GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

FARKLI NANO SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN ORGANİK RANKİNE ÇEVRİM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Meltem ARISU

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Meltem ARISU

01/02/2024

FARKLI NANO SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN ORGANİK RANKİNE ÇEVRİM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Meltem ARISU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2024

ÖZET

Dünyada enerji kullanımı; artan nüfus, kırsal kesimden kentlere göç, teknolojik gelişmeler, hayatı kolaylaştıran teknolojik ürünlerin kullanımında artış gibi nedenlerle sürekli artmaktadır. Bu nedenle enerjinin temininde yenilenebilir enerji kaynaklarına rağbet artmakta, enerji kaybının önüne geçebilmek içinse teknolojik araştırmalar yapılmakta, enerjinin verimli kullanılabilmesi yolunda var olan sistemler geliştirilmektedir. Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), ısı enerjisinin işe çevrilmesinde kullanılan termodinamik bir çevrimdir. Gelişen teknoloji ve artan enerji ihtiyacı nedeniyle Organik Rankine Çevrimini konu alan çalışmalar araştırmacılar tarafından ilgi ile takip edilmektedir. Bu çalışma, ORÇ sisteminde kullanılan iş akışkanlarına nano partikül eklenmesinin sistem performansı üzerinde etkisini incelemektedir Bu çalışmanın özgünlüğü, seçilen iş akışkanları ve nano partiküllerin özel kombinasyonlarında yatmaktadır. İzentropik, ıslak ve kuru akışkanlar arasından yapılan seçim, R141b, R142b ve R123 gibi geleneksel iş akışkanlarının yanı sıra çevre dostu alternatifler olan R32 ve R600'yü içermektedir. Bu seçim, eski ve yeni nesil akışkanların ORÇ sisteminde birbirlerinin yerine kullanılma potansiyelini araştırmayı hedeflemektedir. Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri iş akışkanlarına eklenerek oluşturulan 14 farklı nano akışkan için performansları hesaplanmıştır. Al_2O_3 ve TiO_2 nano partiküllerin seçimi, nano partiküllerin termo-fiziksel özellikleri, yüksek ısı iletkenliği ve termal kararlılık gibi avantajlar sağlayarak iş akışkanlarının ısı transfer özelliklerini artırmak amacını taşımaktadır. Bu durum, organik Rankine çevrim sisteminin verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Akışkan türleri arasında izentropik akışkanların R141b ve R123'ün ORÇ sistemi için daha kullanışlı olduğu görülmüştür. ORÇ sisteminde akışkan türü olarak performans incelendiğinde izentropik akışkanların daha yüksek verim elde edildiği, ardından kuru tür akışkanların geldiği görülmüştür. En düşük verim değerleri R22 ve R32 akışkanları için bulunmuştur.

Bilim Kodu	:	92804
Anahtar Kelimeler	:	Organik Rankine çevrimi, nano akışkan, termodinamik analiz
Sayfa Adedi	:	125
Danışman	:	Prof. Dr. Tayfun MENLİK

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT NANO REFRIGERANTS ON ORGANIC RANKINE CYCLE PERFORMANCE

(Ph. D. Thesis)

Meltem ARISU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2024

ABSTRACT

Energy consumption worldwide is continuously increasing due to factors such as population growth, rural-to-urban migration, technological advancements, and the rising use of technological products that facilitate life. Consequently, there is a growing demand for renewable energy sources in energy supply, and technological research is conducted to prevent energy loss and enhance the efficient use of energy. Organic Rankine Cycle (ORC) is a thermodynamic cycle used to convert thermal energy into work. Due to advancing technology and increasing energy needs, studies focusing on the Organic Rankine Cycle are closely followed by researchers. This study examines the impact of adding nano-particles to working fluids used in the ORC system on system performance. The uniqueness of this study lies in the specific combinations of selected working fluids and nano-particles. The choice made among isentropic, wet, and dry working fluids includes traditional working fluids such as R141b, R142b, and R123, as well as environmentally friendly alternatives like R32 and R600. This selection aims to explore the potential interchangeability of old and new generation working fluids in the ORC system. The performance of 14 different nano-fluids, created by adding Al_2O_3 and TiO_2 nano-particles to working fluids, is calculated. The selection of Al_2O_3 and TiO_2 nano-particles aims to enhance the heat transfer properties of working fluids by providing advantages such as thermo-physical properties, high thermal conductivity, and thermal stability. This, in turn, aims to improve the efficiency of the organic Rankine cycle system. Among the types of working fluids, it is observed that isentropic fluids, specifically R141b and R123, are more useful for the ORC system. When the performance of working fluid types in the ORC system is examined, it is found that isentropic fluids achieve higher efficiency, followed by dry-type fluids. The lowest efficiency values are found for R22 and R32 working fluids.

Bilim Kodu	:	92804
Anahtar Kelimeler	:	Organic Rankine cycle, nanofluid, thermodynamic analysis
Sayfa Adedi	:	125
Danışman	:	Prof. Dr. Tayfun MENLİK

TEŞEKKÜR

Doktora çalışması süresince yardım ve katkılarıyla bana yol gösteren değerli hocalarım Prof. Dr. Tayfun MENLİK ve Prof. Dr. Kurtuluş BORAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Her zorlu anımda yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve beni bu noktaya getiren sevgili annem ve babama, her daim yanımda olan abime sevgi ve anlayışları için minnettarlığımı ifade etmek istiyorum.

Tez yazma sürecinde oğlum ile ilgilenerek bana çalışma fırsatı sunan, her zaman destek olan kayınvalidem ve kayınbabama teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımı anlamlandıran, her zaman yanımda olan, sevgisiyle güç katan eşim Özgür'e ve biriciğim oğlum Kıvanç'a en içten teşekkürlerimi iletiyorum. Sizinle geçirdiğim her an, bu yolculuğu daha değerli kıldı. Varlığınızla beni güçlendirdiniz ve bu başarıda sizin de katkınız büyük. Sonsuz sevgi ve minnettarlıkla, size teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 7

3. ORGANİK RANKİNE ÇEVRİMİ 27

3.1. Isı Makineleri 27

3.2. Organik Rankine Çevrimi Sistemi 32

3.3. ORÇ Sisteminin Tarihçesi 34

3.4. ORÇ Sisteminde Kullanılabilir Isı Kaynakları 35

3.5. ORÇ Sistemi İçin Çalışma Akışkanı Seçimi 35

3.6. Organik Çalışma Akışkanı Tipleri 37

3.7. Organik Çalışma Akışkanının Termofiziksel Özellikleri 41

3.8. ORÇ Sistemi Üniteleri 45

3.9. ORÇ Sisteminin Avantajları 50

3.10. ORÇ Sisteminin Sakıncaları 51

4. NANO AKIŞKANLAR 53

4.1. Nano Akışkan Karakterizasyonu 54

4.2. Nano Akışkan Üretim Yöntemleri 56

Sayfa

4.3. Nano Akışkan Uygulamaları 57

4.4. Nano Akışkanların Termal Özellikleri 58

5. MATERYAL VE YÖNTEM 63

5.1. Matematiksel Modelleme 66

5.1.1. ORÇ sisteminin modellemesi 67

5.1.2. Nano akışkan modellemesi 69

5.1.3. Sayısal modelin varsayımları 73

5.2. Metodoloji 73

6. SONUÇ VE TARTIŞMA 77

6.1. Saf Akışkanlar için Sabit Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları 77

6.2. 0,1 Basınç Oranında Farklı Kütle Konsantrasyonlarında ORÇ Hesaplamaları 82

6.3. 0,3 Basınç Oranında Farklı Kütle Konsantrasyonlarında ORÇ Hesaplamaları 87

6.4. 0,5 Basınç Oranında Farklı Kütle Konsantrasyonlarında ORÇ Hesaplamaları 91

6.5. 0,7 Basınç Oranında Farklı Kütle Konsantrasyonlarında ORÇ Hesaplamaları 95

6.6. 0,9 Basınç Oranında Farklı Kütle Konsantrasyonlarında ORÇ Hesaplamaları 99

6.7. 0,01 Kütle Konsantrasyonunda Farklı Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları ... 103

6.8. 0,03 Kütle Konsantrasyonunda Farklı Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları ... 104

6.9. 0,05 Kütle Konsantrasyonunda Farklı Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları ... 104

6.10. 0,07 Kütle Konsantrasyonunda Farklı Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları . 105

6.11. 0,09 Kütle Konsantrasyonunda Farklı Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları . 106

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 109

KAYNAKLAR 115

ÖZGEÇMİŞ 125

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Organik akışkanların termo fiziksel özellikleri..... 33

Çizelge 5.1. Çalışma akışkanlarının termo fiziksel özellikleri..... 61

Çizelge 5.2. Çalışma akışkanlarının türbin giriş basınçları (kPa) 65

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Isı makinesinin basit görünümü 5

Şekil 3.2. Basit Rankine çevrimi şeması 9

Şekil 3.3. Organik Rankine çevrimi şematik görünümü 13

Şekil 3.4. T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine göre izentropik akışkan. 28

Şekil 3.5. T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine göre ıslak akışkan 29

Şekil 3.6. T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine göre kuru akışkan 30

Şekil 3.7. T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine göre akışkan türleri 31

Şekil 5.1. ORÇ sistemi şematik görünümü 59

Şekil 5.2. Çalışma akışkanlarının T-s diyagramları 61

Şekil 5.3. ORÇ sisteminin T-s diyagramında gösterilmesi 62

Şekil 5.4. Kütle konsantrasyonu ve yoğunluk değerleri 66

Şekil 5.5. Kütle konsantrasyonu ve özgül ısı değerleri 67

Şekil 5.6. Kütle konsantrasyonu ve ısıl iletkenlik değerleri 68

Şekil 5.4. Kütle konsantrasyonu ve viskozite değerleri 69

Şekil 6.1. İzentropik akışkanların basınç oranı, verim ve türbin giriş sıcaklığı değişimleri; a) R141b, b) R123, c) R142b 72

Şekil 6.2. Islak akışkanların basınç oranı, verim ve türbin giriş sıcaklığı değişimleri; a) R22, b) R32 73

Şekil 6.3. Kuru akışkanların basınç oranı, verim ve türbin giriş sıcaklığı değişimleri; a) R114, b) R600 74

Şekil 6.4. Çalışma akışkanlarının basınç oranı, verim ve türbin giriş sıcaklığı değişimleri 75

Şekil 6.5. 0,1 basınç oranında kütle konsantrasyonu ve verim değişimleri 77

Şekil 6.6. 0,1 basınç oranında Al_2O_3 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 78

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.7. 0,1 basınç oranında TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 79

Şekil 6.8. 0,1 basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 80

Şekil 6.9. 0,3 basınç oranında kütle konsantrasyonu ve verim değişimleri 81

Şekil 6.10. 0,3 basınç oranında Al_2O_3 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 82

Şekil 6.11. 0,3 basınç oranında $TİO_2$ eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 83

Şekil 6.12. 0,3 basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 84

Şekil 6.13. 0,5 basınç oranında kütle konsantrasyonu ve verim değişimleri 85

Şekil 6.14. 0,5 basınç oranında Al_2O_3 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 86

Şekil 6.15. 0,5 basınç oranında $TİO_2$ eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 87

Şekil 6.16. 0,5 basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 88

Şekil 6.17. 0,7 basınç oranında kütle konsantrasyonu ve verim değişimleri 89

Şekil 6.18. 0,7 basınç oranında Al_2O_3 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 90

Şekil 6.19. 0,7 basınç oranında $TİO_2$ eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 91

Şekil 6.20. 0,7 basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 92

Şekil 6.21. 0,9 basınç oranında kütle konsantrasyonu ve verim değişimleri 93

Şekil 6.22. 0,9 basınç oranında Al_2O_3 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 94

Şekil 6.23. 0,9 basınç oranında $TİO_2$ eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 95

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.24. 0,9 basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi 96

Şekil 6.25. 0,01 kütle konsantrasyonunda basınç oranı ve verim değişimi 97

Şekil 6.26. 0,03 kütle konsantrasyonunda basınç oranı ve verim değişimi 98

Şekil 6.27. 0,05 kütle konsantrasyonunda basınç oranı ve verim değişimi 99

Şekil 6.28. 0,07 kütle konsantrasyonunda basınç oranı ve verim değişimi 100

Şekil 6.29. 0,09 kütle konsantrasyonunda basınç oranı ve verim değişimi 101

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
$\mathbf{c_p}$	Özgül ısı kapasitesi, kJ kg^{-1} K^{-1}
h	Entalpi, kJ kg^{-1}
k	Isıl iletkenlik, W m^{-1} K^{-1}
$\dot{\boldsymbol{m}}$	Kütlesel akış hızı, kg s^{-1}
T	Sıcaklık, ^oC
W	Güç, kW
μ	Viskozite, kg m^{-1} s^{-1}
ρ	Yoğunluk, kg $(m^3)^{-1}$
Φ	Hacim konsantrasyonu
Ω	Kütle konsantrasyonu

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
EES	Engineering Equation Solver
MATLAB	Matrix Laboratory
ORÇ	Organik Rankine Çevrimi
np	Nano partikül
nsa	Nano soğutucu akışkan
Refprop	Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database
sa	Soğutucu akışkan

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji kullanım talebi; teknolojik gelişmeler, giderek artan nüfus, kırsal kesimden kentlere göç, toplumlardaki sosyal iyileşmeler, hayatı kolaylaştıran teknolojik aletlerin kullanımlarında artış gibi çeşitli nedenlerle artmaktadır. Bu nedenle enerjinin temini, ülkeler için kalkınma dinamiği ve sosyal refah seviyesini arttıran unsurlardan birini oluşturmaktadır.

Ülkemizde enerji talebi hızla artmaktadır. T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının "Türkiye Ulusal Enerji Planı" verilerine göre 2020 yılında birincil enerji tüketimi 147,2 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) iken 2035 yılına kadar 205,3 Mtep olması öngörülmektedir. 2020 yılı değerlerinde birincil enerji tüketimi kişi başı 1,7 tep iken, 2035 yılında kişi başı birincil enerji tüketimi 2,1 tep değerine ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu enerjinin büyük kısmı katı yakıt yakılması ile elde edilmektedir. Birincil enerji tüketiminde kaynakların pay dağılımında 2025 yılı için katı yakıtlar %26,6 değerindedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının değeri ise %18,4'tür [1].

Enerjinin topluma temininde çeşitli kaynaklar söz konusudur. Enerji kaynakları yenilenemez ve yenilebilir şeklinde tanımlanmıştır. Yenilenemez enerji kaynakları, yani fosil yakıtlar, hem giderek tükenmekte hem de çevreye zarar vererek küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarına rağbet artmakta, enerji kaybının önüne geçebilmek içinse teknolojik araştırmalar yapılmakta, enerjinin verimli kullanılabilmesi yolunda var olan sistemler geliştirilmektedir.

Türkiye Ulusal Enerji Planı raporuna göre 2020 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %11,7 olarak belirtilmiştir. 2035 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının payının kademeli olarak %34,3'e yükselmesi ön görülmektedir [1].

Enerji sistemleri incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik araştırmaların arttığı, atık ısı olarak adlandırılan ve sistemde kullanılmayan enerjinin geri dönüşüne yönelik çalışmaların yapıldığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmalar arasında enerji kaynağı olarak atık ısı ve düşük sıcaklık kullanma özelliğine sahip bir çevrim olan Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) de yer almaktadır [2].

ORÇ sistemleri, atık ısı kaynaklarından güç üretimi için özellikle düşük ve orta dereceli ısı kaynakları için umut vadeden bir teknolojidir. Düşük dereceli ısı kaynakları genellikle 300°C'nin altındadır ve orta dereceli ısı kaynakları 300°C ile 500°C arasındadır, 500°C'nin üzerindeki ısı akışları ise yüksek dereceli ısı kaynakları olarak kabul edilmektedir [3].

Isıl enerjinin işe dönüşebilmesi ısı makineleri yardımıyla gerçekleşmektedir. Isı makineleri yüksek sıcaklığa sahip bir ısıl enerji deposu olan kazan, güneş enerjisi, nükleer enerji gibi kaynaklardan ısıl enerji alarak bir kısmını mil işine dönüştürmektedir [4]. Isı makineleri, ısının çevrimde yer alan akışkana nasıl verildiğine göre içten yanmalı veya dıştan yanmalı motorlar olarak sınıflandırılmaktadır. Isıyı enerjiye dönüştürmek için birçok dıştan yanmalı teknoloji kullanılmaktadır. Gaz fazlı ısı motorları ve Rankine motorları dıştan yanmalı motorlar için örneklerdendir.

Buharlı güç çevrimlerinde en yaygın kullanılan akışkan sudur. Suyun her yerde bulunabilmesi, diğer akışkanlara göre daha ucuz olması ve yüksek buharlaşma entalpisine sahip olması gibi özelliklerinden dolayı su yaygın kullanılmaktadır. Rankine çevriminde çalışma akışkanı olarak su kullanılmaktadır [5].

Uzun yıllardır Rankine çevriminde iş akışkanı olarak su kullanılmasına rağmen suyun donma sıcaklığının yüksek olması, korozif olması ve buharlaştırıcıda yüksek basınç oluşması gibi nedenler çalışma akışkanı olarak alternatif akışkanların kullanılmasının yolu açılmıştır [6]. Rankine çevriminde suya alternatif olarak sudan daha düşük sıcaklıklarda kaynayan ve daha yüksek moleküler kütlesi olan akışkanların kullanılmaya başlanmıştır. Bu tür akışkanların kullanıldığı sistemler ise Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) olarak isimlendirilmiştir [7]. ORÇ sisteminin enerji kaynakları olarak genellikle düşük sıcaklıktaki jeotermal, biyokütle, güneş enerjisi ve atık ısıdan oluşmaktadır.

ORÇ teknolojisine olan ilgi, yenilenebilir veya düşük, orta dereceli atık ısıdan elektrik üretme isteğinden kaynaklanmaktadır ve son birkaç yıl içinde önemli ölçüde artmıştır. Gelişen teknoloji ve artan enerji ihtiyacı nedeniyle ORÇ sistemini konu alan çalışmalar araştırmacılar tarafından ilgi ile takip edilmektedir. Bu araştırmalar çoğunlukla alternatif organik akışkan seçiminde yoğunlaşmaktadır. Çünkü ORÇ sistemin verimliliği, güvenliği, çevresel etkenler önemli yer tutmaktadır. Organik akışkanda istenen özellikler yüksek sistem performansı, çevresel güvenlik, düşük yanıcılık ve toksisite gibi değerlerdir [8].

Günümüzde ORÇ verimliliğini artırmak için çalışmalar devam etmektedir. ORÇ birimlerinin tek tek performansı iyileştirilerek sistem verimliliği önemli ölçüde artırılmıştır. Yapılan araştırmalarla ORÇ çalışma akışkanına katkı maddesi olarak nano partiküllerin eklenmesi çevrim performansını artırmak için önerilmektedir [9].

Nano akışkanlar terimini ilk kez 1995 yılında Choi, bir konferans makalesinde bir sıvının termal iletkenliğini nano parçacıklar kullanarak artırma yolunu önerirken kullanmıştır. Choi, makalesinde, nano parçacıkların baz akışkandan dikkat çekici derecede daha yüksek bir termal iletkenliğe sahip olduğunu belirtmiştir [10].

Nano akışkan, yeni nesil enerji taşıma çalışma sıvısıdır [11]. Nano akışkanlar nano ölçekli metal oksit veya metal parçacıklarının baz akışkana belirli bir oranda homojen olarak karıştırılmasıyla oluşturulmaktadır [12].

Çeşitli araştırmalar, nano partiküllerin iş akışkanlarına eklenmesinin sistem performansını artırdığını göstermektedir. Bu bağlamda, mevcut çalışma, organik Rankine çevriminde daha yüksek sistem performansının elde edilmesi amacıyla nano akışkan kullanımını teorik olarak incelemektedir. Çalışmada kullanılan iş akışkanları arasında R141b, R22, R32, R123, R142b, R114 ve R600 gibi organik akışkanlar bulunmaktadır.

Bu çalışmanın özgünlüğü, seçilen iş akışkanları ve nano partiküllerin özel kombinasyonlarında yatmaktadır. İzentropik, ıslak ve kuru akışkanlar arasından yapılan seçim, R141b, R142b ve R123 gibi geleneksel iş akışkanlarının yanı sıra çevre dostu alternatifler olan R32 ve R600'yü içermektedir. Bu seçim, eski ve yeni nesil akışkanların ORÇ sisteminde birbirlerinin yerine kullanılma potansiyelini araştırmayı hedeflemektedir.

Termodinamik hesaplamalar, Engineering Equation Solver (EES) programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. EES programının tercih edilme nedeni, geniş bir termodinamik veri tabanına sahip olması ve birçok malzemenin ve çalışma akışkanının termodinamik özelliklerini içermesidir. Ayrıca, EES programı, karmaşık denklemleri çözmek ve farklı akışkan kullanımlarının sistem performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için gelişmiş matematiksel yeteneklere sahiptir.

İlk aşamada, seçilen iş akışkanlarının kritik basınç ve sıcaklıkları belirlenmiş ve türbin giriş basıncı, 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 ve 0,9 basınç oranları için hesaplanmıştır. Türbin girişinde iş akışkanının doymuş buhar eğrisi üzerinde kabul edilerek ORÇ sistemi verimi hesaplanmıştır. Bu seçim, türbinin iş akışkanını doymuş buhar fazında işlettiği durumu ifade etmektedir, bu da enerji dönüşümündeki kayıpları minimize etmeyi amaçlamaktadır.

Daha sonra, seçilen iş akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partiküllerin eklenmesiyle oluşturulan nano akışkanların termo-fiziksel özellikleri, EES programı kullanılarak detaylı bir şekilde hesaplanmıştır. Nano partikül seçimi, iş akışkanlarının ısı transfer özelliklerini artırmayı hedeflemekte olup, yüksek ısı iletkenliği ve termal kararlılık gibi avantajlar sağlamaktadır.

Çalışmada belirlenen kondenser çıkış sıcaklığı, çeşitli faktörlerin etkisi altında özel bir değer olarak belirlenmiştir. Bu karar, çevresel etkiler ve kullanılan akışkanların özellikleri gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Seçilen iş akışkanlarının termodinamik özellikleri ve stabiliteleri, kondenser çıkış sıcaklığının belirlenmesinde kritik bir rol oynamıştır ve bu akışkanların belirli sıcaklık koşullarında verimli bir şekilde çalışabilmeleri amaçlanarak 20 derece olarak tercih edilmiştir. Nano akışkanın termo-fiziksel özellikleri, iş akışkanlarının sıvı fazda olduğu 20°C durumu için özel olarak belirlenmiştir.

Araştırmanın sonraki aşamalarında, oluşturulan nano akışkanlarla ORÇ sisteminin performansı değerlendirilmiş ve belirlenen basınç oranları için her bir kütle konsantrasyonu kullanılarak ORÇ sistemi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu süreç, seçilen akışkanların termodinamik özelliklerini belirleme ve ORÇ sisteminin performansını değerlendirme süreçlerini birleştirerek daha kapsamlı ve etkili bir çözüm stratejisi sunmaktadır.

Bu tez çalışması beş farklı kısımdan oluşmaktadır;

1. Giriş kısmında, ülkemizin enerji kullanımına değinilmiş, ORÇ sistemi ve nano akışkanlardan kısaca bahsedilmiştir.
2. Literatür araştırması ve kuramsal temeller kısmında, ORÇ sistemi ve nano akışkanlarla ilgili teorik bilgiler sunulmuştur.
3. Materyal ve yöntem kısmında, ORÇ sistemi tanıtılarak ORÇ sisteminde nano akışkan kullanımı modellenmiştir.

4. Sonuçlar ve tartışma kısmında, kullanılan akışkanların EES programı yardımıyla oluşturulan ORÇ sisteminin verileri hesaplanarak grafikler haline getirilmiştir.
5. Sonuç kısmında, ORÇ sistem verileri analiz edilerek ayrıntılı biçimde değerlendirilmiş ve çeşitli öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tez çalışmasının bu kısmında ORÇ sistemi, organik akışkanlar, nano partiküller ve nano akışkanlar hakkında bilgiler yer almaktadır. Literatür taraması, ORÇ sistemi ve nano akışkanlar hakkında yapılan araştırmaları kapsamaktadır.

Jradi ve Riffat, yaptıkları çalışmada Stirling Çevrimi ile organik Rankine çevrimini karşılaştırmışlardır. Belirli işletme koşullarında Stirling çevriminin, Organik Rankine Çevriminden daha yüksek verimliliğe sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak düşük ısı kaynağı sıcaklıklarında Stirling çevriminin daha düşük verimlilik yaşadığını ve aynı zamanda daha yüksek sermaye maliyetine ihtiyaç duyduğunu, bu nedenle düşük sıcaklıklarda kullanmak için daha az tercih edilen bir çözüm yolu olduğu çalışmalarında belirtilmiştir [7].

Cotana ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, biyokütle projesine uygulama için bir organik Rankine çevrimi ve bir Stirling Çevrimini karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, gaz yakıcısı tarafından üretilen nispeten yüksek sıcaklıklarda Stirling Çevrimi'nin daha fazla güç ürettiğini bulunmuştur. Ancak organik Rankine çevrimine kıyasla artan sermaye maliyeti, her iki sistemin genel geri ödeme süresinin aynı olmasına neden olmuştur [13].

Stirling, Ericsson ve Brayton çevrim sistemlerinde çalışma akışkanı çevrim boyunca gaz fazında kalmaktadır. Brayton Çevrimi, tamamen buhar fazında çalışan ve hem açık hem de kapalı bir çevrim olarak çalışabilen bir termal çevrimdir. Rankine çevriminde ise çalışma akışkanı dönüşümlü olarak buharlaşmakta ve yoğunlaşmaktadır.

Nemati ve diğerleri, çalışmasında belirli koşullarda Kalina Çevriminin ORÇ'ye göre daha düşük bir türbin boyut parametresine sahip olduğunu bulunmuştur. Fakat organik Rankine çevriminin daha düşük işletme basıncına ve türbin girişinde aşırı ısınmış buhar sağlama avantajına sahip olmasından dolayı daha iyi bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır [14].

Zare ve Mahmoudi, yaptıkları Kalina çevrimi ile ORÇ karşılaştırmasında ORÇ'nin daha iyi bir çevrim olduğu sonucuna varılmıştır. Türbin girişinde buharı aşırı ısırma potansiyeli,

yüksek verimlilik, daha düşük karmaşıklık ve işletme sırasında daha düşük basınç gibi nedenlerle ORÇ daha uygun bulunmuştur [15].

Wang ve diğerleri, yaptıkları çalışmada endüstriden çoklu akışlı atık ısının geri kazanımı için ORÇ ve Kalina çevrimlerinin termodinamik performansını karşılaştırdı. Kalina Çevrimi'nin ısı kaynağı sıcaklığı için ORÇ'ye göre daha yüksek bir termodinamik performansa sahip olduğunu bulunmuştur [16].

Fu ve arkadaşları, çalışmalarında Kalina çevriminin 150°C'nin üzerindeki ısı kaynakları için benzer ORÇ'ye göre daha yüksek özgül net güç üretimi gösterdiğini ve bu avantajın ısı kaynağı sıcaklıklarının artmasıyla arttığı sonucuna varmışlardır. Bunun nedeni, faz değişimi sırasında artan sıcaklık kaymasından kaynaklanmış olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, belirli koşullarda Kalina Çevrimi için gereken işletme basıncının ORÇ için gereken daha yüksek olduğundan bahsedilmiştir [17].

Bianchi ve De Pascale, yaptıkları çalışmada ORÇ'nin düşük sıcaklıklarda Brayton Çevrimi ve Stirling Çevriminden önemli ölçüde daha verimli olduğuna sonucuna ulaşmışlardır [6].

Refiei ve arkadaşları yaptıkları çalışmada güneş enerjisiyle çalışan bir organik rankine çevrimi sistemini ekonomik yönden, termodinamik yönden ve çevresel olarak incelenmişlerdir. Güneş enerjisinin ısı transferi kısmında çalışma akışkanı olarak MWCNT/yağ kullanışmış olup ORÇ sisteminde çalışa akışkanı olarak ise R113 organik sıvısı seçilmiştir. Güneş enerjisi sisteminde silindirik ve yarım küresel boşluklu alıcılar karşılaştırılmış ve yarı küresel boşluk alıcılı ORÇ sisteminin daha olumlu çevresel etkiye neden olduğu sonucuna varılmıştır. Bir yandan da bu sistemlerde nanoakışkan kullanımını karşılaştırılmıştır. Yarı küresel boşluk alıcılı güneş enerjisi sisteminde nanoakışkan kullanımının sistem verimliliğinin %21.4 olduğu, saf termal yağ kullanıldığında ise sistem verimliliğinin %18.9 olduğu görülmüştür [18].

Zhang ve arkadaşları, Japonya'nın Osaka şehri için yaz aylarında 217,4°C ve kış aylarında 137,0°C olmak üzere ortalama yıllık değeri 177,4°C olan bir termal akışkan sıcaklığı rapor etmişlerdir. Bu sıcaklık değişiminin çevrim için önemli sorunlara neden olduğunu belirtmişlerdir [19].

Tiwari ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada ters emici hibrit fotovoltaik termal bileşik parabolik yoğunlaştırıcı sistemli ORÇ'nin termodinamik analizini yapmışlardır. Çalışmanın temel amacı, güneş enerjili ORÇ sisteminin genel performansını artırmak amacıyla çevresel dengesizlik nedeniyle ortaya çıkan tehdidi azaltmak ve artan enerji talebini karşılamak için bir çaba gösterilmektedir. Saatlik performans değerlendirmesi, güneş enerjili ORÇ sistemi için yoğuşturucu çıkış sıcaklığı, buharlaştırıcıdaki ısı kazancı ve toplam termal ve eksarjik verimlilik açısından değişen konsantrasyon oranları için yapılmıştır. Çalışma, düşük kaliteli yenilenebilir ısı kaynağının güneş elektrifikasyonuna, güneş sulamaya, güneş soğutma ve güneş su arıtmasına dönüştürülmesinin faydalılığını ortaya koymaktadır. Güvenilir zeotropik karışım kullanarak güç üretimi için düşük dereceli ısı kaynağı kullanma amacıyla fotovoltaik termal ve bileşik parabolik yoğuşturucunun bir arada kullanılmasıyla ilgili görüş belirtilmişitr. Çalışmanın bulguları, matematiksel modelleme yapılırken ve deneysel kurulumun yapılmasında belirgin yönleri tanımlamak için faydalı olacağı yönünde tavsiyede bulunulmuştur [20].

Helvacı, yaptığı çalışmada sıcaklık aralığı olarak 40°C ila 95°C almışlardır. Güneş kolektör veriminde %60'tan %45'e değişiklik gözlemlemişlerdir. Güneş kolektörü tarafından ORÇ sistemine sağlanan termal akışkanın sıcaklığı, güneş kolektörünün alanı tarafından güçlü bir şekilde etkilenmektedir [21].

Freeman ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada dikkatli bir çalışma akışkanı seçimi ve güneş kolektörü optimizasyonu ile 1 kW güneş enerjili bir ORÇ sisteminin motorunun termal verimliliği %50'ye kadar artırılabileceği sonucuna varılmıştır [22].

Alvi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yeni bir doğrudan güneşle çalışan ORÇ sistemi ile geleneksel dolaylı güneşle çalışan ORÇ sisteminin termodinamik performansı karşılaştırılmıştır. Doğrudan güneşle çalışan ORÇ sisteminde çalışma akışkanı güneş kolektörlerinde doğrudan buharlaştırılırken, dolaylı güneşle çalışan ORÇ sisteminde ısı transfer akışkanı kullanılarak buharlaştırma işlemi gerçekleştirilir. Sırasıyla doğrudan ve dolaylı güneşle çalışan ORÇ sistemleri için ısı transfer akışkanları olarak R245fa ve su seçilmiştir. Bununla birlikte, her iki konfigürasyon için çalışma akışkanı olarak R245fa kullanılmıştır. Doğrudan güneşle çalışan ORÇ sistemi, termal verimlilik ve net güç açısından dolaylı güneşle çalışan ORÇ sistemini aşmıştır. Bununla birlikte, dolaylı güneşle çalışan

ORÇ sisteminin şarj modu sırasında faz değişim malzemesi tarafından depolanan ortalama yıllık ısı, doğrudan güneşle çalışan ORÇ sistemine göre daha fazla olduğu görülmüştür [23].

Tzivanidis ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklık seviyelerinde güneş enerjisi yakalamak için parabolik oluk kolektörleri ile birleştirilmiş ORÇ'nin finansal ve enerjetik olarak optimize edilmesi üzerine analiz yapılmıştır. Dokuz farklı çalışma akışkanı kullanarak ORÇ'nin verimi termodinamik olarak hesaplanmıştır. En uygun bulunan dört akışkan için güneş sahası, depolama tankı ve ORÇ siteminin toplam enerjetik ve finansal durumu incelenmiştir. ORÇ'de siklohekzan, toluen, su ve MDM akışkanları çalışma ortamları için uygun bulunmuştur. Toplam sistem verimliliğinin %15'e çıkarmak için ORÇ'de siklohekzan kullanılması önerilmiştir. Yüksek toplama alanları için kapasite faktörü, yakalanan güneş enerjisi miktarının yüksek olması nedeniyle mümkün olan maksimum değere yaklaştığı sonucuna ulaşılmıştır [24].

Wu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada düz levha güneş kolektörleri kullanarak 95°C bir termal akışkan sıcaklığı üretebildiklerini ve çevrimin genel maliyetinin güneş kolektörleri tarafından domine edildiğini bulmuşlardır, bu nedenle güneş enerjisi ile çalışan ORÇ sistemlerinin optimize edilmesi için birincil hedef olduklarını belirtmişlerdir [25].

