

**ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNDE GAZ  
KARIŞIMLARININ DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ**

**2017  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

**MEHMET KALE**

**ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNDE GAZ KARIŞIMLARININ DENEYSEL  
OLARAK İNCELENMESİ**

**Mehmet KALE**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

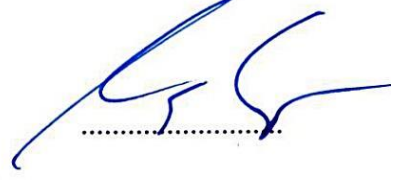
**KARABÜK**

**Haziran 2017**

Mehmet KALE tarafından hazırlanan “ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNDE GAZ KARIŞIMLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Alper ERGÜN

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 15/06/2017

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası


Başkan : Yrd. Doç. Dr. Engin ÖZBAŞ (OMÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Alper ERGÜN (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Bahadır ACAR (KBÜ)



06/07/2017

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü





*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Mehmet KALE

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNDE GAZ KARIŞIMLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Mehmet KALE**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı**

**Yrd. Doç. Dr. Alper ERGÜN**

**Haziran 2017, 39 Sayfa**

Ülkemizde 90°C ile 125°C arasında olup da büyük kapasitede elektrik üretimine uygun olmayan bir çok kuyu veya saha olduğu bilinmektedir. Bu şekilde atıl durumda kalan veya sadece ısıtma amaçlı olarak kullanılabilen bu kaynakların Organik Rankine Çevrimi kullanılarak elektrik üretim sistemine dolayısıyla ekonomiye kazandırılması gerekmektedir. Bu çalışmamızda, ORÇ prensibine göre çalışan bir sistemin tasarımı ve imalatı yapılarak güç üretimi elde edilmeye çalışılmıştır. Sistemde R134a, R134a-propan karışımı, R22, R22-propan karışımı, R22 ve mix (bütan, isobütan, propylene,) akışkanlarını kullanarak deneysel çalışma yapılmış sistemin performansı ve verim analizleri elde edilmiştir. R22-mix karışım akışkanının verimi kullanılan diğer akışkanlardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. R22-propan karışım akışkanı ile yapılan deneyde daha yüksek net iş elde edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Organik rankine çevrimi, gaz karışımı.

**Bilim Kodu** : 928.1.233



## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF GAS MIXTURES IN ORGANIC RANKINE CYCLE**

**Mehmet KALE**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Energy Systems Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. Alper ERGÜN**

**June 2017, 39 pages**

It is known that in our country between 90 °C and 125 °C, there are many wells or fields that are not suitable for electricity generation at large capacity. In this way, those resources that are in the idle state or can only be used for heating purposes need to be incorporated into the electricity generation system using the Organic Rankine Cycle. In this study, a system working according to the ORC principle was designed and manufactured to obtain power production. Performance and efficiency analyzes of the system have been carried out using the R134a, R134a-propane mixture, R22, R22-propane mixture, R22 and mix (butane, isobutane, propylene) fluids in the system. The efficiency of R22-mix fluid was be higher than the other fluids. Also higher net work was obtained with R22-propane mixtures.

**Key Word** : Organic rankine cycle, gas mixture.

**Science Code** : 928.1.233

## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, yürütülmesinde yardım ve desteklerini eksik etmeyen kıymetli tez danışmanım Yrd. Do. Dr. Alper ERGÜN hocama ve aileme destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yapılan bu tez çalıőmasına KBÜ-BAP-16/2-YL-096 proje numarası ile verdiği destekten dolayı Karabük Üniversitesi Bilimsel Araőtırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürü bir borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
LİTERATÜR TARAMASI.....	3
BÖLÜM 3 .....	7
ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ .....	7
3.1. İDEAL RANKİNE ÇEVİRİMİ .....	9
3.2. BASİT ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ .....	10
3.3. REJENERATİF ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ.....	11
3.4. SÜPERKRİTİK ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ.....	12
3.5. REKÜPERATİF ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ.....	13
3.6. ORÇ SİSTEMLERİNİN UYGULAMA ALANLARI.....	14
3.6.1. İkili Jeotermal Güç Sistemleri .....	14
3.6.2. Atık Isı Geri Kazanımlı ORÇ Sistemleri .....	15
3.6.3. Güneş Enerjili ORÇ Sistemleri.....	16
3.7. ORÇ SİSTEMLERİNİN AVANTAJLARI.....	17

3.8. ORÇ SİSTEMLER İÇİN ÇALIŞMA AKIŞKANININ SEÇİLMESİ.....	18
BÖLÜM 4 .....	21
MATERYAL METOD .....	21
4.1. KULLANILAN EKİPMANLAR.....	22
4.1.1. Ana Elemanlar .....	22
4.1.2. Bağlantı Ekipmanları .....	25
4.1.3. Ölçüm Elemanları .....	27
4.2. KULLANILAN ORGANİK AKIŞKANLAR.....	27
BÖLÜM 5 .....	29
TERMODİNAMİK ANALİZ .....	29
BÖLÜM 6 .....	31
DENEY SONUÇLARI .....	31
BÖLÜM 7 .....	36
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	36
KAYNAKLAR .....	37
ÖZGEÇMİŞ .....	39

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) tesisat şeması .....	8
Şekil 3.2. ORÇ basınç entalpi (p-h) diyagramı .....	8
Şekil 3.3. İdeal Rankine Güç Çevrimi ve T-S diyagramı .....	10
Şekil 3.4. Basit ORÇ sistemi ve T-S diyagramı .....	11
Şekil 3.5. Rejeneratif ORÇ sistem şeması ve T-S diyagramı .....	12
Şekil 3.6. Süperkritik Organik Rankine T-S diyagramı .....	12
Şekil 3.7. Reküperatif ORÇ sistem şeması ve T-S diyagramı .....	13
Şekil 3.8. İkili jeotermal elektrik santrali .....	14
Şekil 3.9. Termal yağ kullanılan atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemi .....	15
Şekil 3.10. Doğrudan ısı değiştiricili atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemleri .....	16
Şekil 3.11. Parabolik güneş kolektörlü ORÇ sistemleri .....	17
Şekil 3.12. Bazı akışkanlara ait T-S diyagramı .....	19
Şekil 4.1. Tasarımı yapılan sistemin şematik gösterimi .....	21
Şekil 4.2. Hazırlanan ORÇ deney düzeneğinin 3D gösterimi .....	22
Şekil 4.3. Türbin gösterimi .....	22
Şekil 4.4. Pompa .....	23
Şekil 4.5. Isı değiştiriciler. ....	23
Şekil 4.6. Sirkülasyon pompası .....	24
Şekil 4.7. Elektrik ısıtıcılı kazan .....	24
Şekil 4.8. Sıvı deposu (Receiver) .....	25
Şekil 4.9. Manometre. ....	25
Şekil 4.10. Gözetleme camı. ....	26
Şekil 4.11. Termostat .....	26
Şekil 4.12. Debimetre .....	27
Şekil 4.13. Ölçüm cihazı (Pikolog data logger) .....	27
Şekil 6.1. R134a akışkanı ölçüm grafiği .....	31
Şekil 6.2. R134a-Propan akışkanı ölçüm grafiği .....	32
Şekil 6.3. R22 akışkanı ölçüm grafiği .....	33

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 6.4. R22-Propan karışım akışkanı ölçüm grafiği .....	33
Şekil 6.5. R22-Mix karışım akışkanı ölçüm grafiği.....	34
Şekil 6.6. Akışkanların ortalama verim grafiği.....	35
Şekil 6.7. Akışkanların ortalama Wnet grafiği.....	35



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 4.1. Gaz karışımlarının özellikleri .....	28
Çizelge 6.1. R134a akışkanının Wnet ve verim değerleri.....	31
Çizelge 6.2. R134a-Propan karışım akışkanının Wnet ve verim değerleri .....	32
Çizelge 6.3. R22 akışkanının Wnet ve verim değerleri .....	32
Çizelge 6.4. R22 ve Propan karışım akışkanının Wnet ve verim değerleri .....	33
Çizelge 6.5. R22 ve Mix karışım akışkanının Wnet ve verim değerleri .....	34
Çizelge 6.6. Akışkanların ortalama verim değerleri .....	34
Çizelge 6.7. Akışkanların ortalama Wnet değerleri .....	35

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$q_g$	: Giren ısı miktarı (kW)
$\dot{m}_{su}$	: Suyun kütleli debisi (kg/s)
$\dot{m}_{oa}$	: Organik akışkan debisi (kg/s)
$h$	: Entalpi (kJ/kg)
$\eta_{termal}$	: Ekserji verimi (%)
$\dot{W}_{pompa}$	: Pompa işi (kW)
$\dot{W}_{türbin}$	: Türbin işi (kW)
$\dot{W}_{net}$	: Net iş (kW)
kg	: Kilogram
kW	: Kilowatt
s	: Saniye
$\Delta T$	: Sıcaklık farkı (°C, K)
$C_p$	: Özgül ısı kapasitesi
%	: Yüzde
$\dot{Q}_{giren}$	: Giren ısı miktarı (kW)

### KISALTMALAR

ORÇ : Organik Rankine Çevrim

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Günümüz ülkeleleri için enerji bir ihtiyaç ve güç halini almaktadır. Ülkemiz enerji yönünde dışa bağı bir ülke konumunda olup, enerji ihtiyacının %70'ini dışarıdan karşılamaktadır. Bu durum ülke ekonomisini olumsuz etkilemektedir. Ülkemiz sahip olduğu fosil kaynaklar enerji ihtiyacını karşılayacak seviyede olmayıp, var olan linyit kömürlerimiz de hem düşük kalorili hem de kükürt ve kül içeriği yüksek değerdedir. Günümüzde enerji ihtiyacının %70 'ini ithal kaynaklardan karşılamak durumunda olan ülkemizde, gerekli önlemler alınmazsa enerji konusunda dışa bağımlılık giderek artış gösterecektir. Dünyadaki fosil kökenli yakıt kaynakların azalmasının yanı sıra bunların kullanımı ile meydana gelen çevre kirliliği ve küresel ısınma son zamanlarda enerji üretimi alanındaki çalışmaların yenilenebilir ve temiz enerji üreten kaynaklar üzerine yoğunlaşmasına neden olmuştur. Türkiye'nin coğrafi yapısı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması bakımından avantajlı bir konuma sahiptir [1].

Günümüzde gelişen teknoloji ile beraber farklı yöntemler ile enerji üretmek mümkündür. Bu yöntemlerin büyük bir kısmı termik santrallerde fosil yakıtların yakılıp enerjisinin bir akışkana aktarılarak, elde edilen buharın bir turbine hareket vermesi ile gerçekleşmektedir. Enerji ihtiyacını karşılamada termik santrallerin payı ülkere göre %50 ile %90 arasında değişmektedir. Bu orana bakılarak giderek artan enerji ihtiyacı ve çevre kirliliği ülkeleri alternatif enerji kaynaklarının kullanmaya yöneltmiştir. Alternatif enerji sistemleri ülkelerin enerji ihtiyaçlarını karşılamada yetersiz kalmaktadır. Bu durumda Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) karşımıza yeni bir alternatif olarak çıkmaktadır. ORÇ sistemleri yenilenebilir enerji kaynakları ve atık ısı kaynakları gibi düşük sıcaklıktaki kaynaklarla birleştirilip kullanıldığı zaman elektrik üretimi gerçekleşmektedir. Bu durum aynı zamanda elektrik üretimine

yardımcı olduğu kadar fosil yakıt kullanımını azaltarak çevre kirliliğinin öüne geçmektedir.

ORÇ’li santraller düşük ve orta sıcaklıklı ısının elektriğe dönüştürülmesi açısından umut vadeden sistemlerdir. ORÇ sistemi ‘‘Clausius Rankine’’ güç santralleri gibi çalışır fakat su yerine organik akışkana kullanılır [2]. Kaynama noktası düşük olmasından dolayı ORÇ’deki kritik nokta basınç ve sıcaklık değerleri Clausius-Rankine’e göre daha düşüktür. Sistemin düşük ısı kaynaklarında çalışması, bu kaynakların ısını kullanmayı avantaj haline getirmiştir. Ancak Clausius Rankine Çevrimine göre sistemin verimi oldukça düşüktür [3].

Clausius Rankine çevrimi, ısı enerjisinin işe çeviren termodinamik bir döngü olup bu çevrimde iş yapan akışkanı olarak devamlı su kullanılmaktadır. Rankine çevriminde geleneksel akışkan olan su orta ve büyük güç santrallerinde elektrik enerjisi üretmek için tercih edilmektedir. İş yapan akışkana olan su; güvenli, çevreci ve yüksek ısı transferi özelliklerinden dolayı tercih edilir. Son zamanlarda Rankine çevriminde su yerine, sudan daha yüksek moleküler kütlesi olan hidrokarbon bileşenli organik akışkanlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu akışkanların kullanılması ile bu sistemler ORÇ adını almıştır [3].

