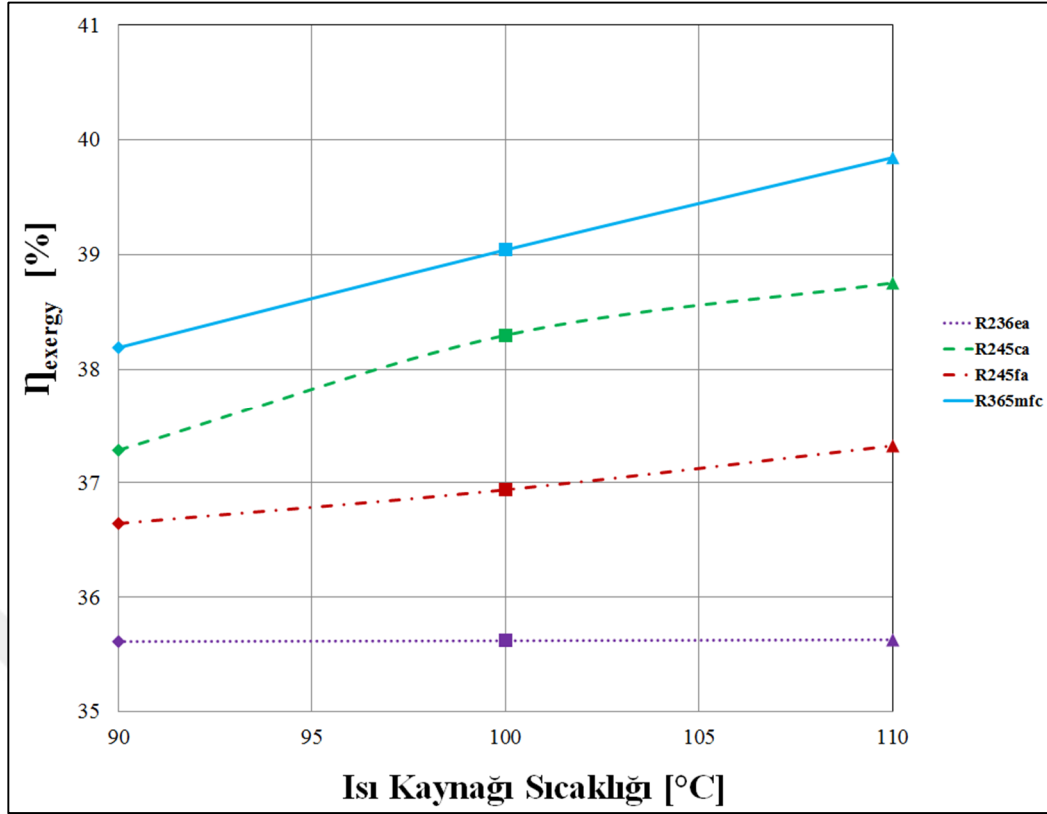
Son olarak incelenen parametre türbin izentropik verimidir. Şekil 3.10’da görüldüğü gibi, türbin izentropik verimindeki artış ORC verimini önemli ölçüde

arttırmaktadır. Şekil 3.13'deki grafikler aşırı kızdırma sıcaklığı 5°C alınarak ve türbin izentropik verimi ise %60, %70 ve %80 alınarak elde edilmiştir. Prototip sistemde hazır ekipman olarak bir scroll kompresör türbin olarak kullanılacaktır. Bu türbin için izentropik verimin testlerde hangi seviyelerde gerçekleşeceği tahmin edilemediği için farklı türbin izentropik verimleri için çevrim analizleri yapılmıştır.



**Şekil 3.13.** ORC veriminin türbin izentropik verimine, çevrim akışkanına ve sıcak kaynak sıcaklığına göre değişimi.

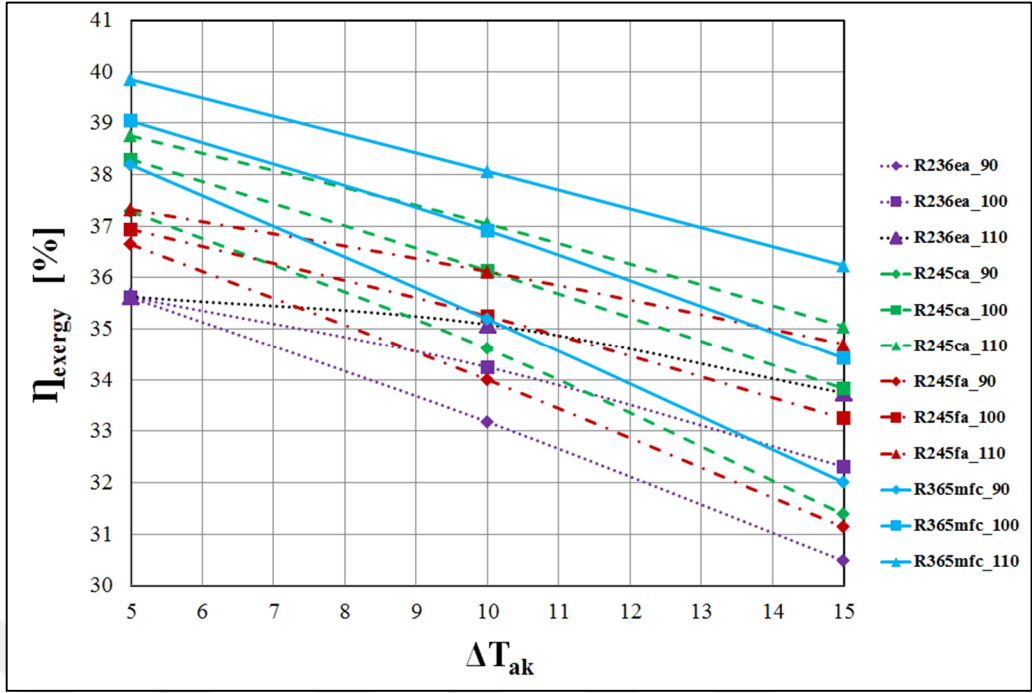
Şekil 3.14'de ısı kaynağı sıcaklığına göre ikinci kanun veriminin değişimi gösterilmiştir. Bu değişim %60 izentropik verim ve 5°C aşırı kızdırma sıcaklığına göre verilmiştir. R245ca, R245fa ve R365mfc akışkanları için, ısı kaynağı sıcaklığının artması ikinci kanun verimini arttırmıştır. Fakat R236ea akışkanı için bu değer neredeyse sabit kalmıştır. ORC veriminde olduğu gibi en yüksek ikinci kanun verimleri bütün sıcaklıklar için R365mfc akışkanında, en düşük ikinci kanun verimleri ise R236ea akışkanında görülmüştür.



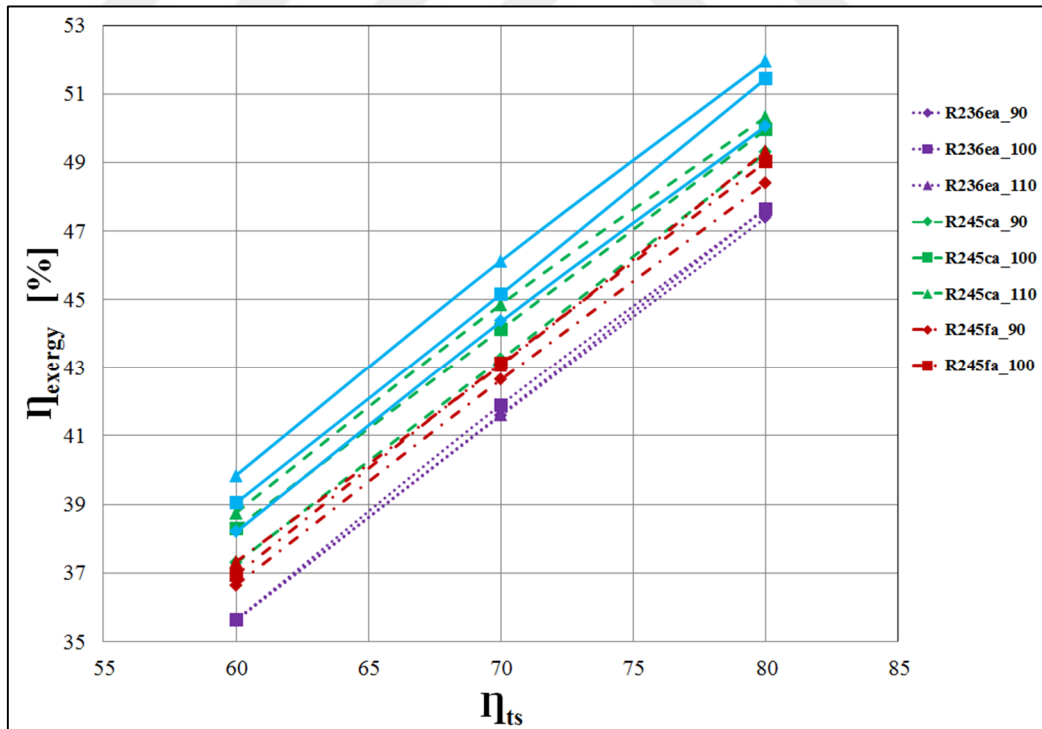
**Şekil 3.14.** Isı kaynağı sıcaklığına göre ikinci kanun veriminin değişimi.

Aşırı kızdırma sıcaklığına göre ikinci kanun veriminin değişimi Şekil 3.15’de gösterilmiştir. Bu grafiklerde türbin izentropik verimi %60 olarak alınmıştır. Şekilde görüldüğü gibi aşırı kızdırma sıcaklığı arttığında ikinci kanun verimi bütün akışkanlar için azalmıştır. R365mfc akışkanının 110°C ısı kaynağı sıcaklığı için ikinci kanun verimi en yüksek değerdedir. R236ea akışkanının 90°C ısı kaynağındaki verim değeri ise en düşük ikinci kanun verimidir.

Şekil 3.16’de ise türbin izentropik veriminin ikinci kanun verimine etkisi 5°C aşırı kızdırma sıcaklığı için gösterilmiştir. Görüldüğü gibi türbin izentropik veriminin azalması ikinci kanun verimini her akışkan için azaltmıştır.



Şekil 3.15. Aşırı kızdırma sıcaklığına göre ikinci kanun veriminin değişimi.



Şekil 3.16. Türbin izentropik verimine göre ikinci kanun veriminin değişimi.