Shahverdi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı soğutucu çalışma akışkanları ile güneş ORÇ sistemi ve Arşimed Vidası Türbini (AST) kombinasyonu kullanarak enerji toplama üzerine incelemede bulunmuşlardır. Araştırmada, bir Arşimed Vidası Türbini ve bir güneş ORÇ sistemi kombinasyonu kullanarak enerji toplama amacıyla bir enerji toplama sistemi geliştirilmiştir. AST, mekanik güç üretmek için bir enerji toplama tekniği olarak sayısal olarak kullanıldı ve optimize edilmiştir. Vidanın eğim açısı, uçuş sayısı ve vidanın uzunluğu gibi farklı yapısal parametreler dikkate alınmıştır. ORÇ sisteminin ısıl kaynağı olarak sayısal olarak bir parabolik oluklu toplama sistem modeli oluşturulmuştur. İki farklı türde absorban, düz ve oluklu tüp kullanılarak incelenmiştir. Güneş ORÇ sisteminde R134a, R245ca, R245fa, R152a, R113, R11 ve R114b gibi farklı ORÇ çalışma akışkanları araştırılmıştır. Sayısal modellemenin sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulanmış ve iyi bir uyum bulunmuştur. Sonuçlar, diğer incelenen çalışma akışkanlarına göre doymuş koşullarda türbin girişinde R113'ün en yüksek ORÇ net güç, ORÇ verimliliği ve toplam verim sağladığını göstermiştir. Bir güneş ORÇ sistemi ve bir vida türbini, hibrit sistem dahil olmak üzere güç üretim sisteminin optimize edilmiş özellikleri enerji toplamak amacıyla sunulmuşutr.

Sunulan hibrit sistem uygulaması, ORÇ güç üretimini artırmak ve optimize etmek için kabul edilebilir bir yol olarak ortaya konulmuştur [26].

Boyaghchi ve Heidarnejad, ORÇ sistemine dayalı evsel bir güneş birleşik soğutma-isıtma-enerji çevrimi sisteminin termo ekonomik analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, çoklu hedefli optimizasyon için genetik algoritmalar kullanılarak termodinamik ve ekonomik modeller öne sürülmüştür [27].

Jeotermal ısınma kaynakları, ORÇ uygulaması için düşünülen yaygın bir ısı kaynağıdır [28, 29]. Literatürde jeotermal ısı kaynağı sıcaklıkları ve çevrim konfigürasyonlarının çeşitli türleri bulunmaktadır [30, 31].

Akkurt yaptığı çalışmada ORÇ'de enerji kaynağı olarak düşük sıcaklığa sahip jeotermal enerjiyi seçmiştir. Çevrim sisteminin ekserji ve enerji analizini yapmıştır. Enerji kaynağı 50-100ºC aralığında düşük jeotermal kaynaktır. ORÇ sisteminde çalışma akışkanı olarak R141b, R245fa, R123 ve R134a kullanılmıştır. Değişen jeotermal sıcaklık değerleri için her bir akışkan için ayrı ayrı termodinamiğin birinci ve ikinci yasasının analizi yapılmıştır. Kaynak sıcaklığının debisi için sistemin net işi ve ORÇ'yi oluşturan her ünite için ekserji yıkım miktarı yüzde olarak belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda sistem için en fazla net iş R134a akışkanının kullanıldığı durumda olmuştur. Jeotermal kaynak debisi ve jeotermal kaynak sıcaklığı arasında ters bir orantının olduğu görülmüştür. Sistemin termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre verimi en yüksek R141b akışkanının kullanıldığı durumda bulunmuştur [32].

Tartiere ve arkadaşları, küresel kurulu ORÇ kapasitesinin %74'ünün jeotermal olduğunu bildirmekte olup, sayı bazında diğer uygulamalardan daha yüksek bir güç çıkışına sahip oldukları için jeotermal sistemlerin bu payının daha düşük olduğunu belirtmektedir [33]. Barbier küresel jeotermal enerji potansiyelinin yaklaşık %70'inin 130°C'den düşük sıcaklıklarda olduğunu tahmin etmektedir [34].

Ata ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ORÇ'de ısı kaynağı olarak jeotermal enerjiyi kullanmışlardır. ORÇ'de çok sık kullanılan 12 organik akışkan akışkan tipine göre kuru ve izentropik olarak seçilmiştir. Kaynak ısı sıcaklığı 110ºC kabul edilerek buharlaştırıcının çevreden çektiği sıcaklığı aralıklarında sistem performansı belirlenmiştir. Türbin işi, giren

ısı miktarı, ısıl verim, tersinmezlik değerleri gibi veriler Engineering Equation Solver programı kullanılarak hesaplanmış ve akışkanlar için karşılaştırılmıştır. Kuru tip akışkanlar olarak; RC318, R114, R600a, R600, R601a ve R601 seçilmiştir. İzentropik akışkanlar olarak ise; R141b, R142b, R245fa, R123, R124 ve R227ea seçilmiştir. Kuru akışkanlar arasında ısıl verim ve türbin işi bakımından R601 akışkanının en yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. İzentropik akışkanlar arasında ise ısıl verim ve türbin işi bakımından R141b akışkanının en yüksek değerlere ulaştığı sonucuna ulaşılmıştır. Çevresel faktörler göz önüne alındığında ise ORÇ sistemi için R601 akışkanının kullanılması durumunda daha iyi olduğu değerlendirilmiştir [35].

Walraven ve diğerleri, yaptıkları çalışmada, su soğutmalı ve hava soğutmalı sistemleri karşılaştırmayı amaçlayan jeotermal enerji ile çalışan ORÇ sistemini analiz etmişlerdir. Çalışmada hava soğutmalı sistemlerin parazitik gücünün, benzer sıvı soğutmalı sistemlere göre iki katı olabileceğini ve bileşenlerin sermaye maliyetinin bunların eşdeğerleri olduğunun %150 daha fazla olabileceğini belirtilmiştir [31].

Cao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada geleneksel jeotermal enerjiyi yardımcı ısı kaynağı olarak kullanan güneş enerjisi kullanımı için Brayton ve Organik Rankine çevriminin birleşik konseptinde termodinamik analizi ve optimizasyonu incelemişlerdir. Güneş enerjisi kullanımı için bir süperkritik CO_2 Brayton ve organik Rankine (sCO_2-ORÇ) birleşik çevrimin incelenmesini sunulmuştur. Bu birleşik çevrim, termodinamik performansını artırmak için tipik jeotermal enerjiyi yardımcı ısı kaynağı olarak kullanmaktadır. Organik çalışma akışkanı, süperkritik karbondioksitten ısısını alır, bu karbondioksit ise güneş enerjisi kulesinden ısı emer ve ardından bir turbo makine içinde genişler. Daha sonra jeotermal kaynak, organik çalışma akışkanının sınıfını artırır, ardından genişler. Bu birleşik çevrimin termodinamik performansını tahmin etmek için bir çözüm prosedürü önerilmektedir. Sonuçlar, CO_2 destekli jeotermal sistemi yardımcı ısı kaynağı olarak kullandığında, geri sıkıştırma birleşik çevrimin en iyi termodinamik performansa sahip olduğunu göstermektedir. Birleşik çevrim için en uygun organik çalışma akışkanı R245ca'dır. Bulgular birleşik çevrimin güneş enerjisi ve yardımcı jeotermal enerjiyi kullanma termodinamik avantajına sahip olduğunu göstermektedir [36] .

ORÇ sistemini kullanan pek çok uygulama bulunmaktadır. Bunlar arasında atık ısı geri kazanımı önemli bir yer tutmaktadır. Organik Rankine çevrimleri, genellikle daha yüksek

sıcaklıkta olan çevrimlerin Brayton Çevrimleri veya diğer Rankine Çevrimleri için alt çevrimler olarak kullanılmaktadır [37].

Loni ve arkadaşları çalışmasında ORÇ ile enerji üretimi için endüstriyel atık ısı geri kazanım sistemi hakkında bir inceleme yapmışlardır. Atık ısı geri kazanma, atık enerjiyi yeniden kullanarak faydalı enerji ürünleri üretme etkili bir yoldur. Bu teknik, CO_2 emisyonlarını azaltmaya yardımcı olur ve sürdürülebilir ve verimli sistemler oluşturmaya yardımcı olur. Çalışmanın temel amacı, ORÇ ile atık ısı geri kazanma üzerine yapılan çalışmaları özetlenmiş ve tartışılmıştır. ORÇ, atık ısı geri kazanma teknolojileri içinde yaygın bir tercih olmuştur çünkü bu çevrim düşük, orta ve yüksek sıcaklıkta ısı kaynaklarıyla çalışabilir ve bu nedenle yüksek esneklik ve atık ısıyla uyumluluk sunar. Bu çalışmanın yeniliği, incelenen teknolojinin farklı yönlerinin yanı sıra ORÇ ile atık ısı geri kazanma temeline dayanan kojenerasyon sistemlerinin incelenmesine dayanmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, atık ısının verimli bir şekilde elektrik üretmek için cazip bir yol olduğunu göstermektedir. Atık ısı ile kojenerasyon, yüksek genel verimliliklere ve atık enerjinin optimal kullanımına yol açabilecek umut verici sonuçlarla alternatif bir tasarım da sunulmuştur [5].

Papapetrou ve arkadaşları çalışmasında AB ülkelerinde endüstriyel atık ısın incelenmiş olup, geri kazanılabilir ve kullanılabilir olan miktarına odaklanılmış, bu miktar atık ısının teknik potansiyeli olarak adlandırılmıştır. Atık ısın kesirleri bu çalışmada her ana endüstri sektörü ve sıcaklık seviyesi için hesaplanmıştır. En son verileri kullanarak her sektör ve sıcaklık seviyesine göre atık ısının potansiyelini ayrıntılı bir şekilde incelemesine olanak tanımıştır. Bu analiz, her AB ülkesi için de aynı şekilde yürütülmüş, böylece her ülke düzeyinde her endüstri sektörü için mevcut ısın geri kazanma fırsatlarının büyüklüğünü belirlemek amaçlanmıştır. Bu çalışmanın bulguları, ısın yükseltme ve yeniden kullanma veya ısından enerjiye dönüştürme teknolojileri gibi ilgili ısın geri kazanma uygulamalarının potansiyelini değerlendirmek için kullanılabileceği düşünülmüştür [38].

Zhao ve arkadaşları çalışmasında düşük sıcaklık ısı geri kazanımında kullanılan organik Rankine çevrimi için genleşme cihazlarını incelemişlerdir. ORÇ sistemlerinin çalışmaları ve uygulamaları, düşük sıcaklık ısı kaynaklarının geri kazanılması konusundaki avantajları nedeniyle son yıllarda artmaktadır. Birçok araştırmacı tarafından ORÇ sistemlerinin çalışma akışkanı seçimi, sistem tasarım yöntemleri, ekipman ve uygulamaları araştırılmıştır. Genleşme cihazları, ORÇ sistemleri için temel ekipmandır. ORÇ sistemleri için genleşme

cihazlarının gözden geçirilmesi sunulmuştur. Scroll, vidalı, piston, kanat, türbin ve ejektör cihazları ORÇ sistemleri için ele alınmıştır. Burada sunulan gözden geçirmenin, daha önce yapılanları özetleyebileceği ve ORÇ sistemleri için genleşme cihazlarını seçme ve performanslarını iyileştirme konusunda araştırmacılara bilgi ve fikirler sunabileceği düşünülmektedir [39].

Önal ve arkadaşları yaptıkları çalışmada basit ORÇ ve rejeneratif organik çevriminin termodinamik analizini Engineering Equation Solver programı kullanarak çözümlemişlerdir. Çevrimlerde çalışma akışkanı olarak R13, R600, R22, R245fa, R123,R134a, izobütan, izopentan ve propan kullanılmıştır. Çevrimlerin enerji kaynağı olarak düşük sıcaklıklı atık su değerleri baz alınmıştır. Tasarlanan her iki çevrim için atık akışkanın sıcaklığı debiis sabit kabul edilmiştir. Her akışkan için çevrimlerin optimum çalışma koşulları belirlenmiştir. Belirlenen değerler aralığından en yüksek verim değerine ulaşan akışkan izopentan olmuştur. Çalışma aralığı değerlerinde kullanım sınırları içerisine giremeyen akışkan R13 olduğu gözlemlenmiştir [40].

Unamba ve arkadaşları yaptığı çalışmada atık ısıtmadan güç üretmek için ORÇ teknolojisinin deneysel olarak geliştirilmesi üzerinedir. Küçük ölçekli bir ORÇ prototipinin tasarımını ve inşasını rapor etmekte ve çeşitli koşullar altında işleyişini incelemektedir. Bu çalışma, ORÇ motorunun kısmi yük performansı ile ilgili yüksek sadakatli sürekli durum ve geçişli verilere ulaşmayı amaçlayarak R245fa çalışma akışkanı ile gerçekleştirilen deneysel testler ve ilgili araştırmaların sonuçlarını sunmaktadır. Deneysel düzenek, döner kanatlı bir pompa, lehimli plakalı buharlaştırıcı ve kondansatör ile ayarlanabilir bir yükle bir genleştiriciden oluşmaktadır. Evaporatöre sıcak yağ akışı sağlamak için 100°C ile 140°C arasındaki farklı sıcaklıklarda bir elektrikli ısıtıcı kullanılmaktadır. Çeşitli ısı kaynağı koşullarında, en iyi işletme koşulları, yani pompa hızı ve genleştirici yükü belirlenmiş ve motorun kısmi yük performansını analiz etmek için sürekli durum veri noktaları kullanılmıştır. Bir bileşen ölçeği performansını ve genel sistem performansını yakalayan bir performans haritası çizilmiştir [41].

Enayatollahi yaptığı çalışmada ağır hizmet uygulamaları için atık ısı geri kazanım sistemlerinin modellenmesi ve kontrolü üzerine araştırmalarda bulunmuştur. Atık ısı geri kazanma sisteminin güvenli işleyişini ve ağır hizmet dizel motorlarından gelen çeşitli atık ısı aralıklarındaki geçici ısı kaynaklarına maruz kaldığında iş çıkışını istikrarlı hale getirme

amacıyla yeni bir kontrol yaklaşımı önerilmektedir. Kontrol stratejisi, buharlaştırıcı çıkışındaki aşırı ısınmayı pompa hızını ayarlayarak kontrol etmek için ORÇ sisteminin ters dinamiğine dayalı bir nöro-bulanık denetleyici ve genişletici iş çıkışını düzenlemek için bir PI denetleyici içerir. Kontrol stratejisinin, set noktası takibi açısından performansı ve gürültünün varlığında sağlamlığı açısından incelenir. Simülasyon sonuçları, nöro-bulanık tekniklere dayalı ileri besleme ve geri bildirim denetleyicilerinin birleşimi ile denetleyici performansında bir iyileşme göstermektedir. Önerilen kontrol şeması, çeşitli yük koşullarında tatmin edici geçici yanıt elde etmekle kalmaz, aynı zamanda istenmeyen girişim reddetme performansına ulaşılabileceği görülmüştür [42].

Kavasoğulları ve Cihan yaptıkları çalışmada atık ısı kaynaklı ORÇ ile birlikte çalışan soğutma çevriminin termodinamik analizi yapılmıştır. ORÇ sistemi için çalışma akışkanı olarak R600a, R141b, R600, R245fa ve R123 olmak üzere beş farklı akışkan seçilmiştir. Akışkanların termodinamik özellikleri araştırılmış, ıslak, kuru ve izentropik olarak akışkan tipleri belirlenmiştir. Sistem ünitelerinin buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve kazan gibi elemanların kaynak sıcaklığındaki değişime göre ekserji ve enerji analizi hesaplanmıştır. En düşük ekserji yıkımı, en yüksek ekserji verimi ve en yüksek enerji verimi gibi sonuçlarda çalışan beş akışkan için değerlerin birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Akışkan sıralamasında enerji verimliliği açısından R141b organik akışkanının en yüksek verimde olduğu görülmüştür. R141b organik akışkanının ardından R123 ve R245fa akışkanlarının kullanıldığı durumlar gelmektedir. Fakat R141b akışkanının ozon delme potansiyeli gibi çevresel değerleri diğerlerine göre daha yüksek olduğu için çevrim sisteminde kullanılması sakıncalı bulunmuştur. R600a ve R600 akışkanlarının çevresel değerleri oldukça düşük olmasından dolayı sistemde kullanılması için uygun bulunmuştur [43].

ORÇ sistemleri ayrıca kojenerasyon veya birleşik ısı ve güç sistemlerinde de kullanılmaktadır [44, 45].

Cihan yaptığı çalışmada buhar sıkıştırmalı soğutma çevriminin ORÇ ile birleştirildiği bir sistemin analizini hesaplanmıştır. ORÇ'nin ısı kaynağı olarak atık ısı seçilmiştir. ORÇ'de kullanılan akışkanların tiplerine göre kuru tip akışkanlardan R600, R600a ve R601 akışkanları seçilmiştir. Bu akışkanlara göre toplam sistem için üç hesaplama yapılmıştır. Sistem değişkenleri olarak kazan sıcaklığı, yoğuşturucu sıcaklığı ve buharlaştırıcı sıcaklığı alınmış olup üç akışkan için bulunan değerler R245fa akışkanının ORÇ değerleriyle

karşılaştırılmıştır. Sistemin performans değerleri karşılaştırıldığında; güç çevrim performansı açısından akışkanların değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Soğutma çevrimi performansı incelendiğinde ise en yüksek değerin R601 akışkanında olduğu, en düşük değerin R600a akışkanı için olduğu görülmüştür. Fakat sistem tasarımında türbin boyutu, maliyet, ağırlık gibi faktörler dikkate alındığında R600a akışkanı daha uygun bulunmuştur [2].

Collings ve Yu yaptıkları çalışmada teorik ve deneysel olarak ORÇ'yi analiz etmiştir. İlk olarak, MATLAB'da bir küçük ölçekli ORÇ analiz etmek için termodinamik bir model geliştirilmiştir. Bu model, genellikle literatürde sıkça görünen iyi kurulmuş analitik modelleme prensiplerine dayanmaktadır. Bu temel model, bir ORÇ'nin performansı üzerinde bir rejeneratörün etkisini araştırmak için R245fa ve R134a gibi iki çalışma akışkanının bir karışımı yapılarak çalışma akışkanı oluşturulmuştur. Deneysel düzenden elde edilen sonuçlar ve bunları doğrulayan model kullanılarak, Dinamik Organik Rankin Çevrimi konsepti sunulmaktadır. Bu çevrimin teorik analizi MATLAB'da yapılmış ve çevrimin çevresel iklim koşullarında yıl boyunca güç üretiminde önemli bir artışa neden olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar, 150°C sıcaklıkta bir ısı kaynağı için %8-10'a kadar, 100°C ve altındaki ısı kaynağı sıcaklıkları için %23'e kadar hesaplanmıştır. Son olarak, dinamik ORÇ'nin teorik analiz sonuçları sunulmuş olup verilerde gözlemlenen eğilimleri açıklamak için REFPROP akışkan özellikleri programının yardımıyla analiz edilmiştir [46].

Yağlı ve arkadaşları yaptıkları çalışmada buhar ve güç bir kogenerasyon sistemine alt devre olarak kullanılan ORÇ2nin optimizasyonu ve enerji analizi incelenmiştir. ORÇ'nin çalışma akışkanı olarak benzen, hekzan, siklohekzan, toluen, R601, R600, R123 ve R11 olmak üzere sekiz akışkan seçilmiştir. ORÇ'nin parametrik optimizasyonu sırasında türbin giriş basıncı 10 bardan 35 bara yükseltilirken, türbin giriş basıncı doymuş buhar sıcaklığından akışkanın maksimum sıcaklığına yükseltilmiştir. En iyi performans gösteren çalışma akışkanı, ORÇ türbin giriş basıncı 10 bar ile 25 bar arasında benzen olarak bulundu. 25 bar'ın üzerindeki ORÇ türbin giriş basıncında ise R123 en yüksek performansı göstermiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda maksimum güç üretimi ve en yüksek termal verim organik rankine çevriminde R123 kullanıldığında elde edildi. Ancak, R123 ile yapılan ORÇ'nin en yüksek net güç üretimine sahip olsa da, ORÇ sisteminin R11 ile geri ödeme süresi minimum olarak hesaplanmıştır [3].

Şahin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada R1234yf, R134a ve R1234ze akışkanlarının kullanıldığı iç ısı değiştiricili ORÇ'nin ekserjisini ve enerjisini analiz etmişlerdir. Basit ORÇ sistemine iç ısı değiştiricisi eklenerek buharlaştırıda akışkanların daha yüksek sıcaklıklara ulaşması sağlanmıştır. Sistem verimliliğinin artırmak için yoğuşturucu sıcaklığının düşmesi iç ısı değiştiricisi ile mümkün olduğu görülmüştür. İç ısı değiştirici eklenen ORÇ sistemini oluşturan her bir ünite için termal verim değerleri hesaplanmış olup her biri için ekserji yıkım değerleri bulunmuştur. Yoğuşturucuda en fazla ekserji yıkımının gerçekleştiği, ısı değiştiricisinde ise en düşük ekserji yıkımının olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma akışkanlarının termal verimleri karşılaştırıldığında ise R134a akışkanın en verimli olduğu fakat küresel iklim değişikliği potansiyeli değerinin çok yüksek olmasından dolayı alternatif olarak R1234yf akışkanı önerilmiştir [47].

Ngangue ve arkadaşları ORÇ ve buhar sıkıştırma-emilim döngülerini birleştiren yüksek verimli bir entegre güç soğutma sistemi için çalışma akışkanı seçimi üzerine çalışmışlardır. ORÇ ve buhar emilim çevrimi ve buhar sıkıştırma çevrimi birleştiren yeni bir ısın geri kazanımı kojenerasyon sisteminin performans değerlendirmesini sunmaktadır. Buhar emilim çevriminde çalışma akışkanı olarak NH3-NaSCN seçilmiştir. ORÇ'de yedi farklı soğutucu incelenmiş ve buhar sıkıştırma döngüsü dahilinde sistemin yüksek verim elde etmesine izin verecek akışkanı belirlemek için çalışılmıştır. Bu akışkanlar, düşük Küresel Isınma Potansiyeli ve Ozon Delme Potansiyeli nedeniyle seçilmiştir. Termodinamik bir simulasyon, buhar emilim çevriminin uygun işletme koşullarını belirlemeye yardımcı olmuştur. Yapılan analiz sonucunda enerji ve ekserji verileri, sistemin tropikal bölgede çalışması için uygun çalışma akışkanının R717 olduğunu göstermiştir [48].

Lakew ve Bolland, yaptıkları çalışmada 160°C'nin altındaki ısı kaynakları için en yüksek gücün R227ea tarafından sağlandığını bulmuşlarsa da, bu sıcaklığın üzerindeki ısı kaynakları için R245fa'nın daha iyi performans sergilediğini bulmuşlardır [49].

Boydak ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ORÇ sisteminde altı farklı çalışma akışkanı kuru, ıslak ve izentropik türde seçilmiş ve simülasyon yazılımı ile çevrim çalıştırılmıştır. R32, R113, R11, R152a, R245fa ve R134a organik sıvıları çalışma akışkanı olarak kullanılmıştır. Sistem termodinamik açıdan analiz edilerek termal verim değerleri hepsi için ayrı ayrı bulunmuştur. En yüksek verim değerine R11 organik sıvısı ile ulaşıldığı, en düşük verim değerinin ise R32 akışkanı ile alındığı sonucuna ulaşılmıştır. R11 akışkanının oluşturulan bu

simülasyon için uygun olduğu, R11 akışkanının güvenliliğinin makul olduğu değerlendirilmiştir. Sistem için ikinci akışkan olarak R113 organik sıvısı bulunmuştur [50].

Dai ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 145°C'lik bir ısı kaynağı için R236ea'nın en yüksek ısı kaynağı kullanımını sağladığını bulmuşlarsa da, en yüksek birinci yasa verimliliğinin R113 kullanılarak elde edildiğini belirlemişlerdir [51].

Çalışma akışkanı ön seçim yönteminde, White ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ORÇ çalışma akışkanlarının bilgisayar destekli moleküler tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Bilgisayar destekli moleküler tasarımın çerçevesi içinde ORÇ sistemlerinden belirli uygulamalarda en iyi termodinamik ve termo ekonomik performansa izin veren eş zamanlı olarak optimize edilmiş çalışma akışkanlarını ve ORÇ sistem koşullarını önermek için yazılım kullanılmıştır [52].

Hung, aynı güç çıkışını elde etmek için hidrokarbon çalışma akışkanlarına kıyasla soğutucuların daha yüksek akış hızları gerektiğini bulmuştur. Genellikle soğutucuların hidrokarbonlardan daha yüksek maliyetli olmasına ek olarak, bu durum onun daha büyük kapasiteli sistemler için daha çekici bir seçenek yapacağı sonucuna varmıştır [53].

Mago ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, R113, R245ca, R123 ve izobütan gibi kuru tip çalışma akışkanları kullanarak geri dönüşümlü ORÇ sisteminin, benzer bir güç çıkışı için daha az atık ısı gerektiren, dolayısıyla ekserji verimini etkileyen daha yüksek verimliliğe sahip olduğunu göstermişlerdir [54].

Zhang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, hidrokarbon çalışma akışkanlarının verilen bir ısı kaynağından daha yüksek bir güç çıkışı sağladığını bulmuşlardır [55].

Orta veya yüksek sıcaklık ısı kaynakları ile çalışan ORÇ sistemi için Yu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, bir dizel motorun atık ısısının geri kazanımı için bir kaskad Rankine çevrimi-ORÇ test düzeneği inşa etmişlerdir. Çalışmada, farklı ısı kaynağı koşullarında sistem performansı test edilmiştir. Net güç çıkışı, varsayılan bir türbin verimliliği %85 olarak kabul edildiğinde 12 kWe olarak tahmin edilmiştir [56].

Geleneksel ORÇ sistemlerinde ilerleme kaydedilmekle birlikte, net güç üretimini optimize eden ve bileşenlerdeki kaybı minimize eden yeni teknolojiler aranmaktadır.

Zhang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, R123, R600, R245fa, R245ca ve R600a'nın termal ve ekserji verimliliği açısından en iyi sonuçları verdiğini bulmuşlardır. R218, R125 ve R41, belirli bir kaynaktan maksimum ısıyı en iyi geri kazandırmaktadır. R152a, R134a, R600 ve R143a en düşük ısı değiştirici alanını gerektirmiştir ve R152a, R600, R600a, R134a, R143a, R125 ve R41, analiz edilen koşullar altında sistem için genelleştirilmiş enerji maliyeti açısından iyi performans sergilemiştir [57].

Literatürde belirtilen nano akışkanların potansiyel kullanım alanları arasında nükleer reaktörler, güneş kolektörleri, elektronik soğutma ve ısı boruları gibi enerji sektörü, kimya endüstrisinde kullanılan ısı değiştiriciler, gıda, çevre, atık ısı geri kazanımı, soğutma ve otomobil radyatörleri bulunmaktadır [58, 59]. Literatür ayrıca nano akışkanların uzay ve savunma endüstrisinde, mikro reaktörleri yoğunlaştırma, manyetik contalar ve atomik mühendislikte olası kullanımlarını belirtmektedir [59, 60].

Majgaonkar Amey nanopartiküllerin soğutma sistemlerinde kullanımı hakkında literatür taramış ve inceleme yapmıştır. Majgaonkar makalesinde soğutma sistemi alanında yapılan araştırmalar, nanopartiküllerin tarihsel gelişimini, üretim tekniklerini ve nanoakışkan hazırlama yöntemleri hakkında kısa bilgiler sunmaktadır. Gelecekteki araştırmaları yöntemlerine yardımcı olmak için yapılan araştırmaların verileri içeren bir veritabanı oluşturulması tavsiyesinde bulunmuştur. Çalışmada, disiplinlerarası bir çalışma yaklaşımının araştırmacılar için daha kolaylık olacağı ayrıca gelecekte nanoakışkanlar için kullanılabilecek bir kontrol listesi de önerilmektedir [61].

Şahin ve Namlı yaptıkları çalışmada nano akışkanların ısı aktarımı üzerine yapılan çalışmaları incelemişlerdir. Çalışmalardaki kararlılık süreleri ve ısı aktarımındaki artış arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Çalışmalarda kararlılığı etkileyen aşamalardan birinin de nanoakışkan hazırlama yöntemleri olduğunu gözlemlemiş, kararlılığı ölçme ve artırma yöntemleri üzerinde durulmuştur. Gelecekte nano akışkanların endüstriyel olarak çalışılabilmesi için deneysel çalışmalar ve teorik çalışmalar arasındaki farkın azalması gerektiği belirtilmiş olup bunun için de nano akışkan kararlılığındaki sorunların çözülmesinin yolları üzerinde durulmuştur [62].

Kumar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada MWCNT+R141b nano soğutucu akışkan kullanarak küçük ölçekli güneş organik Rankine çevriminin performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmanın temel amacı, küçük ölçekli bir güneş organik Rankine çevriminin termal verimliliğinin analiz edilmesidir. ORÇ sistemine ısı beslemek için düz plakalı bir güneş kollektörü kullanılmıştır. ORÇ sisteminin çalışma akışkanı olarak R141b seçilmiş olup MWCNT eklenerek nano akışkan durumuna getirilmiştir. Güneş kollektörü kısmında ise çalışma akışkanı olarak MWCNT+WO_3/su kullanılmıştır. Düz plakalı güneş kollektörü kısmında nano akışkan kullanımı ayrı değerlendirilmiş olup ORÇ sistemine etkisi incelenmiştir. Her iki sistem için nano akışkan kullanımının termal performans üzerine etkisini karşılaştırılmıştır ve enerji verimliliğinde iyileşmeler gözlemlenmiştir [59].

Prajapati ve Patel yaptıkları çalışmada atık ısı enerjisinin geri kazanılmasında kullanılan nanoakışkan bazlı ORÇ siteminin termoekonomik optimizasyonunu incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, termodinamiğin 1. yasası gereği sistem verimliliğini artırarak seviyelendirilmiş enerji maliyetinin azaltımasının incelenmesidir. ORÇ sisteminde nano partiküllerin kullanılmasının önemi ve sistem performansındaki iyileşme gözlemlenmiştir. ORÇ sisteminde çalışma sıvısı olarak R245fa seçilmiştir. Sistemde buharlaştırıcı ve yoğuşturucudaki modifikasyon çalışma akışkanına ısı transferi için kullanılan su ile nano partikül eklenmesi ile yapılmıştır. Nano akışkan bazlı ORÇ'nin çalıştırılmasının, daha büyük ölçüde enerji geri kazanımı ile sonuçlanacağı ve bu da ORÇ sistemlerinin verimliliğini artıracağı sonucuna varılmıştır [63].

Kosmadakis ve arkadaşları yaptıkları çalışmada atık ısının geri kazanımı için düşük sıcaklıklı bir ORÇ sisteminde nano soğutucu akışkanların termodinamik performansı ve maliyet etkilerini araştırmışlardır. Çalışmanın temel amacı, ORÇ sisteminde simülasyon için termodinamik model oluşturmak ve soğutucu akışkana eklenen Al_2O_3 ve Cu nano partiküllerinin enerji dengesi üzerine etkisinin incelenmesidir. Çalışma akışkanı olarak R245fa ve R1234ze soğutucu akışkanları seçilmiştir. ORÇ sisteminde ısı kaynağı sıcaklığı olarak 80-120^oC aralığı alınmış, %0 ile %10 aralığında kütle konsantrasyonlu nano partikül eklenmiş çalışma akışkanının performans iyileştirmesi tanımlanmaya çalışılmıştır. Baz akışkanda nano partikül konsantrasyonu arttıkça ORÇ sistemi için termodinamik verimliliğin arttığı görülmüştür. Sistem çalışma akışkanında nano partikül kullanılması 11,7 yıllık geri ödeme süresi getirdiği fakat duyarlılık analizinin yüksek belirsizliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır [9].

Atmaca ve arkadaşları yaptıkları çalışmada nano akışkanların güneş enerjisi kaynaklı sıcak su sistemlerinde kullanımını araştırmışlardır. Çalışmanın temel amacı, nano akışkan hazırlama yöntemleri, nano akışkan sentezlenmesi, nano akışkanların termofiziksel özelliklerinin nasıl belirlendiği ve nano akışkanların uygulama alanlarının belirlenmesi üzerine literatür araştırması yapılmıştır. Nano akışkanların güneş enerjisi kaynaklı sistemlerde ya da diğer sistemlerde nasıl kullanılacağı yönünde çözüm arayışı ve uygulamadaki engellerin kaldırılması üzerine görüş belirtilmiştir. Nano akışkan kullanılarak yapılan çalışmalarda termofiziksel özelliklerin deneysel yollarda desteklenmesi gerektiği ve termofiziksel özellikleri i.in veri tabanı oluşturulması yönünde tavsiye bulunulmuştur [64].

Zhang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kuru ve izentropik çalışma akışkanlarının yoğuşma özelliklerini tanımlamak için eğri bir üçgen tanımlanmıştır. Bu modeli kullanarak, kuru ve izentropik çalışma akışkanlarının yeni bir sınıflandırması ve organik rankine çevrimindeki uygulama özellikleri önerilmektedir. Ayrıca, kuru ve izentropik çalışma akışkanlarının teorik olarak en uygun veya teorik olarak en kötü yoğuşma sıcaklığını belirlemek için kullanılan bir yöntem önerilmektedir. Organik rankine çevriminde sisteminin pratik yoğuşma sıcaklığının belirlenmesi ve tasarımı için iyi bir yardımcı olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Kuru çalışma akışkanı, kondenserdeki ısı değişim yükünün izentropik akışkanınkinden biraz daha yüksek olmasına rağmen iyi bir seçenek olduğu ve süper kuru akışkan için rejeneratif bir sürecin yürütülebileceği gözlenmiştir [65].

Bellos ve Tzivanidis yaptıkları çalışmada nanoakışkan bazlı güneş parabolik oluk toplayıcıları ile bir organik rankne çevriminin parametrik analizi ve optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmanın temel amacı, daha yüksek sistem performansı elde etmek için nanoakışkanların güneş alanında kullanımını araştırmaktır. Güneş parabolik oluk toplayıcıları tarafından yürütülen bir ORÇ incelenen sistemdir. Baz akışkan (Syltherm 800) içerisindeki dört farklı nanoparçacık (Al_2O_3, CuO, TiO_2 ve Cu) ve ayrıca çalışma akışkanı olarak saf termal yağ incelenmiştir. İncelenen ORÇ, rejeneratif bir döngüdür ve dört organik sıvı da test edilir (toluen, MDM, sikloheksan ve n-pentan). ORÇ'deki organik akışkan ile solar alandaki çalışma akışkanı (nano akışkan) arasındaki her kombinasyonda bir optimizasyon prosedürü izlenir. Her nano partikülün konsantrasyonu ve basınç oranı (türbin girişindeki basınçtan kritik basınca) optimizasyon parametreleridir. Nihai sonuçlara göre, toluen en iyi organik sıvı ve CuO en uygun nano parçacıktır. Nano akışkanların kullanımıyla sağlanan iyileştirme, saf termal yağ ile ilgili duruma kıyasla %1,75'e kadar bulunmuştur ve

bu sonuç, bunların kullanımının güneş enerjisiyle çalışan ORÇ'lerin performansını artırabildiğini göstermektedir [66].