Bu çalışmamızda düşük sıcaklıklarda ORÇ prensibine göre çalışan sistem tasarımı yapılmış ve güç üretimi elde etmeye çalışılmıştır. Sistemde R-134a, R-134a-propan karışımı, R22, R22-propan karışımı, bütan, isobütan, propylene karışımı akışkanlar kullanılarak deney çalışması ve verim analizleri yapılmıştır. Yapılan bu çalışma enerji üretiminin oldukça önemli olduğu günümüzde sıkça kullanılan ORÇ santralleri için yeni ve çevre dostu akışkan elde etmeyi hedeflemektedir.



## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR TARAMASI

Cihan, yaptığı tez çalışmasında, atık ısı kaynaklı çalışan ORÇ ile klasik buhar sıkıştırılmalı soğutma çevriminin birleştirildiği bir sistem tasarlamış ve termodinamik analizlerini incelemiştir. Tasarladığı sistemde, aynı anda hem soğutma işlemi yapan hem de güç üretebilen akışkana olarak, R600, R600a ve R601 kuru tip organik akışkanlarını kullanmıştır. Kullanmış olduğu bu organik akışkanlara göre; sistemin güç çevrimini, soğutma çevrimini ve toplam çevrim verimlerini hesaplamıştır. ORÇ sisteminde yaygın olarak kullanılan R425fa akışkanı ile seçtiği organik akışkanların karşılaştırılmasını yapmıştır. Türbinin basınç oranları ve boyut faktörü dikkate alındığında türbin için en küçük boyut, ağırlığı ve maliyetinden dolayı R600a akışkanı olarak ön plana çıkmıştır. Ancak tüm bulgular değerlendirildiğinde sistem performansı açısından R601 ideal akışkanı olarak tespit etmiştir [4].

Acar, yaptığı tez çalışmasında; birçok sanayi tesisinde mevcut olan düşük sıcaklıktaki atık ısıların geri kazanımında ve yenilenebilir enerji kaynaklı güç santrallerinde kullanıldığında, çevre kirliliği yaratmadan ekonomik bir şekilde elektrik üretilmesini sağlayan ve enerji dönüştürme teknolojileri arasında gelişiminde önemli bir potansiyeli olan ORÇ'nin, bir yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali için dizaynı ve modellemesini yapmıştır [5].

Özdemir, yaptığı tez çalışmasında parabolik kollektörlü ORÇ sistemini ısparta ilinde incelemiştir. 6 metre uzunluğunda 1.72 m uzunluğundaki parabolik kolektörün yoğunluğunu 54,77 bulmuş ve bu değere bağlı olarak parabolik kolektörün ekserji verimini %23 olarak hesaplamıştır. Bulunan bu değerlere göre ORÇ dizaynı yapmış ve güneşten gelen radyasyon yoğunlaştırma oranı ile çarparak % 20 kayıp ile kazana aktarılan yaklaşık enerji miktarını hesaplamıştır [6].

Özden ve Paul ORÇ teknolojisinden faydalanılarak elektrik üretimi konusunda Sarayköy jeotermal santrali için örnek bir çalışma yapmışlardır. Ülkemizde 90 ile 125°C arasında atıl durumda kalan veya sadece ısıtma amaçlı olarak kullanılabilen bu kaynakların ORÇ kullanılarak elektrik üretim sistemine dolayısıyla ekonomiye kazandırılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu bildiri de ORÇ kullanılarak yapılmakta olan örnek çalışmadan bahsedilmektedir [7].

Bamgbopa, yapmış olduğu çalışmada R245fa akışkanının performans analizini incelemiştir. Çalışmalarındaki amaç, sayısal yöntem kullanarak Güneş enerjisi ile elektrik üretebilen ORÇ sisteminin analizini yapmaktır. Bunun için; akışkanının özelliklerinin hesaplanması ve sistemin alt bileşenlerinin (pompa, buharlaştırıcı, genişletici ve kondenser) ayrı ayrı modellenmesini öngörmüşlerdir. Isı girişinin kararlı (Güneş enerjisi kazan ile birlikte kullanıldığında) veya değişken (yalnız Güneş Enerjisi) olması durumu göz önüne alınarak, sistemin kararlı ve zamana bağlı durumları için iki ayrı yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemlerde (kararlı veya geçici), ısı değiştiricilerin temel alınması tespit edilmiştir. ORÇ'ye giren ısı kaynağı, kütleli debisi 2-12 kg/s aralığında ve sıcaklığı 80-95 °C aralığında değişen güneş enerjisi ve ısıtılmış su ile sağlandığını tespit etmişlerdir. Geliştirilen yöntemler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu bu durum için en fazla 40 kW'lık elektrik elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Sistemin geçici durumdan kararlı hale geçebilmesi için ORÇ sistemindeki akışkan debisi, sıcak su döngüsünün debisi ve sıcak su sirkülasyon debisi ve sıcak suyun buharlaştırıcıya giriş sıcaklığının önemli olduğunu belirterek, bu değişkenlerin kontrolü ile sistemi optimize etmişlerdir [8].

Yousefzadeh, yaptığı çalışmada kendi kendini düzenleyebilen bir ORÇ için yeni bir kontrol sistemi oluşturmayı hedeflemiştir. Bunun için geniş kapsamlı bir sayısal yöntem geliştirilmiş ve bu yöntem sistemin kütle ve enerji korunumu ilkeleri doğrultusunda doğrulanmış ve literatürde bulunan deneysel çalışmalar ile karşılaştırarak onaylamıştır. Geliştirilen yöntemin esas özelliği, sistem bileşenlerinde bulunan akışkanın kütle dağılımına göre sistem basınç seviyelerini hassas bir şekilde tahmin edebilmesidir. Özellikle, belirli bir miktarda akışkan yüklenebilen bir sıvı toplama deposu yönteme dahil edilmiş ve depo, kütle dağılımının ve basıncının zamana bağlı değişimlerini yakalamak için kondenserin bir parçası olarak kabul

edilmiştir. Yöntem üzerinden gerçekleştirilen simülasyonlar, depoda toplanan sıvı miktarı ile depodaki soğuma miktarının deponun durumu ve hatta tüm sistemi temsil ettiğini göstermiştir. Bu ikisini birleştiren bir tank parametresi oluşturulmuş ve bu parametre ara değişken olarak kullanarak evaporatör çıkışındaki ısıtma derecesini izleyen kademeli bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrol sistemi, genişleticinin dönme hızını ayarlayarak kondenserin girişindeki ısınma seviyesini düzenlemeyi amaçlamaktadır. Buna ek olarak, kontrol sistemi kullanarak simüle edilen ORÇ sistemi literatür ile karşılaştırıldığında, %15'e varan seviyelerde daha fazla güç üretebildiğini göstermişlerdir [9].

Pelit, yaptığı çalışmada biyokütle kaynaklı ORÇ sisteminin termodinamik ve termoeconomik analizini incelemiş, aynı zamanda biyokütle kaynaklarından ve ORÇ sistemlerinden teorik olarak bahsetmiştir. ORÇ' nin ihtiyacı olan biyokütle kaynaklı termal ısı, kazanlardaki biyokütlenin yakılmasıyla elde edilen kızgın yağdan sağlanmaktadır. Biyokütle kaynaklı ORÇ sistemi mekan ısıtması, sıcak su ve elektrik üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Net elektrik üretimi 891,76 kW olan ORÇ sisteminin 24 saat çalıştığı düşünüldüğünde yıllık ortalama 7.811.818 kW elektrik üretimi yapılabilmektedir. SPECO metoduna göre yapılan termoeconomik analiz sonucunda üretilen elektriğin birim maliyeti 5,671 \$/GJ olarak hesaplanmıştır [10].

Roy vd., yaptıkları tez çalışmasında, enerji üretimi için ORÇ'ye dayalı atık ısı geri kazanım sisteminin parametrik optimizasyon ve performans analizlerini R-12, R-123 ve R-134a organik akışkanlarını kullanarak incelemişlerdir. Seçilen sıvılar için türbin giriş basıncını, verimlilik optimizasyonu sisteminin doymuş boru hattı boyunca ve izobarik farklı basınçlarda aşırı ısıtma ile yapmışlardır. Seçilen akışkanlar arasında maksimum iş çıkışı ve verimini R-123 akışkanı göstermiştir. Bu nedenle düşük dereceli ısı kaynaklarında iş akışkanı olarak R-123 kullanılması ORÇ' de enerji üretimi için iyi bir seçenek olarak saptanmıştır [11].

Sun ve Li, çalışmalarında R-134a akışkanını kullanan bir ORÇ ısı geri kazanım santralini detaylı olarak incelemişlerdir. Santralin performansını değerlendirmek ve optimize için evaporatöre, genişletici, hava soğutmalı kondenser ve pompa için matematik modeller geliştirmişlerdir. Optimizasyon sonuçları kontrolsüz değişkenler

(ısı kaynağı sıcaklığı ve ortam kuru termometre sıcaklığı) arasında net güç üretimi için lineer bir fonksiyon, ısı verim için ikinci dereceden bir fonksiyon ilişkisine değinmişlerdir. Termal verim ve net güç üretiminde iş akışkanı debisinin, kondenser fanı hava debisinden daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir [12].

Eyidoğan vd. biyokütle kaynaklı bir ORÇ sisteminin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Gerçek sistem verilerini kullanarak yaptıkları çalışmada, ORÇ ünitesinin kaynak sıcaklığı olarak biyokütle esaslı sıcak yağ kazanı kullanmışlardır. ORÇ sisteminin temel ekipmanları olan evaporatör, kondenser, türbin ve kondanserde iki farklı çalışma koşuluna göre enerji ve ekserji analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, birinci çalışma koşuluna göre, enerji verimini %12,59 ekserji verimini ise %33,26 ikinci test çalışma koşuluna göre ise enerji verimini %13,22 ekserji verimini %35,5 ve üçüncü test çalışmasında ORÇ ünitesinin enerji verimi %12,91 ekserji verimi %33,8 olarak bulmuşlardır. Ekserji yıkımının sistem ekipmanları içerisindeki dağılımı ise büyükten küçüğe doğru, evaporatör, kondenser, türbin, rejeneratör ve pompa olarak belirlenmiştir [13].

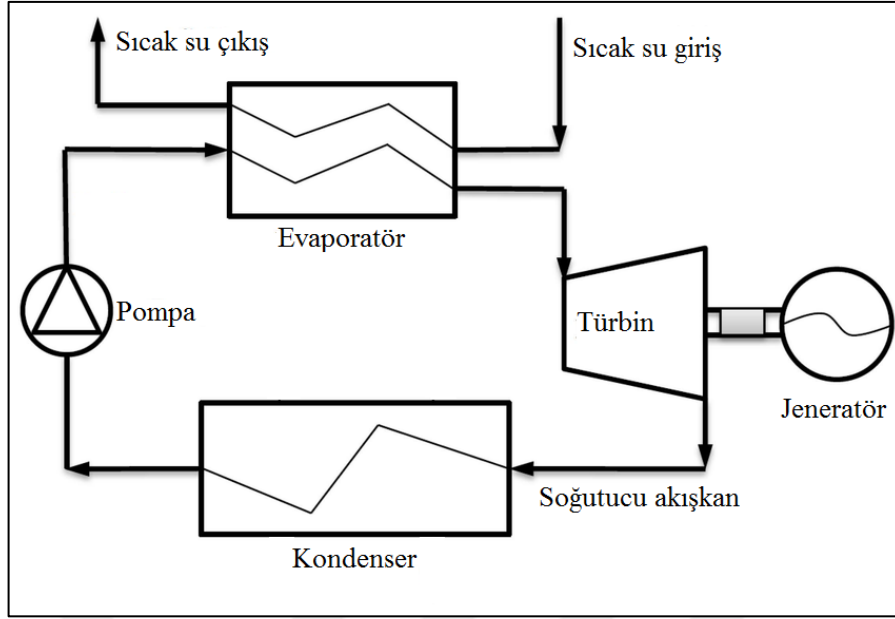
Yılmaz vd., yaptıkları çalışmada güneş çanaklı ORÇ'nin enerji ve ekserji analizlerini R410a akışkanı kullanarak incelemişlerdir. Zararlı çevresel etkilerin olmaması ve literatürde çok fazla çalışma bulunmamasından dolayı R410a akışkanı seçilmiştir. Hesaplamalar Isparta'nın güneş enerjisi verilerine göre yapılmıştır. Türbin giriş basıncının ve kazan sıcaklığının artması sistemin ısı verimini ve ekserji verimini arttırmıştır. Çevrimin ısı verimi %10, ekserjetik verimi ise %70 olarak hesaplanmıştır [14].