### 3.3. Termodinamik Analiz Sonuçlarının Yorumlanması

Farklı ısı kaynağı sıcaklıklarında, farklı izentropik verimlerde ve farklı aşırı kızdırma sıcaklıklarında R236ea, R245ca, R245fa ve R365mfc olmak üzere dört farklı organik akışkan için yapılan termodinamik analiz sonuçları incelenmiştir. İncelemede öne çıkan sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- Isı kaynağı sıcaklığının artması her akışkan için ORC verimini arttırmıştır. Sonuç olarak bir ORC sisteminin mümkün olan en yüksek ısı kaynağı sıcaklık değerinde tasarlanması en yüksek ORC verimini verecektir.
- Aşırı kızdırma sıcaklığı arttığında ORC verimi azalmaktadır. Bu değer minimuma getirilmesi gerekir. Fakat unutulmamalıdır ki teorik olarak bu değer sıfır olarak kabul edilebilse de, doymuş buhar fazındaki akışkanlar küçük basınç artışlarında veya ısı kayıplarında sıvı-buhar fazına geçeceklerdir. Bunun sonucu olarak buharlaştırıcıdan çıkan doymuş buhar fazındaki akışkan türbine giderken sıvı-buhar fazına geçer ve türbine bir miktar sıvı fazında akışkan gönderilmiş olur. Bu da türbinin çalışma prensibine uygun değildir ve türbin kanatlarında ciddi yapısal bozukluklara sebep olabilir. Bu sebeple ORC sistemi tasarlanırken türbine sıvı gönderilmemesi için yeteri miktarda ancak en düşük seviyede aşırı kızdırma yapılması uygun görülmektedir.
- Bir başka parametre olan türbin izentropik verimi ORC sistem verimini etkileyen önemli parametrelerden birisidir. Türbin veriminin artması ORC sistem veriminde artışa sebep olmaktadır. Yüksek ORC veriminin hedeflendiği sistemlerde, türbin izentropik verimi yüksek öncelikli bir parametredir.
- Isı kaynağı sıcaklığının artması R245ca, R245fa ve R365mfc akışkanları için ikinci kanun veriminin artmasını sağlamıştır. Fakat R236ea akışkanı için ısı kaynağının artması (%60 ve 5°C aşırı kızdırma sıcaklığı için) ikinci kanun veriminde değişikliğe neden olmamıştır.
- Aşırı kızdırma sıcaklığının artması ORC veriminde olduğu gibi ikinci kanun verimini de azaltmıştır. R236ea, R245ca, R245fa ve R365mfc akışkanları için aşırı kızdırma sıcaklığı arttıkça ikinci kanun verimi azalmıştır. Aşırı

kızdırmanın hem ikinci kanun verimini hem de ORC verimini azaltması, bu değerin m¼mk¼n olduğunca d¼ř¼k olması gerektiğinin g¼stergesidir.

- T¼rbin izentropik veriminin artması, her akışkan için ikinci kanun verimini arttırmıştır. T¼rbin izentropik veriminin artması ORC verimini de arttırmıştı. Bu sebeple t¼rbin izentropik verimi ORC sistemleri açısından çok ¼nemli bir parametredir.



## 4. ORC TEST DÜZENEĞİ

### 4.1. ORC Test Düzenegi

Yapılan analizlerde R365mfc akışkanı incelenen tüm ısı kaynağı sıcaklıkları için (90°C, 100°C ve 110°C) en verimli akışkan olarak belirlenmiştir. Fakat ne yazık ki mevcut durumda Türkiye piyasasında soğutucu akışkanları bulmak ve temin etmek oldukça zor, uzun süreli ve maliyetli olmaktadır. Yapılan piyasa araştırmasında R365mfc, R245ca, R245fa ve R236ea akışkanlarından sadece R245fa akışkanının piyasadan temin edilebileceği belirlenmiştir. Bunun sebebi, Türkiye’de R134a gazının yoğunlukla kullanılması ve diğer soğutucu gazları kullanan cihazların yaygın olarak kullanılmamasıdır. Yurtdışı temin seçeneklerinde de soğutucu akışkanların çok pahalı olduğu ve gümrükleme işlemlerinin de maliyeti arttırdığı görülmüştür. Bütün bu sebepler dolayısıyla test düzeneğinde R245fa akışkanının kullanılması kararlaştırılmıştır.

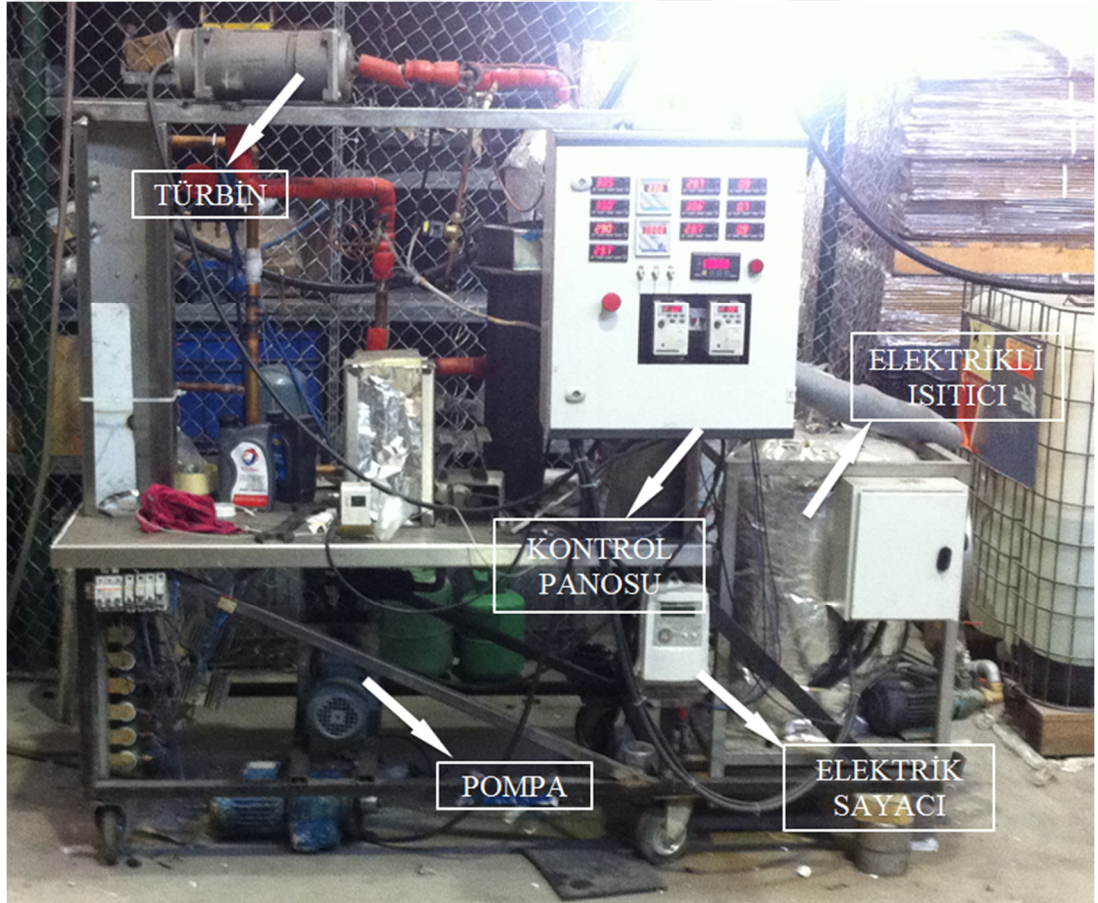
Isı kaynağı olarak ise elektrik ile beslenen 6 bar basınca kadar dayanabilen bir su ısıtıcısı kullanılmıştır. Elektrikli ısıtıcının sıcaklığı istenilen değere ayarlanabilmektedir.

Soğuk kuyu için ise şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Bunun sebebi, testin yapılacağı ortamın kapalı olmasıdır. Şöyle ki, sistemden dışarı ısı atmak için genelde açık ya da kapalı devre soğutucular kullanılır. Bu soğutucular fanlar yardımı ile sıcak suyu soğuturlar. Bu sırada da havaya ısıyı aktarırlar. Test prototipinin kurulacağı MAKİM A.Ş. fabrikasındaki çalışma alanı diğer süreçlerle ortak kullanıldığından ve alan yetersizliğinden dolayı şebeke suyunun soğuk kuyu olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla, 1 ton su alma kapasitesine sahip iki adet su deposu testlere başlamadan önce boş olarak bekletilmiştir. Böylece teste başlandığında şebekeden gelen su ORC sisteminde ısınıp bu su depolarına alınmaktadır. Su depoları değişmeli olarak fabrika binası dışındaki açık alana boşaltılarak testlerin devamlılığı sağlanmıştır.

ORC prototipinin test edilmesi için kurulan test düzeneğinin fotoğrafı Şekil 4.1’de, sistemin şematik resmi ise Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Test düzeneğinde elektrik üretilmeye başlamadan önce, sistemin kararlı hale gelmesi gerekir. Bunun