Bolton ve arkadaşları çalışmasında deneyler sırasında nano akışkanların mevcut kullanımını belirlemek, yapılması gereken araştırma alanlarını incelemek ve nano akışkanların kaynama ısı transferi üzerine deneysel bir analiz yapıştır. Çalışmanın temel amacında, nano akışkanlar kullanılarak kaynama rejimi için bir model oluşturmak için veri toplanması ve ısı değiştirici tasarımı yer almaktadır. Seyreltme yönteminin nano sıvıdaki ortalama parçacık boyutu üzerinde önemli bir etkisi olup olmadığını belirlemek için dört seyreltme yöntemi test edilmiştir. İnceleme sonucunda, seyreltme yönteminin ortalama parçacık boyutu üzerinde önemli bir etkisi olmadığı ancak hacim konsantrasyonu ile ortalama parçacık boyutu arasında bir korelasyon olduğu belirlenmiştir. Nano sıvı daha da seyreltildikçe ortalama parçacık çapının üssel bir şekilde arttığı, en belirgin değişikliğin yaklaşık olarak %3 hacimde gerçekleştiği gözlenmiştir [67].

Bilen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada buhar sıkıştırmalı bir soğutma çevrimi kullanmışlardır. Çevrimde çalışma akışkanı olarak R134a akışkanına alternatif olması için saf R1234yf, R1234yf/CNTs ve R1234yf/Al_2O_3 nano akışkanları kullanılmıştır. Öncelikle saf R1234yf akışkanı kullanılarak buhar sıkıştırmalı soğutma çevriminin COP değeri bulunmuş olup ardından R1234yf akışkanına nano partikül eklenerek oluşturulan nano soğutucu akışkan kullanılarak aynı veriler için COP değerleri hesaplanmıştır. R134a ve R1234yf akışkanlarının buhar sıkıştırmalı soğutma çevriminde kullanılması karşılaştırılmasında R1234yf akışkanında performans düşmesi meydana geldiği görülmüştür. R1234yf akışkanına nano partikül eklenmesi sonucu bulunan veriler karşılaştırıldığında ise R1234yf/CNTs ve R1234yf/Al_2O_3 nano soğutucu akışkanları için sistem performansında iyileşmelerin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Al_2O_3 nano partikül ilavesinin CNTs nano partikül ilavesine göre COP ve ekserji veriminde daha yüksek bir artışa neden olduğu hesaplanmıştır [68].

Cavazzini ve arkadaşları yaptıkları çalışmada enerji kaynağı olarak düşük ısı kullanan bir organik rankine çevriminde R245fa akışkanına metal organik ısı taşıyıcı nano partiküllerin katkısını incelemişlerdir. ORÇ alanındaki yenilikçi bir nanosıvı – nano partiküllerin bir baz sıvı içindeki süspansiyonları - uygulamalarının derinlemesine bir incelemesini sunulmuştur. Bu inovasyon, Metal-Organik Isı Taşıyıcılar (MOHCs) olarak adlandırılan yeni bir nano

partikül sınıfına dayanmaktadır ve bu nano partiküller, içinde bulundukları çalışma akışkan moleküllerini geri dönüşümlü olarak alıp bırakacak şekilde moleküler olarak tasarlanmıştır. Standart nano partiküller ile karşılaştırıldığında, bu MOHC'ler, sadece saf sıvı fazının gizli buharlaşma ısısının iki katına kadar olabilen endotermik adsorpsiyon entalpisinden ek ısı çekilmesini mümkün kılar. Çalışma, ORÇ sistemlerinde MOHC tabanlı nano sıvının kazancını değerlendirmek için bir sayısal modelin gelişimini anlatmaktadır. Daha spesifik olarak, baz sıvı R245fa'nın sağlam bir Metal Organik Isı Taşıyıcı olan nano partikül MIL101 ile birleştirilme olasılığı değerlendirilmiştir. Tersine adsorpsiyon/desorpsiyon sürecini uygun bir şekilde modellemek için R245fa'nın MIL101 içindeki alımını farklı işletme koşullarında incelemek için deneysel analizler gerçekleştirildi ve deneysel sonuçlardan hareketle, sayısal model içinde uygun yarı deneysel ilişkiler tanımlandı ve kullanıldı. Sistem verimliliği artışı ve ısı değiştirici alanının azalması açısından umut verici sonuçlar elde edilmiştir [69].

Li ve Xu çalışmasında düşük dereceli ısıl enerjiden verimli güç üretimi için metal organik ısı taşıyıcıları ile transkritik organik rankine çevrimlerinin termodinamik analizini yapmışlardır. Düşük dereceli enerjinin ORÇ ile elektrik üretimi için geri kazanılması, enerji krizini etkili bir şekilde hafifletebilir ve CO_2 emisyonunu azaltabilir, ancak düşük ısı kaynağı sıcaklığı sistemim termal verimini ve çıkış gücünü ciddi şekilde etkiler. İyileştirilmiş termal özelliklere sahip yeni çalışma akışkanlarının kullanılması, çevrim performansını artırmak için umut vadeden bir yaklaşımdır. Geleneksel soğutucular ve metal-organik ısı taşıyıcılar (MOHCs) ile nanosıvılar konseptine dayalı olarak, R134a/Cr-MIL-101 ve R134a/Mg-MOF-74 nanosıvıları ile subkritik/transkritik temel ORÇ ve yenilenebilir ORC termodinamik modelleri oluşturulmuştur. Termodinamik analiz sonuçları, MOF'lardan R134a adsorpsiyonunun pompa iş girişini ve türbin iş çıkışını artırdığını, desorpsiyonun ise buharlaştırıcı ısı girişini artırdığını göstermektedir. Ayrıca, MOHC'lar hem ORÇ hem de RORÇ'nin termal verimini artırır ve transkritik çevrimin termal verim iyileştirme oranı yüksek buharlaşma basıncında ve düşük türbin giriş sıcaklığında maksimum değere ulaşır. Ayrıca, MOHC eklenen sistemlerle hem eksarji verimliliği hem de ekonomik fayda sağlandığı görülmüştür [70].

Celen ve arkadaşları çalışmasında nano soğutucuların akış özellikleri ve uygulamaları hakkında inceleme yapmışlardır. Farklı termal cihazların ısı transfer performansı, aktif ve pasif tekniklerle artırılabilir. Pasif tekniklerden biri, yaygın ısı transfer akışkanlarına ultra

ince partiküllerin eklenmesidir, böylece hazırlanan süspansiyonun termal taşıma özellikleri, temel akışkana kıyasla artırılır. Nano soğutucular, nano partiküller ve soğutucuların karışımı olan nano sıvıların özel bir türüdür ve bu tür nano soğutucular buzdolapları, klima sistemleri ve ısı pompaları gibi farklı alanlarda geniş bir uygulama yelpazesi bulunmaktadır. Nano soğutucuların özelliklerinin saf soğutucuyla karşılaştırıldığında ısı transferi ve basınç düşmesi üzerine etkisini netleştirmek amacıyla bir inceleme yapılmıştır. Ayrıca, nano soğutucuların termofiziksel özellikleri, akış ve havuz kaynaması ile ilgili çalışmalar ve bu tür nanosoğutucuların ev tipi buzdolapları, ısı boruları ve klima gibi belirli alanlarda uygulanmalarına da değinilmiştir [71].

Jiang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada organik rankine çevrimi ünitelerinden biri olan buharlaştırıcıda Al_2O_3–R123 nano soğutucu akışkanın ısı transfer performanslarını deneyel olarak incelemişlerdir. Organik rankine çevirimi buharlaştırıcısında akış yönü boyunca değişim eğimi, saf R123 ve dört farklı hacim konsantrasyonuna sahip R123-Al_2O_3 nano soğutucu akışkanların ısı transfer performansları değerlendirilmiştir. Farklı nano partikül hacim konsantrasyonlarının yerel ısı transfer katsayısı üzerindeki etkilerini bulmak için saf R123 ve dört çeşit nanosoğutucu arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Dört nano soğutucu akışk anın akış yönü boyunca yerel ısı transfer katsayıları, saf R123 organik akışkanından daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Artan ısı kaynağı sıcaklığı ve süspansiyon halindeki nanopartikül hacim konsantrasyonu, akış yönü boyunca nano soğutucu akışkanların ısı transfer katsayısının değişim eğilimlerini değiştirebileceği görüşü sunulmuştur [72].

Javadi ve Saidur yaptıkları çalışmada termal ve enerji yaklaşımına odaklanarak nanosoğutucu kullanan bir ev tipi buzdolabının termodinamik performansını araştırmışlardır. Ev tipi buzdolabının termodinamik ve enerji verimliliğini analiz etmek için deneysel bir çalışma yapmışlar ve farklı nano partikül kütle konsantrasyonlarının etkisini incelemişlerdir. Javadi ve Saidur, nanopartikül konsantrasyonu artırıldıkça, nanoyağlayıcının kararlılığının azaldığını ve buharlaştırıcı sıcaklık gradyanının arttığı sonucuna ulaşmışlardır [73].

Azmi ve arkadaşları çalışmasında soğutma sistemlerinde enerji tasarrufu üzerine inceleme yapmışlardır. Soğutma sistemleri, enerji tüketiminin artan bir eğilim göstermesinin en büyük nedenlerinden biri olduğundan, enerji tasarrufu bu sorunun üstesinden gelmenin en iyi

yoludur. Nano akışkanlar, soğutma sisteminin termodinamik ve mekanik performansını geliştirmede olağanüstü potansiyele sahiptir. Soğutma sisteminde, sistem verimliliğini artırmak için nano-soğutucu ve nano-yağlayıcı içeren nano partikülleri tanıtarak bir çaba sarf edilir. Enerji tasarrufu üzerindeki nano-soğutucu ve nano-yağlayıcı etkisini incelemek için kapsamlı bir inceleme yapılmıştır. Genel bakış, nano-soğutucu ve nano-yağlayıcının özelliklerin geliştirilmesi, ısı transferi artışı, ısı değiştiricide performans, soğutma sisteminin geliştirilmesi ve basınç düşme karakteristiği içermektedir. Nano soğutucu kullanımıyla buharlaştırıcı sıcaklığı %6 oranında azaldı. R134a'nın R152a ile değiştirilmesi, ozon delme potansiyeli sıfır ve daha düşük sera etkisi potansiyeline sahip yeşil ve temiz bir çevre sunar. Soğutma sisteminin performansı önemli ölçüde arttığı görülmüştür [74].

Feng ve arkadaşları çalışmasında organik rankine çevrimi sisteminde buharlaşma sırasında nanoorganik çalışma sıvısının akış ve ısı transfer özellikleri araştırmıştır. Baz akışkan olarak R123 organik akışkanına ZnO nano partikülü eklenerek deneysel bir araştırma yapılmıştır. Oluşturulan nano akışkanın fiziksel özellikleri, viskozitesi, termal iletkenliği ve ısı transfer özellikleri analiz edilmiş, saf R123 organik akışkanı ile karşılaştırılmıştır. Organik rankine çevrimi sisteminde nanoakışkanın baz akışkana göre daha yüksek basınç düşüşüne neden olduğu gözlemlenmiştir [11].

Boydak ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ORÇ sisteminde altı farklı çalışma akışkanı kuru, ıslak ve izentropik türde seçilmiş ve simülasyon yazılımı ile çevrim çalıştırılmıştır. R32, R113, R11, R152a, R245fa ve R134a organik sıvıları çalışma akışkanı olarak kullanılmıştır. Sistem termodinamik açıdan analiz edilerek termal verim değerleri hepsi için ayrı ayrı bulunmuştur. En yüksek verim değerine R11 organik sıvısı ile ulaşıldığı, en düşük verim değerinin ise R32 akışkanı ile alındığı sonucuna ulaşılmıştır. R11 akışkanının oluşturulan bu simülasyon için uygun olduğu, R11 akışkanının güvenliliğinin makul olduğu değerlendirilmiştir. Sistem için ikinci akışkan olarak R113 organik sıvısı bulunmuştur [50].

Said ve arkadaşları çalışmasında düşük ölçekli bir güneş ORÇ sisteminin termal performansını inceledi. Bu sistemin içinde düz levha güneş kolektörü, ORÇ çevrim sisteminin ısısını sağlamak için kullanıldı. ORÇ sisteminde WO_3+MWCNT/su nanoakışkanı güneş kolektörü için kullanıldı, ORÇ sisteminde ise MWCNT/R141b nano-soğutkanı kullanıldı. İlk aşamada, ORÇ sisteminin termal ve ekserji verimliliği nanosıvının farklı akış hızlarında ve konsantrasyonlarında deneysel olarak incelendi. Sonuç olarak, nanosıvı akış

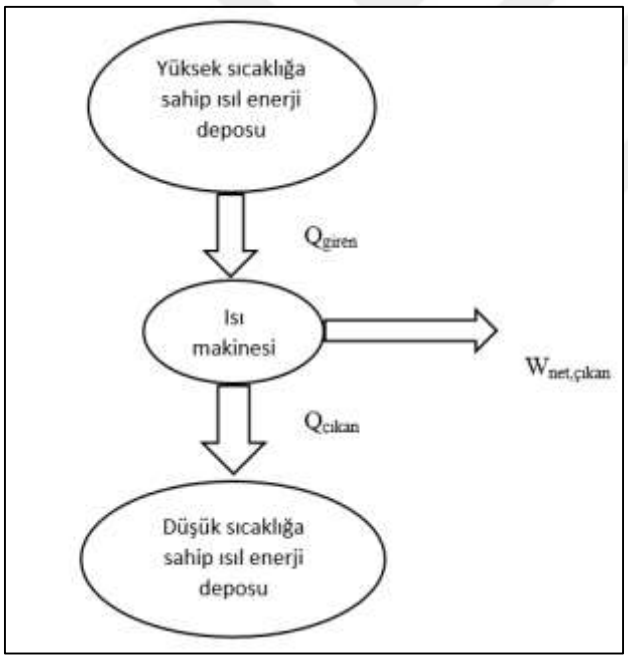
hızı olarak dakikada 3 litre ve nanoakışkan konsantrasyonu olarak %1,5 kullanıldığında en yüksek termal verim %73,21 olarak elde edilmiştir [75].

3. ORGANİK RANKİNE ÇEVRİMİ

Tez çalışmasının bu kısmında ORÇ sistemi ilgi ilgili bilgiler yer almaktadır.

3.1. Isı Makineleri

Isıl enerjinin işe dönüşebilmesi ısı makineleri yardımıyla gerçekleşmektedir. Isı makineleri yüksek sıcaklığa sahip bir ısıl enerji deposu olan kazan, güneş enerjisi, nükleer enerji gibi kaynaklardan ısıl enerji alarak bir kısmını mil işine dönüştürmektedir. Kalan kısım ise düşük sıcaklığa sahip çevre havası, akarsu, göl gibi kaynaklara verilmektedir. Isı makinelerinde yaşanan hal değişimleri çevrim oluşturmaktadır [4]. Isı makinesinin gösterimi Şekil 3.1 ile aşağıda yer almaktadır.



Şekil 3.1. Isı makinesinin basit görünümü

Kapalı bir sistemde hal değişimleri yardımıyla oluşturulan çevrim için sistemin net işi, sistemin net ısı alışverişine eşit olmaktadır. Eş. 3.1 ile aşağıda gösterilmektedir.

$$W_{net,çıkan} = Q_{giren} - Q_{çıkan} \tag{3.1}$$

Bir ısı makinesinde ısıl enerjinin bir kısmı işe dönüşmektedir. Isı makinesinin ısıl enerjinin işe dönüşme etkinliğini gösterir değeri ısıl verim olarak tanımlanmaktadır.

$$n_{th} = \frac{W_{net,çıkan}}{Q_{giren}} \tag{3.2}$$

Isı makinelerinde ısıl verim, alınan ısının işe dönüştürülebilme oranını göstermektedir. Bu nedenle yüksek verim değerleri daha az yakıt tüketimine neden olacağı için istenmektedir.

Isıyı enerjiye dönüştürmek için kullanılan birkaç teknoloji bulunmaktadır. Bu tür teknolojiler, arzu edilen ısıl enerji kaynağından elektrik enerjisine dönüşümü gerçekleştirmek için uğradıkları farklı termodinamik süreçlere göre sınıflandırılabilmektedir.

Bir ısı motoru, ısıl enerjiyi kullanışlı işe dönüştüren termodinamik bir cihazdır, oysa bir ısı pompası ısıyı bir ısıl enerji kaynağından diğerine aktarmak için işi kullanır. Isı makineleri, ısının çevrimde yer alan akışkana nasıl verildiğine göre içten yanmalı veya dıştan yanmalı motorlar olarak sınıflandırılmaktadır.

İçten yanmalı motorlarda, yakıt kimyasal enerji biçiminde ısı motoruna iletilir. Motor içindeki yanma odasında yakıtın yanması, güç üretimi için gereken ısıyı sağlar. Tipik örnekler arasında dizel ve benzinli motorlar bulunur [76]. Fakat ısıl verim olarak baktığımızda otomobil motorunun benzinin kimyasal enerjisinin yaklaşık %20'sini mekanik enerjiye dönüştürdüğü, dizel motorlarda ise bu oranın yaklaşık %30 olması söz konusudur [4].

Dıştan yanmalı motorlar ise içsel bir çalışma akışkanı ile çalışan ve ısıyı motor dışında bir ısıl enerji kaynağından alan ısı motorlarıdır. Dıştan yanmalı motorlarda çevrimdeki akışkana verilen enerji kaynak olarak yeraltı sıcak suyu, güneş enerjisi, nükleer enerji gibi dış kaynaktan alınır. Bu bağlamda, dıştan yanmalı motor, terimi, ısıyı işletme duvarları veya ısı değiştiriciler aracılığıyla çalışma akışkanına aktaran dışsal bir ısı kaynağı; yanma, atık ısı, güneş ısı gibi yenilenebilir kaynaklardan gelen ısı ile çalışan tüm ısı motorlarını ifade etmektedir.

Isıyı enerjiye dönüştürmek için birçok dıştan yanmalı teknoloji kullanılmaktadır. Gaz fazlı ısı motorları ve Rankine motorları dıştan yanmalı motorlar için örneklerdendir. Gaz fazlı ısı motorları, genellikle sıcak hava olan gaz fazlı çalışma akışkanları ile işletilen ısı motorlarını ifade eder ve genellikle faz geçişinden geçmezler. Bu tür motorlarda, sıkıştırılmış ve aşırı ısınmış gazın genişlemesiyle güç üretilir. Ortak örnekler arasında Stirling, Ericsson ve Brayton motorları bulunur.

Stirling ve Ericsson motorları dıştan yanmalı motor olduğundan yakıt sistemin dışında yanmaktadır. Dıştan yanmalı motorların bazı avantajları bulunmaktadır. Isıl enerji kaynağı olarak farklı yakıtlar kullanılabilir. Kullanılan bu yakıtlar için yanma tam gerçekleştirilebilir. Bundan dolayı yakıtın enerjisi fazla alınabilir.

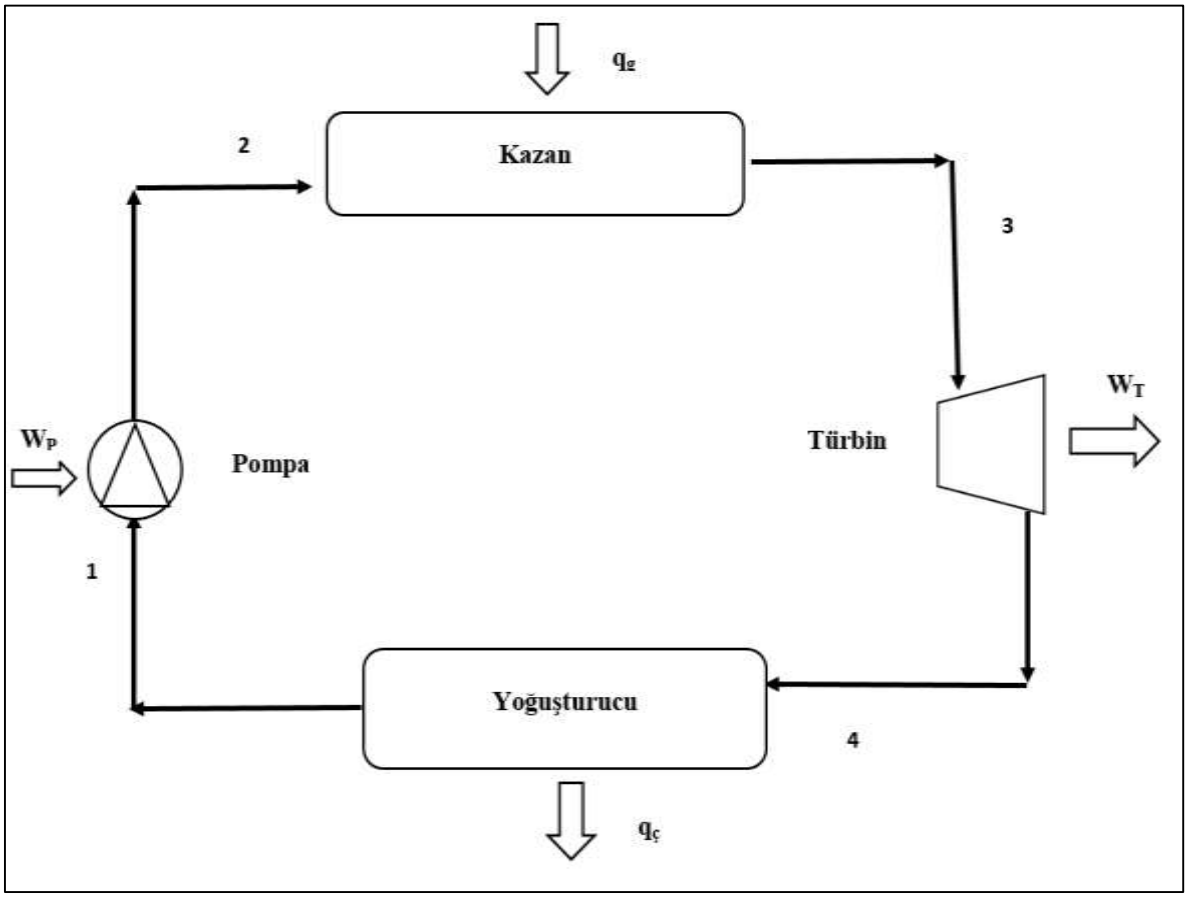
Stirling motorları, dört tersinir hal değişimden oluşan kapalı çevrim motorlarıdır. Stirling motorları, çalışma akışkanının ideal olarak Stirling termodinamik bir çevrim olan, izotermal bir genleşme, sabit hacimde çevrim akışkanından rejeneratöre ısı geçişi, izotermal bir sıkıştırma ve sabit hacimde rejeneratörden çevrim akışkanına bir ısı geçişi süreçlerinden oluşmaktadır. Stirling çevrimi birkaç belirli çevrim konfigürasyonuna sahiptir, ancak hepsi aynı temel ilkeyi paylaşmaktadır. Bir akışkan hacmi, bir itici mekanizmanın etkisiyle sıcak ve soğuk ısıl kaynaklar arasında fiziksel olarak yer değiştirilir. Akışkan, sıcak ve soğuk uçlar arasında hareket ettiğinde genleşir ve büzülür, bir pistonu hareket ettirerek güç üretilmiş olmaktadır.

Bianchi ve De Pascale, yaptıkları çalışmada Stirling Çevrimlerinin yüksek derecede geri dönüşü olmayan genleşme ve yer değiştirme süreçleri nedeniyle düşük verimliliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle düşük sıcaklıklarda, marjinal kazanç ve kayıpların önemli olduğu yerlerde Organik Rankine Çevrimlerine göre Stirling çevriminin üstün olmadığını çalışmalarında gözlemlemişlerdir [6].

Kapalı ve açık çevrim Ericsson motorlarında Stirling çevrime benzerdir. Stirling çevriminde sabit hacimde ısı geçişleri sabit basınçta gerçekleşmektedir. Yaklaşık izotermal sıkıştırma ve genleşme süreçleri genellikle düşük mil hızında çalışan pozitif deplasmanlı cihazlarla elde edilir.

Buharlı güç çevrimlerinde en yaygın kullanılan akışkan sudur. Suyun her yerde bulunabilmesi, diğer akışkanlara göre daha ucuz olması ve yüksek buharlaşma entalpisine sahip olması gibi özelliklerinden dolayı su yaygın kullanılmaktadır. Rankine çevriminde çalışma akışkanı olarak su kullanılmaktadır.

Buharlı güç santralleri için Rankine çevrimi ideal çevrim olarak görülmektedir. Basit ideal Rankine çevriminin şeması Şekil 3.2 ile aşağıda yer almaktadır.



Şekil 3.2. Basit Rankine çevrimi şeması

Rankine çevriminde dört hal değişimi yer almaktadır. Birinci durumda su, pompaya doymuş sıvı olarak girmekte ve kazan basıncına kadar sıkıştırılmaktadır. İkinci durumda ise sıkıştırılmış su kazana girmektedir. Kazan bir ısı değiştirici olduğu için su, kızgın buhar olarak çıkmaktadır. Üçüncü durumda kızgın buhar türbine girerek izantropik olarak genişler ve mili döndürerek mekanik iş yapmış olur. Türbinde buharın sıcaklığı ve basıncı azalmaktadır. Dördüncü durumda buhar yoğuşturucuya girerek doymuş sıvı olarak çıkmaktadır. Çevrim böylece devam etmektedir.

Rankine motoru, ideal olarak Rankine çevrimine dayalı olarak çalışma olup iki fazlı bir ısı makinesidir. Bir Rankine makinesindeki çalışma akışkanı faz değişimine uğramaktadır. Rankine motoru kapalı döngülü bir dıştan yanmalı ısı motorudur ve genellikle kullanılan çalışma akışkanının türüne göre veya ısı kaynağı türüne göre sınıflandırılmaktadır.

Isı makineleri incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik araştırmaların arttığı, atık ısı olarak adlandırılan ve sistemde kullanılmayan enerjinin geri dönüşüne yönelik çalışmalarda ısı makinelerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar arasında enerji kaynağı olarak atık ısı ve düşük sıcaklık kullanma özelliğine sahip bir çevrim olan Organik Rankine Çevrimi de yer almaktadır [48].

Uzun yıllardır Rankine çevriminde iş akışkanı olarak su kullanılmasına rağmen suyun donma sıcaklığının yüksek olması, korozif olması ve buharlaştırıcıda yüksek basınç oluşması gibi nedenler iş akışkanı olarak alternatif akışkanların kullanılmasının yolu açılmıştır [77]. Rankine çevriminde suya alternatif olarak sudan daha düşük sıcaklıklarda kaynayan ve daha yüksek moleküler kütlesi olan akışkanların kullanılmaya başlanmıştır. Bu tür akışkanların kullanıldığı sistemler ise Organik Rankine Çevrimi olarak isimlendirilmiştir [78]. Organik Rankine Çevriminin enerji kaynakları olarak genellikle düşük sıcaklıktaki jeotermal, biyokütle, güneş enerjisi ve atık ısıdan oluşmaktadır.

Çoğu düşük sıcaklığa sahip ısıl kaynaklardan güç üretimi için organik rankine çevrimi veya Kalina çevrimi kullanılmaktadır. Organik bir akışkan kullanan organik Rankine çevrimi ile su ve amonyak karışımı kullanan Kalina çevrimi arasındaki fark, farklı ikili karışımların farklı buharlaşma sıcaklıklarına sahip olması nedeniyle Kalina çevriminde buharlaşma veya kaynatma sırasında daha fazla ısı eklenmesidir. Bu, Kalina çevriminde genellikle daha yüksek verimliliğe yol açmaktadır [79]. Ancak, Kalina çevrimi sistemlerinde çalışma akışkanı olarak su kullanmanın, düşük buharlaşma sıcaklığına sahip organik akışkanlarla karşılaştırıldığında bir dizi soruna yol açtığı, korozyondan daha yüksek bir buharlaşma sıcaklığına ihtiyaç duyulmasına kadar birçok sorunu beraberinde getirdiği bilinmektedir. Bu durum, organik Rankine çevrimini düşük sıcaklık uygulamaları için daha iyi bir seçenek haline getirmektedir.

Kalina çevrimi, temel olarak Organik Rankine çevrimine benzemektedir. Kalina çevriminde çalışma akışkanı olarak su ve amonyak karışımı kullanır. Bu akışkanların kaynama noktaları

arasındaki büyük sıcaklık farkı nedeniyle akışkanın faz değişimi sırasında büyük bir sıcaklık değişimi meydana gelir. Bu, birçok ısı kaynağı için Kalina Çevriminin buhar jeneratörünün çıkışında saf buhar üretmeyeceği anlamına gelir, ancak akışkan karışımı üretecektir. Bu karışım daha sonra ayrılır, buhar kısmı türbine yönlendirilir ve sıvı kısmı türbine uğramadan geçer.

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ve Kalina Çevrimi, düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarından enerji üretmek amacıyla kullanılan iki farklı termal enerji dönüşüm teknolojisidir. Her iki çevrim de benzer uygulama alanlarına sahip olsa da belirgin farklılıkları bulunmaktadır.

ORÇ, genellikle organik çalışma akışkanları kullanarak çalışan ve düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarından elektrik enerjisi üreten bir teknolojidir. ORÇ sistemi, geniş bir çalışma sıcaklık aralığına uyum sağlayabilir ve modüler bir yapıya sahiptir. Bu, ORÇ'nin çeşitli endüstriyel süreçlerden, güneş enerjisi sistemlerinden ve jeotermal kaynaklardan atık ısıyı geri kazanma gibi farklı uygulamalarda kullanılmasına olanak tanır.

Kalina Çevrimi ise, özellikle amonyak ve su karışımını kullanarak düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarından elektrik enerjisi üreten bir teknolojidir. Kalina Çevrimi, çalışma akışkanının zeotropik özellik gösteren bir karışım olmasından dolayı, sıcaklık değişimlerine daha iyi adapte olabilir. Bu özellik, Kalina Çevrimini özellikle jeotermal kaynaklardan elde edilen sıcak su gibi kaynaklarda etkili kılar.

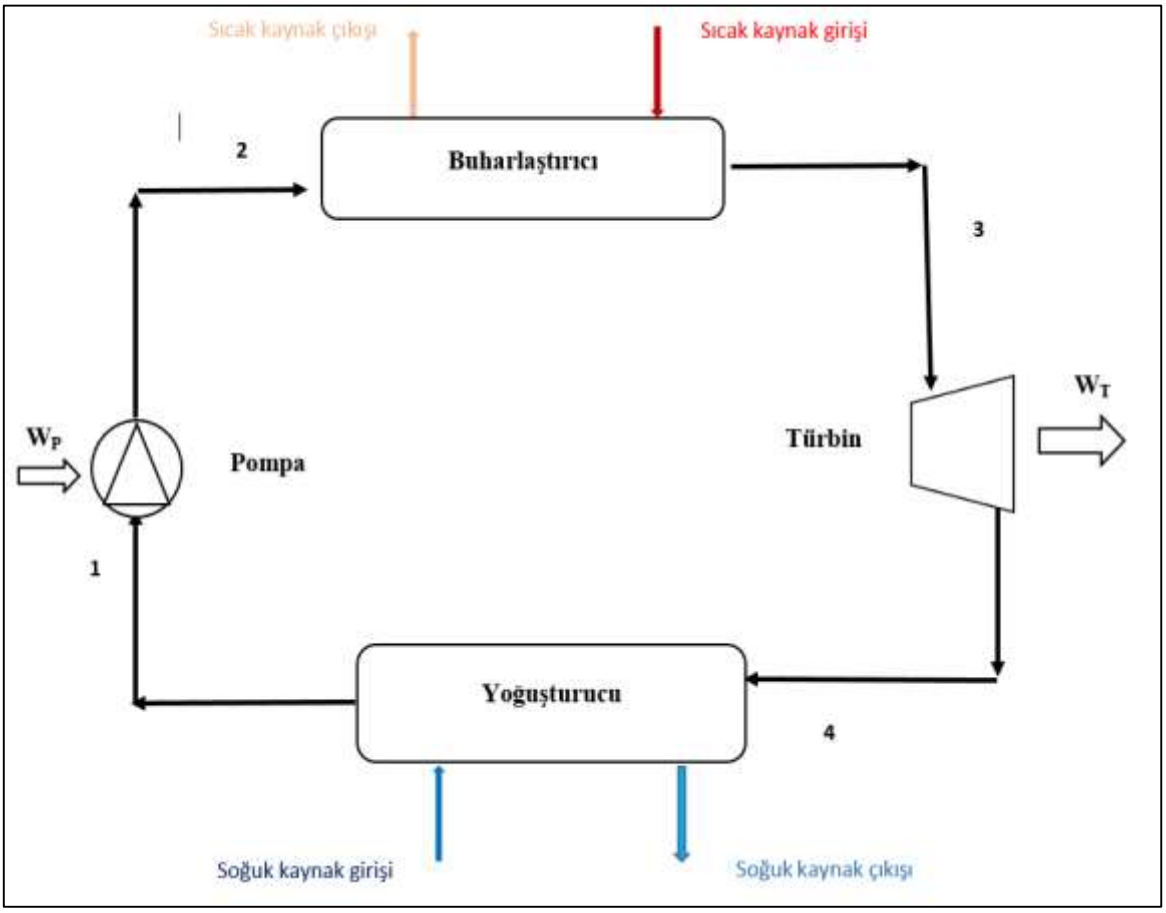
Birçok araştırmacı yaptıkları çalışmalarda Kalina Çevrimi ile ORÇ'nin güç üretimi yönünden karşılaştırmıştır. Lin ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada 100°C ile 200°C arasında değişen düşük sıcaklıktaki ısı kaynağı koşullarında net güç üretimi açısından ORÇ ile Kalina çevriminden daha yüksek sistem performansına ulaşılmıştır [80].