## BÖLÜM 3

### ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ

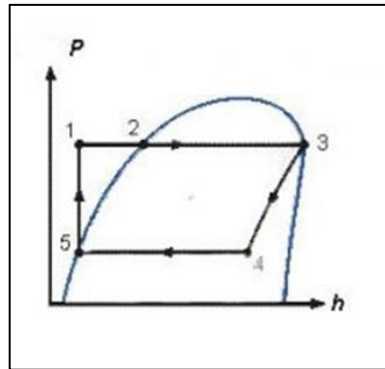
Düşük sıcaklıklı kaynaklardan enerji elde etmenin önemi son yıllarda giderek artmaktadır. Bu sorun için bir çok öneri ortaya atılmış ve bu öneriler arasında ORÇ güçlü bir alternatif olarak farklı uygulamalarda yerini almıştır. Sistemin en büyük avantajları ise basit oluşu ve kolay bulunan ekipmanlarıdır. ORÇ küçük ölçekli enerji üretimi için düşük sıcaklıklarda çalışmaktadır. Aynı zamanda fosil kökenli yakıtların tüketimini azalttığı için, çevre dostu bir sistemdir.

Isıdan elektrik enerjisi üretme amacı için kullanılan ORÇ teknolojisi buharlaştırıcıdaki organik çalışma sıvısını buharlaştırmak için sıcak kaynaktaki ısıyı kullanır. Bu kaynaktan gelen ısı buharlaştırıcıda akışkana ısını transfer eder ve buhar haline gelir. Seçilen çalışma sıvısı; silikon bazlı sıvılar yada düşük sıcaklıklar için hidrokarbon soğutucu olarak kullanılabilir. Basınçlı buhar daha sonra türbine gönderilir, jeneratör ile birleştiği zaman elektrik üretir. Yüksek basınç ve sıcaklıkta türbine gelen akışkan türbinde genişleyerek basınç ve sıcaklığı düşer. Basınç ve sıcaklığı düşen akışkan yoğuşturucuya gelir. Buhar, yoğuşturucu içinde tekrar sıvı hale yoğunlaştırılır. Yoğuşturucudan pompaya düşük basınçta gelen akışkanda tekrar sıvı pompası ile buharlaştırıcıya basılır ve sistemin çalışması bu şekilde devam eder. Sıcak ısı kaynağı olarak kullanıldığı için yakıt maliyeti oranı düşüktür. Herhangi bir yanma prosesi gerçekleşmediğinden, ORÇ enerji sisteminde atmosfer ortamına zararlı emisyon salınımı oluşmaz. ORÇ sistem şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) tesisat şeması.

ORÇ beş ana bileşenden meydana gelir; evaporatör (buharlaştırıcı) pompa, türbin, kondanser ve çalışma akışkanı. Kondanser ve evaporatör ısı değiştiricisidir. Yoğuşturucu ısıyı çevrimden atarken evaporatör ısıyı çevrime absorbe eder. Pompa çevrim içerisindeki akışkanı basınçlandırarak evaporatöre yollar. Evaporatör de sıcak kaynaktan gelen akışkan ısını çalışma akışkanına aktarır. Sıcaklığı artan aracı akışkan buhar veya kızgın buhar fazına geçer. Buhar güç üretmek için türbin kısmına gelir. Türbinde genişleyen buharın basınç ve sıcaklığı düşer, kondansere gelir. Burada da tekrar sıvı fazına geçen akışkan pompaya gelir. Çevrim bu şekilde tekrarlayarak sürekli devam eder. Şekil 3.2’de ORÇ sisteminin basınç ve entalpi (p-h) diyagramı verilmiştir [16].



Şekil 3.2. ORÇ basınç entalpi (p-h) diyagramı.

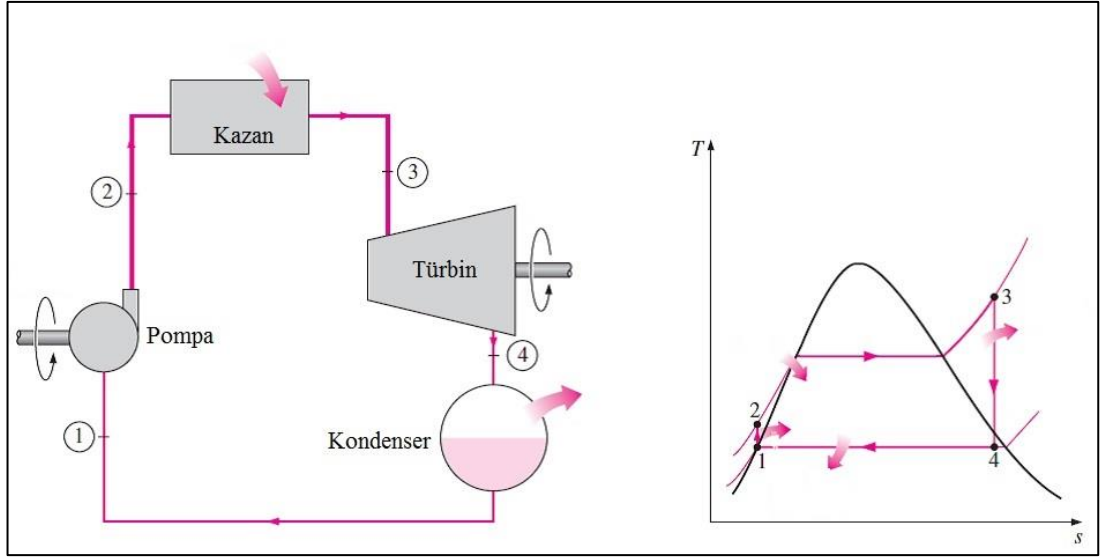
ORÇ sistemlerde çalışma koşullarına bağlı akışkanlar farklılık gösterebilir. Kullanılan organik akışkana ait özellikler aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir.

- Düşük kaynama ve donma noktası.
- Yüksek kritik sıcaklığı.
- Yüksek buharlaşma sıcaklığı.
- Yüksek yoğunluk.
- Düşük çevre kirliliği.
- Güvenlik.

ORÇ sistemi ideal rankine çevrimine oldukça benzerdir.

### 3.1. İDEAL RANKİNE ÇEVİRİMİ

Rankine çevriminde ısı işe dönüştürülür. Basit buharlı güç santrali kazan, pompa, türbin ve yoğuşturucudan oluşmaktadır. Basit buharlı güç santrallerinde akışkan olarak su kullanılmaktadır. Su basıncı pompa yardımıyla artırılır ve basıncı artan su kazana gönderilir. Kömür, doğalgaz vb fosil yakıtlar buhar kazanlarında yakılır. Bunların yanması sonucunda oluşan ısı enerjisi kazandaki borularda dolaşan suya gönderilir ve böylece su kızgın buhar haline dönüşür. Kazanda meydana gelen yüksek basınçlı kızgın buhar türbine aktarılır. Yüksek basınçlı kızgın buharın, türbininin kanatlarına çarpmasıyla mekanik enerji elde edilir. Türbinin mekanik hareketiyle buhar türbinin miline bağlı olan jeneratörden elektrik üretimi gerçekleşir. Düşük basınçta buhar türbininden çıkan buhar kondenserde yoğuşturularak sıcaklığı düşürülür ve tekrar sıvı hale getirilir. Açığa çıkan düşük basınç ve sıcaklıktaki su tekrar pompaya gelir. Suyun pompadan çıkıp tekrar pompaya gelmesi ile çevrim tamamlanmış olur. Bu çevrim dünya genelinde kullanılan tüm elektrik ihtiyacının yaklaşık %90'ını oluşturur. Şekil 3.3'de ideal Rankine çevriminin şekli ve T-s diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.3. İdeal Rankine Güç Çevrimi ve T-S diyagramı.

İdeal Rankine Çevriminde ki 4 hal değişimi vardır.

Bunlar;

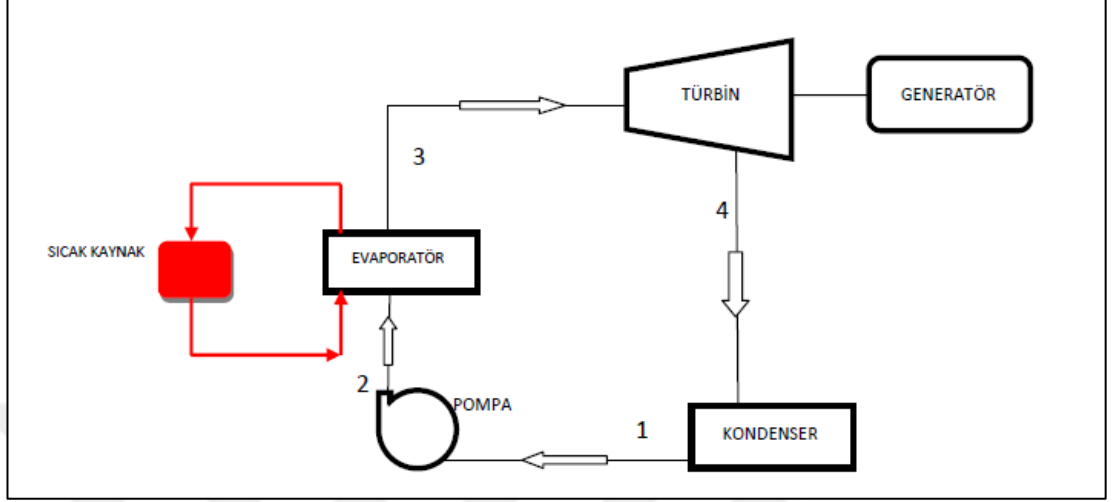
- 1-2 Pompada izantropik sıkıştırma hali,
- 2-3 Kazanda sabit basınçta ısı girişi,
- 3-4 Türbinde izantropik genişleme,
- 4-1 Yoğuşturucuda sabit basınçta ısı atılması [18].

### 3.2. BASİT ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ

Düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarının enerjisini kullanmak günümüzde daha önemlidir. Bu kaynaklar güneş enerjisi, egzoz enerjisi ve jeotermal kaynaklardır. Basit ORÇ 4 ana elemandan meydana gelmektedir. Şekil 3.4’de görüldüğü gibi, evaporatör, türbin, pompa ve kondanserdir. Bu sistemin çalışma prensibi; Evaporatör içerisindeki organik çalışma sıvısını buharlaştırmak için sıcak kaynaktaki ısıyı kullanır. Evaporatör olarak kullanılan eleman bir ısı değiştiricidir. Bu işlem sonrasında akışkan yüksek sıcaklık ve basınca geçmiş olur. Yüksek basınçtaki buhar türbine yollar ve jeneratörle birleştiğinde elektrik üretir. Bu sistemlerde kaynaktan elde edilen ısının verimini arttırmak için buharlaştırıcıdan sonra ön ısıtıcı kullanılır. ORÇ sistemlerinde



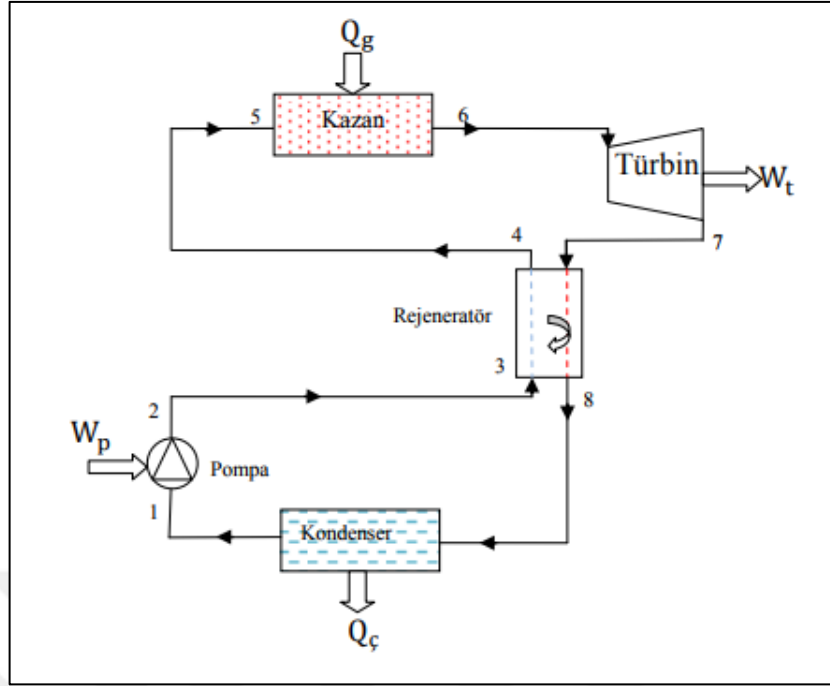
kullanılacak akışkan seçimi hem verim hem de çevresel etki bakımından çok önemlidir [17].