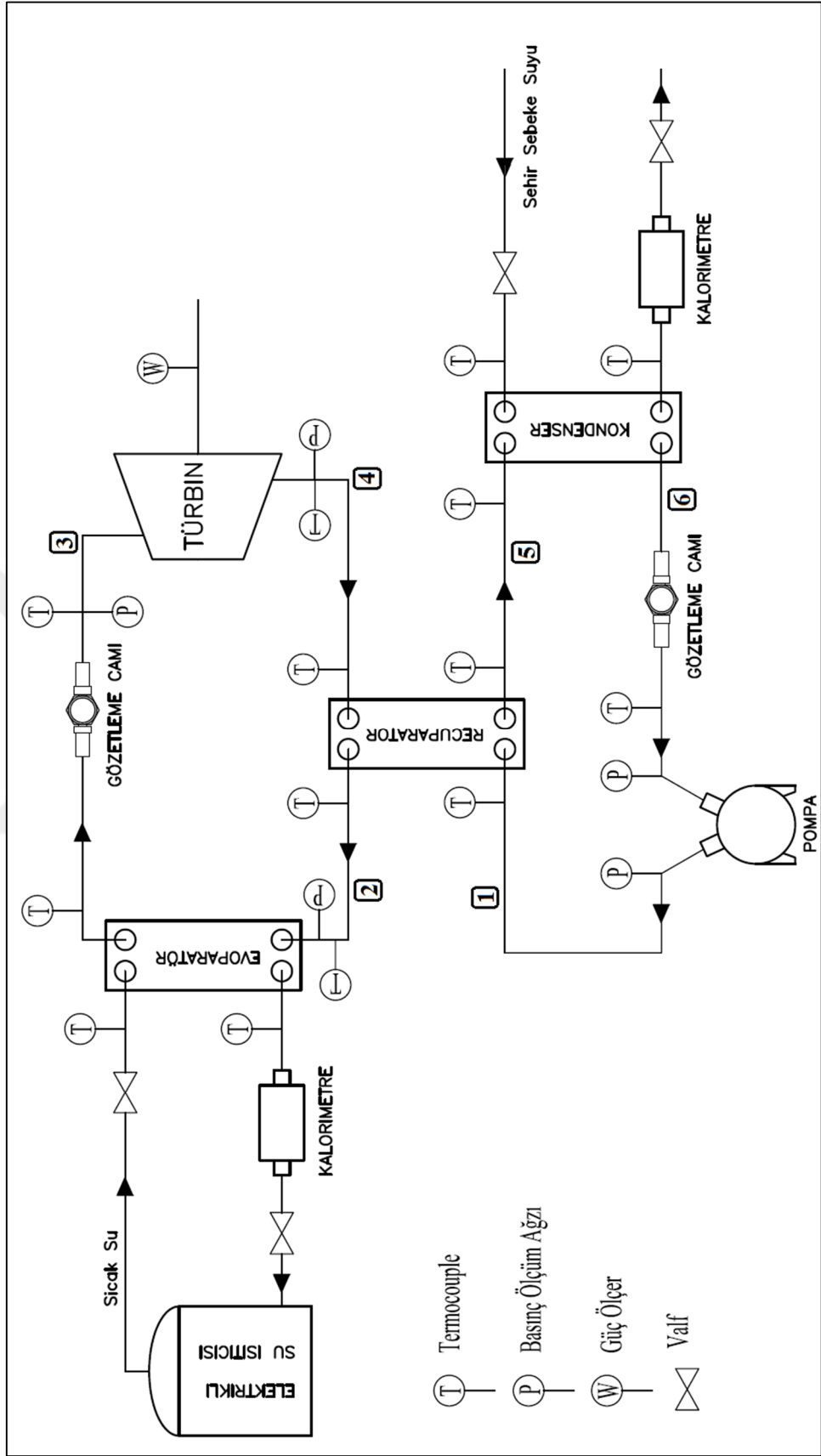
için ilk devreye alma aşamasında buharlaştırıcıya sıcak kaynaktan ısı geçişi olup basınçlı gazın buharlaştırılması gerekir. Fakat bu işlem zaman alacağından, belirli bir süre türbine yeterli miktarda basınçlı gaz gönderilemez. Bu sebeple türbin girişinden çıkışına kadar bir by-pass hattı sisteme yerleştirilmiştir. Böylece ilk devreye alma aşamasında, sistem dengesini sağlayana kadar gaz by-pass hattından geçer, daha sonra by-pass hattı kapatılarak gazın türbine gitmesi sağlanır ve sistemin tekrar dengeye gelmesi sağlanır.

Test düzeneği özellikle hazır raf ürünleri kullanılarak kurulacak şekilde tasarlanmıştır. Test düzeneğinde kullanılan sistem elemanları aşağıda sırasıyla tanıtılmıştır.



Şekil 4.1. Test düzeneğinin fotoğrafı.



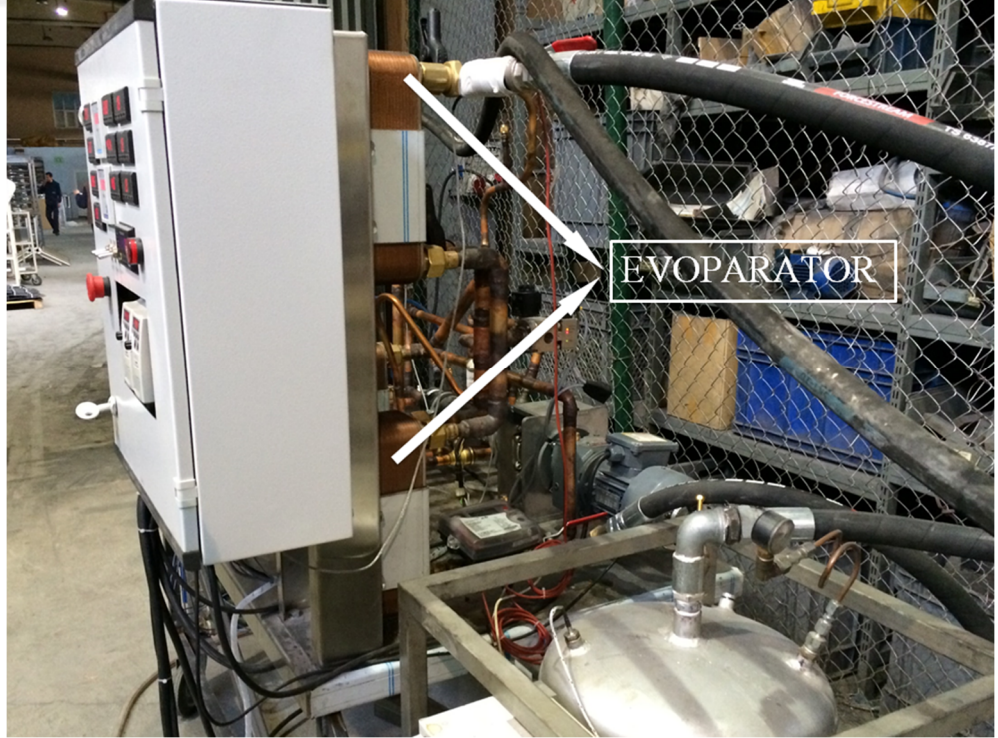


Şekil 4.2. Test düzeneğinin şematik resmi.

#### 4.1.1. Buharlaştırıcı

Sistemde iki adet kaynaklı plakalı ısı değiştirici seri bağlanarak buharlaştırıcı görevinde kullanılmıştır. İlk ısı değiştiricisi sıvı-gaz faz değişimini sağlarken diğeri ise aşırı kızıdırma işlemini gerçekleştirmektedir. Seçilen buharlaştırıcılar 36 plakalı ve 20 kW kapasitelidir. R245fa akışkanı için analizlerde hesaplanan en büyük buharlaştırıcı kapasitesi 29,5 kW olduğu için iki adet seri bağlanmış plakalı eşanjör yeterli görülmüştür.

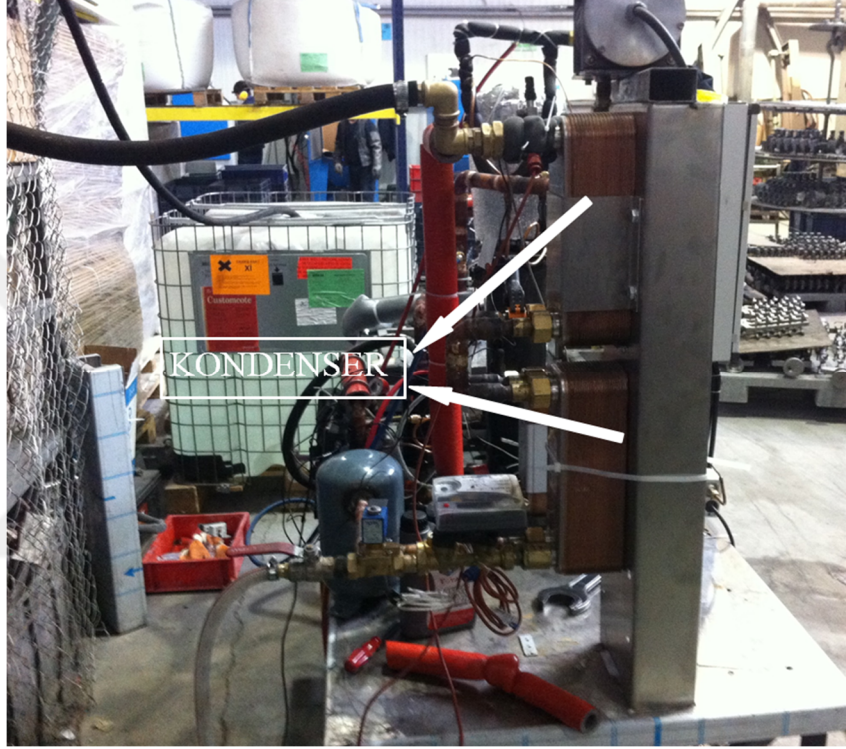
Plakalı ısı değiştiricileri kompakt yapıya sahiptirler. Bu sebeple küçük kapasiteli sistemlerde kullanmak için uygundur. Plakalı ısı değiştiriciler contalı ya da kaynaklı tiptedir. Plakaların içinden geçen akış conta ile ayrılıyor ise contalı, kaynaklı bağlantı ile ayrılıyor ise kaynaklı plakalı ısı değiştirici olarak adlandırılırlar. Test sisteminde kullanılan ısı değiştiriciler kaynaklı plakalı tipte seçilmiştir. Bunun sebebi ise buharlaştırıcıda ulaşılacak sıcaklık değeridir. Contalı tiplerde maksimum sıcaklık dayanımı 90°C iken kaynaklı tiplerde bu sıcaklık 170°C sıcaklığa ulaşabilmektedir. Sıcak kaynaktan gelen su sıcaklığı yüksek olduğu için test sisteminde kaynaklı tipte plakalı ısı değiştiricisi kullanılmıştır. Kullanılan buharlaştırıcının fotoğrafı Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Buharlaştırıcı fotoğrafı.

#### 4.1.2. Yoğuşturucu

Buharlaştırıcıya benzer şekilde sistemde iki adet 20 kW gücünde 36 plakalı ısı değiştirici seri bağlanarak yoğuşturucu görevinde kullanılmıştır. Analizlerde elde edilen yoğuşturucu kapasitesi en yüksek 27,8 kW olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple iki adet seri bağlanmış eşanjörün yeterli olacağı belirlenmiştir. Şekil 4.4'de kullanılan yoğuşturucu fotoğrafı gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Yoğuşturucu fotoğrafı.