3.2. Organik Rankine Çevrimi Sistemi

Gelişen teknoloji ve artan enerji ihtiyacı nedeniyle ORÇ'yi konu alan çalışmalar araştırmacılar tarafından ilgi ile takip edilmektedir. Düşük sıcaklığa sahip ısıl kaynaktan güce dönüşüm için farklı ısı motorlarının kullanılması üzerine birçok araştırma mevcuttur. Düşük kaynak sıcaklığa sahip yani 200^{o}C'nin altında sıcaklığa sahip bir kaynaktan ısı

çekilmesinde en iyi verimliliğe ORÇ ile ulaşılmıştır [81]. Bu nedenle ORÇ düşük kaynak sıcaklığını değerlendirmek için ideal çevrim haline gelmiştir.

ORÇ motoru teknolojisi, düşük sıcaklık ısı kaynaklarından güç üretimi için özellikle uygundur. Düşük ila orta dereceli ısı kaynakları, yenilenebilir kaynaklardan, örneğin jeotermal, güneş veya endüstriyel atık ısı kaynaklarından elde edilebilmektedir. Şekil 3.3 ile ORÇ'nin şematik görünümü aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.3. Organik Rankine çevrimi şematik görümü

ORÇ sistem döngüsünün akış süreci Şekil 2.3 ile gösterilmiştir. Çalışma akışkanı olan organik sıvının 1 durumundan 2 durumuna geçişte pompa kullanılır. Yüksek basınçlı akışkan 2 durumundan buharlaştırıcıya girer ve burada ısı transferi gerçekleşir. 3 durumuna ulaştığında hem yüksek basınca hem de yüksek sıcaklığa sahiptir. 3 durumundan 4 durumuna geçişte türbin kullanılmaktadır. Türbinde yüksek sıcaklık ve basınca sahip akışkan genleşerek yoğuşturucuya geçiş yapar. Yoğuşturucuda da ısı transferi gerçekleşir ve düşük sıcak ve düşük basınca ulaşan akışkan doygun sıvı olarak pompaya geri döner.

Çalışma akışkanı olarak geleneksel olarak suyun kullanıldığı Rankine çevrimleri yapılan araştırmalar sonucunda 370^{o}C'nin altındaki kaynak sıcaklığına sahip çevrimler için rekabetçi olmadığı sonucuna varılmıştır [82-84]. Bu nedenle çalışma akışkanı olarak organik akışkanın kullanıldığı ORÇ önerilmektedir.

3.3. ORÇ Sisteminin Tarihçesi

ORÇ'nin temelini atan kişi, Lord Kelvin olarak da bilinen İskoç fizikçi William John Macquorn Rankine'dir. Rankine, 1859 yılında, günümüzde Rankine Çevrimi olarak adlandırılan ve termodinamik bir çevrim olan çalışmalarını yayımlamıştır. Rankine, bu çalışmalarında buhar gücüyle çalışan motorların sıcaklık ve basınç değişimlerini inceleyerek verimliliği artırmak amacıyla çeşitli termodinamik çevrimler üzerine odaklanmıştır. Bu çevrimlerden biri de sonradan ORÇ olarak adlandırılacak olan organik Rankine çevrimidir. Dolayısıyla, ORÇ'nin temelleri, William John Macquorn'un 19. yüzyılın ortalarındaki termodinamik çalışmalarına dayanmaktadır. Ancak, ORÇ'nin günümüzdeki uygulamaları ve endüstriyel kullanımı daha sonraki yıllarda geliştirilmiş ve artan çevresel farkındalık ile enerji verimliliği talepleriyle daha da önem kazanmıştır [85].

ORÇ sistemleri, güneş enerjisi, jeotermal enerji, atık ısı geri kazanımı, biyokütle tesisleri ve endüstriyel süreçler gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüksek verimlilikleri, düşük sıcaklık koşullarında çalışabilme yetenekleri ve çevre dostu çalışma akışkanları nedeniyle giderek daha fazla tercih edilmektedir [86].

İlk prototipler 1930'larda ortaya çıkmış olup, bu sistemler genellikle organik çalışma akışkanları ve düşük sıcaklıklı ısı kaynakları üzerinde odaklanmıştır. Ancak, ORÇ teknolojisinin çıkış noktası olarak nitelendirilebilecek dönem 1970'lerdir. Bu dönemde, alternatif enerji kaynaklarına ve çevresel endişelere yönelik artan ilgi, ORÇ üzerine yapılan araştırmalara ivme kazandırmıştır. Özellikle güneş enerjisi ve atık ısı gibi düşük sıcaklıklı kaynaklardan enerji üretme potansiyeli keşfedilmiştir. 1980'lerin sonlarına doğru, ORÇ teknolojisi jeotermal kaynaklardan enerji üretimi alanında önemli bir rol oynamaya başlamıştır. İlk ticari ORÇ sistemleri bu dönemde geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuştur. 1990'larla birlikte ORÇ, endüstriyel süreçlerden ve güneş enerjisi sistemlerinden atık ısıyı geri kazanma konusunda başarıyla uygulanmıştır. 2000'lerden itibaren ORÇ teknolojisi giderek daha fazla kabul görmüş ve güneş enerjisi, jeotermal enerji, atık ısı geri kazanımı,

biyokütle tesisleri ve endüstriyel süreçler gibi çeşitli uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmıştır [85, 86].

3.4. ORÇ Sisteminde Kullanılabilir Isı Kaynakları

ORÇ'de ısı kaynağı genellikle yenilebilir enerjiden elde edilmektedir. Güneş enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle ve endüstriyel atık ısı gibi kaynaklar kullanılmaktadır.

Isıl enerji kaynağı olarak güneş enerjisinin kullanıldığı ORÇ sistemlerde birçok araştırmacı tarafından incelenmektedir. Güneş kolektörü tarafından sağlanan termal akışkanın sıcaklığı yıl boyunca değişkenlik göstermektedir.

Genellikle jeotermal, biyokütle, güneş ve atık ısı geri kazanma uygulamalarında yaygın olarak kullanılan büyük ölçekli ORÇ'li elektrik santrallerinin aksine, mikro ve küçük ölçekli ORÇ'li sistemlerin performansı, maliyet etkili bileşenlerin tasarımına ve çalışma akışkanının optimize edilmesine dayanmaktadır.

Güneş enerjisi üretimi son zamanlarda oldukça ilgi çekmektedir. Bu durumun en önemli sebeplerinden biri olarak güneşten elde edilen enerjinin tüm yenilenebilir kaynaklar arasında en büyük potansiyele sahip olması nedeniyledir. Güneş enerjisi ORÇ'ye sahip sistemler için alternatif bir uygulama sunmaktadır [87]. Bir dizi çalışma, güneş enerjisi ile çalışan ORÇ'nin güç dönüşüm sistemlerinin kullanım potansiyelini değerlendirmeye ve maksimize etmeye odaklanmıştır.

3.5. ORÇ Sistemi İçin Çalışma Akışkanı Seçimi

ORÇ sistemleri için çalışma akışkanı seçimi karmaşık bir süreçtir ve genellikle sistem tasarımcıları tarafından öncelikli hedef belirlendikten sonra seçim süreci gerçekleşmektedir [88].

ORÇ sistemi için "en iyi" olarak nitelendirilebilecek tek bir akışkan bulunmamaktadır, çünkü akışkanın seçimi uygulamaya ve çevrim koşullarına oldukça bağlıdır.

ORÇ sistemleri, kısmi yük veya tasarım dışı koşullarda performans kaybına uğrar ve yaygın kullanılan çalışma akışkanlarının yüksek küresel ısınma potansiyeli (GWP) veya yanıcı özellikleri artan bir endişe kaynağıdır.

Çevrimlerde kullanılan akışkanlar farklı ailelere sınıflandırılmaktadır. Soğutucu akışkan olarak da adlandırılan bu akışkanlar yapılarına göre kloroflorokarbonlar (CFC), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC), hidroflorokarbonlar (HFC) ve hidrofloroolefinler (HFO) olarak ayrılmışlardır. Yapılarına göre yapılan bu sınıflandırmada CFC ve HCFC'ler klor içerirken, HFC ve HFO'lar klor içermemektedir. İlk bulunan soğutucu akışkanlar arasında CFC'ler yer almaktadır. Yirminci yüzyılın başlarında CFC'ler gibi sentetik soğutucu akışkanlar geliştirilmiştir. CFC'ler geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilen, düşük zehirlilikte ve düşük yanıcılıkta akışkanlar olarak bilinmektedir. Ancak ozon tabakasına zarar verdikleri keşfedilmiştir. R12 akışkanı ilk bulunan CFC'lerdendir. R11, R12, R114 ve R502 gibi akışkanlar CFC arasında yer almaktadır. R22 akışkanı ise HCFC grubu arasındadır. Bu akışkanlar soğutma ve klima sistemlerinde önemli bir rol oynamıştır. Fakat klor içerdikleri için aşamalı olarak kullanımlarının azaltılması söz konusudur [89].

Çevre kaygıları, Kyoto Protokolü ve Montreal Protokolü'nün ardından F-Gazı düzenlemeleri, CFC'ler ve HCFC'lerden HFC'ler ve GWP'si daha düşük HFO'lar hale geçişi tetiklemiştir. F-gazları, sera gazlarından olan ve iklim değişikliğine katkıda bulunan fluorojenik gazlardır. Bu gazlar genellikle hidroflorokarbonlar (HFC'ler), perflorokarbonlar (PFC'ler), sülfür heksaflorür (SF6) ve azot triflorür (NF3) gibi bileşenleri içerir. F-gazı düzenlemeleri, bu sera gazlarının atmosfere salınımını kontrol etmeyi ve azaltmayı amaçlayan çeşitli yasal ve düzenleyici önlemleri içermektedir.

Çalışma akışkanının özellikleri genel ORÇ sistem performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Birçok diğer sorun arasında, bazı çalışma akışkanları, çevrim verimliliğine zarar verebilecek çok büyük bir ısı ihtiyaç duymaktadır. Düşük sıcaklıklarda atık ısı dönüşümü için uygun diğer güç çevrimleri ile karşılaştırıldığında, buhar çevrimi gibi, ORÇ daha fazla güç üretir [90]. Ancak güç, çalışma akışkanının kritik sıcaklığı gibi diğer faktörlere de bağlıdır. En yüksek çevrim verimliliği çevrim sıcaklığının maksimum sıcaklığına yakın olan akışkanlarla elde edilmektedir [91].

Geleneksel ORÇ sistemlerinde ilerleme kaydedilmekle birlikte, net güç üretimini optimize eden ve bileşenlerdeki kaybı minimize eden yeni teknolojiler aranmaktadır.

ORÇ sistemlerinin farklı bileşenlerini ve malzemelerini içeren entegre modeller kullanarak bileşen ölçeğinde kaybı azaltan iyileştirmeler, geliştirilmesi gereken alanları ele almak için de kullanılmaktadır [92, 93]. Bir ORÇ sisteminin en önemli parçaları, çalışma akışkanı ve türbindir. Bunlar, hedeflenen önemli verim artışına tabi olan sistem bileşenlerini ve malzemelerini temsil etmektedir. Yoğuşturucu ve buharlaştırıcı, toplam güç üretimine katkıları sınırlıdır.

Bu bileşenler arasındaki ilişki, işletme parametreleri, ekonomik etkiler ve malzeme seçimi, uygulama alanları, ısı kaynağı, güç gereksinimi ve kurulum yeri, ORÇ sistemi oluşturulurken dikkate alınması gereken faktörlerdir. Düşük dereceli ısıyı enerji üretmek için kullanmak, sistem mimarisi, tasarım ve kabul edilebilir mekanik ve termodinamik kayıplar arasında bir denge oluşturmayı gerektirmektedir [94].

3.6. Organik Çalışma Akışkanı Tipleri

Organik çalışma akışkanları, çalışma akışkanlarının doymuş buhar eğrisinin eğimi temel alınarak üç türe ayrılabilir: kuru akışkan, izentropik akışkan ve ıslak akışkan.

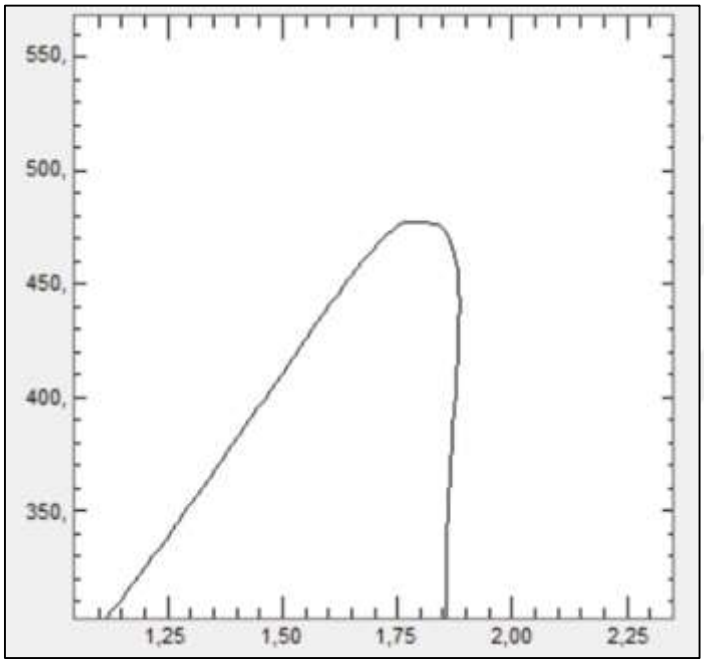
Islak akışkanlar, doyma eğrisinin buhar tarafında negatif bir eğime sahiptir, bu da izentropik genişleme nedeniyle sıcaklık düşüşünün basınç düşüşünü geçme eğiliminde olacağını, bu da buharın aşırı ısınmasının azalmasına veya akışkanın yoğunlaşmasına neden olabileceği anlamına gelmektedir.

İzentropik çalışma akışkanları sonsuz bir eğime sahiptir, bu da izentropik genişlemenin faz değişikliğine neden olmadığını ve akışkanın aşırı ısınmasında herhangi bir değişikliğe yol açmadığını göstermektedir.

Kuru akışkanlar ise doyma eğrisinin buhar tarafında pozitif bir eğime sahiptir, bu da basınçtaki düşüşün sıcaklıktaki düşüşü geçersiz kılacağı ve izentropik genişlemenin akışkanın aşırı ısınmasını artıracağı anlamına gelmektedir.

- $\frac{ds}{dT} > 0$ olması durumunda kuru akışkan
- $\frac{ds}{dT} < 0$ olması durumunda ıslak akışkan
- $\frac{ds}{dT} = 0$ olması durumunda izentropik akışkan olarak tanımlanmaktadır [46] .

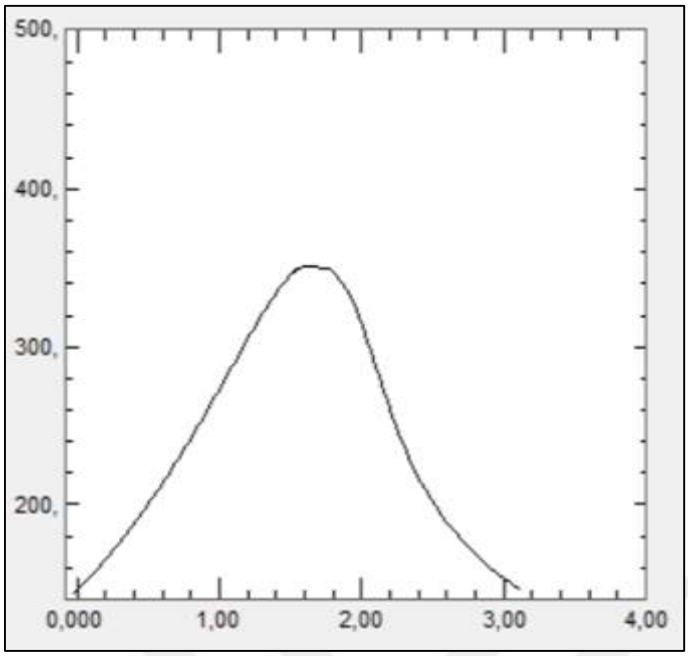
Şekil 2.4 yardımıyla bazı akışkanların T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine dayalı akışkan türlerinden izentropik tip akışkan gösterilmiştir.



Şekil 3.4. T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine göre izentropik akışkan

Teorik olarak, tüm diğer faktörler eşit olduğunda izentropik akışkanlar, ORÇ için en yüksek verimi üretmektedir.

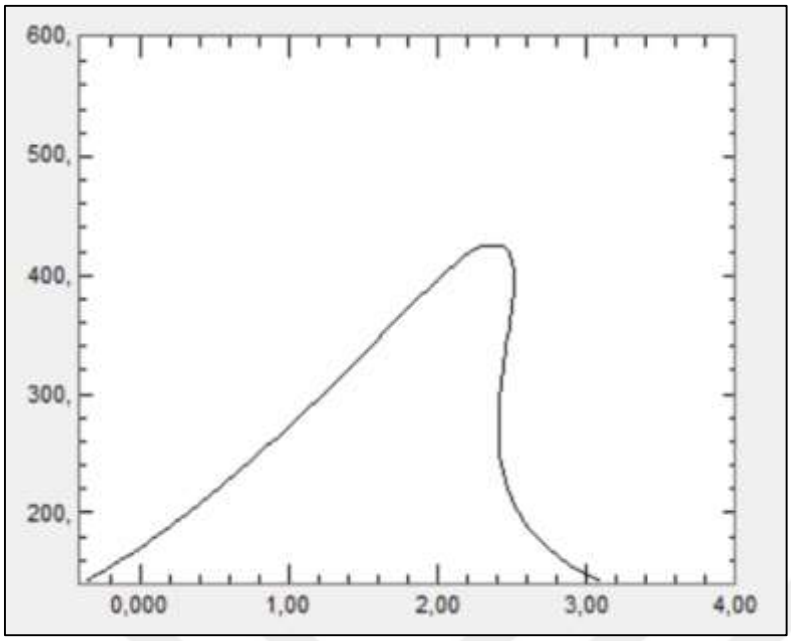
Şekil 3.5 ile T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine dayalı akışkan türlerinden ıslak tip akışkan gösterilmiştir.



Şekil 3.5. T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine göre ıslak akışkan

Islak akışkanlar, genişleme oranı fazlaysa genleşme cihazı içinde yoğuşma yaşarlar. Akışkanın yoğuşması türbin kanatlarına zarar verebilir ve cihazın izentropik verimliliğini azaltabilir [95]. Bu durum, ıslak çalışma akışkanlarının, yoğuşmanın meydana gelmemesi için genişletici girişinde belirli bir aşırı ısının uygulanmasını gerektirdiği anlamına gelmektedir [22].

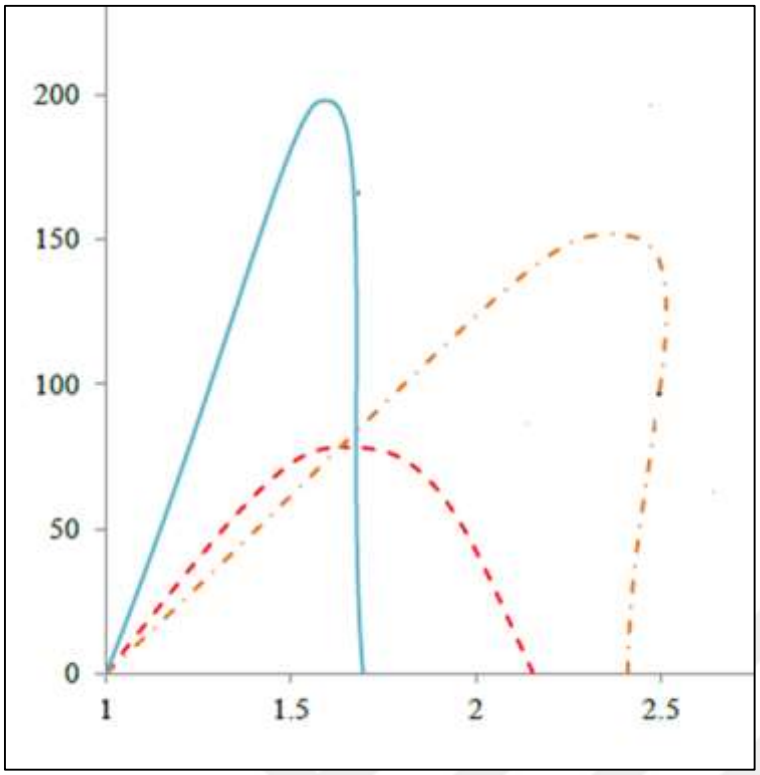
Şekil 3.6 ile T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine dayalı akışkan türlerinden kuru tip akışkan gösterilmiştir.



Şekil 3.6. T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine göre kuru akışkan [96]

Kuru çalışma akışkanları zıt bir etkiden muzdarip olurlar. Akışkan izentropik olarak genişledikçe, T-s diyagramındaki dikey çizgi doyma eğrisinin buhar tarafından uzaklaşmasına neden olur. Bu, genişletici çıkışında aşırı ısınmaya yol açar. Bu, genişlemeden sonra kullanılmamış bir miktar termal enerjinin olduğu anlamına gelir, bu da yoğuşturucu yükünü artırır ve verimliliği azaltmaktadır [88].

Şekil 3.7 yardımıyla bazı akışkanların T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine dayalı akışkan türleri bir arada gösterilmiştir.



Şekil 3.7. T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine göre akışkan türleri [97].

Uygulamada, genişleme işlemi asla tamamen izentropik değildir. Sızıntı, genişleticiden ısı transferi, sıcak ve soğuk yanlar arasında ısı transferi, türbulans, sürtünme ve giriş ve çıkış kayıpları gibi genişleme kayıpları gibi. Bu durumda genişletici izentropik verimliliğinin %100'ün altında olduğu anlamına gelmektedir.

3.7. Organik Çalışma Akışkanının Termofiziksel Özellikleri

Çalışma akışkanı seçimi, bir ORÇ sisteminin tasarımı için kritiktir. Toksisite, ozon delme potansiyeli (ODP), küresel ısınma potansiyeli (GWP) ve sistem bileşenlerine uygunluğu da içeren konular, çalışma akışkanının termodinamik ve termofiziksel özellikleri de dikkate alınarak değerlendirilir. Çalışma akışkanı türü, kapalı çevrim içindeki iç basınç ve sıcaklık seviyelerini ve iş potansiyelini belirler; çalışma akışkanının termodinamik özellikleri araştırılmalı ve dikkatli bir şekilde seçilmelidir.

ORÇ'de kullanılan çalışma akışkanının buharlaşma ısısı, genişletici cihazda yapılan işi artırırken, buharlaştırıcı için gereken enerji miktarını da artırmaktadır.

Çalışma akışkanının yoğunluğu sistem tasarımı açısından birkaç sonucu beraberinde getirmektedir. Düşük yoğunluk, aynı miktarda gücü elde etmek için sistemin daha yüksek hacim debilerini gerektirir. Bu ısı değiştiricilerde ve borularda basınç kayıplarını artırır ve genişletiricinin boyutunu büyütür [88]. Bunun aksine, daha yüksek yoğunluk daha karmaşık sistem tasarımına olanak tanımaktadır.

Çalışma akışkanının özgül ısısı ile ilgili yapılan değerlendirmeler, düşük özgül ısının pompa işini azalttığı ve böylece çevrim verimliliğinin arttığı yönündedir [98].

Çalışma akışkanının kaynama noktası ideal olarak 0°C ile 100°C arasında olması yönünde yapılan değerlendirme, yoğuşturucuda aşırı düşük veya yüksek basınçlara ihtiyaç duymamak böylece işlemi kolaylaştırmak içindir [88]. Termodinamik ve çevrim verimliliği açısından, çalışma akışkanının kaynama noktası yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağı ve düşük sıcaklıktaki ısı kaynağı sıcaklıklarına uyarlanmalıdır. Düşük bir kaynama noktası, aşırı ısını en aza indirmek ve çevrim verimliliğini artırmak için basıncın yüksek bir seviyeye çıkarılması gerektiği anlamına gelmektedir.

Çalışma akışkanında düşük bir viskozite, borularda ve ısı değiştiricilerde basınç kayıplarını azaltmak için istenen değerdir. Çalışma akışkanında yüksek termal iletkenlik, ısı değiştiricilerde ısı transfer katsayısını artırır ve bu da minimum boyutlarını azaltarak sermaye maliyetinde tasarruf sağlanmasına yol açmaktadır [88]. Ancak, termal iletkenlik başlı başına bir sistemin termodinamik performansını etkilemez.

Moleküler karmaşıklık, çalışma akışkanının çeşitli farklı özellikleri üzerinde etkili olan bir faktördür. İlk olarak, daha karmaşık moleküller genellikle daha kuru çalışma akışkanları olma eğilimindedir [88], T-s diyagramındaki buhar-sıvı doygunluk eğrisinin pozitif eğimi daha küçük olan daha karmaşık moleküllere sahiptir. Bu, genellikle bir genişletici çıkışında daha yüksek bir aşırı ısının olduğu anlamına gelir ve diğer tüm faktörler eşit olduğunda, bir dönüş çevrimi için daha düşük verimliliğe sahip olacaktır.

Kritik sıcaklık, çevrimin basınç oranı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sabit buharlaşma ve yoğuşma sıcaklığı için, daha yüksek kritik sıcaklıklar genellikle daha yüksek verimliliğe yol açmaktadır, çünkü genişleme makinesinin girişindeki aşırı ısının en aza indirilmesi mümkün olmaktadır [88].

Organik Çalışma Akışkanlarının seçimi için iki temel çevresel faktör belirlenmiştir [97];

1- Ozon Delme Potansiyeli (ODP)
2- Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)

Çevresel etkiler, ozon delme potansiyeli (ODP) ve küresel ısınma potansiyeli (GWP) değerlerine göre birçok araştırma yapılmaktadır. ODP, bir maddenin neden olduğu ozon tükenmesinin düzeyine atıfta bulunan bir parametredir. R11'in ODP'si 1,0 olarak tanımlanmıştır. Diğer maddelerin ODP'si, ozonu azaltma yeteneklerine dayanarak R11'e göre karşılaştırılır. R11, R114 gibi yüksek ODP'ye sahip çalışma akışkanları, doğrudan ozonu tahrip ettikleri için Montreal ve Kyoto protokollerine göre kullanımdan kaldırılması gereken maddeler olarak kabul edilmiştir. ABD'de R11 ve R114 üretimi 1996'da durdurulmuştur.

GWP, bir maddenin etkisini yansıtan bir faktördür. ODP gibi, GWP için CO_2'nin GWP'si 1 olarak kabul edilir ve diğer maddelerle karşılaştırmalar için ölçek olarak kullanılır. Tipik olarak, 100 yıl süresi, zaman içinde küresel ısınma üzerindeki etkiyi değerlendirmek için kullanılır. Ancak, Tablo 1'de gösterilen bazı çalışma akışkanlarının GWP'si CO_2'nin binlerce katı olsa da, ORC çalışma akışkanı atmosfere yayılmayacağından, GWP, çalışma akışkanı seçiminde küçük bir faktör olacaktır.

Çizelge 3.1 ile ORÇ'de kullanılan bazı akışkanların termofiziksel özellikleri ve çevresel etki değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Organik akışkanların termo fiziksel özellikleri

Çalışma Akışkanı	Kritik Sıcaklık, ^oC	Kritik Basınç, MPa	Akışkan Tipi	ODP	GWP
R11	197,96	4,408	İzentropik	1,0	4750
R114	214,06	3,392	Kuru	0,8	6130
R115	79,95	3,129	Kuru	0,6	7370
R123	183,68	3,662	Kuru	0,02	77
R125	66,02	3,618	Islak	0	3500
R134a	101,06	4,059	Islak	0	1430

Çizelge 3.1. (devam) Organik akışkanların termo fiziksel özellikleri

R141b	204,35	4,212	İzentropik	0,12	725
R142b	137,11	4,055	İzentropik	0,07	2310
R152a	113,26	4,517	Islak	0	124
R21	178,33	5,181	Islak	0,04	151
R218	71,87	2,640	Kuru	0	8830
R22	96,15	4,990	Islak	0,05	1810
R227ea	101,75	2,925	Kuru	0	3220
R236fa	124,92	3,200	Kuru	0	9810
R236ea	139,29	3,502	Kuru	0	1370
R245ca	174,42	3,925	Kuru	0	693
R245fa	154,01	3,651	Kuru	0	1030
R32	78,11	5,782	Islak	0	675
R600a	134,66	3,629	Kuru	0	4
R601	196,55	3,370	Kuru	0	0,1

Islak akışkanlar, genişleme oranı fazlaysa genleşme cihazı içinde yoğuşma yaşar. Akışkanın yoğuşması türbin kanatlarına zarar verebilir ve cihazın izentropik verimliliğini azaltabilir [88]. Bu, ıslak çalışma akışkanlarının, yoğuşmanın meydana gelmemesi için genişletici girişinde belirli bir aşırı ısının uygulanmasını gerektirdiği anlamına gelmektedir [51]. Genişletici girişinde aşırı ısıya izin verilmesi, çevrimin belirli bir çalışma akışkanı ve ısı kaynağı için maksimum olası basınç oranında çalışmadığı anlamına gelir ve bu durum çevrimin verimini azaltmaktadır.

Çalışma akışkanının termal kararlılığı, ısıl direnci, ısıtılma sırasında tüm fiziksel özelliklerini koruma yeteneği olarak tanımlanır. Isı transferinin kalitesini gösteren bu özellik, termal akışkanların yüksek sıcaklıkta kimyasal bozulmaya duyarlı hale getiren tekrarlayan ısı kullanımı nedeniyle ısıya karşı dayanıklı olmalarını sağlar. Sıcaklık arttıkça termal çatlama ve polimerizasyon, molekülleri bağlayan moleküler bağları kırarak moleküler yapısını değiştirecek veya bozacak ve termal verimliliğini azaltacaktır.

3.8. ORÇ Sistemi Üniteleri

ORÇ sistemi temelde dört birimden oluşturmaktadır. Bunlar;

- Pompa
- Buharlaştırıcı
- Genişletici
- Yoğuşturucudur.

Pompa

ORÇ sistemlerinde kullanılan pompalar, genellikle işletme koşullarına, uygulama gereksinimlerine ve çalışma akışkanına bağlı olarak değişebilir [99]. Ancak, ORÇ sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bazı pompalar şunlardır:

- Santrifüj pompalar; sıvıyı merkezkaç kuvveti ile dışa doğru itmeye dayanan bir mekanizma kullanır. ORÇ sistemlerinde sıvı akışını artırmak için kullanılabilirler.
- Vidalı pompalar; sıvıyı bir vida mekanizması yardımıyla taşıyan pozitif deplasmanlı pompalardır. ORÇ sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir türdür.
- Rotary vane pompalar; döner bir mekanizma kullanarak sıvıyı taşıyan bir pompa türüdür. ORÇ sistemlerinde kullanılmaktadırlar.
- Diyafram pompalar; bir diyaframın sıkıştırılması ve gevşetilmesi yoluyla sıvıyı pompalayan bir mekanizma kullanır. Bazı ORÇ uygulamalarında kullanılabilirler.
- Pistonlu pompalar; bir pistonun ileri-geri hareketi ile sıvıyı taşır. ORÇ sistemlerinde kullanılan bir diğer pozitif deplasmanlı pompa türüdür.

Hangi tip pompaların kullanılacağı, ORÇ sisteminin ölçeğine, uygulama gereksinimlerine ve tasarım parametrelerine bağlı olarak değişebilir. Pompaların seçimi, sistem verimliliği, güvenilirlik ve maliyet açısından dikkatlice değerlendirilmelidir [99].

Pompa seçimi, çalışma akışkanına ve özellikle genişletici teknolojisi ile güç gereksinimine bağlıdır. ORÇ sistemleri, süperkritik durumdan subkritik duruma geçtikçe, sistem bileşenlerinin dereceleri artar ve daha büyük bir pompa gereksinimine yol açar. Bu durum,

artan bir pompa güç tüketimine neden olur ve süperkritik sistemlerin daha fazla pompa yoğun ve net gücün azalma eğiliminde olduğu bir duruma getirir [90].

Pompa verimlilikleri genellikle süperkritik güç çevrimlerinde endişe kaynağıdır. Pompalar güç tüketir ve pompanın türüne ve pompalanan akışkana bağlı olarak güç tüketimi değişebilir. ORÇ uygulamalarında düşük bir pompa elektrik güç tüketimi sürdürmek önemlidir çünkü bu, tıpkı tüm güç çevrimlerinde olduğu gibi, sistem tarafından üretilen elektrik enerjisinin net miktarını artırır [41].

Buharlaştırıcı

ORÇ'de buharlaştırıcı, ısı kaynağından alınan ısının çalışma akışkanına aktarıldığı kısımdır. Buharlaştırıcı tasarımı ve işlevi:

Isı transferi; buharlaştırıcı, çalışma akışkanının sıvı fazdan buhar fazına geçişini sağlamak amacıyla ısı kaynağından alınan termal enerjiyi absorbe eder. Bu süreç, ısı kaynağından gelen yüksek sıcaklıktaki akışkanın buharlaştırıcı içinde dolaştığı bir ısı değişim sistemini içerir.

Buhar oluşumu; yüksek sıcaklıktaki akışkanın, buharlaştırıcı içinde düşük basınç ve sıcaklıkta bulunan çalışma akışkanı ile temas etmesi sonucunda buharlaşması gerçekleşir. Bu, çalışma akışkanının buhar fazına geçişini ve potansiyel olarak genleşme işini gerçekleştirir.

Isı kaynağı seçimi; buharlaştırıcı tasarımında, kullanılan ısı kaynağının özellikleri önemlidir. Güneş enerjisi, endüstriyel atık ısı veya jeotermal kaynaklar gibi çeşitli ısı kaynakları, buharlaştırıcı performansını etkileyen faktörlerdir.

Sıkışma noktası analizi; tasarım aşamasında, sıkışma noktası analizi kullanılabilir. Sıkışma noktası, ORÇ sistemindeki en yüksek sıcaklıktaki akışkan ile buharlaştırıcıdan çıkan çalışma akışkanının sıcaklığı arasındaki minimum farkı ifade eder. Bu farkı minimize etmek, sistemin termal verimliliğini artırabilir [99].