Şekil 3.4. Basit ORÇ sistemi.

### 3.3. REJENERATİF ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ

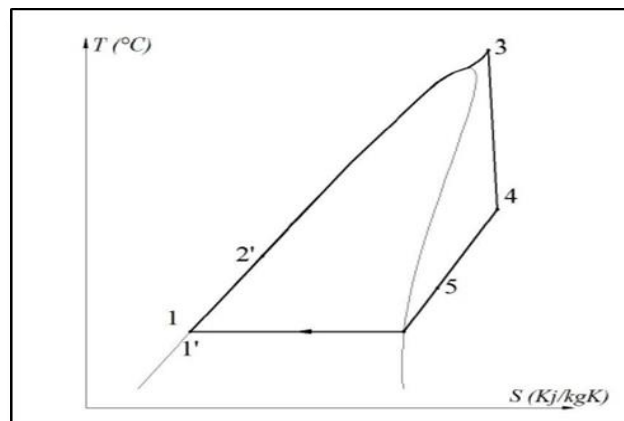
Basit ORÇ sistemlerinden farkı ise bir rejeneratör ve ikinci bir pompa kullanılmasıdır. Birinci pompa ORÇ sisteminin döngüsünü tamamlarken türbindeki genişlemeden dolayı türbinden bir miktar kızgın buhar çekilir ve rejeneratöre gönderilir, bu çevrim esnasında kondenserde yoğuşan organik akışkan ikinci pompa aracılığı ile rejeneratöre gönderilmektedir. Bu esnada türbinden genişleme sırasında çekilen buhar ve yoğuşmuş akışkan arasında ısı transferi olur ve rejenerasyon gerçekleşmiş olmaktadır. Şekil 3.5’de rejeneratif ORÇ sistemi gösterilmiştir [19].



Şekil 3.5. Rejeneratif ORÇ sistem şeması [18].

### 3.4. SÜPERKRİTİK ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ

Bu ORC tasarımında akışkan kritik nokta üzerinde çalışır. Akışkan çevrim boyunca basınçlandırılmadan ilk türbinde genişler, soğur ve yoğuşarak alçak basınç bölgesine gider. Alt kritiktaya ulaşan akışkanın burda basıncı artar ve süperkritik noktasına ulaşır. Bu çevrimde akışkanın ısıtılması esnasında sabit bir basınç olmadığından sabit bir sıcaklıkta yoktur [18]. Şekil 3.6’da süperkritik ORÇ sisteminin T-S diyagramı görülmektedir.



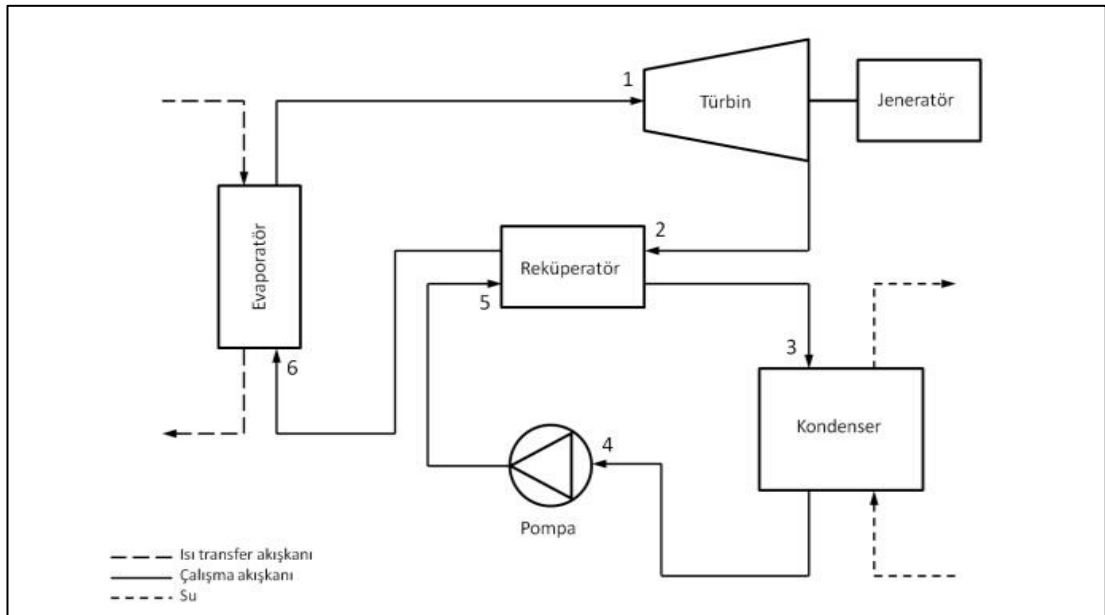
Şekil 3.6 Süperkritik Organik Rankine T-S diyagramı.

ORÇ sistemlerindeki en önemli konulardan bir diğeri ısı kaynağına olan bağlantı kısmının iyi tasarlanmış olmasıdır. Isı kaynağına bağlı olarak uygun ısı değıştiricisi seçilmesi gerekir veya minimum sıcaklık farkı göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır. Çevrimdeki akışkan olarak birkaçı tavsiye edilebilir;

- Isı kaynağı sıcak sıvı ise çalışma sıvısı ile sıcak kaynak arasında plakalı ısı değıştiricisi ilave edilebilir. Alternatif olarak ise borulu tip ısı değıştirici kullanılabilir.
- Isı kaynağı çimento veya metal dökümden gelen baca gazı gibi sıcak bir gaz ise uzun yüzeye sahip ısı değıştiricisi tercih edilebilir [18].

### 3.5. REKÜPERATİF ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ

Şekil 3.7’de görülen bu ORÇ sistemin basit ORÇ sisteminden farklı olarak türbin çıkışında ısı kullanılması ve bu kullanılan ısıyı ön ısıtıcıya girecek olan organik akışkana aktarmak için bir reküperatör kullanılmasıdır. Kullanılan bu reküperatör sistemdeki organik akışkanın kondensere girmeden önceki ısısını atmasını ve ön ısıtıcıya girmeden ek bir ön ısıtma işlemine tabi tutulmasını sağlar ve sistem performansı artırılmış olur [16].



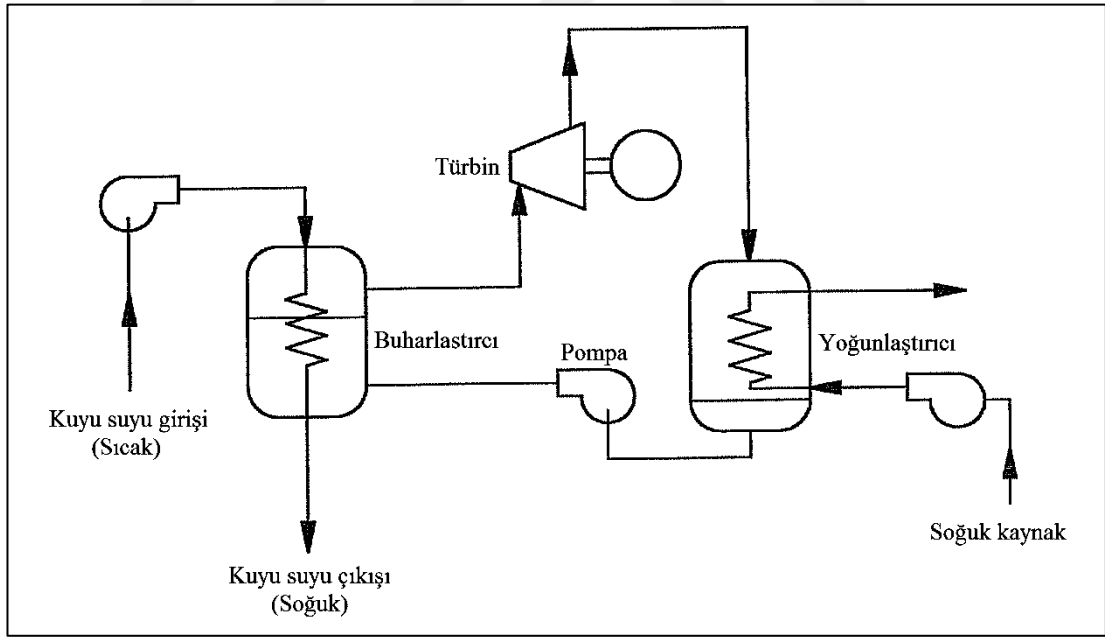
Şekil 3.7. Reküperatif ORÇ sistem şeması [5].

### 3.6. ORÇ SİSTEMLERİNİN UYGULAMA ALANLARI

Literatüre baktığımız zaman ORÇ sisteminin uygulama alanları; atık ısı geri kazanım sistemler, güneş enerjisi ve jeotermal enerji kaynakları, biyokütle kaynakları olarak karşımıza çıkmaktadır.

#### 3.6.1. İkili Jeotermal Güç Sistemleri

Çift çevrimli santrallerde bütün enerji dönüşümü ikincil bir sıvı ile gerçekleştirilir. Genel olarak iki döngüden oluşan ORÇ sistemleri olarak kurulurlar, biri ısıyı ileten jeotermal akışkan, diğeri de ısıyı alıp kullanılabilir enerjiye dönüştüren aracı akışkandır ve kapalı çevrimde bulunmaktadır. ORÇ'nin hareketlendirici akışkanı genelde hidrokarbondur. Bu sistemlerde güç çıkışı onlarca kW ile yüzlerce MW arasında olabilir [16]. Şekil 3.8' de ikili çevrimin basit şekli gösterilmektedir.



Şekil 3.8. İkili jeotermal elektrik santrali.

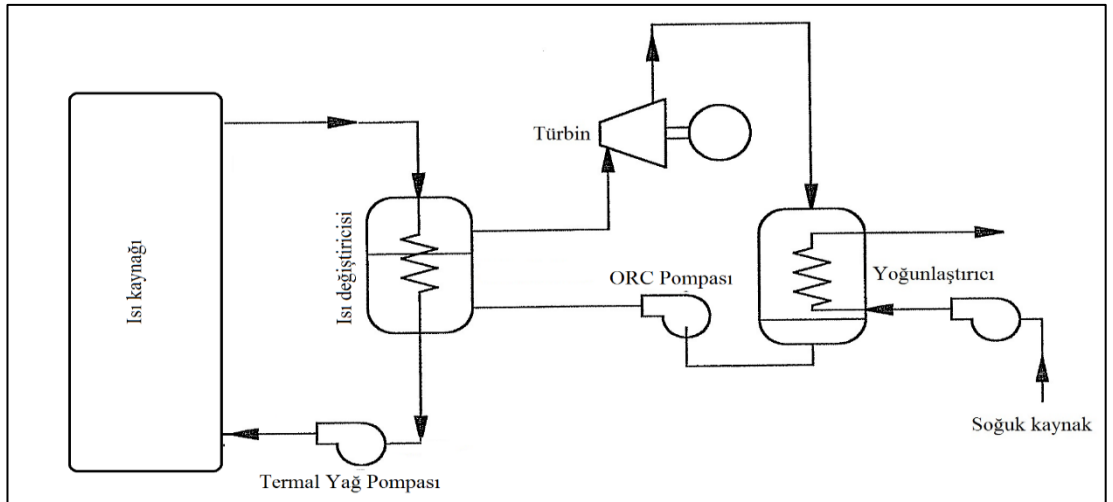
İkili çevrimlerde, üretim kuyusundan gelen jeotermal akışkan, buharlaştırıcı olarak kullanılan ısı değiştiricisine girerek, enerjisini, daha düşük sıcaklıklarda buhar fazına geçebilen organik akışkana aktarır ve buradaki organik akışkanın olduğu çevrim ORÇ

çevrimidir. Bu sistemlere ikili çevrim denmesinin nedeni ise sistemin iki akışkan oluşmasından kaynaklıdır. Jeotermal santrallerde ORÇ sistemi genellikle ikili çevrim olarak adlandırılır. Bu çevrim düşük sıcaklıklardaki jeotermal kaynaklardan elektrik elde etmek için etkili bir yöntemdir [19].