#### 4.1.3. Reküparatör

Sistemde ısı geri kazanımı için kullanılan reküparatörün fotoğrafı Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Bu ısı değiştirici de kullanılan diğer ısı değiştiriciler gibi 20 kW kapasiteli ve 36 plakalı, kaynaklı ısı değiştiricidir. Reküparatörde ısı alışverişi sırasında bir taraftaki akışkan gaz, diğer taraftaki akışkan ise sıvıdır ve ısı geçişinde faz değişimi olmaz. Bu sebeple, gerçekleşen ısı geçişinin kapasitesi düşük olsa bile gereken yüzey alanı fazladır. Analizlerde R245fa için en büyük reküparatör

kapasitesi 3,47 kW olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple kullanılan eşanjörün yeterli olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. Reküperatör fotoğrafı.

#### 4.1.4. Türbin

Türbin olarak, hazır raf ürünü bir kompresör ters çalıştırılarak kullanılması planlanmıştır. Bunun en önemli sebebi verimi düşük olan ORC sistemlerinin kullanımının kabul edilebilir olması için maliyetinin de düşük olması kaçınılmaz bir gerçektir. ORC sistemlerin hali hazırda yeterince yaygınlaşamamasının en önemli sebeplerinden birisi maliyetinin yüksek olmasıdır.

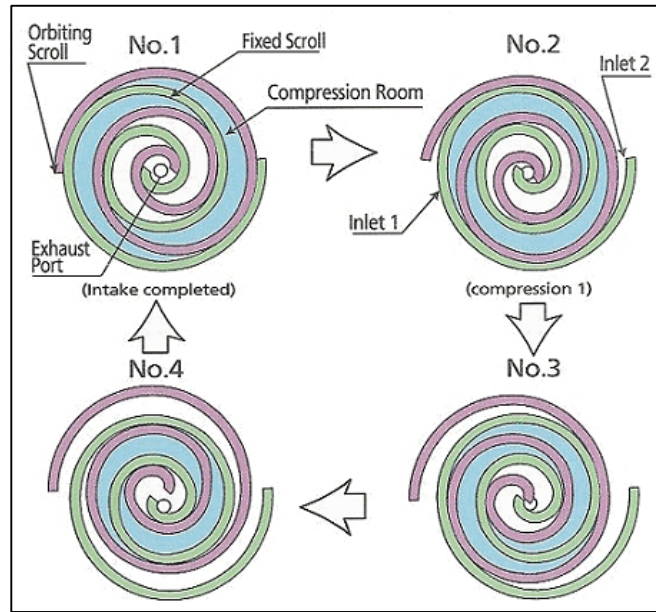
Prototip ORC sisteminde türbin olarak, Bitzer marka ECH209Y model scroll (spiral) kompresör modifiye edilerek kullanılmıştır. Kompresörün çıkış ağzındaki çekvalf alınarak ters yönlü akışa izin vermesi sağlanmıştır. Böylece sistemde üretilen basınçlı gaz kompresörün çıkışından gönderilebilecektir. Yapılan bu değişiklik prototip sistemde kompresörü kullanmak için yeteli görülmüştür. Kompresörün elektrik motoru da scroll türbine direkt olarak bağlıdır. Böylece elektrik motoru ile

kompresör arasındaki bağlantı için bir değişiklik yapılmasına gerek kalmamıştır. Kullanılan kompresörün fotoğrafı Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

Scroll kompresörler soğutma uygulamalarında yaygın kullanılan elemanlardır. Bu sebeple kolay bulunabilir ve düşük maliyetlidirler. Test düzeneğinde türbin olarak scroll kompresör kullanımı bu sebeple uygun görülmüştür. Scroll kompresör erkek ve dişi spiral olmak üzere iki ana parçadan oluşur. Scroll kompresörün çalışma prensibi Şekil 4.7’de gösterilmiştir [26].



Şekil 4.6. Türbin olarak kullanılan spiral kompresörün fotoğrafı.



Şekil 4.7. Scroll kompresörün çalışma prensibi.

#### **4.1.5. Pompa**

Yine hazır raf ürünleri kullanılarak prototip sistemin kurulmasına yönelik, sıvı fazındaki akışkanı basınçlandırmak için SANDEN marka SD-505 model pistonlu kompresör kullanılmıştır. Eksenel yönde hareket eden 5 pistonu sahip olan bu kompresör 89cc/rev hacim süpürme kapasitesine sahiptir. Kullanılan kompresörün fotoğrafı Şekil 4.8’da gösterilmiştir.

Sıvı basınçlandırma işlemi için pistonlu kompresör kullanılmasının sebebi, alternatif olarak kullanılabilen pompaların istenilen debi değerinde istenilen basınçları sağlamamasıdır. Analizlerde hesaplanan debi değerleri dikkate alındığında, piyasadaki pompaların yüksek basınçlarda düşük debileri sağlamadığı görülmüştür. Özetle piyasadaki pompaların kapasiteleri istenilen debi değerlerine göre fazladır. Bu da ürün tedarikini zorlaştırmaktadır. Bu ürünün kullanılmasının diğer bir sebebi de alternatif olarak bulunan ürünlerin maliyetinin çok fazla olmasıdır. Düşük debide yüksek basınç sağlayabilen mekanik diyaframlı pistonlu pompalar, ancak yurtdışından yüksek maliyette ve uzun teslim süreleriyle tedarik edilebilirler. Bu sebeple pompa yerine, düşük maliyetli ve kısa sürede temin edilebilen pistonlu kompresör pompa görevinde kullanılmıştır.



**Şekil 4.8.** Pompa fotoğrafı.

#### **4.1.6. Yardımcı Elemanlar**

Prototip ORC test sisteminde kullanılan diğler yardımcı elemanlar hakkında aşağıda kısa bilgiler verilmiştir.

#### 4.1.6.1. Gözetleme camı

Gözetleme camları boru üzerine monte edilerek boru içi akışın ve fazının göz kontrolü ile belirlenmesini sağlayan elemanlardır. Test sisteminde pompamın girişine gözetleme camı konulmuştur. Bu sayede yoğuşturucudan pompaya gelen akışkanın fazının sıvı olup olmadığı kontrol edilebilecektir. Gözetleme camının temsili fotoğrafi Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



**Şekil 4.9.** Gözetleme camı temsili fotoğrafi.

#### 4.1.6.2. Selenoid Vanalar

Sistemde üç adet selenoid vana mevcuttur. Bunlardan biri türbin girişinde biri by-pass hattı üzerinde diğeri ise soğuk kaynak hattı üzerinde bulunmaktadır. Bu vanalar sadece elektrik kontrollü olarak a-kapa prensibinde çalışırlar. Sistemin termal denge durumuna göre açılıp kapatılabilirler. Sistemde kullanılan selenoid vanaların fotoğrafi Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



**Şekil 4.10.** Selenoid vanaların fotoğrafı.

#### 4.1.6.3. Sıvı Deposu

Yoğuşturucudan pompaya kadar olan boru hattı üzerine sıvı deposu yerleştirilmiştir. Şekil 4.11’de sıvı deposunun fotoğrafı gösterilmiştir. Sıvı deposu, yoğuşturucudan gelen sıvı fazdaki akışkanı depolar. Bu deponun sistemde iki farklı görevi vardır. İlk görevi, sistemin devreye alınma aşamasında pompaya giden boru hattında sıvının biterek akışkanın gaz fazına geçmesini engellemektir. Sistem ısı olarak kararlı hale gelene kadar yoğuşturucuda yeterli sıvılaşma olmayacağı için, bu esnada depolanan akışkan ile pompaya gereken sıvı sağlanmış olur. Deponun ikinci görevi ise, sistemde beklenmedik bir değişim olduğunda sıcak kaynaktan yeterli miktarda ısı alınamaması ya da yoğuşturucuda yeterli ısının çevreye atılamaması gibi durumlarda pompaya yeterli sıvıyı sağlamaktır. Sıvı deposu seçimi yapılırken, kurulan sistemdeki boruların toplam hacmi hesaplandı. Daha sonra, sistemdeki sıvı fazındaki ve gaz fazındaki akışkan miktarı hesaplandı. Buna göre sıvı deposunun hacminin yarıya kadar dolu olması şartıyla sıvı deposunun hacmi 8 litre olarak belirlendi.





**Şekil 4.11.** Sıvı deposunun fotoğrafı.

#### *4.1.6.4. Sıvı Filtresi*

Sistemde tıkanıklığa yol açabilecek katı parçacıkların toplanması amacı ile pompa çıkışına bir filtre konulması uygun görülmüştür. Filtrenin fotoğrafı Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.12.** Sıvı filtresinin fotoğrafı.

#### 4.1.6.5. Kontrol Panosu

Sistemin devreye alınması, pompanın frekans ayarının yapılması, vanaların kontrolü gibi tüm kontrol görevler için Şekil 4.13’de gösterilen kontrol panosu oluşturulmuştur. Bu pano üzerinde üç adet selenoid valfin kontrolünün sağlandığı aç/kapa anahtar bulunmaktadır. yoğuşturucuya soğuk suyun girişine izin vermek için bir anahtar, by-pass vanasının kontrolü için bir anahtar, ayrıca sıcak suyun sisteme girişine izin vermek için de bir adet anahtar kullanılmıştır.

Ayrıca bu pano üzerinde ORC sisteminde farklı noktalardan alınan basınç ve sıcaklık değerleri de eşzamanlı olarak görülebilmektedir.

Sıcak su ve sistem basınçlandırma pompasının kontrolü için de iki adet frekans konvertör cihazı panonun üzerine yerleştirilmiştir. Bu cihazlar kullanılarak sistemdeki akışkanın debisi ve sisteme giren sıcak suyun debisi kontrol edilebilmektedir.

Panoya ayrıca, türbinde üretilen akım ve voltaj değerlerinin okunması için de iki adet gösterge eklenmiştir.



Şekil 4.13. Kontrol panosunun fotoğrafı.

## 4.2. Ölçüm Cihazları ve Tekniği

Prototip ORC test sisteminde kullanılan ölçüm cihazları hakkında aşağıda kısa bilgiler verilmiştir.