Buharlaştırıcı türleri; buharlaştırıcılar, levha tipi, tüp tipi veya kabuk-boru tipi gibi farklı konfigürasyonlarda olabilir. Tasarım, kullanılan akışkanın özelliklerine, ısı kaynağına ve uygulamanın özel gereksinimlerine bağlı olarak seçilir.

Süper ısıtma; bazı durumlarda, buharlaştırıcıdan çıkan buharın sıcaklığını daha da artırmak amacıyla süper ısıtıcı eklenir. Bu, çalışma akışkanının kalitesini iyileştirebilir ve ek termal enerji sağlayabilir.

ORÇ sisteminin buharlaştırıcı tasarımı, termal verimlilik, güvenilirlik ve uygulama gereksinimleri göz önüne alınarak yapılır. Bu tasarım, sistemin belirli bir uygulama veya koşula en iyi şekilde uyum sağlamasını sağlar [99].

ORÇ sistemleri buharlaşma ünitesinde ısı değiştirici seçimi veya boyutlandırılmasında birkaç durum söz konusudur [90]. Bunlar;

- ORÇ sisteminde reküperatör veya süperısıtıcı olup olmaması,
- Çalışma akışkanına transfer edilmesi gereken ısı miktarı,
- Basınç düşüşüdür.

Isı değiştiricisinin boyutuna, termodinamik özelliklerine ve çalışma akışkanının kütle debisine bağlı olarak, çıkış sıcaklığından sonra buharlaştırıcıdan çıkan çalışma akışkanının sıcaklığı ile ORÇ sistemindeki en yüksek sıcaklık arasındaki sıcaklık farkı değişebilir. Bu sıcaklık farkını mümkün olduğunca düşük yapmak arzu edilir. Daha büyük kütle debisi, buharlaştırıcıda ısı transferi için yetersiz zaman olduğu için sıcaklık farkını artırır. Süperısıtıcı, bu sıcaklık farkını telafi etmek için kullanılabilir ve çalışma akışkanının bileşimi ve kütle debisi buharlaştırıcıdan çıkarken ıslak buhar üretiyorsa bu durumda da kullanılabilir [90].

Isı değiştiricisinin seçimi, bir ORÇ motorunun tasarım işlemleri sırasında genişleticilerin seçimini etkilediği bilinmektedir. Bu durum, ısı transferi için plakaların sayısını ve plaka alanını etkiler. Buharlaştırıcı, ısı kaynağı olarak güneş ısı veya endüstriyel atık ısı ile çalışma akışkanı arasında ısı alışverişi için bir alan sağlar. Burada, çalışma akışkanının faz değişimini sıvıdan buhar haline geçerken entalpisi veya ısı içeriği artar [100].

Genişletici

ORÇ'de genişletici, çalışma akışkanının genişleme işlemi sırasında mekanik enerjiye dönüştürüldüğü kısmı temsil eder. ORÇ sistemlerinde farklı genişletici türleri kullanılabilir ve bu türler, termodinamik performans, uygulama koşulları ve çalışma akışkanının özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak seçilir [90].

Belirli sıcaklık koşulları altında, ORÇ türbinleri, geleneksel buhar türbinine göre daha yüksek genleşme oranına ve daha düşük entalpi düşüşüne sahip olacaktır.

Organik akışkanlar genellikle suya göre daha yüksek yoğunluğa sahiptir, bu nedenle aynı güç üretimi için türbinler daha küçük olabilir [99].

Genişletici, ORÇ sisteminin önemli bir bileşenidir. Bu, bir çalışma akışını basıncını düşürerek genişleten ve aynı zamanda mekanik iş üreten bir cihazdır. Sistem kurulumunun temel amacı, elektrik üretimidir ve bu, bütün sistemin performansını etkiler. Düşünüldüğü uygulamaya bağlı olarak, genişleticiler, çalışma akışının türü, motor boyutu ve güç gereksinimi ile ilgili olarak seçilebilir. İki ana genişletici kategorisi bulunmaktadır [90]. Bunlar;

- Turbo makineler veya kinetik genleştiriciler
- Pozitif deplasmanlı veya hacimsel genleştiricilerdir.

Turbo makinelere örnek olarak türbin gösterilebilir. Turbo makineler, çalışma akışkanının kinetik enerjisine dayanarak kanatların dönmesini sağlar. Şaftın döner hareketi, bir jeneratöre bağlı olan bir armatürde elektromanyetik indüksiyon aracılığıyla bir elektromotor kuvvet oluşturur, böylece ona bağlı bir yüke elektrik gücü sağlanır. Bunlar, genellikle 100 kW ile 10 MW arasındaki orta ila yüksek güç gereksinimleri için uygundur [90].

Hacimsel genişleticiye örnek olarak alternatif pistonlu genişleticiler veya döner kanatlı genişleticiler gösterilebilir. Hacimsel genişleticilerde, çalışma akışkanının basıncı, akışkanın hacmini artırarak azaltılır. Genellikle 1 ila 100 kW arasındaki orta ila düşük güç gereksinimleri için uygundur [99].

Hacimsel genişleticiler, genellikle kinetik genişleticilere kıyasla orta ila düşük sınıf ısı dönüşüm teknolojileri için uygun bir seçenektir çünkü iki fazlı genişleme işleyebilirler. İki fazlı genişleme, genellikle düşük sıcaklıklarda yaygındır. Kinetik genişleticiler, sıvı damlacıklarının çok yüksek hızlarda hareket eden türbin kanatlarına çarpması nedeniyle genellikle yalnızca gaz fazını işlemek üzere tasarlanmıştır. Türbin kanatları tasarım ve imalatlarındaki hassasiyet nedeniyle genellikle bir türbinin en kritik ancak en pahalı kısmıdır [99].

Yoğuşturucu

ORÇ'de yoğuşturucu, çalışma akışkanının buharlaştırıcıdan çıkan gaz fazını sıvı fazına dönüştürerek ısıyı dış ortama veya başka bir işleme transfer etme işlevini yerine getirir. ORÇ sisteminde yoğuşturucunun kullanımı, sistemin verimliliği ve performansını belirleyen kritik bir aşamadır [90].

Yoğuşturucu, çalışma akışkanı ile soğuk akışkan veya ısı kaynağı arasında ısı değişimi sağlayan bir alan sunar. Yoğuşturucuların boyutlandırılması, termal verimliliği maksimize etmek için son derece önemlidir. Eğer ısı yoğuşturucuda yeterince atılmazsa, çalışma akışkanının yoğuşma basıncı artırılabilir, bu da çalışma akışkanının sıcaklığının artmasını telafi etmek için ve genişletici üzerindeki basınç oranının azalmasına neden olur. Düşen bir basınç oranı, genişletici güç çıkışının veya termal verimliliğin azalmasına yol açabilir [99].

Yoğuşturucudan çıkan sıvı, ideal olarak doygun sıvı haline getirilmelidir, ancak çalışma akışkanının yoğuşturulması veya soğutulması gerektiği kadar, alt soğutma derecesi yani, çalışma akışkanını doygun sıcaklığının altına soğutma durumu da önemlidir ve uygun bir şekilde ele alınmalıdır. Daha düşük yoğuşma sıcaklıkları bir ORÇ sisteminin performansını olumlu etkiler [101]. Alt soğutma derecesi, kavitasyon olasılığının bir göstergesidir. Eğer bir derece alt soğutma söz konusuysa, kavitasyon önlenebilir.

Kavitasyon, ya çalışma akışkanının doygun sıvı halinin altına inen pompa giriş sıcaklığını azaltarak ya da pompa emme basıncını artırarak hafifletilebilir. İkincisi, kondenser ile pompa arasına bir soğutucu yerleştirilerek sağlanabilir. Pratik olarak bunun önlenmesi tercih edilir, çünkü soğutucular pahalıdır ve aynı zamanda fazla güç tüketir, bu da ORÇ motorunun net güç çıkışını azaltmaktadır [99].

3.9. ORÇ Sisteminin Avantajları

ORÇ bir dizi avantaj sunan bir ısı geri kazanım teknolojisidir.

Düşük sıcaklıkta çalışabilme kabiliyeti; ORÇ sistemi, düşük sıcaklık kaynaklarından (örneğin, güneş enerjisi, endüstriyel atık ısı) enerji çekebilme kabiliyetiyle öne çıkar. Diğer enerji dönüşüm sistemleri genellikle yüksek sıcaklıklarda çalışma eğilimindedir, ancak ORÇ, düşük sıcaklık aralıklarında etkili bir şekilde çalışabilir [77].

Çeşitli çalışma akışkanları kullanabilme yeteneği; ORÇ, farklı termal uygulamalara ve koşullara uyacak şekilde çeşitli çalışma akışkanları kullanabilir. Bu özellik, spesifik uygulama gereksinimlerine uygun çözümler sunma esnekliği sağlar.

Çevre dostu çalışma akışkanlarının kullanılabilirliği; ORÇ sistemi, çevre dostu çalışma akışkanları kullanma olasılığı sunar. Ozon tabakasını etkilemeyen ve düşük sera gazı emisyonlarına sahip akışkanlar, ORÇ'nin çevresel etkilerini azaltmasına yardımcı olabilir [85, 88].

Modüler ve ölçeklenebilir yapı; ORÇ sistemi, modüler bir yapıya sahiptir ve ihtiyaca göre ölçeklendirilebilir. Bu, farklı uygulama boyutları ve enerji talepleri için özelleştirilebilir çözümler geliştirmeyi mümkün kılar.

Sürekli ve kararlı çalışma; ORÇ sistemi, sürekli bir enerji döngüsü oluşturarak istikrarlı bir enerji üretimini destekler. Çalışma akışkanının döngü boyunca dönüştürülmesi ve geri kazanılması, sürekli enerji üretimini mümkün kılar [88].

Atık ısının değerlendirilmesi; ORÇ, endüstriyel tesislerde veya enerji üretim süreçlerinde oluşan atık ısının geri kazanılmasını sağlar. Bu, enerji verimliliğini artırır ve çevresel sürdürülebilirliği destekler.

Uzak ve izole alanlarda kullanım; ORÇ sistemi, uzak veya izole edilmiş bölgelerde, özellikle elektrik şebekesine erişimin sınırlı olduğu durumlarda kullanılabilir. Bu, enerjiye erişimde bağımsızlık sağlar [85].

Bu avantajlar, ORÇ'nin geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmasını ve farklı endüstri sektörlerinde enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunmasını sağlamaktadır [77].

3.10. ORÇ Sisteminin Sakıncaları

ORÇ teknolojisinin uygulama bağlamında dikkatlice değerlendirilmesi gerektiğini vurgular ve optimal çözümler için daha fazla araştırma ve geliştirmeyi teşvik etmektedir [77].

Yüksek yatırım maliyeti; ORÇ sistemleri genellikle karmaşık ve özel tasarım gereksinimleri nedeniyle yüksek yatırım maliyetine sahiptir. Özellikle küçük ölçekli uygulamalarda bu maliyet, ekonomik olarak sürdürülebilir olmayabilir [85].

Çalışma akışkanı seçimi; ORÇ'nin verimli çalışabilmesi için uygun bir çalışma akışkanının seçilmesi önemlidir. Ancak, bazı çevre dostu akışkanlar, çalışma şartlarına bağlı olarak performanslarını kaybedebilir veya özellikle düşük sıcaklıklarda etkin olmayabilir.

Enerji verimliliği; ORÇ sistemleri genellikle yüksek enerji verimliliğine sahiptir, ancak bazen bu sistemler, düşük verimlilikle çalışan küçük ölçekli uygulamalarda daha az rekabet avantajına sahip olabilir [77].

Bakım gereksinimleri; ORÇ sistemlerinin karmaşıklığı, bakım gereksinimlerini artırabilir. Özellikle geniş sistemlerde, bu bakım ihtiyaçları işletme maliyetlerini artırabilir [88].

Sistem güvenilirliği; ORÇ sistemleri, çalışma koşullarına ve akışkan özelliklerine bağlı olarak güvenilirlik konularını içerebilir. Özellikle değişken çalışma koşullarına maruz kalan sistemlerde güvenilirlik sorunları ortaya çıkabilir.

Kullanım alanlarına sınırlı etkinlik; ORÇ sistemleri genellikle belirli sıcaklık aralıklarında en etkili olurlar. Düşük sıcaklık kaynakları veya yüksek sıcaklık gereksinimleri olan uygulamalarda etkinliği sınırlı olabilir [77].

Çalışma parametrelerine hassasiyet; ORÇ sistemi, optimum performans için belirli çalışma parametrelerine hassas olabilir. Bu, sistemin sürekli değişen koşullara uyum sağlama yeteneğini sınırlayabilir.

Çevresel etkiler; ORÇ sistemlerinin üretiminde kullanılan malzemelerin çevresel etkileri ve atıkların yönetimi de dikkate alınmalıdır. Çevre dostu bir teknoloji olmasına rağmen, bu unsurların sürdürülebilirlikle uyumlu olması önemlidir [85].

Organik rankine çevrimi ve rankine çevriminin karşılaştırılması

Her iki çevrim türü de belirli avantajlara ve dezavantajlara sahiptir ve seçim, özellikle uygulamanın spesifik gereksinimleri, enerji kaynağı türü ve çevresel etki gibi faktörler göz önüne alınarak yapılmalıdır [85].

Isı kaynakları ve sıcaklık aralığı yönünden bakıldığında; Rankine çevriminde genellikle yüksek sıcaklıklı ısı kaynakları kullanılmaktadır. Organik Rankine çevriminde ise düşük ve orta sıcaklıklı yani 80-200^{o}C ısı kaynakları kullanılmaktadır [85].

Çalışma akışkanları yönünden bakıldığında; Rankine çevriminde çalışma akışkanı olarak su kullanılmaktadır. Organik Rankine çevriminde ise organik bileşenler çalışma akışkanı olarak kullanılır. Bu durum daha düşük sıcaklık ve basınç koşullarında çalışabilen çeşitli akışkanlarla esnek bir tasarım yapılmasının önünü açmaktadır [77, 88].

Uygulanabilirlik açısından bakıldığında; Rankine çevrimi büyük santral tipi güç üretimi daha uygundur. Organik Rankine çevrimi ise daha modüler ve ölçeklenebilir bir tasarıma sahiptir. Bu durumda farklı uygulamalara ev enerji ihtiyaçlarına uygunluğu artırmaktadır [77].

Verimlilik açısından bakıldığında; Rankine çevrimi daha yüksek sıcaklıklarda çalıştığı için yüksek verimliliğe sahiptir. Organik Rankine çevrimi ise düşük ve orta sıcaklıklardaki çalışma koşullarında bile yüksek termodinamik verimlilik sağlamaktadır [85].

4. NANO AKIŞKANLAR

Nano akışkanlar terimini ilk kez 1995 yılında Choi, bir konferans makalesinde bir sıvının termal iletkenliğini nanoparçacıklar kullanarak artırma yolunu önerirken kullanmıştır. Choi, makalesinde, nanoparçacıkların baz akışkandan dikkat çekici derecede daha yüksek bir termal iletkenliğe sahip olduğunu belirtmiştir [10]. Baz akışkan içerisinde 1 - 100 nm çapında nanoparçacıkların dağıtılmasıyla süspansiyon karışım oluşturulur ve bu sayede baz akışkanın termal iletkenliğini artırmanın mümkün olduğu görülmüştür [64]. Baz akışkana nano parçacıkların eklenmesinin baz akışkanın viskozitesini ve diğer termal özelliklerini de değiştirdiği bulunmuş ve bu sayede nano akışkanlar ısı transfer sistemlerinin verimliliğini artırmada umut veren bir yol haline gelmiştir [102].

Nanoakışkan, yeni nesil enerji taşıma çalışma sıvısıdır [11]. Nanoakışkanlar nano ölçekli metal oksit veya metal parçacıklarının baz akışkana belirli bir oranda homojen olarak karıştırılmasıyla oluşturulmaktadır [12]. Isı ve kütle transferinin arttırılması açısından nanoakışkanlar, üstün termal özellikleri ve birçok potansiyel uygulaması nedeniyle araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir [103].

Nano partiküllerin varlığı nedeniyle ısı iletkenliği gibi termal özelliklerdeki artış, araştırmacıların büyük ilgisini çekmektedir. Çeşitli nanoparçacıklar ve akışkanlar kullanılmaktadır. En yaygın olarak araştırılan nanoparçacıklardan bazıları CuO, Al2O3, SiO2 ve TiO2'dir. Karbon nanotüpler (CNT'ler), çoklu duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) ve grafen tabanlı nanoakışkanlar, son zamanlarda yapılan araştırmalarda daha belirgin hale gelmiştir. Homojen nanoakışkanların sürekli olarak incelenmesinin yanı sıra, hibrit nanosıvıların etkinliğine dair araştırmalar da artmaktadır [104]. Ancak özellikle yüksek konsantrasyonlarda nano boyutlu katı partiküllerin baz akışkan içindeki kararsızlığı, uygulamasında hala bir zorluk oluşturmaktadır [105].

Farklı türde nanopartiküllerin farklı baz akışkanlara dağıtılmasıyla ilgili temel özellikler, uygulama ve karakterizasyon konularında birçok çalışma yapılmıştır [106]. Ancak, soğutucu gibi düşük sıcaklıklı bir baz akışkanda nanopartikül kullanımı, karışımın temel özelliklerinin ölçülmesi ve akışkanın sıvıdan buhara dönüşümü sırasındaki zorluklar nedeniyle hala bilinmemektedir. Bu nedenle, nano-soğutucunun kaynama sırasında nanopartikül göçü,

çökme ve farklı fazların termofiziksel özellikleri de dahil olmak üzere bir faz değişim sürecindeki işlevi tartışmalara açıktır [73].

Mühendislik alanlarında nano malzemelerin uygulanması, son iki on yılda ilginç bir konu haline gelmiş ve bazı yönlerden zorlu kalmıştır [107]. Uygulama engellerini aşmak, avantajları ve dezavantajları keşfetmek amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmaların temel amacı, daha yüksek ısı transfer kabiliyetine sahip yeni bir alan oluşturmaktır ve bu, bilgisayarlar, güç elektroniği, otomobil motorları, ısı değiştiriciler ve yüksek güçlü lazerler gibi birçok üründe kullanılmıştır [73].

4.1. Nano Akışkan Karakterizasyonu

Nano akışkanları karakterize etmek için iki teknik bulunmaktadır. İlk teknik, nanoparçacıkları karakterize ederken ikincisi sonuçta oluşan nano akışkanların kararlılığını belirlemektedir [64].

Geçirimli Elektron Mikroskopisi (TEM), Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM), X-ışını Kırınımı (XRD) ve Dinamik Işık Saçılımı (DLS), nano sıvılardaki nano parçacıkları ve hibrit nano sıvıları karakterize etmek için kullanılan bazı deneysel tekniklerdir. Bu teknikler, nano parçacıkların şeklini, morfolojisini, kristal yapısını ve parçacık boyutlarını belirlemek için kullanılmaktadır [58].

Geçirimli Elektron Mikroskopisi (TEM), ince kesitlerdeki örnekleri incelemek için kullanılan bir elektron mikroskop tekniğidir. Elektron demeti örnekten geçer ve bir detektör tarafından yakalanır. Bu, nano ölçekteki detayları görmek için yüksek çözünürlük sağlamaktadır. Nano ölçekteki yapıların morfolojik özelliklerini, boyutlarını ve dağılımlarını belirlemek için kullanılmaktadır [108].

Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM), yüzeydeki örnekleri incelemek için kullanılan bir elektron mikroskop tekniğidir. Elektron demeti örnek yüzeyine odaklanır ve yansıyan elektronlar detektör tarafından ölçülerek görüntü elde edilir. Yüzey morfolojisini, partikül boyutunu ve dağılımını değerlendirmek için kullanılmaktadır [109].

X-ışını Kırınımı (XRD), kristal yapıları belirlemek ve kristallografi analizleri yapmak için kullanılan bir tekniktir. X-ışınları, kristal yapılarının atomik düzenlemesine göre dağıldığında belirli bir desen oluşturur. Nano ölçekteki malzemelerin kristal yapılarını, fazlarını ve kristalinin özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır [102].

Dinamik Işık Saçılımı (DLS), Nano partiküllerin boyutlarını belirlemek ve dispersiyonlarının özelliklerini anlamak için kullanılan bir tekniktir. Partiküllerin termal hareketleri nedeniyle çevrelerindeki sıvının ışığı saçmasını ölçer. Nano akışkanların partikül boyutu, dispersiyon durumu gibi özelliklerini değerlendirmek için kullanılır.

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR), Termogravimetrik Analiz (TGA), Zeta potansiyeli analizi, Alan Emisyonlu SEM (FE-SEM), Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ve Raman Spektroskopisi, nano parçacıkların termal kararlılığını ve yüzey kimyasını belirlemek için kullanılabilir [110].

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR), bir örneğin kimyasal bileşimini belirlemek ve fonksiyonel grupları tanımlamak için kullanılan bir spektroskopik tekniktir. Kızılötesi ışığın örnek tarafından absorbe edilme ve yayılma özelliklerini analiz eder. Nanoparçacıkların yüzey kimyasını, kimyasal bağları ve fonksiyonel grupları belirlemek için kullanılmaktadır.

Termogravimetrik Analiz (TGA), bir malzemenin sıcaklık değişimine karşı kütlesini ölçen bir tekniktir. Nano parçacıkların termal kararlılığını, ayrışma sıcaklıklarını ve termal davranışlarını değerlendirmek için kullanılır. Nano parçacıkların termal stabilitesini ve bozunma karakteristiklerini anlamak için kullanılır.

Zeta Potansiyeli Analizi, nano parçacıkların yüzeyindeki yükü ve elektrokinetik davranışını ölçen bir parametredir. Bu analiz, nano parçacıkların dispersiyon stabilitesini ve yüzey yüklerini değerlendirmek için kullanılır.

Alan Emisyonlu SEM (FE-SEM), yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek için kullanılan bir tür taramalı elektron mikroskop tekniğidir. Nano parçacıkların morfolojisini, boyutlarını ve yüzey özelliklerini incelemek için kullanılır.

Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS), bir malzemenin bileşimini belirlemek için kullanılan bir analiz yöntemidir. X-ışınlarıyla uyarılan karakteristik radyasyonları ölçerek elementel bileşimi belirler. Nano parçacıkların kimyasal bileşimini ve elementel dağılımını belirlemek için kullanılır.

Raman Spektroskopisi, moleküler titreşim ve rotasyonları inceleyerek bir malzemenin kimyasal bağlarını ve yapısını belirlemek için kullanılır. Nano parçacıkların yüzey kimyasını, moleküler yapılarını ve kimyasal bağlarını anlamak için kullanılır [110].

4.2. Nano Akışkan Üretim Yöntemleri

Nano akışkanların üretimi genellikle tek aşamalı veya iki aşamalı bir süreçle gerçekleştirilmektedir [64].

Tek aşamalı üretim sürecinde, nano parçacıklar doğrudan temel sıvı içinde üretilir. Bu süreç, genellikle bir reaktör içinde gerçekleşir, bu reaktörde malzemenin kimyasal reaksiyonları sonucunda nano parçacıkların oluşumu meydana gelir. Bu yöntem, özellikle sıvı içinde nano boyutlu partiküllerin hızlı ve etkili bir şekilde oluşturulması gereken durumlarda kullanılır. Tek aşamalı üretim süreci, özellikle kimyasal çöktürme reaksiyonları, yüksek enerjili öğütme veya diğer sentez yöntemleri ile gerçekleştirilebilir [59, 111].

İki aşamalı üretim sürecinde, nano parçacıklar ayrı bir şekilde üretilir ve daha sonra bu parçacıklar sıvı içinde dağıtılır. İlk aşama, genellikle partikül sentezi için bir reaktörde gerçekleşir ve ikinci aşama, bu sentezlenmiş partiküllerin belirli bir sıvı içinde dispersiyonu sağlanarak gerçekleşir. Bu yöntem, farklı sentez yöntemleri ile üretilen nano parçacıkları çeşitli sıvılara entegre etme ve istenen dispersiyon karakteristiklerini elde etme esnekliği sağlar. İki aşamalı süreç, özellikle özel dispersiyon özelliklerine sahip olması gereken nano akışkan üretiminde kullanılır [67].

Her iki üretim süreci de nano akışkanların özelliklerini belirli bir uygulama veya endüstri ihtiyacına göre ayarlamak için kullanılmaktadır.

4.3. Nano Akışkan Uygulamaları

Nano akışkanlar; konvektif ısı transfer rejiminde önemli bir termal performans artışı potansiyeli göstermesi ve kritik ısı akısı üzerinde büyük bir iyileştirme sağlaması nedeniyle, çeşitli durumlarda kullanılabilmektedir. Literatürde belirtilen nano akışkanların potansiyel kullanım alanları arasında nükleer reaktörler, güneş kolektörleri, elektronik soğutma ve ısı boruları gibi enerji sektörü, kimya endüstrisinde kullanılan ısı değiştiriciler, gıda, çevre, atık ısı geri kazanımı, soğutma ve otomobil radyatörleri bulunmaktadır [58, 59]. Literatür ayrıca nano akışkanların uzay ve savunma endüstrisinde, mikro reaktörleri yoğunlaştırma, manyetik contalar ve atomik mühendislikte olası kullanımlarını belirtmektedir [59, 60].

Nano akışkanların büyük ölçüde geliştirilmiş termofiziksel özelliklere sahip olması, geniş bir kullanım yelpazesi sağlamaktadır. Bu alanlardan birkaçı aşağıda verilmiştir;

Isı transferi ve soğutma, nano akışkanlar, nano partiküllerin yüksek termal iletkenlik özellikleri sayesinde ısı transferi uygulamalarında kullanılır. Elektronik cihazların soğutulmasında, geleneksel soğutma sıvılarına kıyasla daha etkili bir performans gösterirler.

Enerji depolama ve taşıma, nano akışkanlar, enerji depolama ve taşıma sistemlerinde kullanılır. Güneş enerjisi toplama ve depolama sistemlerinde termal enerji depolama için kullanılabilecekleri gibi, bataryalarda da kullanılabilecek özel nano malzemeler içerebilirler.

Kataliz ve reaksiyon hızlandırma, nano akışkanlar, katalitik reaksiyonlarda kullanılarak kimyasal süreçleri hızlandırabilirler. Yüksek yüzey alanları ve özel reaktif özellikleri sayesinde katalitik aktiviteyi artırabilirler [64].

Optik ve elektronik uygulamalar, nano akışkanlar, optik ve elektronik uygulamalarda sensör teknolojilerini geliştirmek için kullanılabilir. Optik özellikleri ve elektronik iletkenlikleri sayesinde çeşitli sensör sistemlerinde kullanılırlar.

Petrol ve gaz endüstrisi, nano akışkanlar, petrol ve gaz endüstrisinde çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Örneğin, doğal gazın depolanması ve taşınması sırasında hidrat oluşumunu önlemek için kullanılabilirler

Bu kullanım alanları, nano akışkanların özel özelliklerinin çeşitli endüstri ve araştırma alanlarında nasıl değerlendirilebileceğini göstermektedir. Nano akışkanların kullanımı, sürekli olarak gelişen bir alan olup, araştırma ve uygulama çalışmalarıyla daha da genişletilmektedir [60, 112, 113].

4.4. Nano Akışkanların Termal Özellikleri

Araştırmacılar genellikle nano akışkan üretimi başladığından beri, bir sıvıya metalik bir madde eklenerek elde edilebilecek geliştirilmiş termofiziksel özelliklere odaklanmıştır. SiO_2, Cu, Al_2O_3 gibi farklı malzemelerin eklenmesiyle daha yüksek bir yoğunluk ve farklı yapısal özellikler elde edilebileceği düşünülmüştür. Bu, bir sıvının ortalama özelliklerinin önemli ölçüde farklı olabileceği beklentisiyle bir dizi çalışmanın yapılmasına yol açmıştır. Odaklanılan başlıca özellikler, nano akışkanın termal iletkenliği, viskozitesi, yoğunluğu ve özgül ısı kapasitesidir [64].

Termal iletkenlik, nano akışkanların termal iletkenliği, nano partiküllerin eklenmesiyle artar. Bu artış, nano partiküllerin yüksek yüzey alanına ve çeşitli termal özelliklere sahip olmalarından kaynaklanır. Nano partiküller, ısıyı daha etkili bir şekilde iletebilir, bu da nano akışkanların termal iletkenlik özelliklerini artırır. Bu özellik, özellikle ısı transferi uygulamalarında, elektronik soğutma sistemlerinde ve ısı değiştiricilerinde kullanıldığında avantaj sağlamaktadır.

Nano akışkanların termal iletkenliğini tahmin etmek için birçok model geliştirilmiştir. Geliştirilen ilk modellerden biri, Hamilton ve Crosser modeli olmuştur ve nano akışkanların termal iletkenliği için bir model geliştirirken birçok çalışmanın başlangıç noktası olmuştur. Bu model, kullanılan parçacıkların şeklini ve kesikli fazın hacim kesirini hesaba katmaktadır [19].

$$k_{na} = k_{sa}\left(\frac{k_{np} + (n-1)k_{sa} - (n-1)\varphi\left(k_{sa} - k_{np}\right)}{k_{np} + (n-1)k_{sa} + \varphi\left(k_{sa} - k_{np}\right)}\right) \tag{2.3}$$

Bu denklemde n şekil faktörünü temsil etmektedir. Bu model sıkça kullanılsa da, temel sınırlama herhangi bir termal iletkenlik hesaplamasına devam etmeden önce nano parçacıkların şeklinin karakterizasyonunu gerektirmesidir.

Termal iletkenlik hesaplaması için başka iyi geliştirilmiş bir model Maxwell denklemidir [114]. Maxwell denkleminin de sınırlamaları bulunmaktadır, çünkü bu denklem tüm parçacıkların küresel olduğunu, aynı boyuta sahip olduğunu ve düşük parçacık konsantrasyonu olduğunu varsayar, bu da parçacıklar arasında etkileşim olmadığı anlamına gelir [59].

$$k_{na} = \frac{k_{np} + 2k_{sa} + 2(k_{np} - k_{sa})\varphi}{k_{np} + 2k_{sa} - (k_{np} - k_{sa})\varphi} k_{sa} \tag{2.4}$$

Bu denklem, sadece parçacıkların hacimsel konsantrasyonunu ve iki fazın termal iletkenliklerini hesaba kattığı için, kullanımı kolay basit bir temel modeldir, ancak parçacık şekli önemli ölçüde farklı ise hafif bir hata yapabilir [115].

Viskozite, nano parçacıkların bir sıvıya eklenmesi durumunda odaklanılan bir diğer alan, temel sıvıdan kaynaklanan viskozitenin değişimidir.

Nano akışkanların viskozitesi, nano partiküllerin sıvı içindeki hareketini etkiler. Nano partiküller eklenirse, sıvının viskozitesi genellikle artar. Ancak, doğru oranda nano partikül dispersiyonu ve özel yüzey kaplamaları kullanılarak viskozite kontrol edilebilir. Bu kontrol, nano akışkanların farklı uygulama alanlarına adapte edilebilmesini sağlamaktadır [64].

Viskozite sıcaklığı ve birçok başka faktörü değiştirerek etkilenmesine rağmen, metalik parçacıkların eklenmesi sıvının viskozitesini artırmaktadır. Nano akışkanların viskozitesi için birçok model, termal iletkenlik modelleriyle birlikte oluşturulmuştur.

Küresel katı parçacıklar içeren bir sıvının viskozitesini hesaplamak için Einstein, aşağıdaki denklemi önermiştir.

$$\frac{\mu_{na}}{\mu_{sa}} = 1 + 2.5\varphi \tag{2.5}$$

Einstein'ın denkleminin sınırlamalarını azaltmak için 1952 yılında Brinkman, orta seviye partikül hacim konsantrasyonları için viskozite hesaplanması amacıyla denklemi daha da geliştirdi [116, 117].

$$\mu_{na} = \mu_{sa} \frac{1}{(1-\varphi)^{2.5}} \tag{2.6}$$

Brinkman denkleminin ardından, Lundgren, göreceli viskozitenin hesaplanması için hacim konsantrasyonunu dikkate alan bir Taylor serisi genişlemesi önerdi. Temel varsayımlar, akışın partikül-partikül etkileşimini azaltmak amacıyla son derece yavaş olduğu ve parçacıkların küresel şekle sahip olmasıdır [118].

$$\mu_{na} = \mu_{sa}(1 + 2.5\varphi + \frac{25}{4}\varphi^2 \tag{2.7}$$

Yoğunluk; nano akışkanların yoğunluğu, nano partiküllerin eklenmesiyle değişebilir. Genellikle, nano partiküller eklenirse, yoğunluk artar. Yoğunluktaki bu değişiklik, özellikle termal depolama sistemlerinde ve enerji transfer uygulamalarında önemli rol oynamaktadır. Nanosıvının yoğunluğu genellikle nanosıvının yoğunluğunu hesaplarken doğru sonuçlar verdiği bildirilen karışım kuralı kullanılarak hesaplanır.

$$\rho_{na} = \varphi\rho_{np} + (1-\varphi)\rho_{sa} \tag{2.8}$$

Özgül ısı kapasitesi; nano akışkanların özgül ısı kapasitesi, nano partiküllerin sıvı içindeki ısı depolama kapasitesini etkiler. Nano partiküller eklenirse, genellikle özgül ısı kapasitesi artar. Bu, nano akışkanların termal depolama uygulamalarında ve enerji transferinde daha etkili olmalarını sağlamaktadır.

Nano akışkanların özgül ısı kapasitesini karışım kuralını kullanarak benzer bir şekilde hesaplamak mümkündür.

$$c_{p,na} = \varphi c_{p,np} + (1-\varphi)c_{p,sa} \tag{2.9}$$

Nano parçacıklar ile temel sıvı arasında termal denge varsayımını kabul eden ve özgül ısı kapasitesini hesaplamak için kullanılan başka bir denklem aşağıda verilmektedir [119].