### 3.6.2. Atık Isı Geri Kazanımlı ORÇ Sistemleri

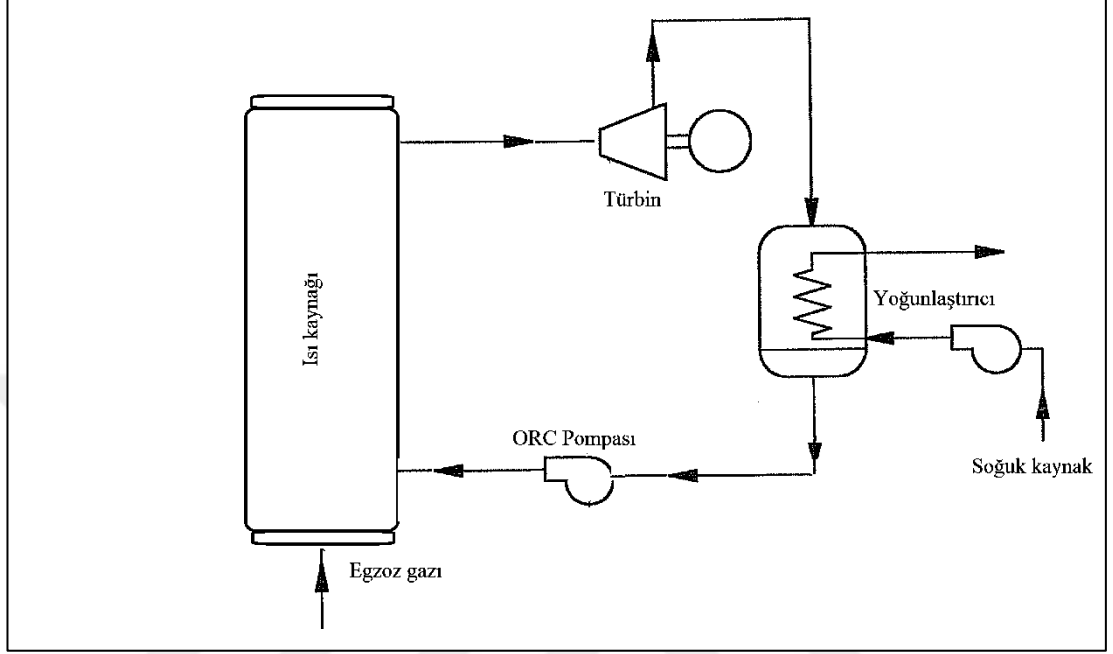
Atık ısı yanması veya benzeri bir kimyasal olay sonucu ortaya çıkan egzoz gazındaki sıcaklıktır. Atık ısının geri kazanılması için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemi olarak görülmektedir. Yanma işlemi sonucunda ortaya çıkan egzoz gazının yeterli sıcaklık ve debide olması sonucu, egzoz gazındaki enerji sistemde kullanılan akışkana aktarılarak bu sistemler kurulmaktadır. Egzoz gazlarının ORÇ sisteminde kullanılması boşa giden büyük bir enerji kaynağının değerlendirilmesini sağlar ve bu gazların meydana getirdiği çevresel problemlerinde azaltılmasına olanak sağlamaktadır.

Mevcut kaynaktaki enerjiyi iki farklı yolla değerlendirmek mümkündür. Bunlardan ilki, egzoz ısının önce termal yağa aktarılması, ardından yağdaki enerjinin ısı değiştiricisi aracılığı ile organik akışkana iletilmesi ile gerçekleşir. Şekil 3.9’de bu sistem görülmektedir [16,19].



Şekil 3.9. Termal yağ kullanılan atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemi.

Atık ısının değerlendirilmesinde kullanılan ikinci yol ise, egzoz ısısının doğrudan bir ısı değiştiricisine gönderilmesi ile sağlanır. Şekil 3.10’da bu görölmektedir.



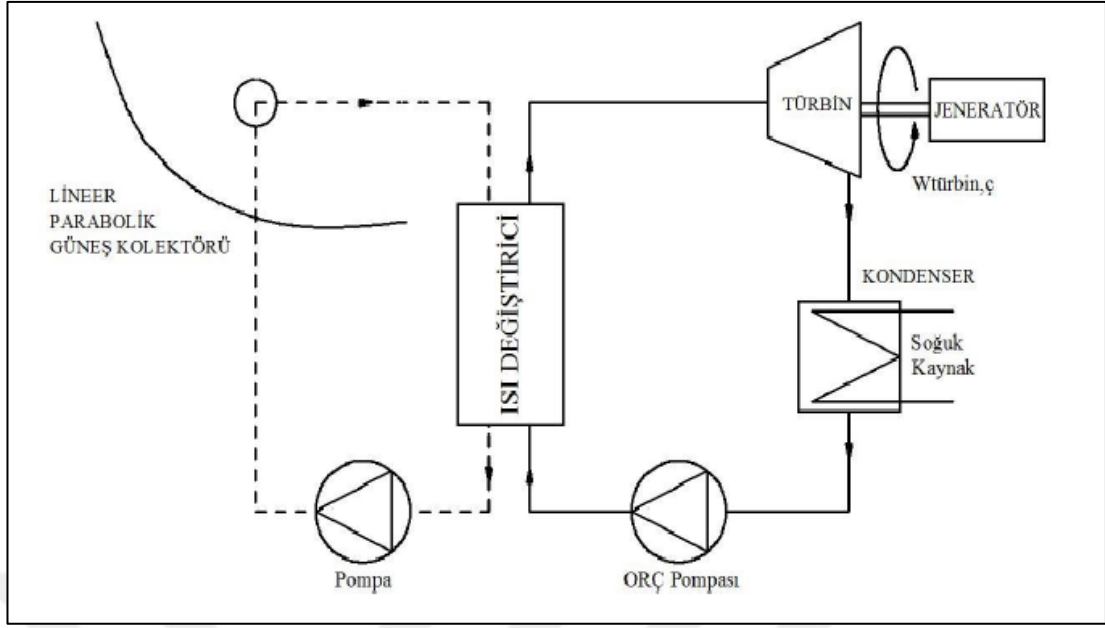
Şekil 3.10. Doğrudan ısı değiştiricili atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemleri.

Bu sistem karşılaştırıldığında doğrudan ısı değiştiricili sistemlerde, eşanjör boyutları daha büyük sonuç vermekte ve maliyet artmaktadır. Ayrıca akışkanın yanıcı olması durumunda yangın tehlikesi oluşturabilir [19].

### 3.6.3. Güneş Enerjili ORÇ Sistemleri

Güneş enerjisi sınırsız ve tükenmeyen bir enerji kaynağıdır. Ayrıca çevreci olan bu enerjinin kullanımı fosil yakıtların tükenmesi ve çevresel etkiler göz önüne alındığı zaman gün geçtikçe artış göstermektedir. Sıcak su ihtiyacı, proses ısıtma, endüstriyel kurutma sistemleri ve fotovoltatik piller aracılığı ile elektrik üretimi güneş enerjisinin kullanım alanları arasındadır [16].

Gelişen teknoloji ile güneş enerjisini yüksek sıcaklıklara çıkararak kullanmak mümkün hale gelmiştir. Bu enerjiyi ORÇ sistemleri kurarak elektrik üretimini mümkün hale getirmiştir. Şekil 3.11’ de güneş enerjili ORÇ sistemi görölmektedir.



Şekil 3.11. Parabolik güneş kolektörlü ORÇ sistemleri.

Bu sistemlerde elektrik üretimi fotovoltaik pillere oranla daha ucuza mal olmaktadır. Ayrıca kondenser suyu farklı uygulama alanlarında kullanılması mümkündür. Fakat bu tarz sistemlerde karşımıza çıkan sorun ise yeterli güneş olmadı zaman sistem çalışmayacağı için başka bir enerji kaynağı ile ilave edilerek çalıştırılmaktadır [16].

### 3.7. ORÇ SİSTEMLERİNİN AVANTAJLARI

ORÇ, buhar türbin sistemleri ile kıyaslandığı zaman, ORÇ'nin daha avantajlı olduğu gözlemlenmektedir. Buhar türbini yüksek sıcaklık ve basınçta kullanıldığı için genellikle daha verimli olsa da ORÇ sistemi aşağıda belirtilen özelliklerden dolayı birçok uygulamada tercih edilmektedir.

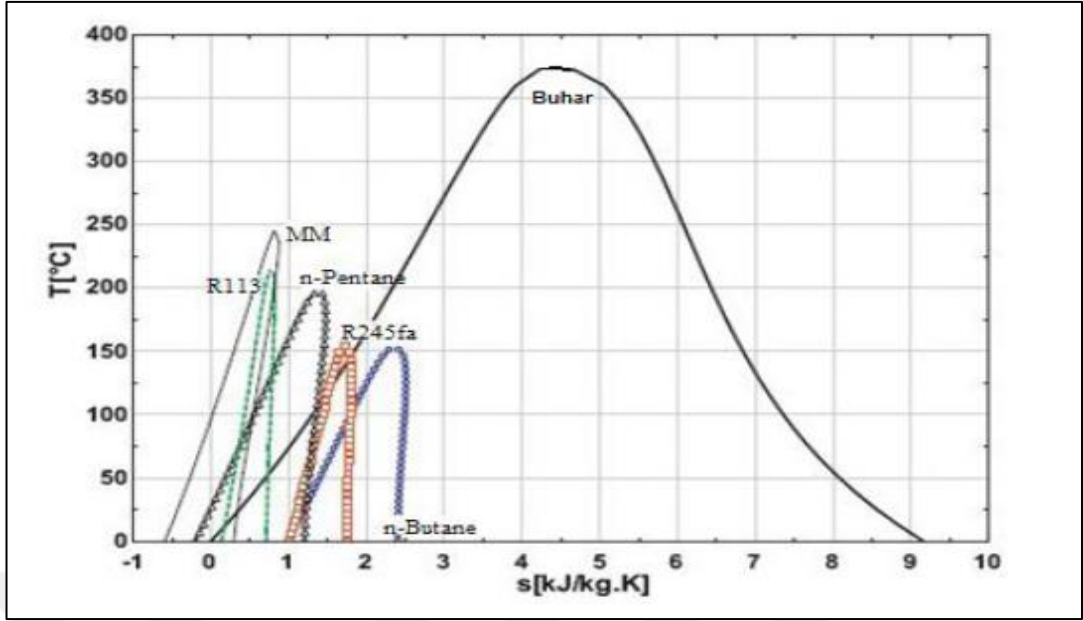
1. Buhar türbinindeki organik çalışma sıvısının moleküler ağırlığı oldukça yüksektir. Daha minimal olan yüksek hızlı buhar moleküllerin buhar türbinine yüksek hızla çarpmasından dolayı bıçakların zarar görmesi söz konusudur. Bu durum ilgili türbinin bakım, onarım ve yenileme periyodunu toplam maliyetini arttırmaktadır.
2. ORÇ'nin düşük sıcaklık ve basınç değerlerinde çalışması amacıyla bir operatöre ihtiyaç bulunmamaktadır. Çünkü ORÇ herhangi bir personele gerek kalmaksızın otomasyon aracılığıyla uzaktan erişim sağlanarak kontrolü sağlanmaktadır.

3. ORÇ'nin düşük sıcaklık ve basınç değerlerinde çalışmasından dolayı bileşenlerdeki mekanik ve termal gerilim, buhar türbinine göre oldukça düşüktür.
4. ORÇ bazı yüklemelerde daha yüksek performansla çalışabilmektedir. Bu sayede yapılacak olan uygulamalar çalışma ortamında sabahın erken saatlerinde başlayıp akşam geç saatlere kadar işleyebilmektedir.
5. ORÇ'de sıvı akışkan kullanılmasından dolayı su kullanılmasına gerek bulunmamaktadır. Böylece söz konusu sistemin tamamen çalıştırılması ve kontrolü daha kolaydır [16].
6. ORÇ'deki türbinin daha düşük bir hızla dönmesi mekanik zorlamayı da azaltmaktadır. Böylelikle devir düşürücü dişli sistem ve buna bağlı ekipmanlar aracılığı ile direkt olarak türbin ve jeneratör arasında bağ kurulmasına olanak sağlamıştır.
7. Orta dereceli kaynak sıcaklıklı jeotermal enerji santralleri, düşük entalpi değerinden dolayı doğrudan buhar Rankine çevrimi ile birlikte kullanılmamaktadır. Bu yüzden, ORÇ sistemi ile çalışan ikili çevirimden yararlanılmaktadır [19].