### 4.2.1. Sıcaklık ve Basınç Ölçümü

Sıcaklık ve basınç ölçümleri iki farklı yöntem ile yapılacaktır. Sistemde bazı noktalara basınç ve sıcaklık transmitterleri konulmuştur. Bu transmitterler yardımı ile basınç ve sıcaklık değerlerini okuyarak kontrol panosunda bulunan ekranlara iletmektedirler. Sıcaklık ölçümlerinde LEA markalı NTC2K tipinde sensörlerden gelen sinyaller dijital çeviriciler yoluyla ekrana aktarılmıştır. Bu sensörlerin sıcaklık ölçüm aralığı  $-40/+120$  °C, ölçüm hassasiyeti ise  $\pm 0,3$  °C'dir. Basınç ölçümünde PTG35 kod adına sahip piezoresistive prensibine dayalı ölçüm yapan transmitterler kullanılmıştır. Bu transmitterleri basıncı % 0,1 hassasiyet ile  $-0,5/35$  bar aralığında ölçebilirler.

Diğer yöntem ise dijital manifold kullanmaktır. TESTO 570 dijital manifold kullanarak borular üzerinde bulunan basınç ölçüm noktaları yardımı ile basınç ölçümü yapılmıştır. Ayrıca iki adet kısaç sıcaklık probu kullanarak istenilen noktada sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Şekil 4.14'de gösterildiği gibi TESTO 570 cihazında bir LCD ekran üzerinden sıcaklık ve basınç değerleri okunabilmektedir.



Şekil 4.14. Test 570 ölçüm cihazının fotoğrafı.

#### **4.2.2. Debi Ölçümü**

Sistemdeki debinin ölçülmesi için entegre edilmiş bir cihaz bulunmamaktadır. Debi, pompanın devrine göre hesaplanmıştır. Kullanılan pompa pozitif deplasmanlı bir pompadır. Bu sayede pompanın devri bilindiğinde birim zamandaki akışkan miktarı da belirlenmiş olur.

#### **4.2.3. Elektriksel Ölçümler**

Prototip ORC test sisteminde kullanılan elektriksel ölçümler hakkında aşağıda kısa bilgiler verilmiştir.

##### **4.2.3.1. Türbinde Üretilen Güç Ölçümü**

Kontrol panelinde bulunan akım ve voltaj göstergeleri sayesinde bu değerler okunmuştur. Scroll kompresöre direkt bağlı olarak çalışan elektrik motoru 3 fazlı olduğundan;

$$W=V.I.\sqrt{3} \quad (26)$$

formülü ile üretilen güç hesaplanmıştır.

##### **4.2.3.2. Pompada Tüketilen Güç Ölçümü**

Pompada tüketilen gücü bulabilmek için sisteme Şekil 4.15’de fotoğrafı gösterilen elektrik sayacı eklenmiştir.



**Şekil 4.15.** Elektrik sayacının fotoğrafı.

### 4.3. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Tasarımı ve analizleri yapılan ORC sisteminin prototipi MAKİM A.Ş. bünyesinde kuruldu ve testler yapıldı. Test edilen prototip sistemde R245fa akışkanı kullanıldı. Toplamda 8 adet test yapıldı. Testlerde ölçülen tüm değerler Çizelge 5.1’de listelendi. ORC verimi en düşük %5,61 ve en yüksek %7,17 olarak ölçüldü.

Ölçülen değerlerin teorik termodinamik analizlerle de doğrulanması için, ölçülen değerler kullanılarak, Cycle-Tempo programında termodinamik çevrim analizleri tekrar edildi. Bölüm 3.2’deki teorik analizlerde, incelenen parametreler (ısı kaynağı sıcaklığı, aşırı kızdırma sıcaklığı, türbin izentropik verimi, vb.) istenilen değerlerde alınarak analizler yapılmıştı. Ancak, testlerde oldukça fazla olan bu değerlerin istenildiği gibi ayarlanması çok zordur. Bölüm 3.2’de analizleri yapılan ORC sistemlerindeki sıcaklık, basınç vb. gibi değerlerin testler esnasında sistemdeki birçok etkileşimli değişimden dolayı ve birçok kontrol edilmesi mümkün olmayan parametrelerden dolayı tutturulması mümkün olmamıştır. Bu sebeple testlerde ölçülen ve Çizelge 5.1’de listelenen sıcaklık, basınç vb. gibi değerler kullanılarak Cycle-Tempo programında termodinamik analizler testler için tekrar edildi. Termodinamik analizlerden elde edilen ORC verimleri ile testlerde ölçülen değerler

karşılaştırıldı. Böylece termodinamik çevrim analizleri ile testlerin uyumluluğu değerlendirildi.

#### **4.3.1. Testlerde Ölçülen Değerler için Termodinamik Analizler**

Testlerde ölçülen değerler kullanılarak ORC termodinamik analizleri Bölüm 3.2'deki analizlere benzer şekilde Cycle-Tempo programında yapıldı. Yapılan 8 adet testte ölçülen değerler kullanılarak yapılan Cycle-Tempo analizlerinden elde edilen test analizi sonuçları Çizelge 5.2'de gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 5.3' de testlerden ve test analizlerinden elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Aşağıda sırasıyla türbin giriş sıcaklığının ve aşırı kızdırma sıcaklığının ORC verimine etki grafikleri verilerek değerlendirme yapılmıştır.

#### **4.3.2. ORC Veriminin Türbin Giriş Sıcaklığı ile Değişimi**

Türbin giriş sıcaklığına göre ORC veriminin değişimi için test ve analiz sonuçları Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Şekil 5.1'de ayrıca Bölüm 3.2'de yapılan teorik analiz sonuçları da karşılaştırma yapmak amacıyla gösterilmiştir.

Testlerde ısı kaynağı olarak kullanılan basınçlı suyun sıcaklığı buharlaştırıcıda sabit kalmadığından, Şekil 5.1'de değerlendirme için ölçümün daha net yapıldığı türbin giriş sıcaklığı kullanılmıştır. Türbin giriş sıcaklığı da, aşırı kızdırmaya bağlı olarak ısı kaynağı sıcaklığının bir fonksiyonudur ve temsili olarak ısı kaynağı sıcaklığı olarak değerlendirilebilir. Bölüm 3.2'deki teorik analizlerde artan ısı kaynağı sıcaklığının ORC verimini artırdığı hesaplanmıştı. Teorik analizlerde salt olarak sadece ısı kaynağı sıcaklığı artırılmış ve diğer çevrim parametreleri sabit tutulmuştu.

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi, testlerde ve test değerlerine göre yapılan analizlerde artış gözlenmemiş ancak dalgalı da olsa nihai olarak ORC veriminde bir miktar artma eğilimi olduğu görülmüştür. Testlerde artan ısı kaynağı sıcaklığı esnasında komple sistemdeki diğer parametreler teorik analizlerde olduğu gibi sabit kalmamıştır. Bu sebeple teorik analizler ile testler birebir aynı eğilimde sonuçlar

vermemiştir. Buna rağmen Şekil 5.1’de gösterilen teorik analiz sonuçları ve testler arasında uyumlu bir örtüşme gerçekleşmiştir.

**Çizelge 4.1.** Testlerde ölçülen ve hesaplanan değerler.

Test No	Türbin Giriş Sıcaklığı [°C]	Türbin İzotropik Verimi [%]	Pompa Verimi [%]	Aşın Kızdırma [°C]	Organik Akışkan Debişi [kg/s]	$W_t$ [kW]	$W_p$ [kW]	$E_{giren}$ [kW]	$W_{net}$ [kW]	$\eta_{IORC}$ [%]	$\eta_{exergy}$ [%]	$P_e$ [bar]	$P_c$ [bar]	$P_r$ [bar]	$T_e$ [°C]	$T_c$ [°C]	$Q_e$ [kW]	$Q_c$ [kW]	$T_{scale}$ kaymak-test [°C]	$T_{soguk}$ kuyu-test [°C]	$T_1$ [°C]	$T_2$ [°C]	$T_3$ [°C]	$T_4$ [°C]	$T_5$ [°C]	$T_6$ [°C]
1	85,33	49,27	12,42	5,5	0,051	0,61	0,17	1,818	0,43	4,2	23,65	7,86	1,75	4,49	79,83	29,56	10,17	9,33	93	15,8	15,24	51,7	85,33	60,8	32,25	13,83
2	89,52	52,92	12,4	6,44	0,068	0,87	0,23	2,495	0,64	4,628	25,65	8,51	2	4,26	83,03	33,35	13,83	12,63	94,3	12,7	13,51	50,65	89,52	63,67	35,05	12,12
3	91,33	58,51	15,87	7,13	0,055	0,76	0,17	2,025	0,6	5,51	29,63	8,75	1,84	4,76	84,17	30,97	10,88	10,85	96,6	15,2	23,09	55,45	91,33	64,33	39,17	21,87
4	93,93	47,87	18,75	6,43	0,071	0,87	0,21	2,548	0,66	4,641	25,90	9,74	1,95	4,99	88,62	32,62	14,22	12,38	95	12,9	14,2	54,73	93,93	67,25	41,13	13
5	94,78	51,82	19,27	7,71	0,062	0,81	0,18	2,427	0,63	5,12	25,96	9,37	2,09	4,48	87	34,62	12,3	12,12	102,3	15,5	27,46	60,25	94,78	68,3	40,37	26,3
6	96,86	57,75	15,76	14,63	0,06	0,94	0,18	2,468	0,76	5,97	30,79	8,05	1,63	4,94	80,79	27,58	12,73	10,9	101,9	12,6	12,99	52,88	96,86	69,74	31,36	11,8
7	98,07	48,29	19,19	9,49	0,083	0,96	0,24	2,956	0,72	4,718	24,36	9,71	2	4,86	88,5	33,35	15,26	13,78	103,26	12,6	13,3	57,35	98,07	71,43	37,11	12,04
8	101,4	46,76	22,51	10,83	0,081	1,02	0,23	3,209	0,78	4,81	24,31	10,36	1,99	5,21	91,25	33,21	16,23	15,86	104,2	12,9	13,43	58,13	101,43	74,15	40,45	12,3