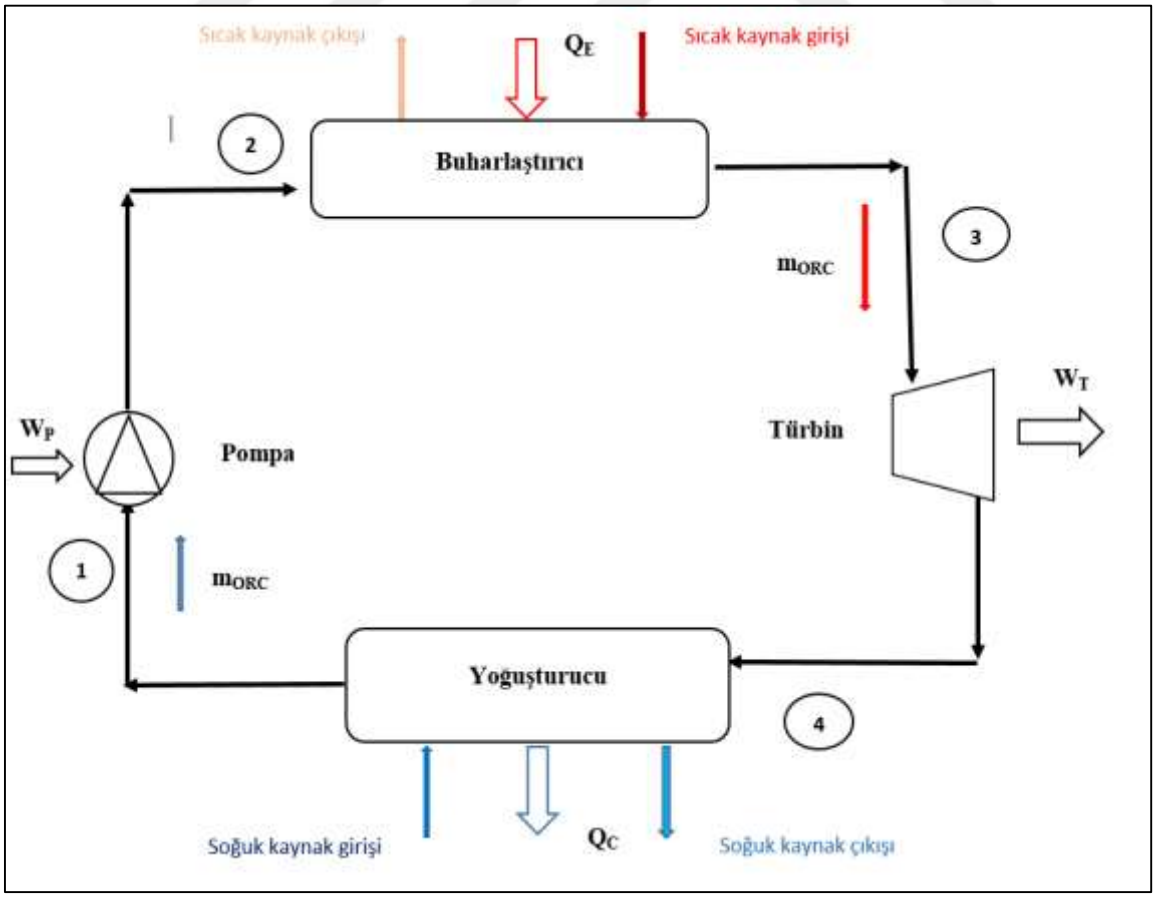
$$c_{p,na} = \frac{\varphi\rho_{np}c_{p,np} + (1-\varphi)\rho_{sa}c_{p,sa}}{\rho_{na}} \tag{4.10}$$

Organik Rankine çevrimi, genellikle genellikle güneş enerjisi, jeotermal enerji veya endüstriyel atık ısı gibi düşük sıcaklık ve düşük basınçlı ısı kaynaklarından enerji üretmek için kullanılan bir ısı enerjisi dönüşüm teknolojisidir. Nano akışkanların bu tür bir çevrimde kullanımı, genellikle termal iletkenliği artırma ve ısı transfer verimliliğini optimize etme amacını taşımaktadır [64].

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Buhardan elektrik üretimini sağlayan ORÇ sistemi, düşük sıcaklıklarda da etkili bir şekilde elektrik üretebilmek için geleneksel su buharı yerine daha yüksek buhar basıncı sağlayabilen organik akışkanlarla birlikte kullanılır.

ORÇ sistemi, pompa, buharlaştırıcı (kaynama kazanı veya evaporatör), türbin (genişletici) ve yoğuşturucu (kondenser) gibi temel bileşenlerden oluşur. Sistemde çalışma akışkanı buharlaştırıcıda ısıtılır ve yüksek basınçlı bir buhar elde edilir. Bu buhar türbine iletilir ve burada düşük basınçlı bir buhar haline getirilir. Bu aşamada, yüksek basınçlı buharın termal enerjisi, mekanik enerjiye dönüşür. Türbinden çıkan buhar daha sonra yoğuşturucuya yönlendirilir ve sıvı hale döner. Sıvının basıncı daha sonra bir pompa kullanılarak artırılır. Genel olarak, ORC sisteminde türbin giriş sıcaklığı, türbin içindeki basınç oranı ve türbin girişindeki akış hızı, sistemin en önemli faktörleridir [120]. ORÇ sisteminin şematik diyagramı Şekil 5.1. ile gösterilmektedir.

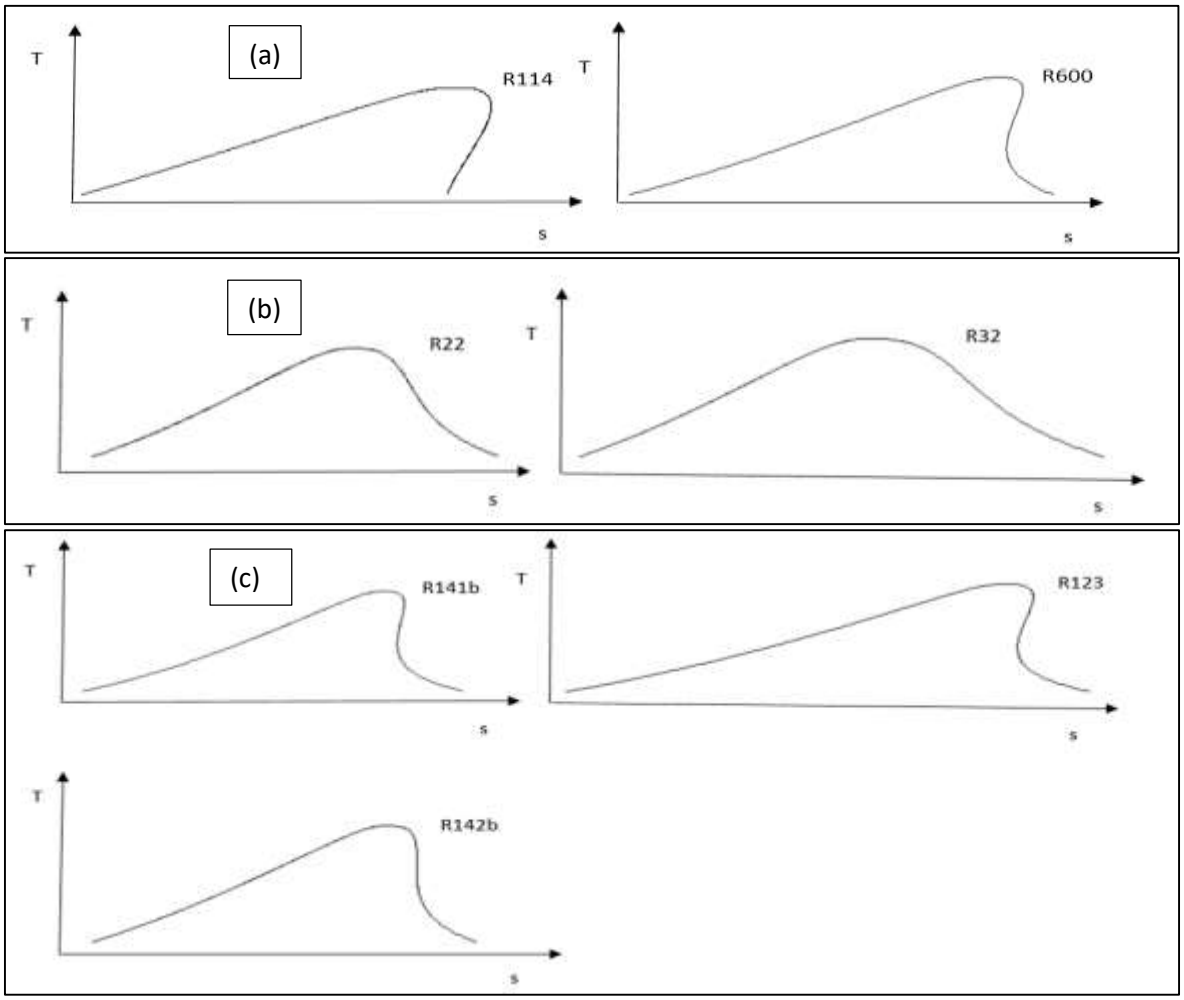


Şekil 5.1. ORÇ sistemi şematik görünümü

Çalışmalar incelendiğinde nano partiküllerin çalışma akışkanlarına eklenmesi ile sistem performanslarının arttığı görülmüştür. Bu nedenle bu tez çalışmasında, organik rankine çevriminde daha yüksek sistem performansı elde etmek için nano akışkan kullanımı teorik olarak incelenmiştir.

- Çalışma akışkanı olarak R141b, R22, R32, R123, R142b, R114 ve R600 organik akışkanları seçilmiştir.
- Termodinamik hesaplamalar Engineering Equation Solver (EES) programı kullanılarak yapılmıştır.
- Çalışma akışkanlarının termodinamik değerleri için REFPROP programından yararlanılmıştır.
- Nano partikül olarak Al_2O_3 ve TiO_2 iş akışkanlarına eklenerek nano akışkan elde edilmiştir.
- ORÇ sisteminde öncelikle seçilen çalışma akışkanlarının 0,1-0,9 aralıklarında basınç oranlarına göre verimleri bulunmuştur.
- Nano akışkanların kütle konsantrasyonu 0,01-0,09 aralığında olup her bir basınç oranı için tekrar hesaplanmıştır.
- Bulunan sonuçlar birbiri ile kıyaslanarak en uygun çalışma akışkanı, basınç oranı ve nano partikül seçilmiştir.

ORÇ'de kullanılan çalışma akışkanı T-s diyagramındaki doymuş buhar fazının eğimine göre izentropik, ıslak ve kuru olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çalışma, ORÇ sisteminde kullanılan çalışma akışkanlarına nano partikül eklenmesinin sistem performansı üzerinde etkisini incelemektedir. R141b, R123, R142b (izentropik), R22 ve R32 (ıslak), R114 ve R600 (kuru) olmak üzere 7 farklı iş akışkanı seçilmiştir. Akışkanların doymuş buhar fazının T-s diyagramınları Şekil 3.2 ile gösterilmektedir [96].



Şekil 5.2. Çalışma Akışkanlarının T-s diyagramları; a) Kuru- R114, R600 b) Islak- R22, R32, c) İzentropik- R141b, R123, R142b

Çalışmada kullanılan akışkanların özelleri Çizelge 3.1 ile gösterilmektedir [96, 97]

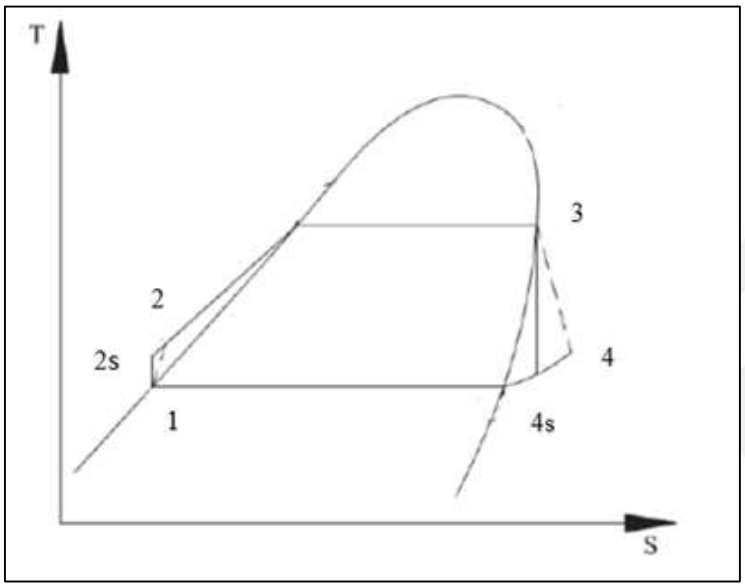
Çizelge 5.1. Çalışma akışkanlarının termo fiziksel özellikleri

Çalışma Akışkanları	Molar Kütle (g/mol)	Kritik Basınç (Mpa)	Kritik Sıcaklık (K)	Çalışma akışkanı Tipi	ODP	GWP
R141b	116,95	4,21	477,5	İzentropik	0,12	725
R22	86,47	4,99	369,3	Islak	0,05	1810
R32	52,02	5,78	351,2	Islak	0	675
R123	152,93	3,66	456,8	İzentropik	0,02	77
R142b	100,5	4,06	410,2	İzentropik	0,07	2310
R114	170,92	3,257	418,83	Kuru	1	10000
R600	58,122	3,796	425,13	Kuru	0	4

Akışkanların termofiziksel özelliklerini gösterir değerler Refprop programından alınmıştır.

Yukarıdaki tablodan anlaşılacağı gibi sistemde kullanılan akışkanlar izentropik, ıslak ve kuru olarak akışkanın türüne göre seçilmiştir.

ORC sisteminin T-s diyagramı ile gösterimi Şekil 5.3 ile aşağıda sunulmuştur [35].



Şekil 5.3. ORÇ sisteminin T-s diyagramında gösterilmesi

ORC sistemi, dört ana bileşenden oluşur: basıncı artırmak için bir pompa, çevreden ısı çekerek akışkanı buharlaştıran bir buharlaştırıcı, genişlemiş akışkandan iş elde etmek için bir genişleyici (türbin) ve çevreye ısı salmak için bir yoğuşturucudur.

5.1. Matematiksel Modelleme

ORC sisteminin modeli Refprop yardımıyla ESS ortamında analiz edilmiştir.

5.1.1. ORÇ sisteminin modellemesi

Oluşturulan model buharlaştırıcı, yoğuşturucu, genişletici ve pompanın enerji dengesine dayanmaktadır. Modeller Refprop yardımıyla EES ortamında oluşturulmuştur.

Pompa

Pompanın izentropik verimi;

$$n_p = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \tag{3.1}$$

Denklemdeki s, izentropik durumu göstermektedir [20]. Bu çalışmada pompanın izentropik verimi 0,85 olarak kabul edilmiştir [35]. h ise iş akışkanın sistemdeki entalpisidir.

Pompa işi aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$W_p = \frac{\dot{m}(P_3 - P_1)}{\rho n_p} \tag{3.2}$$

Denklemde $\dot{m}$, iş akışkanının kütle akış hızıdır. Hesaplamalarda kolaylık sağlaması için kütle akış hızı 1 kg/s alınmıştır. P_3 türbin giriş basıncını, P_1 pompa giriş basıncını göstermektedir [59].

Buharlaştırıcı

Bir buharlaştırıcıda ORC sistemi tarafından alınan termal enerji aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [59].

$$Q_E = \dot{m}(h_3 - h_2) \tag{3.3}$$

Türbin

Türbinin izentropik verimi aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır. Bu çalışmada türbin izentropik verimi 0,85 olarak alınmıştır.

$$n_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \tag{3.4}$$

Türbin işi aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$W_t = \dot{m}(h_3 - h_4) \tag{3.5}$$

Yoğuşturucu

Bir kondenserde ORC sistemi tarafından atılan termal enerji aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [59]. Çalışma akışkanının konsender çıkış sıcaklığı 20^0C'dir.

$$Q_C = \dot{m}(h_4 - h_1) \tag{3.6}$$

Sistemin net işi

$$W_{net} = W_t - W_p \tag{3.7}$$

Sistemin termal verimi aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [20].

$$n_{th} = \frac{W_{net}}{Q_E} \tag{3.8}$$

Basınç oranı

Boyutsuz bir parametre olmakla birlikte bu çalışmada değişken parametre olarak alınmıştır.

$$P_r = \frac{P_3}{P_{cr}} \tag{3.9}$$

Seçilen iş akışkanlarının türbin giriş basıncının kritik basınlarına oranı ile bulunmaktadır [59]. Çizelge 5.2 ile basınç oranları ve çalışma akışkanlarının türbin giriş basınçları kPa biriminden verilmektedir.

Çizelge 5.2. Çalışma akışkanlarının türbin giriş basınçları (kPa)

Basınç Oranı	R141b,P_3	R22, P_3	R32, P_3	R123, P_3	R142b, P_3	R114, P_3	R600, P_3
0,1	421	499	578,2	366,18	405,5	325,7	379,6
0,3	1263	1497	1734,6	1098,9	1216,5	977,1	1138,8
0,5	2105	2495	2891	1830,9	2027,5	1628,5	1898
0,7	2947	3493	4047,4	2563,26	2838,5	2279,9	2657,2
0,9	3789	4491	5203,8	3295,62	3649,5	2931,3	3416,4

Basınç oranı, türbinin verimliliği, güç üretimi ve sistem performansı üzerinde doğrudan etkili olan bir parametredir. Uygun bir basınç oranı belirlemek, sistem tasarımında ve optimizasyonunda kritik bir adımdır. Akışkanın fiziksel özellikleri, kullanılan çalışma akışkanı türü, sıcaklık aralığı ve tasarım hedefleri, uygun basınç oranını belirlemede etkilidir.

5.1.2. Nano akışkan modellemesi

Bu çalışmada yaygın kullanımları nedeniyle nano partikül olarak Al_2O_3 ve TiO_2 seçilmiştir [121].

Nano partikül hacim konsantrasyonu aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır [9].

$$\Phi = \frac{\omega \rho_{sa}}{\omega \rho_{sa} + (1-\omega)\rho_{np}} \tag{3.10}$$

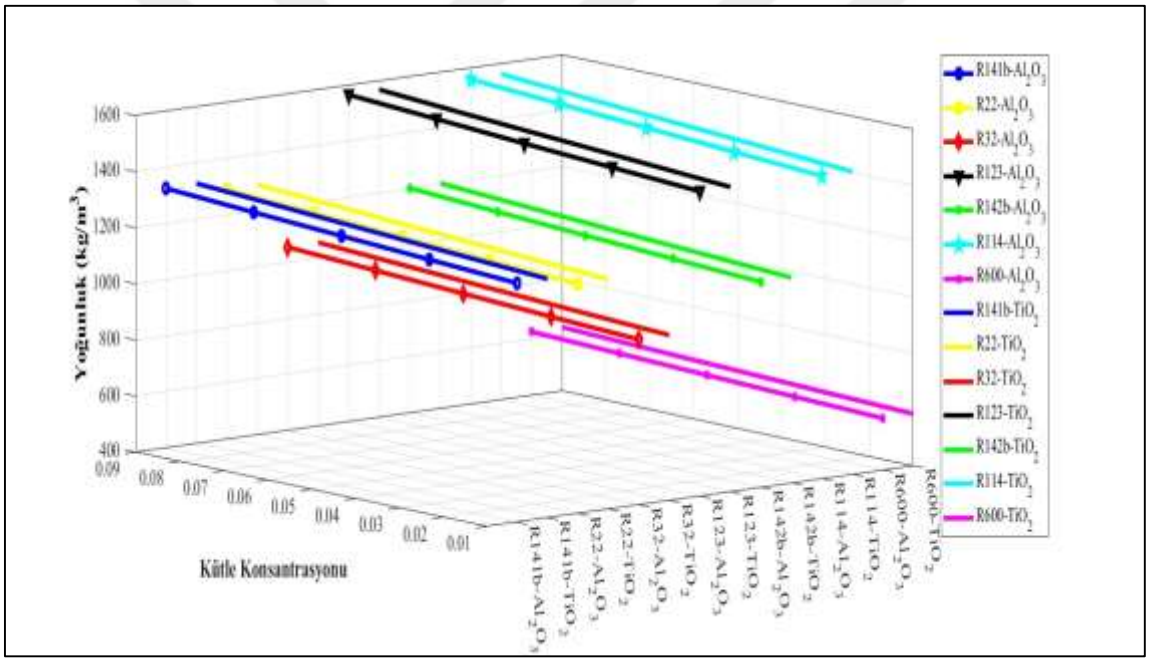
Denklemde yer alan ω, kütle konsantrasyonunu, ρ_{np}, nano partikül yoğunluğunu, ρ_{sa} ise iş akışkanı yoğunluğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, ORÇ sistemine Al_2O_3 ve TiO_2 nano parçacıkları 20°C'de eklenmiştir, çünkü pompa giriş sıcaklığı 20°C olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar, çalışma akışkanlarının sıvı fazı ve kütle konsantrasyonu için yapılmıştır. Nano akışkanların termofiziksel özellikleri değişimi aşağıdaki şekiller yardımıyla verilmiştir.

Nano akışkan yoğunluğunun hesaplanması aşağıdaki formül iledir.

$$\rho_{nsa} = \Phi\rho_{np} + (1 - \Phi)\rho_{sa} \tag{3.11}$$

Denklem kullanılarak hesaplanan değerler Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



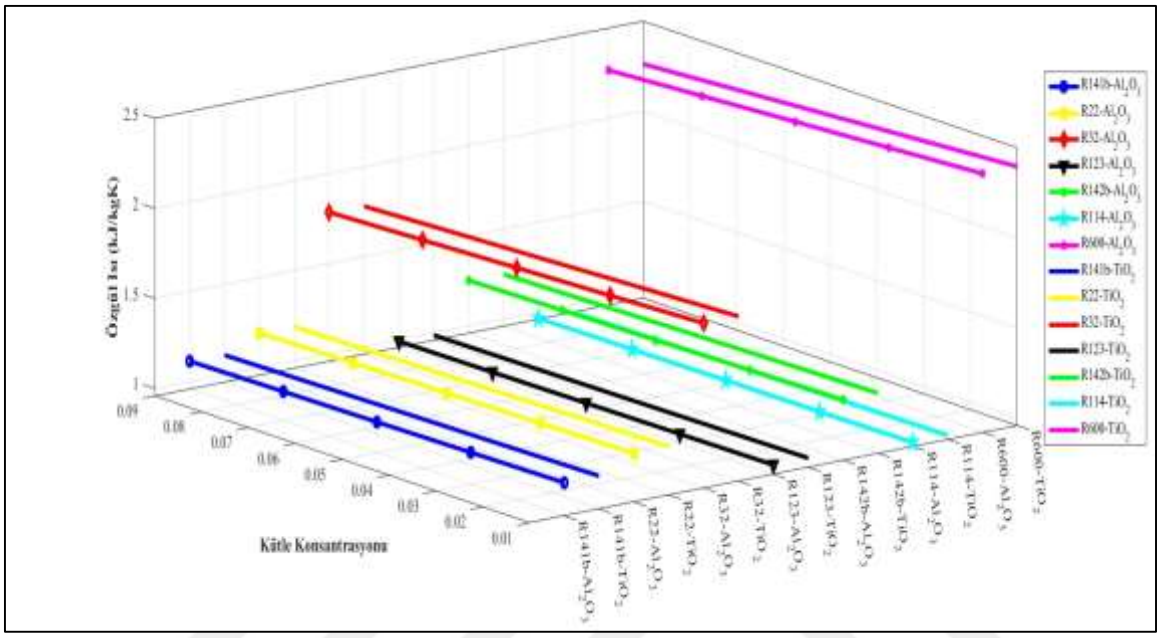
Şekil 5.4. Kütle konsantrasyonu ve yoğunluk değerleri

Şekil 5.4. nano akışkan yoğunluk değerlerinin kütle konsantrasyonlarındaki değişimlere yanıt olarak arttığını göstermektedir. Kütle konsantrasyonları arttıkça yoğunlukları da artmaktadır. TiO_2 katkılı akışkanların yoğunluklarının, Al_2O_3 katkılı olanlara kıyasla daha belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. R123-TiO_2 nano akışkanı ve R114-TiO_2 nano akışkanının yoğunluk değerleri birbirine yakın görünmektedir.

Nano akışkan özgül ısısı, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır [9]:

$$c_{p,nsa} = \frac{\Phi \rho_{np} c_{p,np} + (1-\Phi)\rho_{sa} c_{p,sa}}{\rho_{nsa}} \tag{3.12}$$

Denklem kullanılarak hesaplanan değerler Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Kütle konsantrasyonu ve özgül ısı değerleri

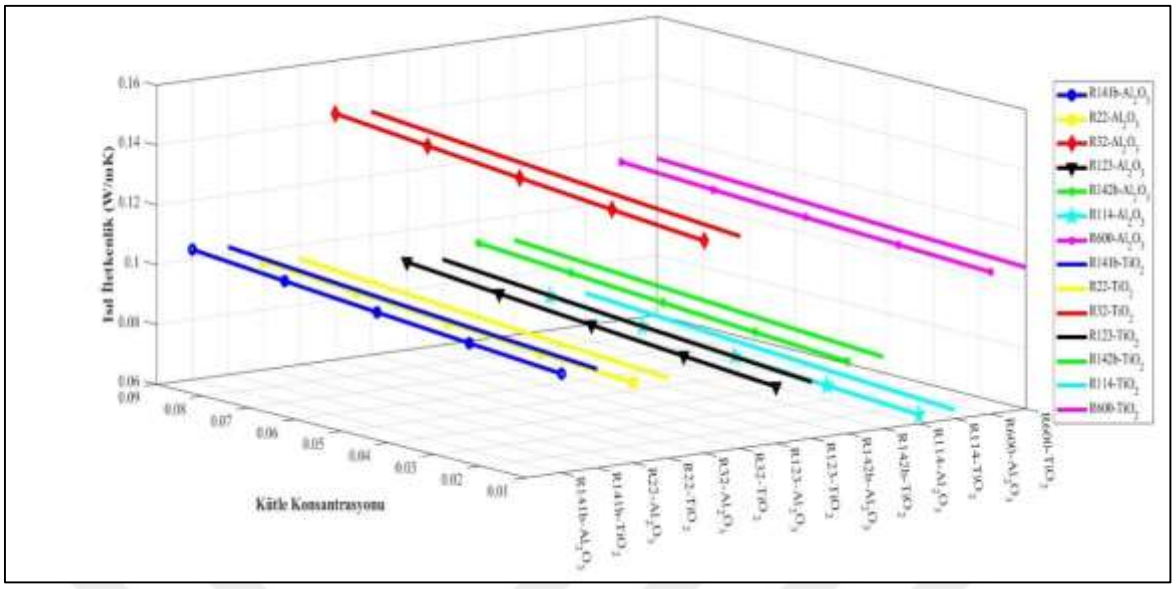
Şekil 5.5. ile nano akışkanların farklı kütle konsantrasyonlarında ısı sığalarının kütle konsantrasyonuyla orantılı bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Kütle konsantrasyonları arttıkça ısı sığaları azalmıştır. TiO_2 eklenmiş akışkanların Al_2O_3 eklenmiş akışkanlara göre ısı sığaları daha fazla azalmıştır.

Nano akışkanın ısıl iletkenliğinin hesaplanması aşağıdaki denklem ile yapılmaktadır.

$$\frac{k_{nsa}}{k_{sa}} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{sa} - (n-1)\Phi(k_{sa} - k_{np})}{k_{np} + (n-1)k_{sa} + \Phi(k_{sa} - k_{np})} \tag{3.13}$$

Denklemde yer alan k_{sa}, iş akışkanının ısıl iletkenliğini, k_{nsa} ise nano akışkanın ısıl iletkenliğini göstermektedir. n ifadesi 50 nm çapında küresel olarak kabul edilen parçacık şekli için sabit değerdir [9].

Denklem kullanılarak hesaplanan değerler Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



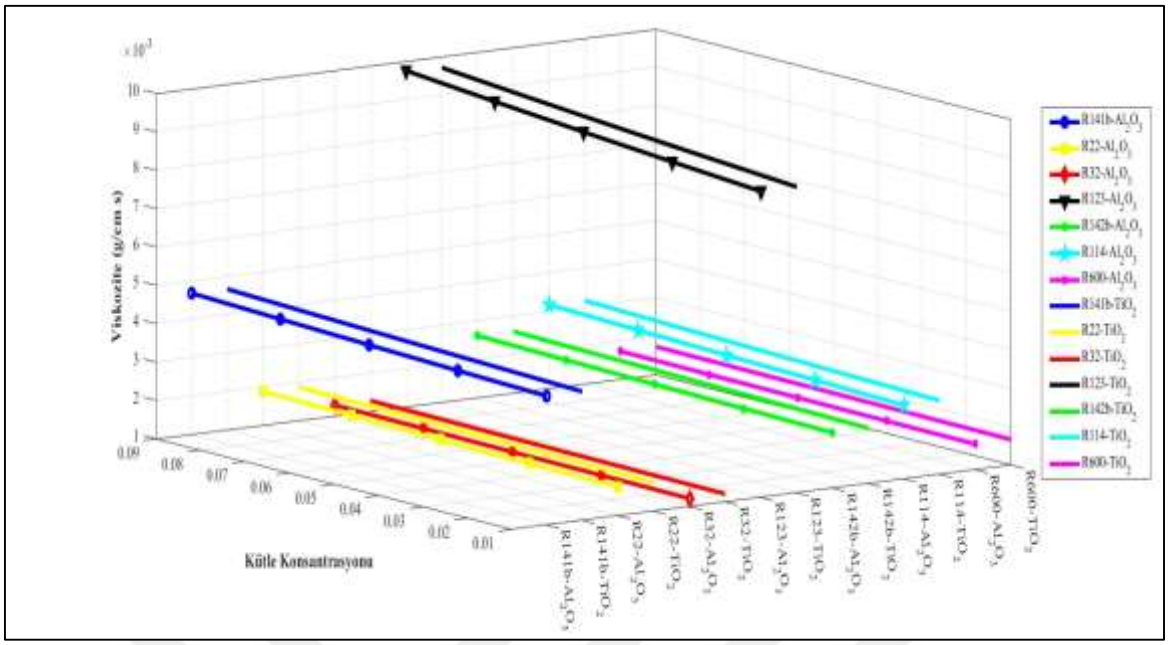
Şekil 5.6. Kütle konsantrasyonu ve ısıl iletkenlik değerleri

Şekil 5.6. ile nano akışkanların farklı kütle konsantrasyonlarında ısıl iletkenliklerinin kütle konsantrasyonuyla orantılı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Kütle konsantrasyonları arttıkça ısıl iletkenlikleri artmıştır. TiO_2 eklenmiş akışkanların Al_2O_3 eklenmiş akışkanlara göre ısıl iletkenliği daha az artmıştır. TiO_2 nano partikülünün ısıl iletkenliğinin Al_2O_3'e göre daha düşük olması nedeniyle olduğu anlaşılmaktadır.

Nano akışkanın viskozitesinin bulunması ise aşağıdaki denklem iledir.

$$\frac{\mu_{nsa}}{\mu_{sa}} = 1 + 2{,}5\Phi + 6{,}5\Phi^2 \qquad (3.14)$$

Denklem kullanılarak hesaplanan değerler Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Kütle konsantrasyonu ve viskozite değerleri

Şekil 5.7. ile nano akışkanların farklı kütle konsantrasyonlarında viskozitelerinin kütle konsantrasyonuyla orantılı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Kütle konsantrasyonları arttıkça viskoziteleri artmıştır. TiO_2 eklenmiş akışkanların Al_2O_3 eklenmiş akışkanlara göre viskozitesi daha az artmıştır.

5.1.3. Sayısal modelin varsayımları

ORÇ sistemi ve nano partiküller hakkında yapılan kabuller aşağıda yer almaktadır.

- Çalışma akışkanına eklenen nano partiküller homojen dağılmaktadır.
- ORÇ sisteminde nano partiküller çökelme veya kümelenme olmadan kararlılık göstermektedir.
- Çalışma akışkanı ve eklenen nano partiküller aynı sıcaklığa sahip termodinamik dengededir.

5.2. Metodoloji

Bu çalışma, Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) sistemi üzerinde kapsamlı bir analiz gerçekleştirmek amacıyla yedi farklı iş akışkanının seçilmesine odaklanmıştır. İzentropik,

ıslak ve kuru akışkanlar arasından yapılan seçim, akışkan tipine göre gruplandırılmıştır. İzentropik akışkanlar olarak R141b, R142b ve R123; ıslak akışkanlar olarak R22 ve R32; kuru akışkanlar olarak da R114 ve R600 tercih edilmiştir. Bu akışkanlar arasında R141b, R142b ve R123, uzun süredir soğutma ve ısıtma uygulamalarında yaygın olarak kullanılan akışkanlardır. R22, ozon tabakasına zarar verme potansiyeli nedeniyle kullanımı kısıtlanan bir akışkandır. R32, çevre dostu bir alternatif olarak R22'nin yerine kullanılabilir. R114, endüstriyel uygulamalarda uzun yıllar boyunca tercih edilen bir akışkandır. R600 ise doğal bir akışkan olup düşük çevresel etkiye sahiptir. Bu akışkanların seçimi, eski tip geleneksel akışkanlar ile yeni tip akışkanların ORÇ sisteminde birbirlerinin yerine kullanılma potansiyelini araştırmak amacını taşımaktadır.

Araştırmanın ilk aşamasında, her bir iş akışkanının kritik basınç ve sıcaklıkları belirlenmiş ve 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 ve 0,9 basınç oranlarına göre türbin giriş basıncı hesaplanmıştır. Türbin girişinde iş akışkanının doymuş buhar eğrisi üzerinde kabul edilerek ORÇ sistemi verimi hesaplanmıştır. Bu seçim, türbinin iş akışkanını doymuş buhar fazında işlettiği durumu ifade etmektedir. Türbin girişinde iş akışkanının doymuş buhar eğrisi üzerinde kabul edilmesi, enerji dönüşümündeki kayıpları minimize etmeyi amaçlamaktadır ve bu yaklaşım ile türbinin daha etkin bir şekilde çalışması sağlanmaktadır.

Daha sonra, seçilen iş akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partiküllerin eklenmesi ile oluşturulan nano akışkanların termo-fiziksel özellikleri, EES programı kullanılarak detaylı bir şekilde hesaplanmıştır. Al_2O_3 ve TiO_2 nano partiküllerin seçimi, nano partiküllerin termo-fiziksel özellikleri, yüksek ısı iletkenliği ve termal kararlılık gibi avantajlar sağlayarak iş akışkanlarının ısı transfer özelliklerini artırmak amacını taşımaktadır. Bu durum, organik Rankine çevrim sisteminin verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Ayrıca, Al_2O_3 ve TiO_2 gibi nano partiküllerin termo-fiziksel özellikleri, iş akışkanlarının stabilitesini artırabilir ve sistem performansını olumlu yönde etkileyebilir. Bu seçim aynı zamanda Al_2O3 ve TiO_2 gibi nano partiküllerin genellikle çevre dostu ve düşük toksisiteye sahip malzemeler olmalarından kaynaklanmaktadır.