### **3.8. ORÇ SİSTEMLER İÇİN ÇALIŞMA AKIŞKANININ SEÇİLMESİ**

Düşük sıcaklıklarda ısı transfer verimsizliği önemli olduğundan, bu sıcaklıklardaki uygulamalarda kullanılacak akışkanın seçimi çok kritiktir. Isı verimsizlikleri, sıvının termodinamik özelliklerine ve çalışma koşullarına bağlı kalmaktadır. Düşük kalitede ısı elde etmek için sıvının sudan daha düşük kaynama seviyesine sahip olması gerekmektedir. Şekil 3.12'de bazı organik akışkanlar ile su buharına ait T-S diyagramları gösterilmektedir [19].





Şekil 3.12. Bazı akışkanlara ait T-S diyagramı [19]

Sıvının bazı özellikleri aşağıda verilmiştir [16,19].

- Eğer düşük sıcaklık da çalışan ORÇ sistemi gerekiyorsa düşük kaynama noktasına sahip bir akışkan tercih edilir.
- Soğutucu akışkanın donmasını önlemek amacıyla düşük donma noktası tercih edilmektedir.
- Kondensere sıvı yürümesini engellemek amacıyla özgül ısısı daha düşük bir akışkan seçilmelidir.
- Yüksek basınç ve sıcaklıktaki akışkanlarda genellikle kimyasal bozulma ve ayrışma görülmektedir.
- Akışkanı seçerken ozon delme potansiyeli ve küresel ısınma potansiyeli göz önüne alınması gerekmektedir.
- Güvenlik sebebiyle akışkanın tahriş edici, sıvı, yanıcı olmamasına dikkat edilmelidir.

ORÇ’de çalışma akışkanı önemli bir yere sahiptir. Çevrimin performansını ve ekominisini belirlemektedir. Bu gerçeklerle farklı ısı geri kazanım uygulamalarında iyi bir akışkana sahip olmak için bir çok çalışma denenmiştir [19].

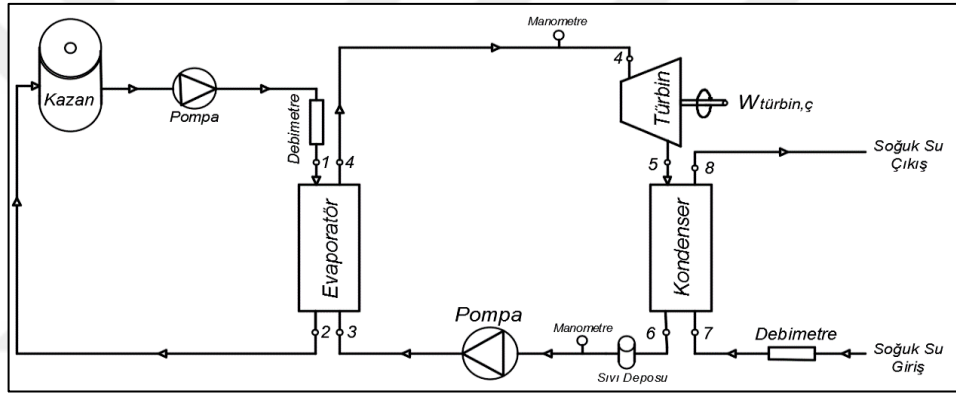
- Sıfır veya pozitif eğimli doyma eğrisi ( $ds/dt$ )
- Buharlaşma gizli ısısı
- Yüksek yoğunluk (sıvı/buhar fazı)
- Yüksek özgül ısı
- Kritik parametler ( sıcaklık, basınç)
- Kabul edilebilir yoğunlaşma ve buharlaşma basıncı ( $>1$  bar ve  $<25$  bar)
- Isı transfer özellikleri ( düşük vizkoz, yüksek termal iletkenlik)
- Malzemeler ile uyumu
- Yüksek termodinamik performans

ORÇ sistemi 1880'lerde keşfedilmesine rağmen günümüze kadar popüler bir sistem olamamıştır. Düşük çalışma sıcaklığından dolayı ORÇ sistemleri çeşitli sistemler ile uyumlu olarak kullanılabilir. Bunlar güneş enerjisi, endüstriyel atık ısılar, jeotermal enerji vb. dir.

## BÖLÜM 4

### MATERYAL METOD

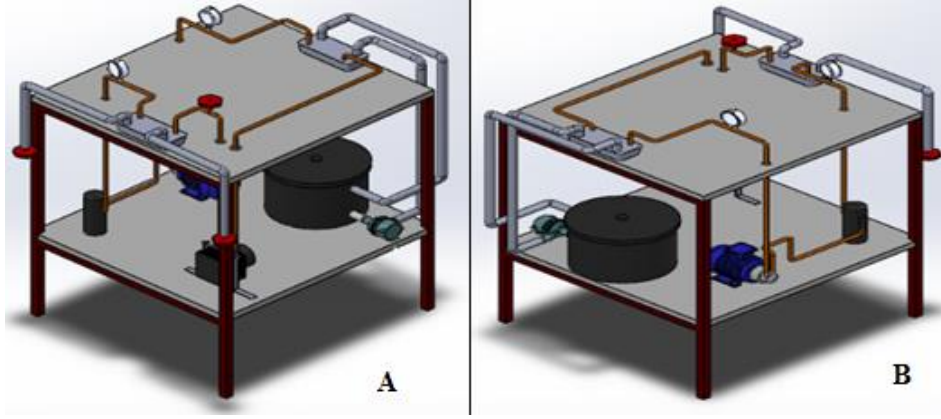
Yapılan bu çalışmada, ORÇ prensibine göre çalışan bir sistem tasarlanıp imal edilmiştir. Tasarımı ve imalatı yapılan sistemin, çalışma prensibi şekil 4.1.'de gösterilmektedir



Şekil 4.1. Tasarımı yapılan sistemin şematik gösterimi.

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere sistemin ısı kaynağı elektrikle ısıtılan küçük bir kazandır. Bu kazandan yaklaşık 90°C de sıcak su elde edilmektedir. Kazandan temin edilen sıcak su pompa yardımıyla sistemde kullanılan evaporatöre gönderilir. Evaporatöre gönderilen sıcak su burada enerjisini organik akışkana vererek kazana geri döner ve tekrar sıcak su pompasıyla sistemin devamlılığı sağlanır.

Aynı zamanda organik akışkanın evaporatörden geçerken sıcaklığı ve basıncı artırılır. Yüksek sıcaklık ve basınçta türbine giren organik akışkan türbini hareket ettirir ve mekanik iş elde edilir. Bu mekanik iş de jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Ardından organik akışkan kondensere girerek soğutma suyu ile ısı alışverişine girer ve sıvı hale geçip pompaya gelir. Pompa aracılığı ile sistemin sürekliliği sağlanmış olur. Şekil 4.2'de deney düzeneğinin 3 boyutlu çizimi gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Hazırlanan ORÇ deney düzeneğinin 3D gösterimi.

#### 4.1. KULLANILAN EKİPMANLAR

Kurulan sistemde ekipmanlar 3 bölüme ayrılmaktadır. Bunlar; ana elemanlar, bağlantı elemanları ve ölçüm elemanları olmak üzere 3 kısma ayrılır.

##### 4.1.1. Ana Elemanlar

###### Türbin

Termal enerjinin mekanik enerjiye dönüştüğü kısımdır. Genelde yüksek hızlı, çok kademeli, radyal veya karışık akışlı üniteler yüksek verimlilik sağlamaktadır. Evaporatörden kızgın buhar olarak çıkan organik akışkan, türbin kanatlarına çarparak mekanik iş elde edilir. Yapılan bu çalışmada ORÇ sisteminde mekanik enerji elde etmek için türbin olarak Şekil 4.3'te görülen scroll kompresör kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Türbin gösterimi.

## Pompa

Kurulan sistemde, kondenserden çıkan sıvı fazdaki organik akışkanın basınçlandırılması, evaporatöre gönderilmesi ve sistemin dolaşımının sağlanabilmesi için Şekil 4.4'te gösterilen manyetik nuert marka pompa kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Pompa.

## Isı Değiştiriciler

Farklı sıcaklıkta ve birbirlerinden katı bir cidar ile ayrılan iki akışkan arasındaki ısı iletimini sağlamak amacı ile kullanılan cihazlardır. Yapılan bu ORÇ sisteminde organik akışkanı yüksek sıcaklık ve basınca çıkarabilmek için evaporatör olarak kullanılacak ve türbinden çıkan organik akışkanın sıcaklığını düşürmek için kondanser görevi görecektir. Şekil 4.5'da gösterilen 24 plakalı ısı değiştirici kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Isı değiştiriciler.

### Sirkülasyon Pompası

Yapılan bu sistemde sirkülasyon pompası kazandan elde edilen sıcak suyu evaporatöre göndermek ve evaporatörden çıkan sıcak suyun kazana dönmesini sağlamak için şekil 4.6'de gösterilen sirkülasyon pompası kullanılmıştır.



Şekil 4.6. Sirkülasyon pompası.

### Kazan

Yapılan bu sistemde, hem sistemin ısı kaynağı olması hemde sıcak su elde edilebilmesi için elektrikle ısıtılan şekil 4.7'de gösterilen küçük bir kazan tasarlanmıştır.



Şekil 4.7. Elektrik ısıtıcılı kazan.

### Sıvı Deposu (Receiver)

Kurulan bu sistemde organik akışkanı sıvı olarak depolamak, takviye etmek ve eksilmek ve sistemde vakum gibi işlemlerin yapılabilmesi için şekil 4.8’da gösterilen sıvı deposu kullanılmıştır.



Şekil 4.8. Sıvı deposu (Receiver).

### **4.1.2. Bağlantı Ekipmanları**

Sistemin organik akışkan ile oluşturulacak kısmı için bakır boru, organik akışkan (R134a, R134a-propan karışımı, R22, R22-propan karışımı,) ve bu akışkanlara uygun 2 adet manometre, 2 adet gözetleme camı 1 adet termostat ve fittingsler, eşanjörlerle sağlanacak ısıtma-soğutma kısımlarını oluşturmak için ise plastik boru ve fittingsler kullanılmıştır.

### Manometre

Sistemdeki organik akışkanın alçak ve yüksek basınçlarını ölçmek için şekil 4.9’da gösterilen 2 adet manometre kullanılmıştır.



Şekil 4.9. Manometre.

### Gözetleme Camı

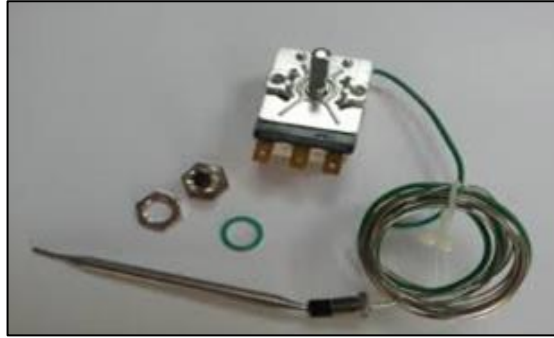
Kurulan sistemde organik akışkanın sıvı fazda olup olmadığı, akışkan miktarının yeterli olup olmadığı ve sistemin çalışmasını gözlemlemek amacıyla Şekil 4.10'de gösterilen 2 adet gözetleme camı kullanılmıştır.



Şekil 4.10. Gözetleme camı.

### Termostat

Kurulan sistemde kazandan elde edilen sıcak suyun sıcaklığını istenilen derecede sabit olmasını sağlamak için Şekil 4.11'de gösterilen 1 adet termostat kullanılmıştır.



Şekil 4.11. Termostat.

### Debimetre

Kurulacak sistemde, kazandan elde edilen sıcak suyun ve soğutma suyunun hacimsel debisini ölçmek amacı ile şekil 4.12'de gösterilen 2 adet debimetre kullanılmıştır.





Şekil 4.12. Debimetre.

### 4.1.3. Ölçüm Elemanları

Sistemde elde edilen elektrikli ölçmek için bir voltmetre ve belirli noktalarda sıcaklık ölçümü yapabilmek için şekil 4.13’de gösterilen K tipi termokupl, PİKOLOG marka data logger cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.13. Ölçüm cihazı (Pikolog data logger).

## 4.2. KULLANILAN ORGANİK AKIŞKANLAR

Bu çalışmada R22-R134a-R134a ve propan karışımı- R22 ve propan karışımı ve R22-mix (propan, bütan, isobütan, propylene) karışımı kullanılmıştır.