**Çizelge 4.2.** Testlerde ölçülen değerler kullanılarak elde edilen test analizi sonuçları.

Alışkan	Test No	Türbin Giriş Sıcaklığı [°C]	Türbin İzentropik Verimi [%]	Pompa Verimi [%]	Aşırı Kızdırma [°C]	Organik Akışkan Debisi [kg/s]	$W_t$ [kW]	$W_p$ [kW]	$E_{giren}$ [kW]	$W_{net}$ [kW]	$\eta_{ORC}$ [%]	$\eta_{exergy}$ [%]	$P_e$ [bar]	$P_c$ [bar]	$P_r$ [bar]	$T_e$ [°C]	$T_c$ [°C]	$Q_e$ [kW]	$Q_c$ [kW]	$T_{sıcak-kaynak-test}$ [°C]	$T_{soğuk-kuyu-test}$ [°C]	$T_1$ [°C]	$T_2$ [°C]	$T_3$ [°C]	$T_4$ [°C]	$T_5$ [°C]	$T_6$ [°C]
R245fa	1	85.33	49.27	12.42	5.5	0.051	0.61	0.17	1.818	0.43	4.2	23.65	7.86	1.75	4.49	79.83	29.56	10.17	9.33	93	15.8	15.24	51.7	85.33	60.8	32.25	13.83
	2	89.52	52.92	12.4	6.44	0.068	0.87	0.23	2.495	0.64	4.628	25.65	8.51	2	4.26	83.03	33.35	13.83	12.63	94.3	12.7	13.51	50.65	89.52	63.67	35.05	12.12
	3	91.33	58.51	15.87	7.13	0.055	0.76	0.17	2.025	0.6	5.51	29.63	8.75	1.84	4.76	84.17	30.97	10.88	10.85	96.6	15.2	23.09	55.45	91.33	64.33	39.17	21.87
	4	93.93	47.87	18.75	6.43	0.071	0.87	0.21	2.548	0.66	4.641	25.90	9.74	1.95	4.99	88.62	32.62	14.22	12.38	95	12.9	14.2	54.73	93.93	67.25	41.13	13
	5	94.78	51.82	19.27	7.71	0.062	0.81	0.18	2.427	0.63	5.12	25.96	9.37	2.09	4.48	87	34.62	12.3	12.12	102.3	15.5	27.46	60.25	94.78	68.3	40.37	26.3
	6	96.86	57.75	15.76	14.63	0.06	0.94	0.18	2.468	0.76	5.97	30.79	8.05	1.63	4.94	80.79	27.58	12.73	10.9	101.9	12.6	12.99	52.88	96.86	69.74	31.36	11.8
	7	98.07	48.29	19.19	9.49	0.083	0.96	0.24	2.956	0.72	4.718	24.36	9.71	2	4.86	88.5	33.35	15.26	13.78	103.26	12.6	13.3	57.35	98.07	71.43	37.11	12.04
	8	101.4	46.76	22.51	10.83	0.081	1.02	0.23	3.209	0.78	4.81	24.31	10.36	1.99	5.21	91.25	33.21	16.23	15.86	104.2	12.9	13.43	58.13	101.43	74.15	40.45	12.3



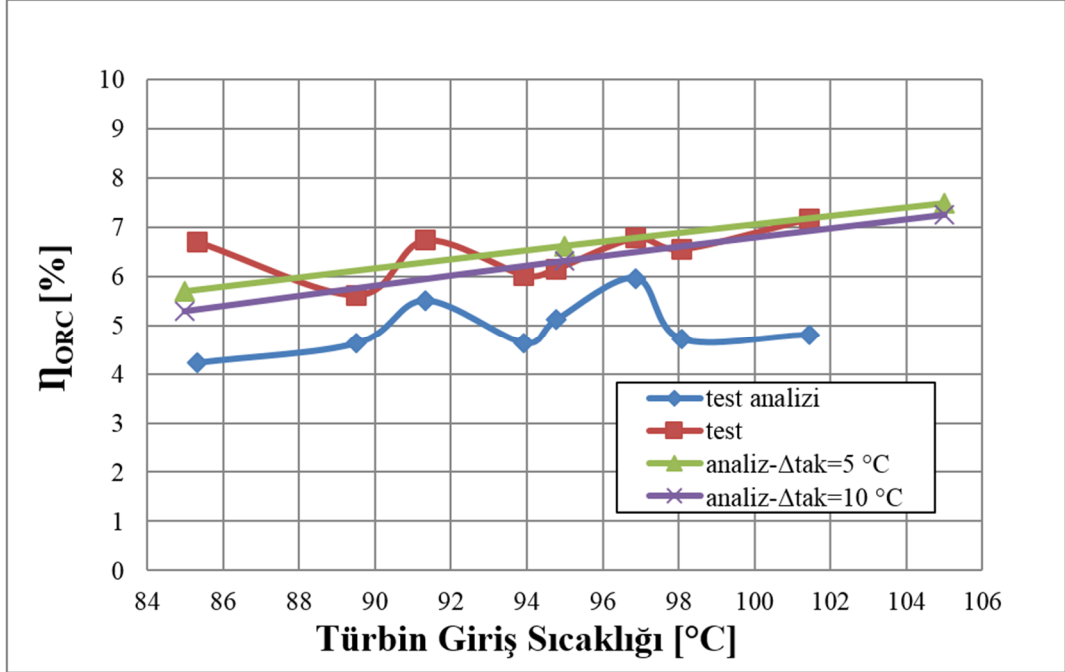
**Çizelge 4.3.** Testler ve test analizlerinde ölçülen ve hesaplanan değerler.

	Türbin Giriş Sıcaklığı [°C]	Aşırı Kızdırma Sıcaklığı ( $\Delta T_{ak}$ ) [°C]	Türbin İzotropik Verimi ( $\eta_{is}$ ) [%]	ORC Verimi Test ( $\eta_{ORC}$ ) [%]	ORC Verimi Test Analizi ( $\eta_{ORC}$ ) [%]	İkinci Kanun Verimi Test ( $\eta_{exergy}$ ) [%]	İkinci Kanun Verimi Test Analizi ( $\eta_{exergy}$ ) [%]
1	85.33	5.5	49.27	6.7	4.22	38.12	23.65
2	89.52	6.44	52.92	5.61	4.62	31.14	25.65
3	91.33	7.13	58.51	6.73	5.5	36.4	29.63
4	93.93	6.43	47.89	6.02	4.63	33.55	25.9
5	94.78	7.71	51.52	6.15	5.11	31.4	25.96
6	96.86	14.63	57.75	6.78	5.96	34.89	36.79
7	98.07	9.49	48.29	6.55	4.71	33.8	24.36
8	101.43	10.83	46.76	7.17	4.8	36.27	24.31

Ayrıca, Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, testlerde ölçülen ORC verimi ile testleri simüle eden termodinamik analizlerden elde edilen ORC verimi arasında değişen seviyelerde farklar olduğu görülmektedir. Testlerden ve test analizlerinden elde edilen ORC verimi, belli bölgede (90-97°C sıcak kaynak sıcaklıkları) benzer yapıda olmasına rağmen düşük ve yüksek sıcaklıklarda benzerlik yapısı bir miktar sapmaktadır. Analizlerden hesaplanan ORC verimi testlere göre bir miktar düşük çıkmıştır. Aslında, testlerdeki birçok kayıp (ısı kaybı, akış sürtünme kayıpları, vb.) tam bilinen olarak analizlerde dahil edilemediği için, analizlerdeki verimin testlerden bir miktar yüksek çıkması beklenirdi. Bu durumda testlerde ORC veriminin bir miktar yüksek çıkmasına yol açan etkenler olmalıdır.

Test esnasında sistem veriminin hesaplanmasına yönelik çok farklı formda birçok fiziksel büyüklüğün ölçümü (sıcaklık, basınç, debi, akım, gerilim, vs.) birçok ölçüm cihazı kullanılarak yapılmaktadır. Prototip sistem hazır ekipman kullanılarak oluşturulmuş ve kullanılan ölçüm cihazları da yine özel amaçlı olmayıp genel ölçüm cihazlarından temin edilebilirliğine göre en pratik ve basit olanları kullanılmıştır. Her bir ölçüm cihazının sahip olduğu okuma hatası vardır. Dolayısıyla, testler ile testleri simüle eden test analizleri arasındaki bu beklenmedik farkın, kullanılan test cihazlarının hatalarından ve sistemdeki birçok geçici rejim davranışından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

Olası bütün ölçüm hatalarına rağmen, elde edilen test ve test analizi sonuçlarının yeter seviyede yakın olduğu ve kabul edilebilir bir hatada olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 4.16. ORC veriminin türbin giriş sıcaklığı ile değişimi için test ve test analizi sonuçları.

#### 4.3.3. ORC Veriminin Aşırı Kızdırma Sıcaklığı ile Değişimi

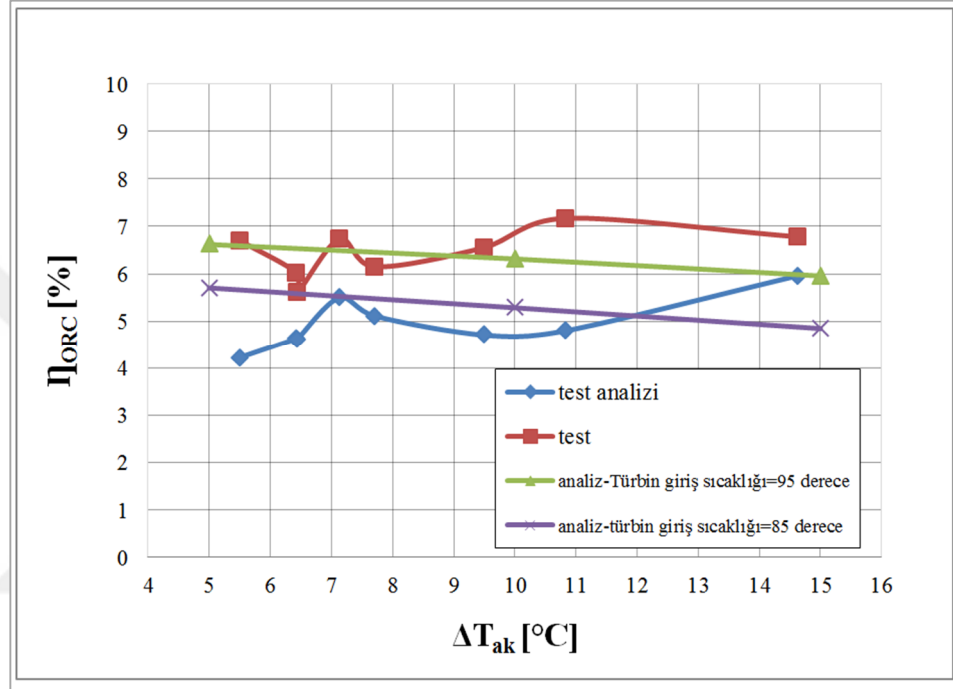
Aşırı kızdırma sıcaklığının ORC verimi üzerindeki etkisi test ve test analizi sonuçlarına göre Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

Şekil 5.2’de ayrıca Bölüm 3.2’de yapılan teorik analiz sonuçları da karşılaştırma yapmak amacıyla gösterilmiştir. Bölüm 3.2’deki teorik analizlerde artan aşırı kızdırma sıcaklığının ORC verimini azalttığı hesaplanmıştır.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, testlerde ve test değerlerine göre yapılan analizlerde azalma gözlenmemiş ve ORC veriminde dalgalı bir değişim görülmüştür. Testlerde artan aşırı kızdırma sıcaklığı esnasında komple sistemdeki diğer parametreler teorik analizlerde olduğu gibi sabit kalmamıştır. Bu sebeple teorik analizler ile testler birebir aynı eğilimde sonuçlar vermemiştir. Buna rağmen Şekil

5.2'de gösterilen teorik analiz sonuçları ve testler arasında uyumlu bir örtüşme gerçekleşmiştir.