EES programı, seçilen akışkanların termodinamik özelliklerini belirlemek ve çeşitli parametrelerle sistemin performansını modellenmek için etkili bir şekilde kullanılmıştır. Elde edilen termo-fiziksel veriler, Matlab programı kullanılarak grafiksel olarak görselleştirilmiştir.

Çalışmada kondenser çıkış sıcaklığı, çeşitli faktörlerin etkisi altında özel bir değer olan 20 derece olarak belirlenmiştir. Bu karar, çevresel etkiler ve kullanılan akışkanların özellikleri gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, seçilen iş akışkanlarının termodinamik özellikleri ve stabiliteleri, kondenser çıkış sıcaklığının belirlenmesinde kritik bir rol oynamıştır. Bu akışkanların belirli sıcaklık koşullarında verimli bir şekilde çalışabilmeleri ve sistem performansını optimize etmeye olanak tanımak amacıyla 20ºC tercih edilmiştir. Nano akışkanın termo-fiziksel özellikleri, iş akışkanlarının sıvı fazda olduğu 20°C durumu için özel olarak belirlenmiştir.

Bu aşamanın ardından, 0,01; 0,03; 0,05; 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonlarında oluşturulan nano akışkanlarla ORÇ sisteminin performansı değerlendirilmiştir. Son olarak, ilk aşamada belirlenen basınç oranları için her bir kütle konsantrasyonu kullanılarak ORÇ sistemi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. EES programı, seçilen akışkanların termofiziksel değerlerini almak ve organik Rankine çevriminin çözümü için kullanılan denklemleri çözmek amacıyla aktif olarak kullanılmıştır. Bu entegre yaklaşım, akışkanların termodinamik özelliklerini belirleme ve ORÇ sisteminin performansını değerlendirme süreçlerini birleştirerek daha kapsamlı ve etkili bir çözüm stratejisi sunmaktadır.

Bu çalışmada, Al_2O_3 ve TiO_2 nano partiküllerinin boyutlarına özel bir vurgu yapılmamıştır. Kullanılan nano partiküllerin geniş bir boyut dağılımına sahip olmalarından dolayı, çalışmanın odak noktası nano partikül boyutları üzerinde derinlemesine bir analiz yapmak değildir. Ancak, gelecekteki çalışmalarda farklı nano partikül boyutlarının ısı transfer performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bu konuda detaylı bir araştırma yapılabilir.

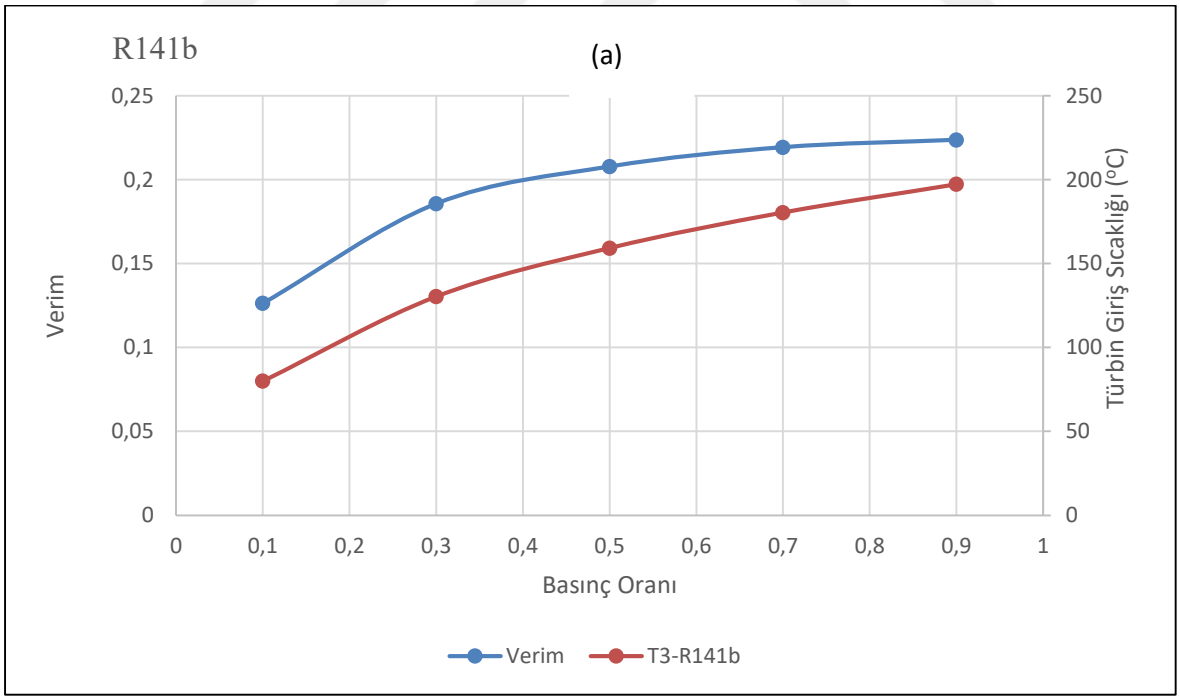
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

ORÇ sistemi için kullanılan çalışma akışkanları akışkan türüne göre seçilmiştir. EES programı kullanılarak bulunan değerlerin grafiklerinin çiziminde Excel ve Matlab programlarından yararlanılmıştır.

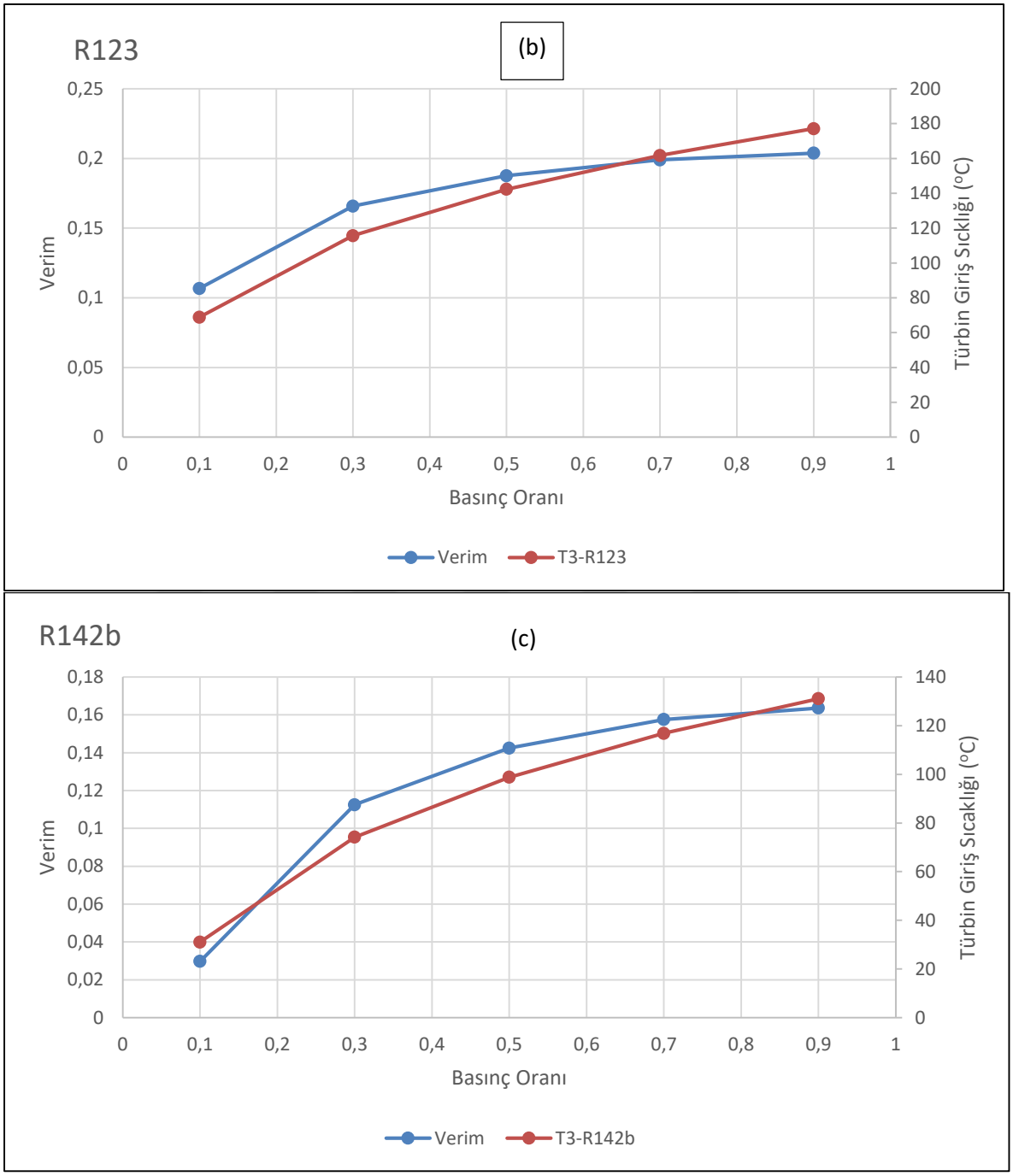
6.1. Saf Akışkanlar için Sabit Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları

R141b, R123 ve R142b akışkanları izentropiktir. R22 ve R32 akışkanları akışkan türüne göre ıslaktır. R114 ve R600 akışkanları ise kuru tip akışkandır. Öncelikle bu akışkanların ORÇ sisteminde 0,1 basınç oranından başlayarak türbin giriş sıcaklıkları ve basınç oranlarına göre verimleri bulunmuştur.

İzentropik akışkanlar için basınç oranı, türbin giriş sıcaklığı ve verim değerlerini gösteren grafik Şekil 6.1 aşağıda yer almaktadır.



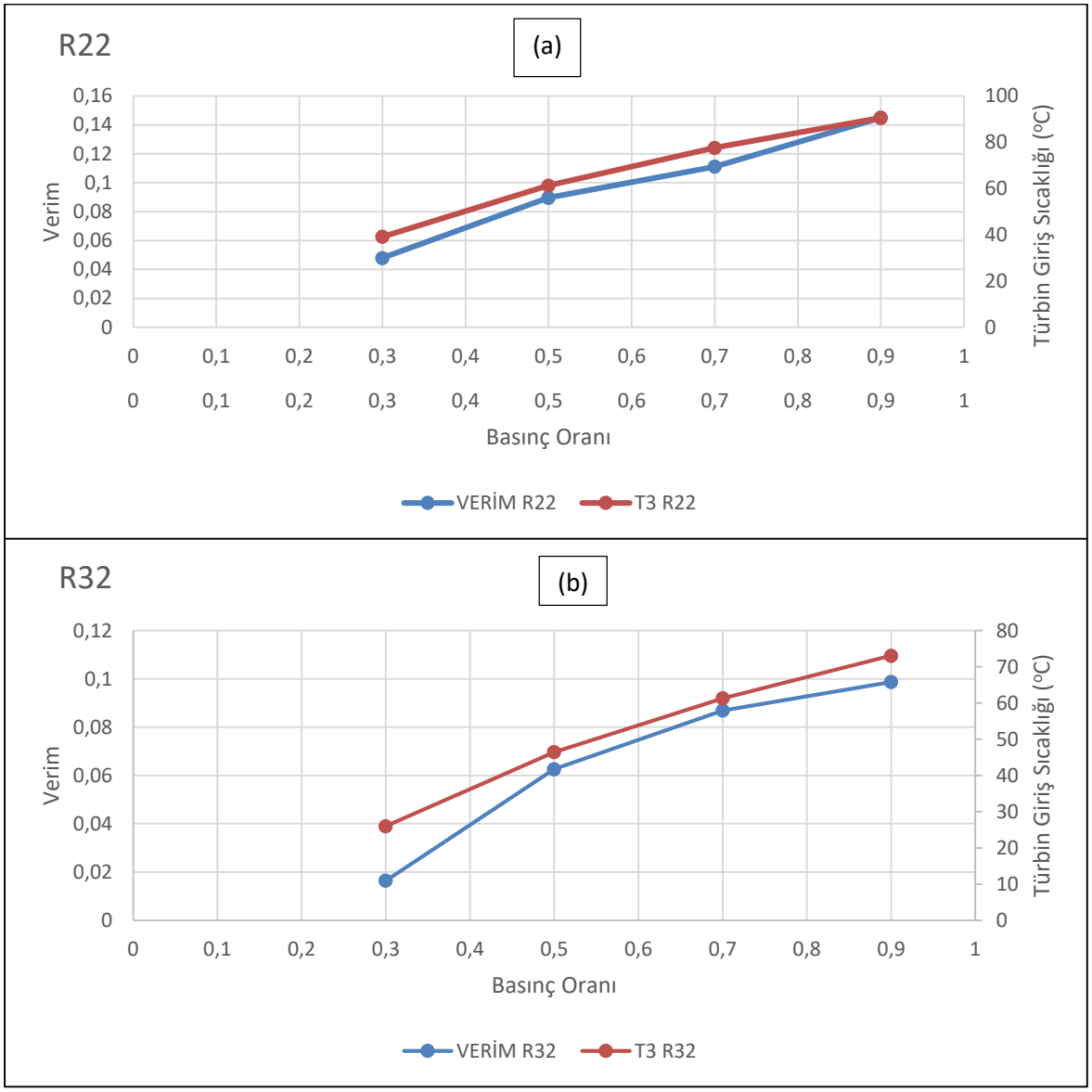
Şekil 6.1. İzentropik akışkanların basınç oranı, verim ve türbin giriş sıcaklığı değişimleri; a) R141b, b) R123, c) R142b



Şekil 6.1. (devam) İzentropik akışkanların basınç oranı, verim ve türbin giriş sıcaklığı değişimleri; a) R141b, b) R123, c) R142b

R141b ve R142b akışkanlarının basınç oranına göre verim ve türbin giriş sıcaklıklarını gösteren değerler paralel şekilde artmıştır. Basınç oranı arttıkça verim artmış buna paralel olarak türbin giriş sıcaklığı da artmıştır. Fakat R123 akışkanında türbin giriş sıcaklığı 150ºC'nin üzerine çıktığında verim beklenen şekilde artmamıştır.

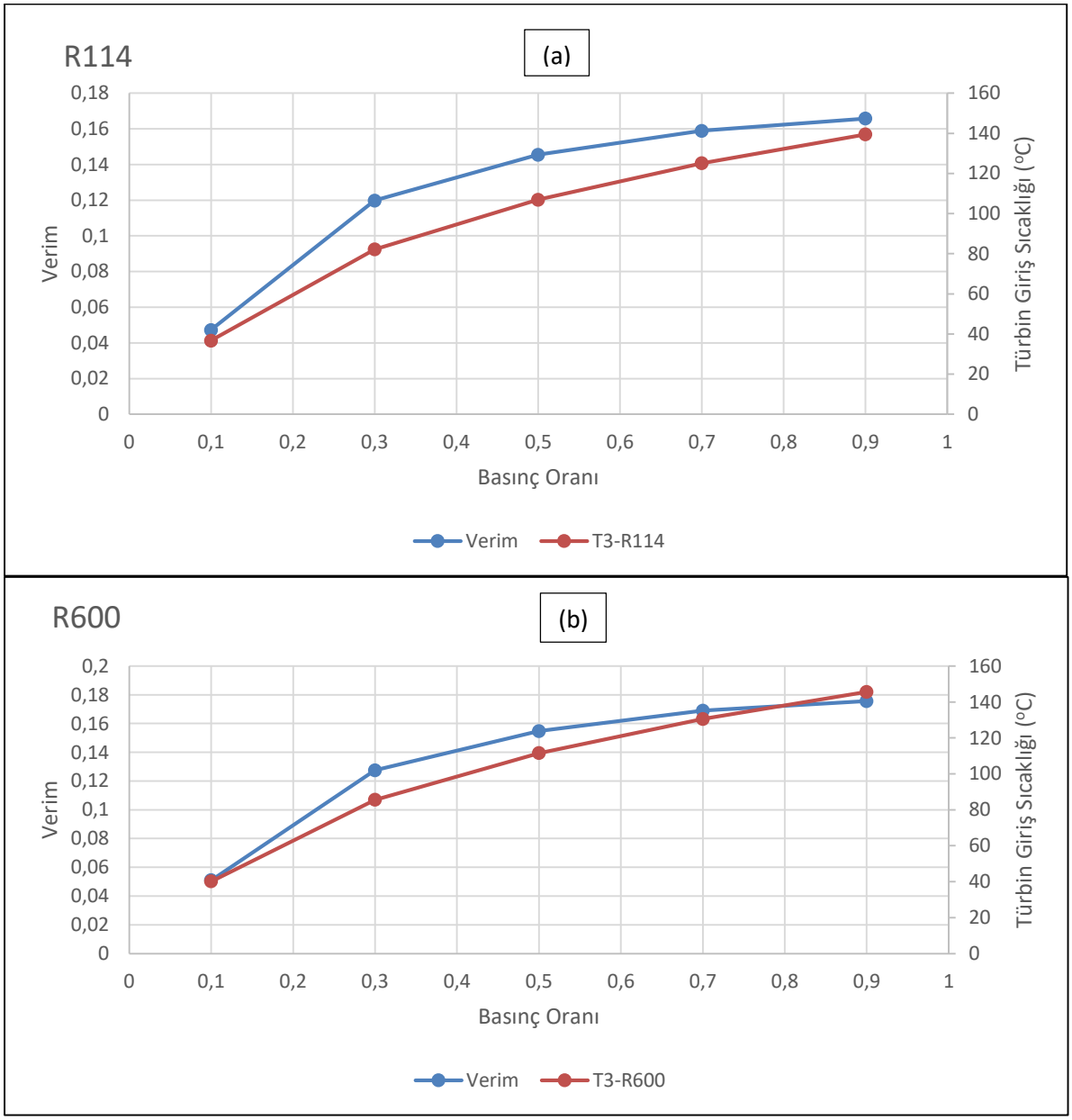
Islak akışkanlar için basınç oranı, türbin giriş sıcaklığı ve verim değerlerini gösteren grafik şekil 6.2. aşağıda yer almaktadır.



Şekil 6.2. Islak akışkanların basınç oranı, verim ve türbin giriş sıcaklığı değişimleri; a) R22, b) R32

R22 ve R32 akışkanlarının basınç oranına göre verim ve türbin giriş sıcaklıklarını gösteren değerler paralel şekilde artmıştır. Basınç oranı arttıkça verim artmış buna paralel olarak türbin giriş sıcaklığı da artmıştır. ORÇ sisteminde R22 akışkanının kullanımında 0,2 basınç oranının üstünde pozitif değerde verim elde edilmektedir. R32 akışkanında ise basınç oranının yaklaşık olarak 0,27 olması durumunda verim pozitif değere ulaşmaktadır.

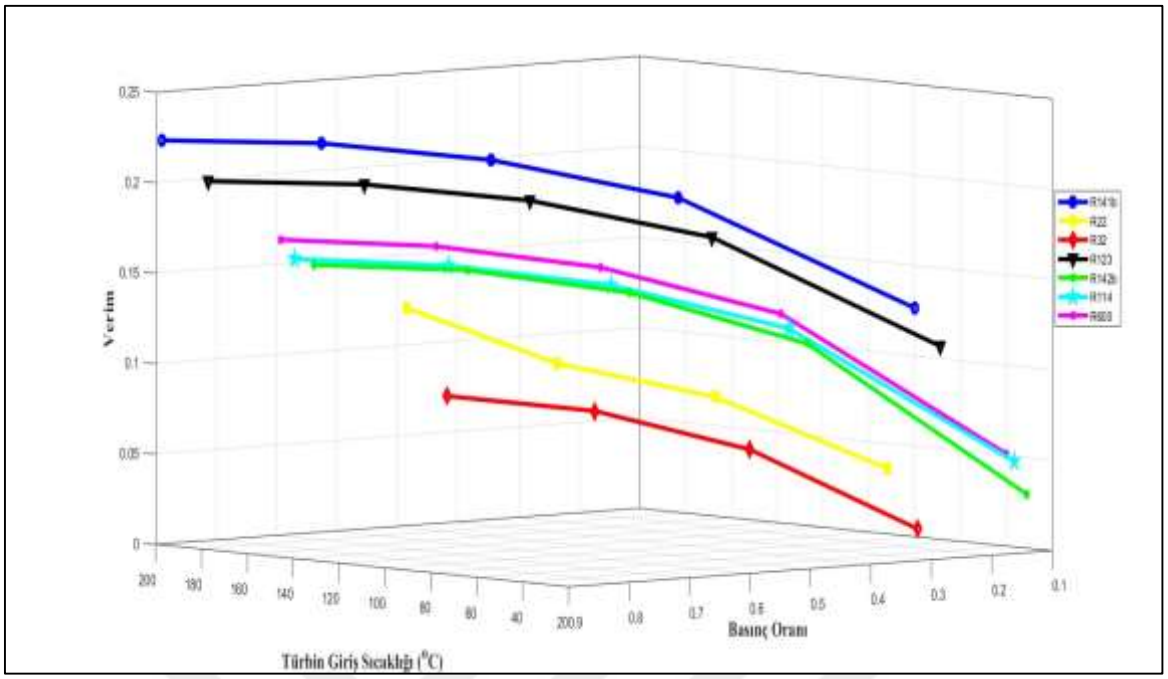
Kuru akışkanlar için basınç oranı, türbin giriş sıcaklığı ve verim değerlerini gösteren grafik Şekil 6.3 ile aşağıda yer almaktadır.



Şekil 6.3. Kuru akışkanların basınç oranı, verim ve türbin giriş sıcaklığı değişimleri; a) R114, b) R600

R114 ve R600 akışkanlarının basınç oranına göre verim ve türbin giriş sıcaklıklarını gösteren değerler paralel şekilde artmıştır. Basınç oranı arttıkça verim artmış buna paralel olarak türbin giriş sıcaklığı da artmıştır.

Bütün akışkan değerlerinin bir arada olduğu grafik Şekil 6.4 ile aşağıdadır.



Şekil 6.4. Çalışma akışkanlarının basınç oranı, verim ve türbin giriş sıcaklığı değişimleri

Her bir akışkan için basınç oranı değeri arttıkça termal verimin arttığı görülmektedir. Basınç oranına bağlı olarak türbin giriş basıncı ve sıcaklığı artmıştır.

Basınç oranı 0,1 ve 0,3 arasında verimdeki artışın daha yüksek olduğu, 0,7 ve 0,9 arasında ise verim artışının daha az olduğu Şekil 6.4. ile belirlenir. R22 akışkanı için, 0,1-0,3 basınç oranları arasındaki eğim 0,56 iken, 0,7-0,9 basınç oranlarındaki eğim 0,16'ya düşmektedir. R141b akışkanı için bu değerler sırasıyla 0,29 ve 0,022'dir. R32 akışkanı için ise bu değerler 0,62 ve 0,058 olarak belirlenmiştir. R123 akışkanında ise eğim değerleri 0,29 ve 0,024 olarak hesaplanmıştır. R114 akışkanında bu değerler sırasıyla 0,36 ve 0,03'tür. R600 akışkanında ise eğim değerleri 0,38 ve 0,033 olarak bulunmuştur. Son olarak, R142b akışkanında eğim değerleri 0,41 ve 0,03'tür. Bu verilere göre, her akışkan için 0,1-0,3 basınç oranları arasındaki eğim, 0,7-0,9 basınç oranlarındaki eğime kıyasla daha yüksektir. Özellikle R22, R32 ve R142b akışkanları, belirtilen basınç oranları arasında daha dik bir eğime sahiptir, bu da daha yüksek bir etkinlik artışını göstermektedir.

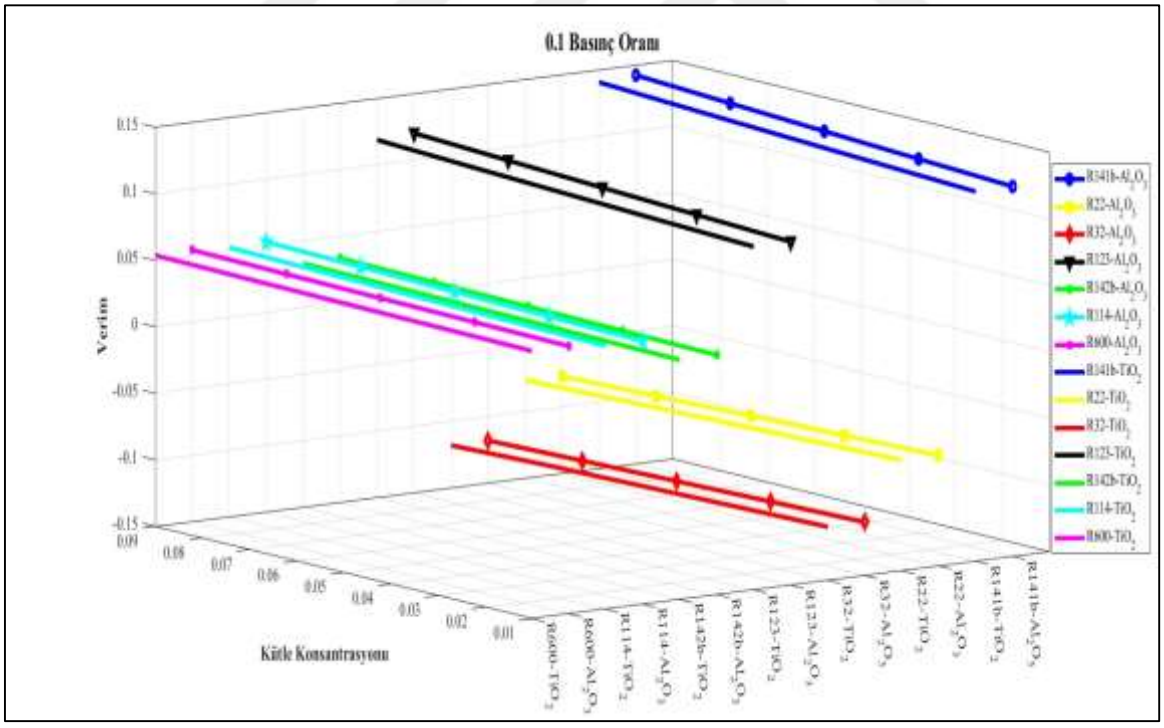
R22 ve R32 akışkanları için belirlenen değerlerde 0,1 basınç oranında pozitif sonuç elde edilememesi nedeniyle, grafiklerde 0,3 basınç oranı değerinden başlayarak incelenmektedir.

İzentropik akışkanlar arasında, R141b ve R123 en yüksek verimlilik değerlerini sergilemektedir; ancak izentropik olmasına rağmen, R142b daha düşük bir verimlilikte çalışmaktadır.

R600 ve R114 akışkanları kuru tip akışkan olarak birbirlerine yakın değerlerde çalışmakta oldukları anlaşılmıştır.

6.2. 0,1 Basınç Oranında Farklı Kütle Konsantrasyonlarında ORÇ Hesaplamaları

ORÇ sisteminde 0,1 basınç oranı için R141b, R123, R142b, R22, R32, R114 ve R600 akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek 0,01; 0,03; 0,05; 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonlarında nano akışkan elde edilmiştir. Her bir nano akışkan için sistem performansı hesaplanmıştır. Şekil 6.5 ile 0,1 basınç oranında kütle konsantrasyonlarındaki değişim ve sistem performansları gösterilmiştir.

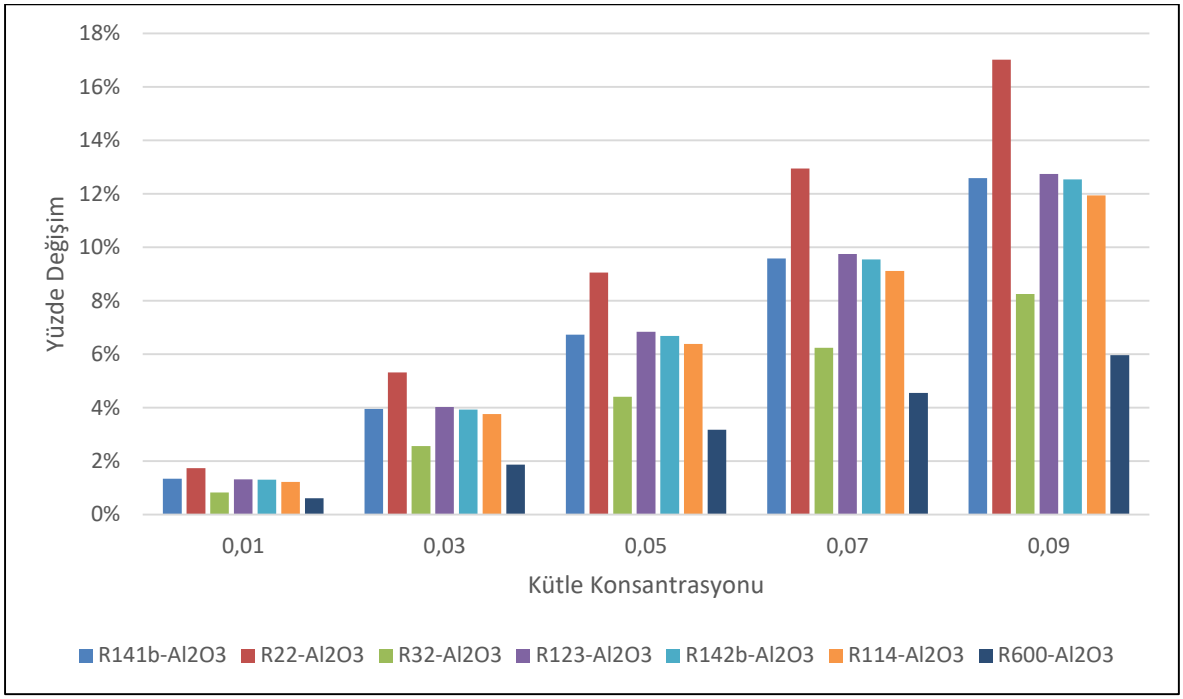


Şekil 6.5. 0,1 basınç oranında kütle konsantrasyonu ve verim değişimleri

ORÇ sisteminin basınç oranının 0,1 olarak sabit tutulduğu durum Şekil 6.5. ile gösterilmiştir. Çalışma akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek elde edilen nano akışkanların kütle konsantrasyonları arttıkça sistem veriminin arttığı gözlemlenmektedir. Fakat R22 ve R32

akışkanları için 0,1 basınç oranındaki değerler için her ne kadar nano partikül eklenerek verim arttırılsa da pozitif değerlere ulaşmamıştır.

0,1 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen Al_2O_3 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 6.6. ile gösterilmiştir.

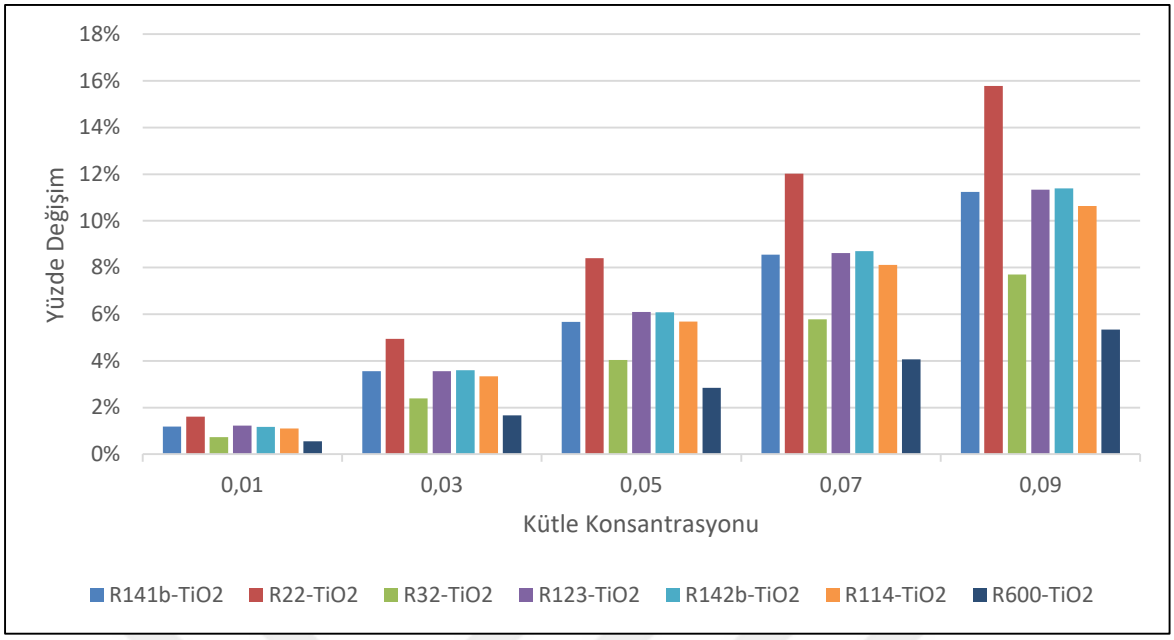


Şekil 6.6. 0,1 basınç oranında Al_2O_3 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,1 sabit basınç oranında Al_2O_3 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkan R22-Al_2O_3 nano akışkanı olmuştur.

0,09 kütle konsantrasyonunda R141-Al_2O_3, R123-Al_2O_3 ve R142b-Al_2O_3 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %13 olmuştur. Aynı şekilde 0,07 kütle konsantrasyonunda R141-Al_2O_3, R123-Al_2O_3 ve R142b-Al_2O_3 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %10 olmuştur.

0,1 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen TiO_2 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi yüzdelik olarak Şekil 6.7 ile verilmiştir.