R22: (CHFCIF<sub>2</sub>) formüllü, yanmayan zehirsiz bir akışkandır. Soğutma uygulamalarında kullanılmak için geliştirilmiş soğutucu organik akışkandır. Paket tipi klima cihazlarda, ev tipi ve ticari tip soğutucularda kompakt kompresör gerektirmesi ve yer kazancı sağlaması yönünden kullanılır. Soğutma uygulamalarında, yüksek sıkıştırma oranı ile çıkış sıcaklıklarını karşılayabileceğinden silindirlerin su gömlekli olması tavsiye edilir [16].

R134a: (CF<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>F) formüllü, özellikleri bakımından en uygun soğutucu akışkandır. Ev tipi ve araç soğutucuları için en uygun akışkan olarak tercih edilmektedir. R134a akışkanı, mineral yağlarla uyumlu olmadığı için poli-olester veya poli-olester bazlı yağlarla kullanılmalıdır.

Propan: Yanıcı, renksiz, kokusuz, yüksek kalori değeri olan bir gazdır. Yanma testlerinde ve yakıt olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ORÇ sistem düzeneğinde 5 farklı akışkan (R134a, R134a-propan karışımı, R22, R22-propan karışımı, R22-mix (propan, bütan, isobütan, propylene) ile yapılmıştır. Kullanılan akışkanlar ayrı ayrı ve karıştırılarak denenmiş ve belirli zaman aralıklarında veriler toplanarak termodinamik analizler ve hesaplama yapılmıştır

Çizelge 4.1. Gaz karışımlarının özellikleri.

<b>Karışım Türleri</b>	<b>Kütle (gr)</b>	<b>Karışım Oranları (%)</b>
R134 a	500	100
R134 a ve Propan	500-10	98,22-1,78
R22	700	100
R22 ve Propan	250-25	90,9- 9,1
R22, Propan, Bütan, İsobütan, Propylene	1200- 17,05- 3,08- 6,17- 3,70	97,5- 1,45- 0,25-0,5- 0,3

## BÖLÜM 5

### TERMODİNAMİK ANALİZ

Yapılan bu çalışmada, sistem performansını belirlemek, sistemde verimsiz çalışan ekipmanları tespit edebilmek için termodinamik analizlerin yapılması gerekmektedir.

Sistemin performansını belirlemek için soğutucu akışkanın debisinin bilinmesi gerekir. Sistemde evaporatörden geçen iki farklı akışkanın ısı alışverişi olayında alınan ısı daima verilen ısıya eşit olur. Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2 ile gösterilmektedir. Soğutucu akışkanın debisi bu eşlenikleri kullanarak hesaplanır [19].

$$\dot{Q}_{su} = \dot{Q}_{oa} \quad (5.1)$$

$$\dot{m}_{su} \times c_{psu} \times \Delta T_{su} = \dot{m}_{oa} \times c_{poa} \times \Delta T_{oa} \quad (5.2)$$

Sisteme giren enerji kazanda elde edilen sıcak suyun giriş ve çıkışındaki entalpi farkı ve kütleli debinin çarpımına eşittir. Bu durum Eşitlik 5.3'de görülmektedir.

$$\dot{Q}_{giren} = \dot{m}_{sıcak,su} \times (h_1 - h_2) \quad (5.3)$$

Sistemdeki enerjinin korunum denklemi 5.4 eşitliğinde gösterilmiştir.

$$q - w = h_{\dot{c}} - h_g \quad \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (5.4)$$

Kazanda ve yoğuşturucuda iş etkileşimi yoktur, ayrıca pompa ve türbindeki hal değişimleri izantropik kabul edilebilir. Bu durumda her bir sistem için enerjinin korunum denklemi aşağıdaki eşitliklerde gösterilmiştir.

$$\text{Pompa (q=0)} : \quad W_{pompa,g} = h_2 - h_1 \quad (5.5)$$

$$\text{Kazan (w=0)} : \quad q_g = h_3 - h_2 \quad (5.6)$$

$$\text{Yoğuşturucu (w=0)} : \quad q_c = h_4 - h_1 \quad (5.7)$$

Sistemden elde edilen mekanik iş, türbin işine eşittir ve 5.4 eşitliğinde gösterilmiştir.

$$\dot{W}_{türbin} = \dot{m}_{oa} x (h_4 - h_5) \quad (5.8)$$

Sistemden elde edilen net iş ( $W_{net}$ ), türbinde elde edilen güçten, pompa güçlerinin çıkarılması ile hesaplanır. Eşitlik 5.5 ile gösterilmektedir.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{türbin} - \dot{W}_{pompa} \quad (5.9)$$

$$\eta_{thermal} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{giren}} \quad (5.10)$$

## BÖLÜM 6

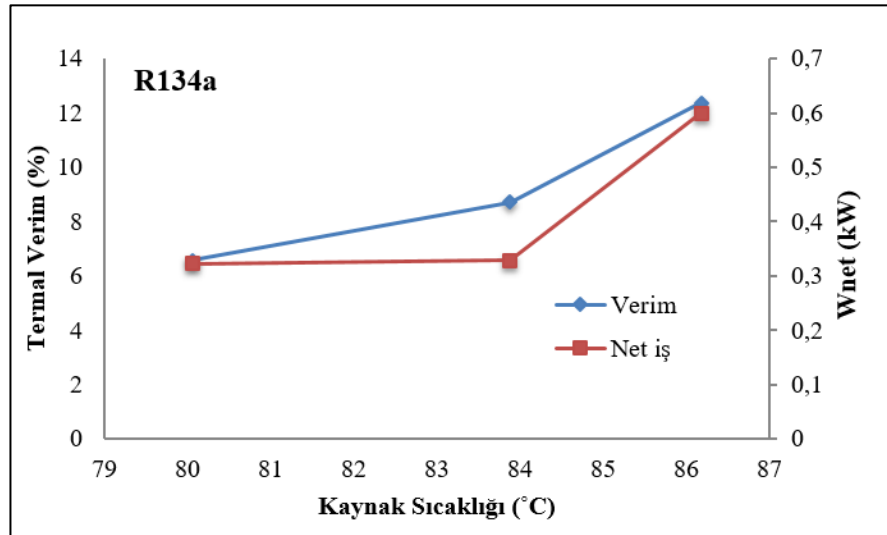
### DENEY SONUÇLARI

Yapılan çalışmanın sonucunda, R134a, R134a-Propan, R22, R22-propan ve R22-mix gazlarının analizleri yapılmıştır.

Çizelge 6.1’de R-134a akışkanı için kaynak sıcaklığına bağlı olarak değişen net iş ve verim değişimi görülmektedir. Şekil 6.1’de de bu durum grafiksel olarak gösterilmiştir

Çizelge 6.1. R134a akışkanının  $W_{net}$  ve verim değerleri.

Kaynak Sıcaklığı	$\eta_{verim}(\%)$	$W_{net}$ (kW)
86,18	12,37	0,599
83,88	8,7	0,328
80,06	6,57	0,322

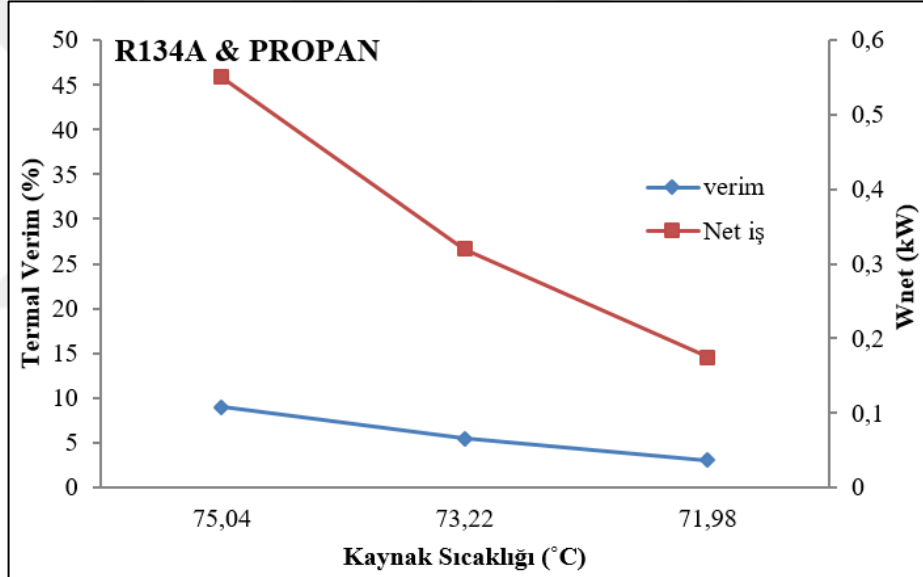


Şekil 6.1. R134a akışkanı ölçüm grafiği.

Çizelge 6.2’te ise R-134a ve Propan karışım akışkanları için kaynak sıcaklığına bağlı olarak değişen net iş ve verim değişimi görülmektedir. Şekil 6.2’de de bu durum grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. R134a-Propan karışım akışkanının  $W_{net}$  ve verim değerleri.

Kaynak Sıcaklığı (°C)	$\eta_{verim}(\%)$	$W_{net}$ (kW)
75,04	9,03	0,55
73,22	5,5	0,32
71,98	3,06	0,175

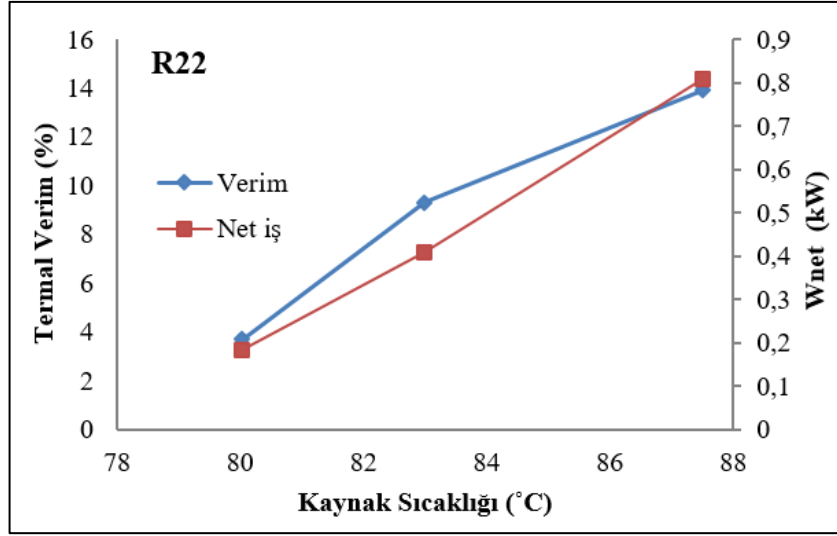


Şekil 6.2. R134a-Propan akışkanı ölçüm grafiği.

R22 akışkanı için kaynak sıcaklığına bağlı olarak değişen net iş ve verim değişimi çizelge 6.3’te görülmektedir. Şekil 6.3’de de R22 akışkanının sonuçlarının grafiksel olarak gösterimi aşağıda verilmiştir.

Çizelge 6.3. R22 akışkanının  $W_{net}$  ve verim değerleri.

Kaynak Sıcaklığı (°C)	$\eta_{verim}(\%)$	$W_{net}$ (kW)
87,15	13,9	0,81
82,99	9,3	0,41
80,03	3,7	0,184

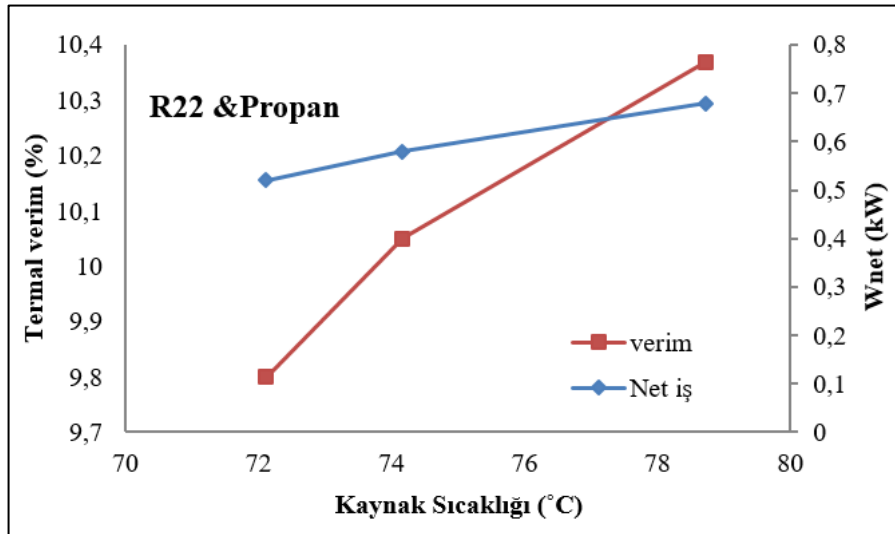


Şekil 6.3. R22 akışkanı ölçüm grafiği.