Testlerde yapılan ölçümlerden hesaplanan en düşük aşırı kızdırma sıcaklığı 5,5°C ve en yüksek ise 14,63°C olmuştur. Benzer şekilde, test analizlerinden elde edilen ORC verimi testlere göre bir miktar düşük çıkmıştır. Test ve test analizi eğrilerinin yeterince benzer olduğu ve yakın olduğu değerlendirilmektedir.



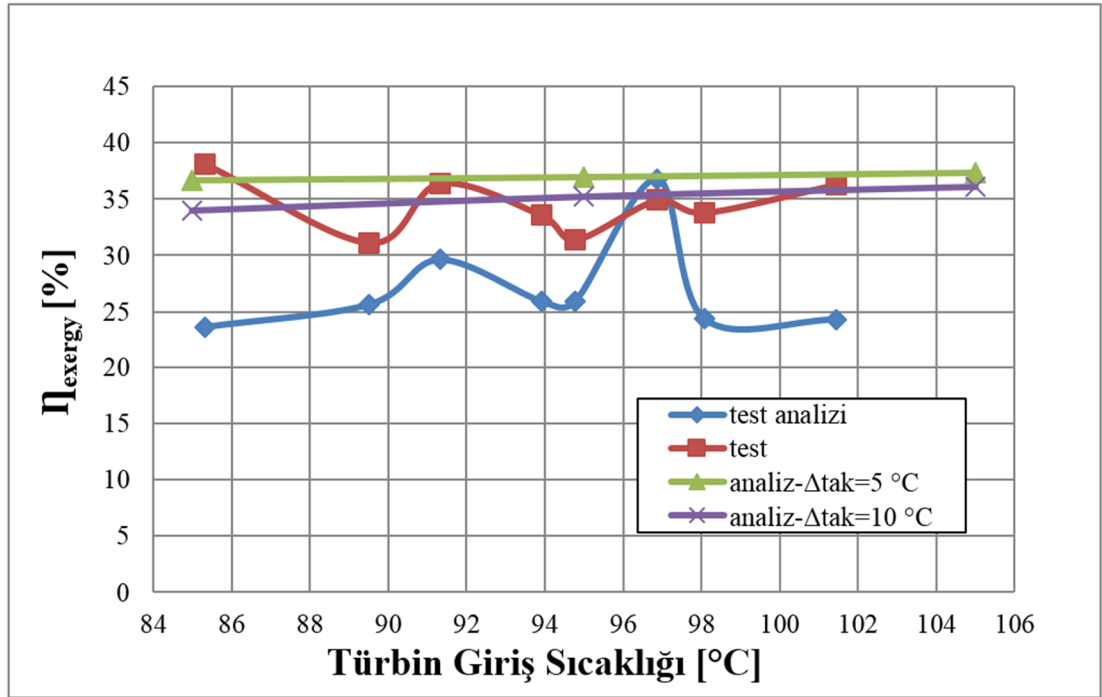
**Şekil 4.17.** ORC veriminin aşırı kızdırma sıcaklığı ile değişimi için test ve test analizi sonuçları.

Bu tez çalışmasında ortaya konan ORC termodinamik analiz metodolojisi ile prototip test sonuçlarının kabul edilebilir seviyede yakın sonuçlar vermesi, tasarım ve analiz metodolojisinin doğrulanmasını sağlamıştır. Daha da önemlisi, hazır ekipmanlarla gerçekleştirilen ORC sistem tasarımı, prototip imalatı ve testlerinin geçerliliğini ortaya koymuştur.

#### **4.3.4. İkinci Kanun Veriminin Türbin Giriş Sıcaklığı ile Değişimi**

Türbin giriş sıcaklığının ORC ikinci kanun verimi üzerindeki etkisi test ve test analizi sonuçlarına göre Şekil 5.3'de gösterilmiştir.

Bölüm 3.2'de yapılan analiz sonuçları da karşılaştırmalı olarak Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi türbin giriş sıcaklığının artışı ikinci kanun veriminin artmasını sağlamıştır. Testlerde ve test analizlerinde sonuçlar dalgalı bir görünümde olsa da genel olarak türbin giriş sıcaklığı ikinci kanun veriminin artmasına sebep olmuştur.

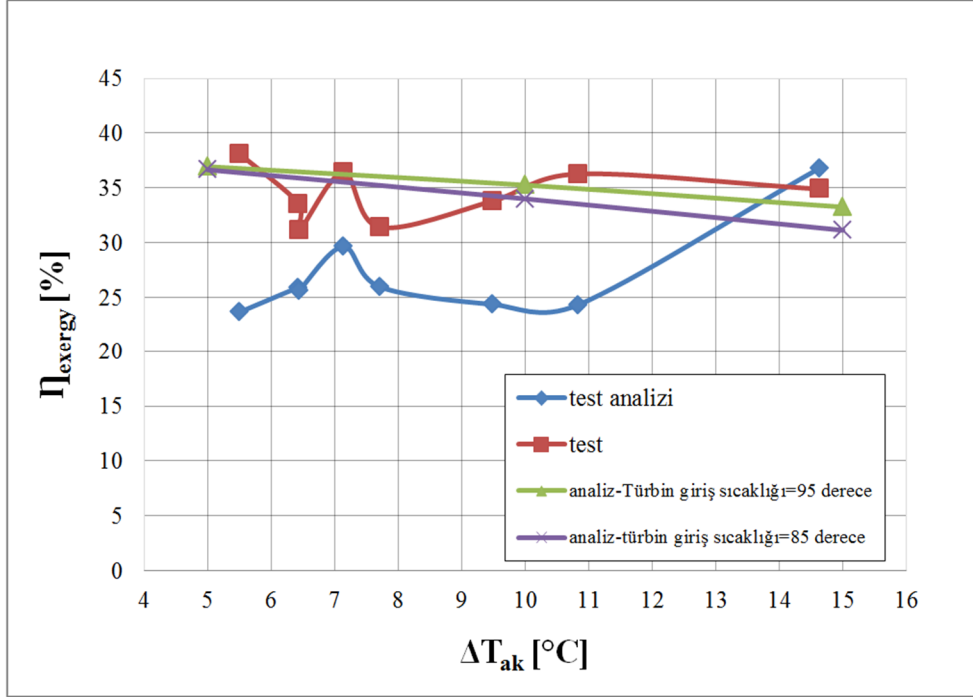


Şekil 4.18. İkinci kanun veriminin türbin giriş sıcaklığı ile değişimi için test ve test analizi sonuçları.

#### 4.3.5. İkinci Kanun Veriminin Aşırı Kızdırma Sıcaklığı ile Değişimi

Aşırı kızdırma sıcaklığının ikinci kanun verimine etkisi yapılan test ve test analizi sonuçlarına göre Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Ayrıca Bölüm 3.2'de yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar da Şekil 5.4'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi aşırı kızdırma sıcaklığı arttığında ikinci kanun verimi azalmıştır. Testlerde ve test analizlerinde aşırı kızdırma değeri arttıkça genel olarak ikinci kanun verimi de azalmıştır. Fakat bu değişim bazı ölçümlerde artış olarak

görüldüğünden grafikte dalgalanmalara neden olmuştur. Yine de genel olarak sistem davranışı aşırı kızdırma sıcaklığının artmasına karşılık ikinci kanun veriminin azalması yönündedir.



Şekil 4.19. İkinci kanun veriminin aşırı kızdırma sıcaklığı ile değişimi için test ve test analizi sonuçları.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

ORC'nin termodinamik analizine ilaveten sistem tasarımı, prototipleme ve testlerinin yapıldığı bu tez çalışmasında tecrübe edilen bazı gözlemler ve genel değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır.

- 1) R236ea, R245fa, R245fa ve R365mfc için 90, 100 ve 110°C ısı kaynağı sıcaklıklarında yapılan analiz sonuçlarına göre, bu akışkanların içinden en yüksek performans gösteren yani en yüksek çevrim verimini veren akışkan R365mfc olmuştur. Ancak, maliyet ve temin edilebilme açısından prototipte R245fa akışkanı kullanılmıştır.
- 2) ORC sistem verimine önemli ölçüde etki eden parametreler; ısı kaynağı sıcaklığı, aşırı kızdırma sıcaklığı ve türbin verimi olarak belirlenmiştir. Bu değişkenlerin etkisi analizlerde ve testlerde açıkça görülmüştür. Sistem veriminin mümkün olan en üst düzeyde olması için türbin seçimine dikkat edilmelidir. Prototipte türbin yerine hazır ekipman olarak ve ters bağlantı ile scroll kompresör kullanılmıştır. Buna rağmen, testlerde yapılan ölçümlerden hesaplanan en düşük türbin izentropik verimi %46,76 olurken en yüksek değer ise %58,51 olmuştur. Türbin verimi arttıkça ORC sistem veriminin de arttığı gözlenmiştir. Bu sebeple ORC sisteminde kullanılacak türbinin seçimi akışkana ve türbin giriş şartlarına uygun olarak yapılmalıdır.
- 3) Testlerde, türbin yerine soğutma çevrimlerinde yaygın kullanılan scroll kompresör kullanılmıştır. Bunun sebebi, bu kompresörlerin organik akışkanların kullanımına uygun olmasıdır. Analizlerde türbin genişleme oranının 2,87 ile 5,97 arasında değiştiği görülmüş, ölçümlerde ise bu değer 2,94 ile 4,66 arasında gerçekleşmiştir. Buna göre bahsedilen ısı kaynağı sıcaklıklarında scroll kompresör kullanımı, genişleme oranının sağlanması açısından uygundur. Bu tip kompresörlerde genel olarak kompresörün ters yönde dönmesini engellemek amacıyla çek-valfler kullanılır. Bu sebeple kompresörün türbin görevinde kullanımından önce içinde yer alan çek-valf çıkarılmalıdır. Bu bilgiler referans alınarak düşük sıcaklığa sahip ısı kaynaklarında scroll kompresörün kullanımı uygundur denilebilir. Fakat bu

kompresörlerin verimlerini arttırmak için daha ayrıntılı çalışmalar yapılması gereklidir.