Çizelge 6.4'te ise R22 ve Propan akışkan karışımı için kaynak sıcaklığına bağlı olarak değişen net iş ve verim değişimi görülmektedir. Şekil 6.4'de de bu durum grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. R22 ve Propan karışım akışkanının  $W_{net}$  ve verim değerleri.

Kaynak Sıcaklığı (°C)	$\eta_{verim}(\%)$	$W_{net}$ (kW)
78,73	10,37	0,68
74,17	10,05	0,58
72,12	9,8	0,52

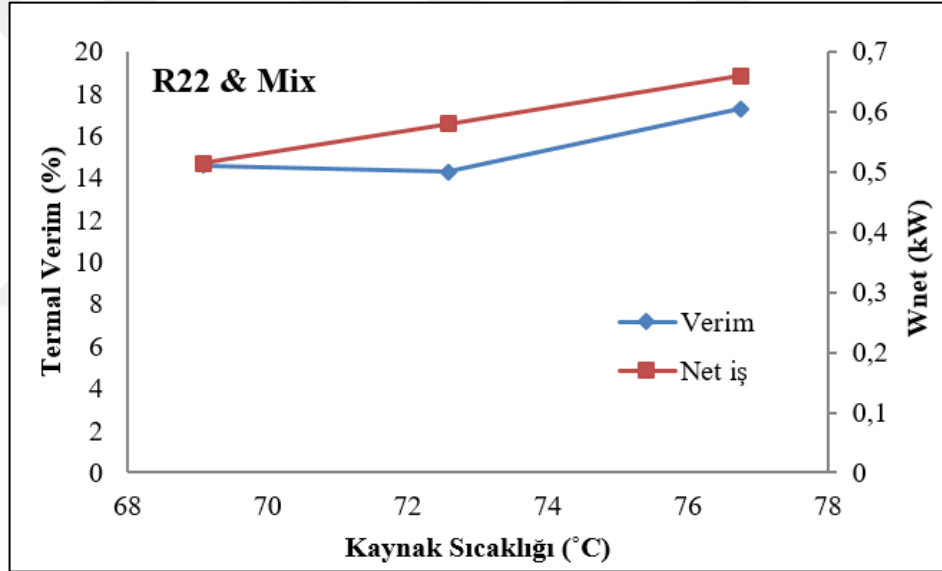


Şekil 6.4. R22-Propan karışım akışkanı ölçüm grafiği.

Çizelge 6.5'te ise R22 ve Mix karışım akışkanları için kaynak sıcaklığına bağlı olarak değişen net iş ve verim değişimi görülmektedir. Şekil 6.5'de de bu durum grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.5. R22 ve Mix karışım akışkanının Wnet ve verim değerleri.

Kaynak Sıcaklığı (°C)	$\eta_{verim}(\%)$	Wnet (kW)
76,76	17,3	0,66
72,58	14,3	0,58
69,08	14,6	0,514

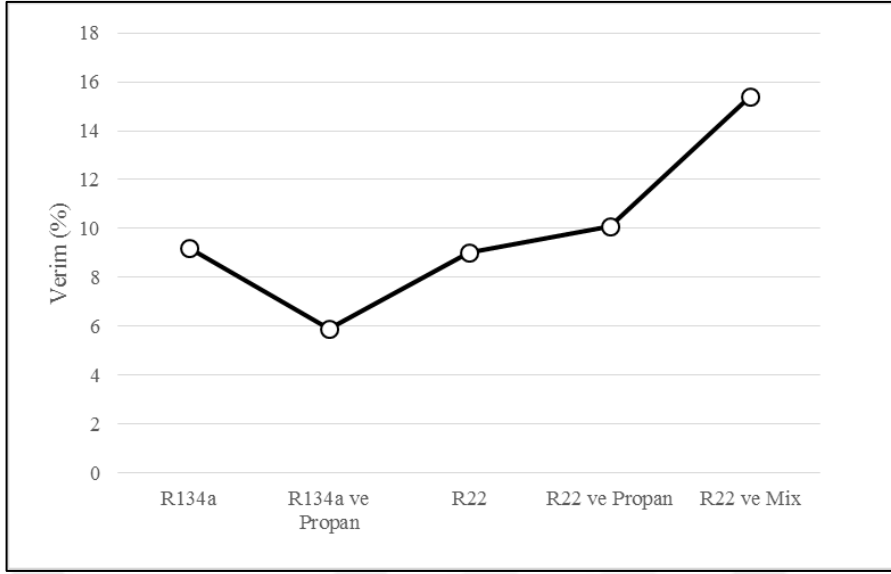


Şekil 6.5. R22-Mix karışım akışkanı ölçüm grafiği.

Çizelge 6.6. Akışkanların ortalama verim değerleri.

Akışkanlar	Verim(%)
R134a	9,22
R134a ve propan	5,87
R22	9,02
R22 ve propan	10,07
R22 ve mix	15,4

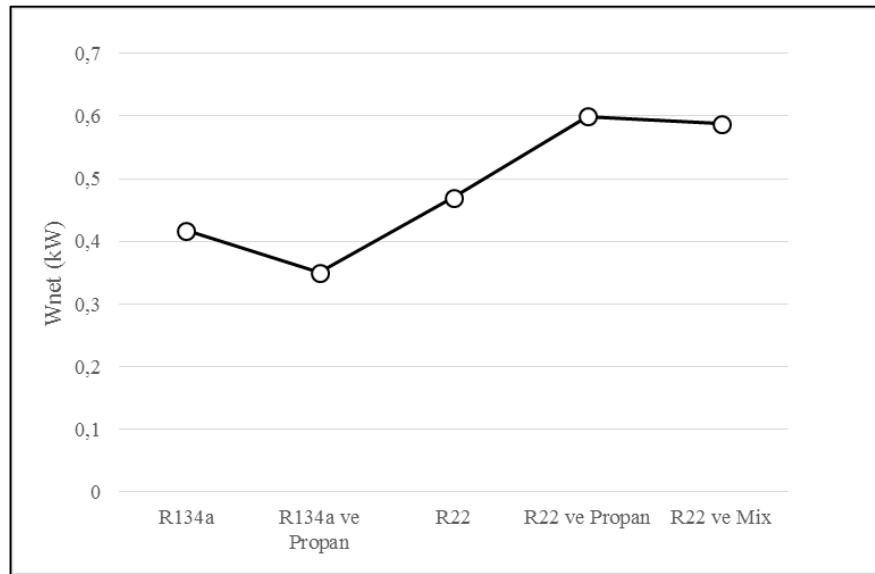




Şekil 6.6. Akışkanların ortalama verim grafiği.

Çizelge 6.7. Akışkanların ortalama  $W_{net}$  değerleri.

Akışkanlar	$W_{net}(KW)$
R134a	0,417
R134a ve propan	0,35
R22	0,47
R22 ve propan	0,599
R22 ve mix	0,588



Şekil 6.7. Akışkanların ortalama  $W_{net}$  grafiği.

## BÖLÜM 7

### SONUÇ VE ÖNERİLER

- ORÇ sistemlerinde kaynak sıcaklığının önemi bir hayli fazladır. Sıcaklığı ne kadar yüksek tutarsak üretilen net iş ve verimin yükseldiği açıkça görülmektedir.
- Yapılan deneyler ve ölçümler sonucunda R22-Mix gaz karışımının verimi %15,4 olarak ölçülmüştür. Diğer gazların ölçüm sonuçları verimleri %5,87 - %10,07 arasında olduğu gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında R134a, R22, R134a ve Propan, R22 ve Propan gazlarının değerleri R22-Mix gaz karışımının verimine erişememiştir.
- Elde edilen net işe bakıldığında ise R22-Propan karışımından en yüksek iş elde edildiği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada optimum çalışma koşullarında R22-Propan karışımında gözlemlenmiştir.

R134a ve R22 akışkanları genel olarak büyük ORC sistemlerinde çok fazla kullanılmamaktadır. Fakat küçük ölçekli uygulamalarda HFC gazları yerine oldukça fazla kullanıldığı görülmektedir. Küçük ölçekli sistemlerde R134a ve R22 gazları ile beraber HFC kullanımının hem R134a hem de R22 akışkanı için verim ve net işi arttığı açıkça görülmektedir. Burada uygun akışkanı bulmak için karışım miktarlarının daha farklı yüzdelerle denenmesi önerilmektedir. Doğru akışkanı bulmak hem sistem verimini artıracak hem de çevresel etkileri en aza indirgeyecektir.

## KAYNAKLAR

1. Ergün, A., Özkaymak, M., ve Kılıçarslan, E., “Organik Rankine Çevrimi prensibi ile düşük sıcaklıktaki kaynaklardan elektirik üretim uygulamaları”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Düzce, 4 (2016).
2. Arslan, O., “Kütahya-Simav jeotermal kaynaklarının hassas değerlendirmesi: Entegre system tasarımı ve enerji-ekserji analizleri”, Doktora Tezi, *Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2008).
3. Tamyerli, U., “Jeotermal enerjiden elektrik üretiminin irdelenmesi: Örnek Çalışma: Kütahya-Simav jeotermal sahası”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, (2007).
4. Cihan, E., “Organik Rankine Çevrimi ile çalışan atık ısı kaynaklı bir soğutma sisteminin performansının araştırılması”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 34 (1): 101-109 (2014).
5. Acar, E., “Bir yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali için organik rankine çevrimi dizaynı ve modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü*, İstanbul (2014).
6. Özdemir, A., “Parabolik kollektörlü organik rankine çevriminin ısparta şartlarında incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta (2012).
7. Özden, H., ve Paul, D., “Organik rankine çevrim teknolojisiyle düşük sıcaklıktaki kaynaktan faydalanılarak elektrik üretimi. Örnek çalışma: Sarayköy Jeotermal Santrali”, *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir (2011).
8. Bamgbopa, M. O., “Modeling and performance evaluation of an organic rankine cycle with R245Fa as working fluid”, Yüksek Lisans Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Kuzey Kıbrıs Kampüsü*, KKTC (2012).
9. Yousefzadeh, M. A., “Novel control strategy for an organic rankine cycle based on regulating the mass distribution in the system”, *Middle East Technical University Northern Cyprus*, February (2015).
10. Dipippo, R., “Second law assessment of binary plants generating power fromn lowtemperature geothermal fluids”, *Geothermics*, 33: 565-586 (2004).
11. Roy, J. P., Mishra, M. K and Mishra, A., “Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using organic rankine cycle”, *Energy*, 35 (12): 5049-5062 (2010).

12. Sun, J. and Li, W., “Operation optimization of an organic rankine cycle (ORC).Heat recovery power plant”, *Applied Thermal Engineering*, 31 (11-12): 2032-2041 (2011).
13. Eyidoğan, M., “Organik rankine çevrimli güç üretim sisteminin enerji ve ekserji analizi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2014).
14. Yılmaz, F., Selbaş, R. ve Balta, T., “Güneş enerjisi destekli organic rankine çevriminin ekserji analizi”, *Makine Teknolojileri Elektrik Dergisi*, 12 (4): 39-50 (2015).
15. İnternet: ARES, Development and Applications of Organic Rankine Cycle, <https://ares.fbk.eu/events/development-and-applications-organic-rankine-cycle-what-are-next-steps-fbk-seminar> (2017).
16. Kayataş, G., “Jeotermal enerji destekli organik Rankine çevriminde alternatif akışkan kullanımının deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2016).
17. Pelit, M., “Biyokütle kaynaklı organik rankine çevrimli güç ünitesinin termoekonomik analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2015).
18. Yılmaz, F., “Güneş çanaklı organik rankine çevriminin İsparta şartlarında incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta (2013).
19. Ergün, A., “Organik rankine çevrimi prensibine göre çalışan bir jeotermal elektrik santralinin termoekonomik analizi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2014).

## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet KALE 1992 yılında Nevşehir'in Ürgüp ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğretimini Nevşehir' de tamamladı. 2010'da Avanos Anadolu Lisesi Fen Bilimleri Bölümü'nden mezun oldu. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğretimine başladı. 2015 yılında buradan mezun oldu ve Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2015 yılında Esdoğalgaz ısı sistemleri ve mühendislik firmasında 6 ay çalıştı.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : 100.yıl mah. 1059 nolu sok. 7/6 Merkez/KARABÜK

Tel : 544-267-13-16

E-posta: mehmett.kale@gmail.com