- 4) Aşırı kızdırmanın sistemin verimini azalttığı gözlenmiştir. Bu sebeple aşırı kızdırma değerinin çok iyi belirlenmesi gerekir. Bu değer fazla olması sistem verimini azaltırken, az olması da türbine sıvı gitmesine neden olur. Testlerde aşırı kızdırmanın 5,5°C ile 14,63°C arasında değiştiği gözlenmiştir. Testler esnasında etkileşimli olarak birçok parametrenin değişimi bu değer biraz da kontrol dışı değişmesine sebep olmuştur.
- 5) Analizlerde hesaplanan pompada harcanan güç ile testlerde ölçülen pompa gücü farklılık göstermektedir. Bunun sebebi seçilen pompanın sıvıları basınçlandırmaya uygun olmamasıdır. Pompa yerine yine hazır ekipman olarak gazların basınçlandırılması için imal edilmiş bir kompresör kullanılmıştır. Bu sebeple pompa verimi oldukça düşük seviyelerde gerçekleştiğinden komple ORC sistem verimini etkilemiştir.
- 6) Bölüm 3’de yapılan analizlerde, yapılan test çalışmalarında ve test analizi çalışmalarında görüldüğü gibi türbin giriş sıcaklığı arttıkça ikinci kanun verimi de artmıştır. Türbin giriş sıcaklığının artması her durum için ikinci kanun verimini arttırmıştır denilebilir.
- 7) Aşırı kızdırma sıcaklığı ORC verimliliğini azalttığı gibi ikinci kanun verimini de azaltmıştır. Sistemin termodinamik verimliliğinin yüksek olması için aşırı kızdırma değerinin olabilecek en düşük noktada olması gereklidir. Bölüm 3’de yapılan analizlerde olduğu gibi, yapılan test ve test analizi çalışmalarında da aşırı kızdırma sıcaklığının ORC verimini ve ikinci kanun verimini azalttığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında komple bir ORC sisteminin termodinamik analizi yapılmıştır. Önemli çevrim parametrelerine göre analizler tekrar edilmiş ve parametrelerin etkileri ortaya konmuştur. Termodinamik analizleri yapılan ORC için tüm sistem elemanları özellikle hazır raf ürünleri seçilerek sistem tasarımı yapılmıştır. ORC sistemi prototipi imal edilmiş ve testleri gerçekleştirilmiştir. Böylece, dünyada ve ülkemizde özellikle atık ısı ve yenilenebilir enerji gibi düşük ısı kaynaklarının değerlendirilmesi için önemi giderek artan ORC sistemleri hakkında analizden tasarıma bilgi edinimi yanında prototipleme ve test tecrübesi elde

edilmiştir. Çalışmanın devamında ticari bir ORC sisteminin piyasaya sunulması hedeflenmektedir.





## KAYNAKLAR

- [1] Li Y., “Analysis of Low Temperature Organic Rankine Cycles for Solar Applications”, M.Sc. Thesis, Lehigh University, ABD, 2013.
- [2] Anonim, <http://www.kcorc.org/en/literature>, 2016.
- [3] Wang X. D., Zhao L., Wang J. L., Zhang W. Z., Zhao X. Z., and Wu W., “Performance Evaluation of a Low-temperature Solar Rankine Cycle System Utilizing R245fa”, *Solar Energy*, v. 84, 353-364, 2010.
- [4] Qiu G., Shao Y., Li J., Liu H., and Riffat B. S., “Experimental Investigation of a Biomass-Fired ORC-Based Micro-CHP for Domestic Applications”, *Fuel*, v. 96, 374-382, 2012.
- [5] Tian H., Shu G., Wei H., Liang X., and Liu L., “Fluids and Parameters Optimization for the Organic Rankine Cycles (ORCs) Used in Exhaust Heat Recovery of Internal Combustion Engine (ICE)”, *Energy*, v. 47, 125-136, 2012.
- [6] Chen H., Goswami D. Y., and Stefanakos E. K., “A Review of Thermodynamic Cycles and Working Fluids for the Conversion of Low-Grade Heat”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, 3059-3067, 2010.
- [7] Saleh B., Koglbauer G., Wnedland M., and Fischer J., “Working Fluids for Low-Temperature Organic Rankine Cycles”, *Energy*, v. 32, 1210-1221, 2007.
- [8] Mago P. J., Charma L. M., and Somayaji C., “Performance Analysis of Different Working Fluids for Use in Organic Rankine Cycles”, *Journal of Power and Energy*, v. 221(3), 255-263, 2007.
- [9] Liu B., Chien K. H., and Wang C. C., “Effect of Working Fluids on Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery”, *Energy*, v. 29, 1207-1217, 2004.
- [10] Mago P. J., Chamra L. M., Srinivasan K., and Somayaji C., “An Examination of Regenerative Organic Rankine Cycles Using Dry Fluids”, *Applied Thermal Engineering*, v. 28, 998-1007, 2008.
- [11] Aghahosseini S., and Dincer I., “Comparative Performance Analysis of Low-Temperature Organic Rankine Cycle (ORC) Using Pure and Zeotropic Working Fluids”, *Applied Thermal Engineering*, v. 54, 35-42, 2013.
- [12] Dai Y., Wang J., and Gao L., “Parametric Optimization and Comparative Study of Organic Rankine Cycle (ORC) for Low Grade Waste Heat Recovery”, *Energy Conversion and Management*, v. 50, 576-582, 2009.

- [13] Chen Q., Xu J., and Chen H., “A New Design Method for Organic Rankine Cycles with Constraint of Inlet and Outlet Heat Carrier Fluid Temperatures Coupling with the Heat Source”, *Applied Energy*, v. 98, 562-573, 2012.
- [14] Hung T. C., Shai T. Y., and Wang S. K., “A Review of Organic Rankine Cycles (ORCs) for the Recovery of Low-grade Waste Heat”, *Energy*, v. 22, 661-667, 1997.
- [15] Roy J. P., Mishra M. K., and Misra A., “Parametric Optimization and Performance Analysis of a Waste Heat Recovery System Using Organic Rankine Cycle”, *Energy*, v. 35, 5049-5062, 2010.
- [16] Declaye S., Quoilin S., Guillaume L., and Lemort V., “Experimental Study on an Open-Drive Scroll Expander Integrated into an ORC (Organic Rankine Cycle) System With R245fa as Working Fluid”, *Energy*, v. 55, 173-183, 2013.
- [17] Bracco R., Clemente S., Micheli D., and Reini M., “Experimental Tests and Modelization of a Domestic-Scale ORC (Organic Rankine Cycle)”, *Energy*, v. 58, 107-116, 2013.
- [18] Yun E., Kim H. D., Yoon S. Y., and Kim K. C., “Development and Characterization of Small-Scale ORC System Using Scroll Expander”, *Applied Mechanics and Materials*, v. 291-294, 1627-1630, 2013.
- [19] Tarique M. A., Dincer I., and Zamfirescu C., “Development and Characterization of Small-scale ORC System Using Scroll Expander”, *International Journal of Energy Research*, v. 38, 1825-1834, 2014.
- [20] Mathias J. A., Johnston J. R., Cao J., Priedeman D. K., and Christensen R. N., “Experimental Testing of Gerotor and Scroll Expanders Used in, and Energetic and Exergetic Modeling of, an Organic Rankine Cycle”, *Journal of Energy Resources Technology*, v. 131, 2009.
- [21] Lemort V., Declaye S., and Quoilin S., “Experimental Characterization of a Hermetic Scroll Expander for Use in a Micro-Scale Rankine Cycle” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, v. 226, 126-136, 2012.
- [22] Li T., Zhu J., Fu W., and Hu K., “Experimental Comparison of R245fa and R245fa/R601a for Organic Rankine Cycle Using Scroll Expander”, *International Journal of Energy Research*, v. 39, 202-2014, 2014.

- [23] Quoilin S., “Experimental Study and Modeling of a Low Temperature Rankine Cycle for Small Scale Cogeneration”, M.Sc. Thesis, University of Liege, Belgium, 2007.
- [24] Günaydın I., Doğu Y., Erişen A. ve İleri T., “Organik Rankine Çevrimi (ORC) Tasarım Uygulaması” ICCI 20. Uluslararası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı, Nisan 2014, Bakırköy-İstanbul, s. 93-97, 2014.
- [25] Anonim, [https://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_warming\\_potential](https://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming_potential), 2016.
- [26] Anonim, <http://www.enggcyclopedia.com/2012/03/scroll-compressors>, 2016.
- [27] Çengel Y. A. ve Boles M. A., “Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla”. İzmir Güven Kitapevi, İzmir,2008.
- [28] Anonim, [http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_-2014.150.01.0195.01.ENG](http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_-2014.150.01.0195.01.ENG), 2016

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İbrahim GÜNAYDIN

Doğum Tarihi : 1989

Yabancı Dil : İngilizce

### Eğitim Durumu:

Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2012

Yüksek Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı, 2016

Araştırma Alanları : Organik Rankine Çevrimi (ORC), HAD analizi, Turbomakina Tasarımı, Radyal Dış Akışlı Türbin Tasarımı, Yenilenebilir Enerji.

Beceriler : Ansys (Fluent, CFX), FlowVision, Cycle-Tempo, AutoCAD, SolidWorks, MS Office.

### İş Tecrübesi:

- TechnoVision Mühendislik (2012-2014)
- MAKİM A.Ş. (2015- halen)

Projeler : “Organik Rankine Cycle Yöntemiyle Atık Isı Kaynaklarını Kullanarak 10 kW'lık Elektrik Üretim Sistemi Prototipinin Geliştirilmesi Ar-Ge Projesi”

### Yayınları :

Günaydın I., Doğu Y., Erişen A. ve İleri T., “Organik Rankine Çevrimi (ORC) Tasarım Uygulaması” ICCI 20. Uluslararası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı, Nisan 2014, Bakırköy-İstanbul, s. 93-97, 2014.