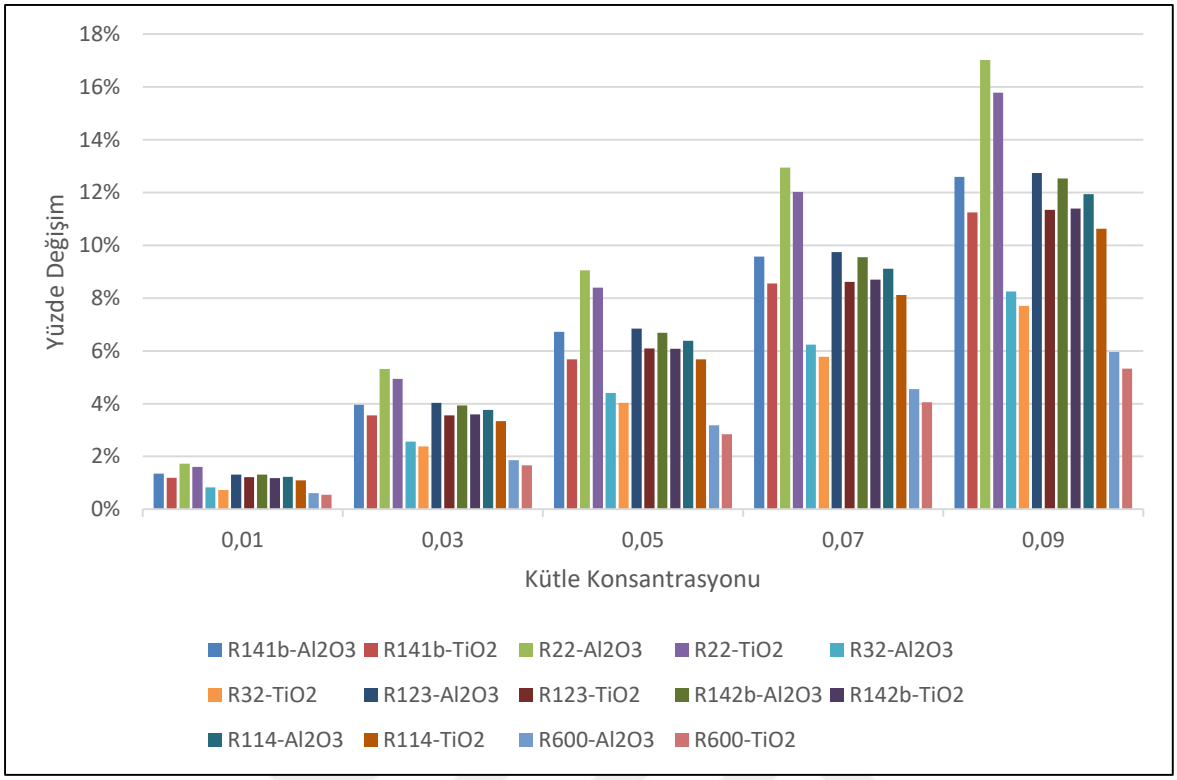


Şekil. 6.7. 0,1 basınç oranında TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,1 sabit basınç oranında TiO_2 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkan R22-TiO_2 nano akışkanı olmuştur.

0,09 kütle konsantrasyonunda R141-TiO_2, R123-TiO_2, R142b-TiO_2 ve R114-TiO_2 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %11 olmuştur. Aynı şekilde 0,07 kütle konsantrasyonunda R141-Al_2O_3, R123-Al_2O_3 ve R142b-Al_2O_3 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %9 olmuştur.

0,1 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 4.8 ile gösterilmiştir.



Şekil. 6.8. 0,1 basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,1 sabit basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkanlar R22-Al_2O_3 ve R22-TiO_2 nano akışkanları olmuştur.

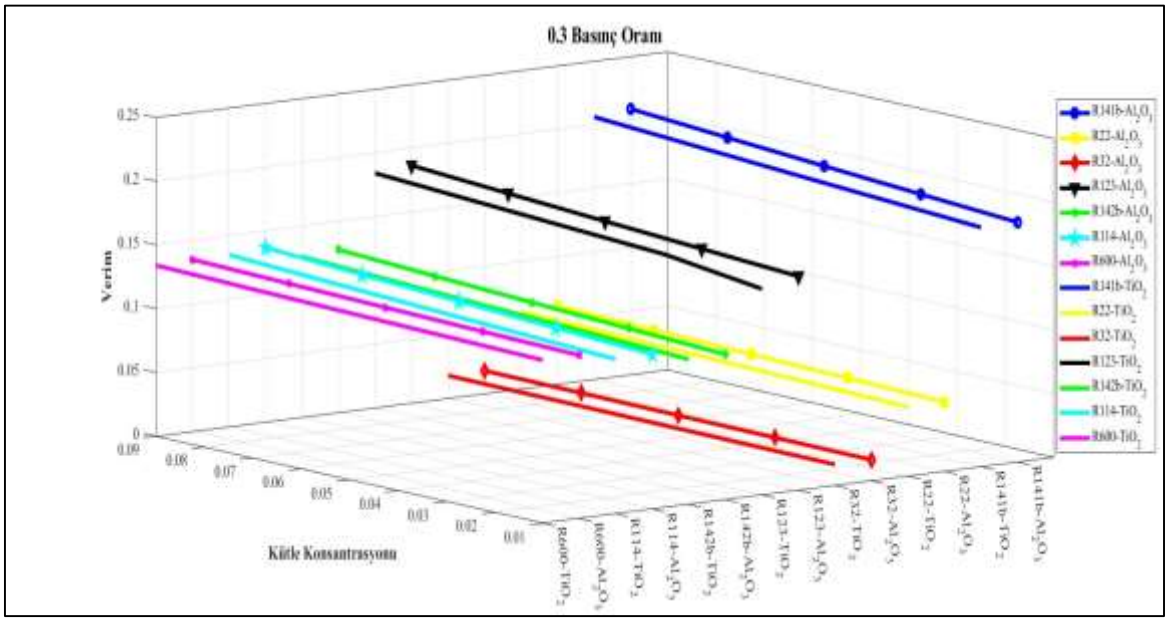
ORÇ sisteminde 0,1 sabit basınç oranında 0,01 ve 0,03 kütle konsantrasyonlarında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenmiş nano akışkanların yüzdelik değişiminin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,05 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 eklenmiş nano akışkanların sistem verimindeki yüzdelik değişimin TiO_2 eklenmiş nano akışkanlara göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

0,01 kütle konsantrasyonunda R141b-Al_2O_3 ve R141b-TiO_2 nano akışkanlarının verimindeki değişim %1 iken, 0,09 kütle konsantrasyonunda verimdeki değişim R141b-Al_2O_3 için %13, R141b-TiO_2 için ise %11 olmaktadır.

R32 akışkanına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek elde edilen nano akışkanlar için her bir kütle konsantrasyonunda verimin yüzdelik değişimlerinin aynı olduğu görülmektedir.

6.3. 0,3 Basınç Oranında Farklı Kütle Konsantrasyonlarında ORÇ Hesaplamaları

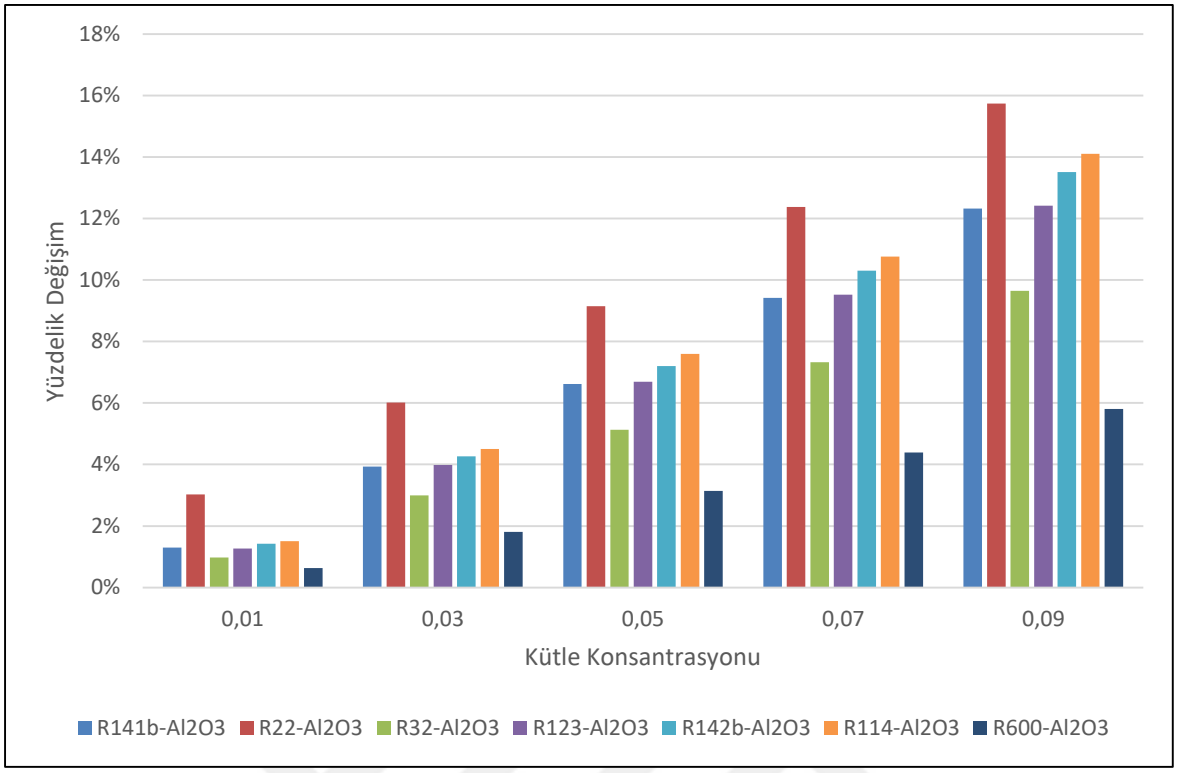
ORÇ sisteminde 0,3 basınç oranı için R141b, R123, R142b, R22, R32, R114 ve R600 akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek 0,01; 0,03; 0,05; 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonlarında nano akışkan elde edilmiştir. Her bir nano akışkan için sistem performansı hesaplanmıştır. Şekil 6.9 ile 0,3 basınç oranında kütle konsatrasyonlarındaki değişim ve sistem performansları gösterilmiştir.



Şekil 6.9. 0,3 basınç oranında kütle konsantrasyonu ve verim değişimleri

ORÇ sisteminin basınç oranının 0,3 olarak sabit tutulduğu durum Şekil 4.9 ile gösterilmiştir. Çalışma akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek elde edilen nano akışkanların kütle konsantrasyonları arttıkça sistem veriminin arttığı gözlemlenmektedir. En düşük verim değerlerinin R22-Al_2O_3, R22-TiO_2, R32-Al_2O_3 ve R32-TiO_2 nano akışkanlarında olduğu anlaşılmaktadır.

0,3 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen Al_2O_3 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 6.10 ile gösterilmiştir.

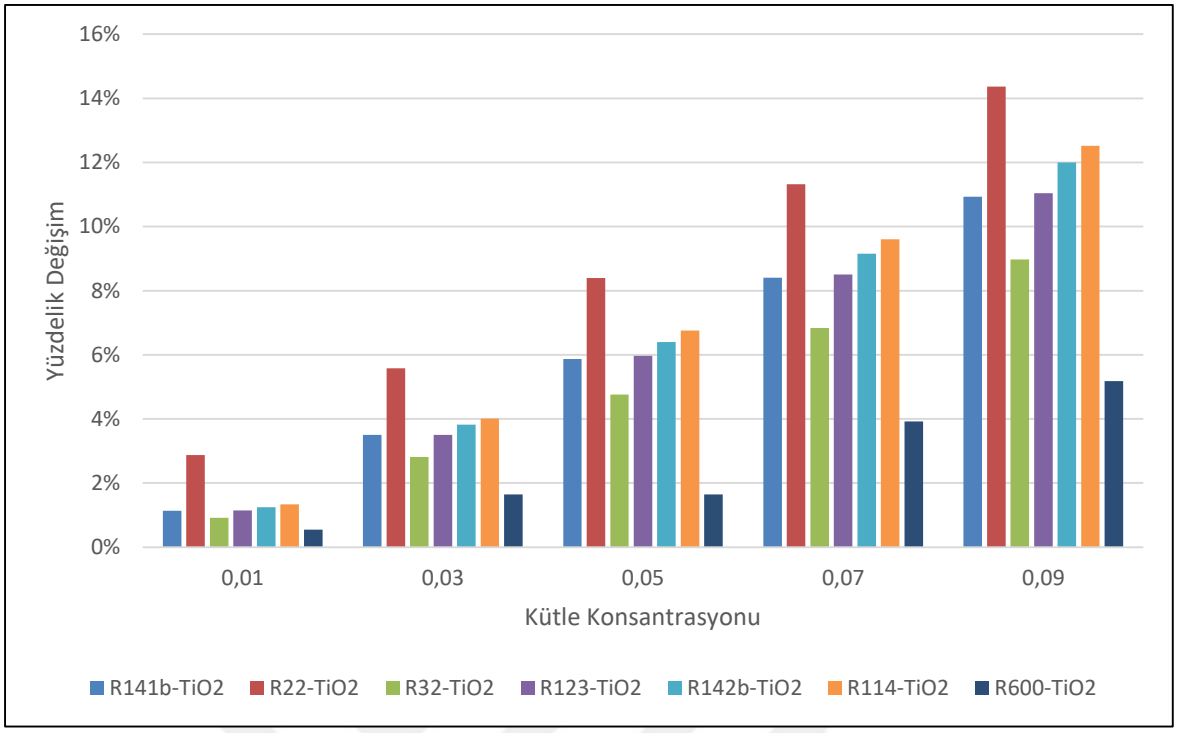


Şekil. 6.10. 0,3 basınç oranında Al_2O_3 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,3 sabit basınç oranında Al_2O_3 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkan R22-Al_2O_3 nano akışkanı olmuştur. ORÇ sistemi verim değişiminin yüzdelik artışın en az olarak gözlemlendiği nano akışkan ise R600-Al_2O_3'tür.

0,09 kütle konsantrasyonunda R114-Al_2O_3 ve R142b-Al_2O_3 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %14 olmuştur. Aynı şekilde 0,07 kütle konsantrasyonunda R114-Al_2O_3 nano akışkanının ORÇ sistemindeki verim değişimi %11 olmuştur.

0,3 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen TiO_2 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 6.11 ile gösterilmiştir.

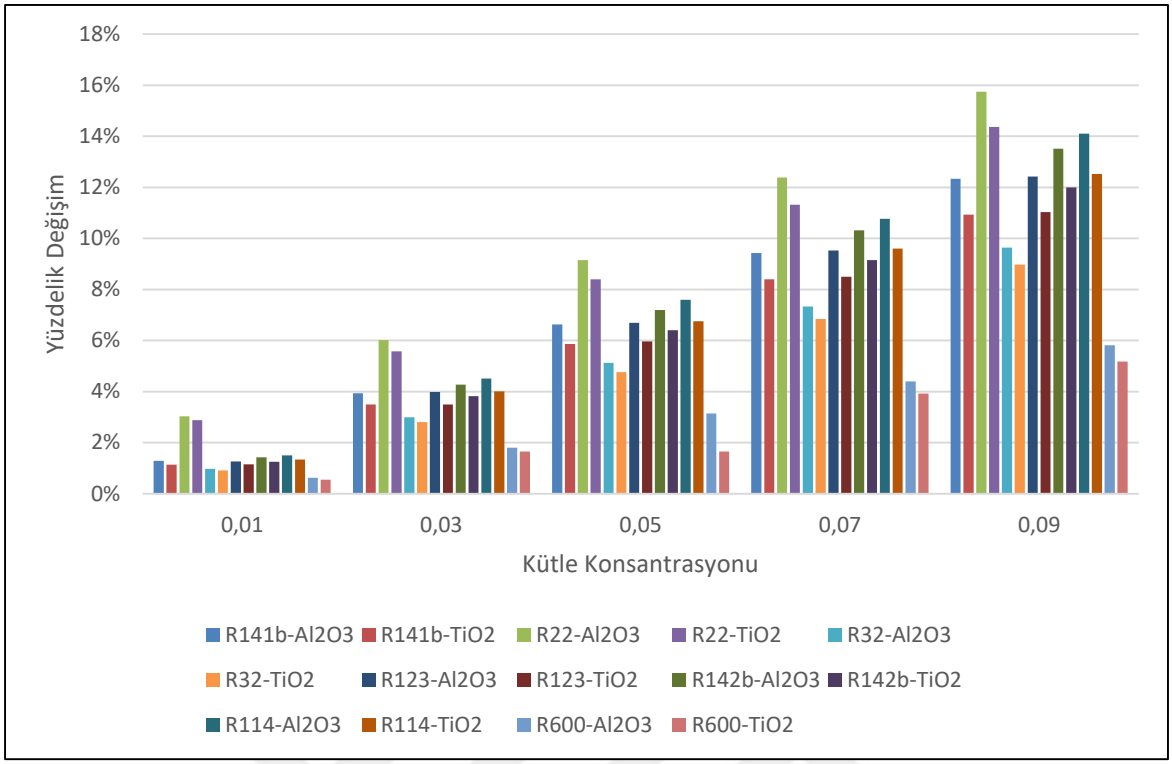


Şekil. 6.11. 0,3 basınç oranında TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,3 sabit basınç oranında TiO_2 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkan R22-TiO_2 nano akışkanı olmuştur. ORÇ sistemi verim değişiminin yüzdelik artışın en az olarak gözlemlendiği nano akışkan ise R600-TiO_2'dir.

0,09 kütle konsantrasyonunda R114-TiO_2 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %13 olmuştur. Aynı şekilde 0,07 kütle konsantrasyonunda R114-TiO_2 nano akışkanının ORÇ sistemindeki verim değişimi %10 olmuştur.

0,3 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 6.12 ile gösterilmiştir.



Şekil. 6.12. 0,3 basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,3 sabit basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkanlar R22-Al_2O_3 ve R22-TiO_2 nano akışkanları olmuştur.

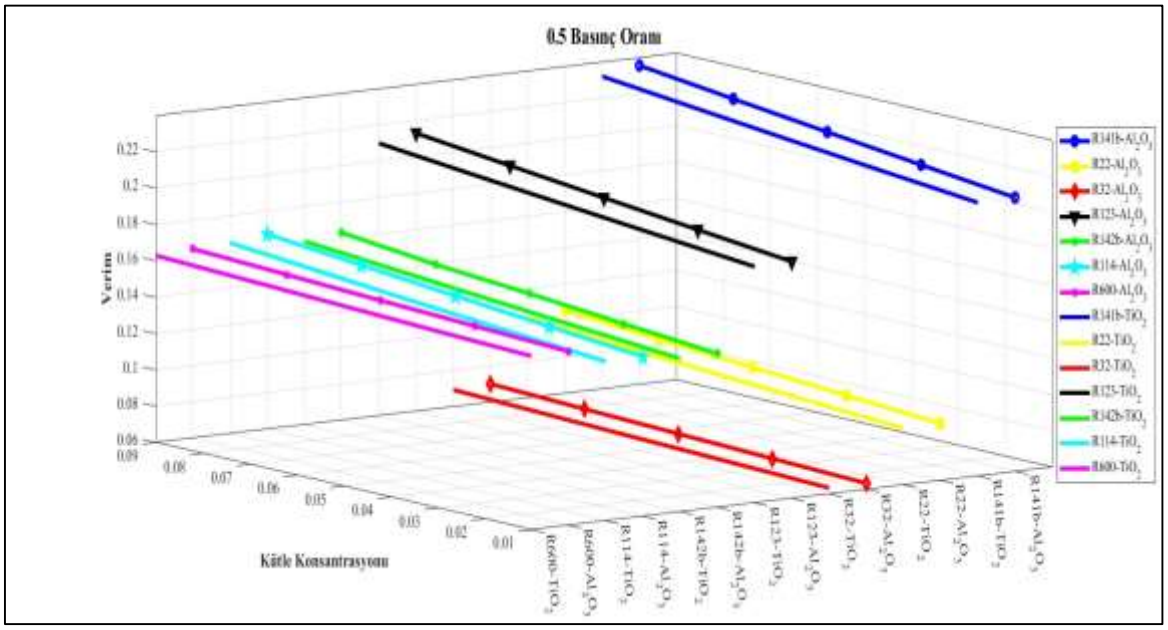
ORÇ sisteminde 0,3 sabit basınç oranında 0,01 ve 0,03 kütle konsantrasyonlarında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenmiş nano akışkanların yüzdelik değişiminin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,05 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 eklenmiş nano akışkanların sistem verimindeki yüzdelik değişimin TiO_2 eklenmiş nano akışkanlara göre daha fazla olduğu görülmektedir.

ORÇ sisteminde 0,3 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonunda R141b-Al_2O_3 ve R141b-TiO_2 nano akışkanlarının verimindeki değişim %1 iken, 0,09 kütle konsantrasyonunda verimdeki değişim R141b-Al_2O_3 için %12, R141b-TiO_2 için ise %11 olmaktadır.

R32 akışkanına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek elde edilen nano akışkanlar için her bir kütle konsantrasyonunda verimin yüzdelik değişimlerinin aynı olduğu görülmektedir.

6.4. 0,5 Basınç Oranında Farklı Kütle Konsantrasyonlarında ORÇ Hesaplamaları

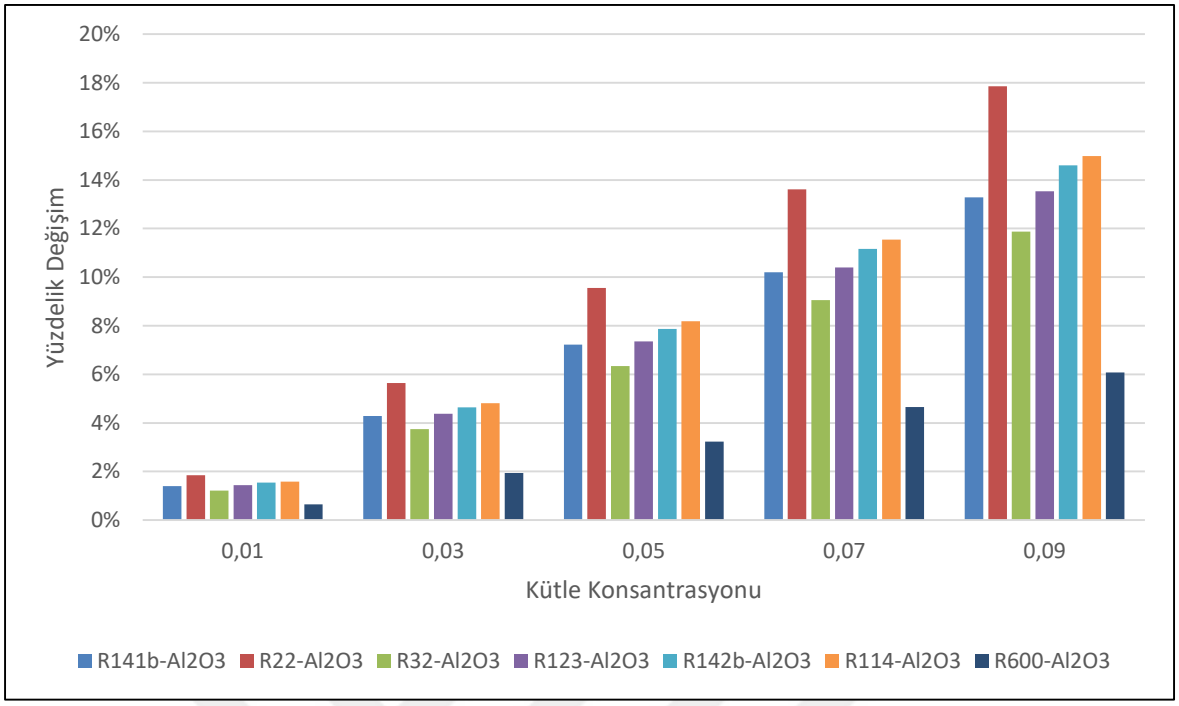
ORÇ sisteminde 0,5 basınç oranı için R141b, R123, R142b, R22, R32, R114 ve R600 akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek 0,01; 0,03; 0,05; 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonlarında nano akışkan elde edilmiştir. Her bir nano akışkan için sistem performansı hesaplanmıştır. Şekil 6.13 ile 0,5 basınç oranında kütle konsantrasyonlarındaki değişim ve sistem performansları gösterilmiştir.



Şekil 6.13. 0,5 basınç oranında kütle konsantrasyonu ve verim değişimleri

ORÇ sisteminin basınç oranının 0,5 olarak sabit tutulduğu durum şekil 6.13. ile gösterilmiştir. Çalışma akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek elde edilen nano akışkanların kütle konsantrasyonları arttıkça sistem veriminin arttığı gözlemlenmektedir. En düşük verim değerlerinin R22-Al_2O_3, R22-TiO_2, R32-Al_2O_3 ve R32-TiO_2 nano akışkanlarında olduğu anlaşılmaktadır.

0,5 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen Al_2O_3 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 6.14 ile gösterilmiştir.

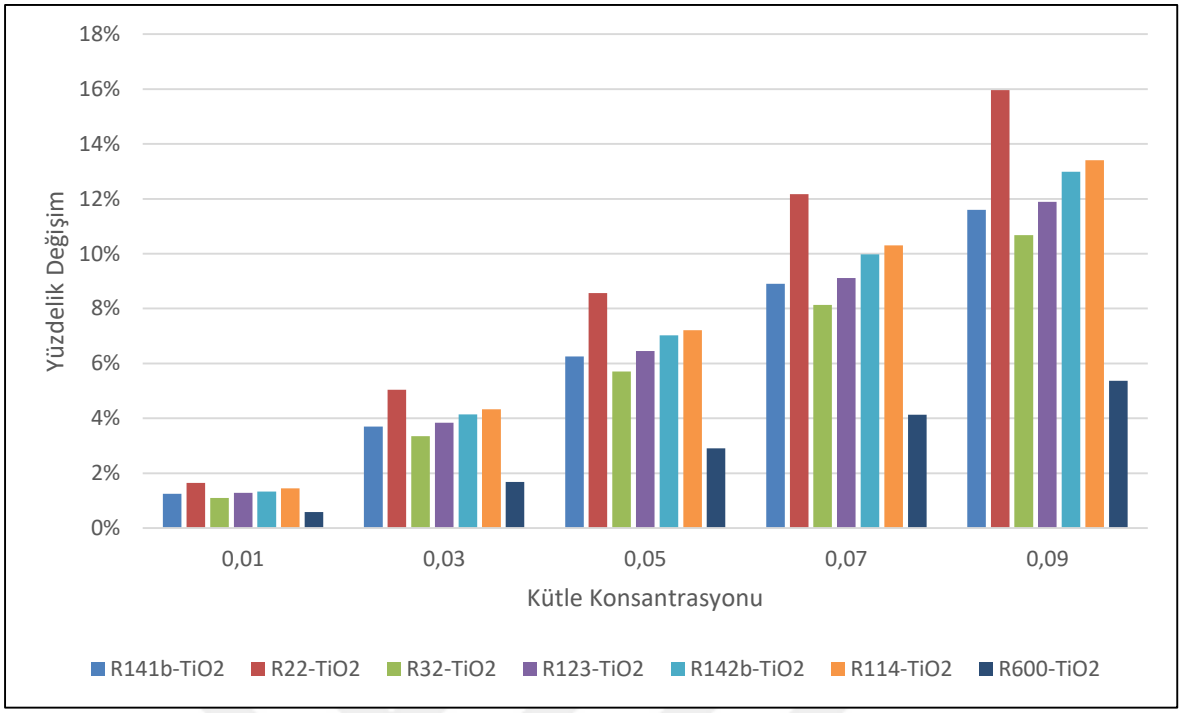


Şekil 6.14. 0,5 basınç oranında Al_2O_3 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzdelik değişimi

ORÇ sisteminde 0,5 sabit basınç oranında Al_2O_3 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkan R22-Al_2O_3 nano akışkanı olmuştur. ORÇ sistemi verim değişiminin yüzdelik artışın en az olarak gözlemlendiği nano akışkan ise R600-Al_2O_3'tür.

0,09 kütle konsantrasyonunda R114-Al_2O_3 ve R142b-Al_2O_3 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %15 olmuştur. Aynı şekilde 0,07 kütle konsantrasyonunda R114-Al_2O_3 nano akışkanının ORÇ sistemindeki verim değişimi %14 olmuştur.

0,5 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen TiO_2 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 4.14 ile gösterilmiştir.

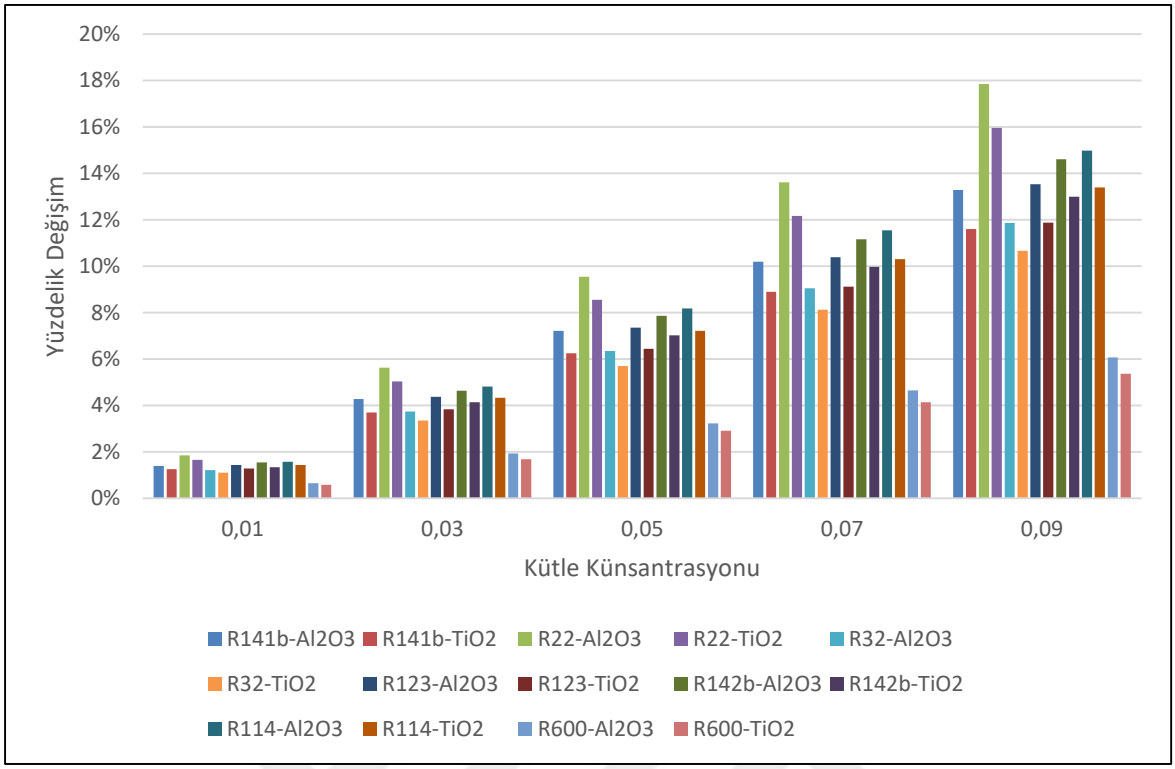


Şekil 6.15. 0,5 basınç oranında TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,5 sabit basınç oranında TiO_2 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkan R22-TiO_2 nano akışkanı olmuştur. ORÇ sistemi verim değişiminin yüzdelik artışın en az olarak gözlemlendiği nano akışkan ise R600-TiO_2'dir.

0,09 kütle konsantrasyonunda R114-TiO_2 ve R142b-TiO_2 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %13 olmuştur. Aynı şekilde 0,07 kütle konsantrasyonunda R114-TiO_2 ve R142b-TiO_2 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %10 olmuştur.

0,5 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 6.15 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.16. 0,5 basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,5 sabit basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkanlar R22-Al_2O_3 ve R22-TiO_2 nano akışkanları olmuştur.

0,01 kütle konsantrasyonlarında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenmiş nano akışkanların yüzdelik değişiminin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,03 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 eklenmiş nano akışkanların sistem verimindeki yüzdelik değişimin TiO_2 eklenmiş nano akışkanlara göre daha fazla olduğu görülmektedir.

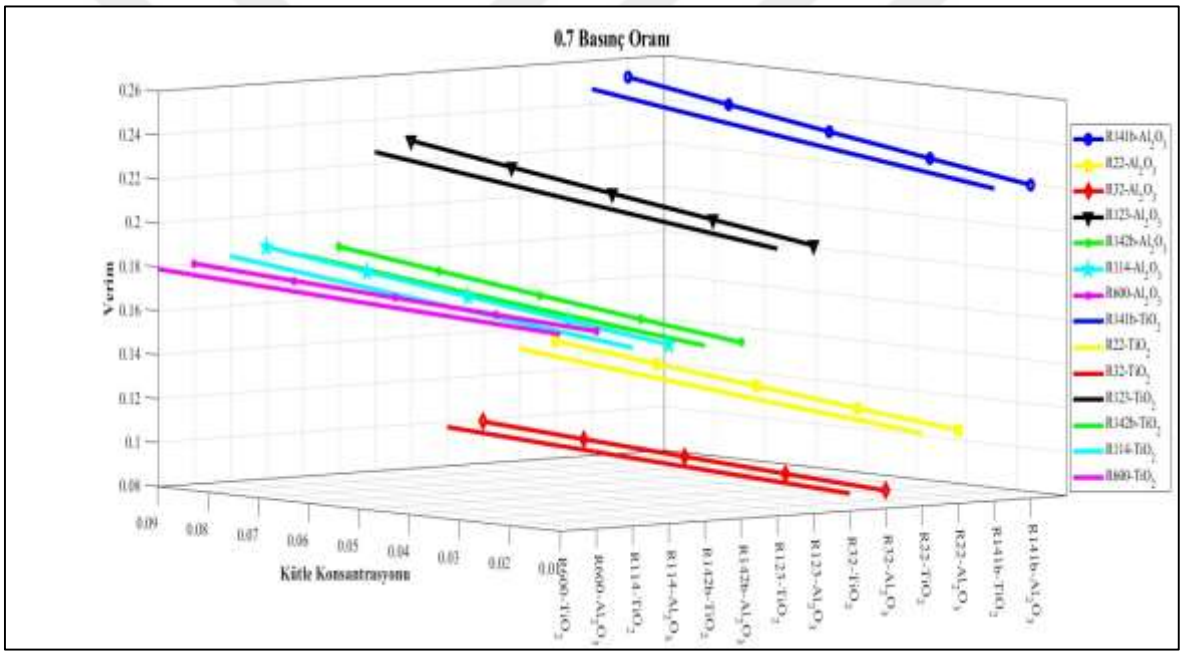
0,01 kütle konsantrasyonunda R141b-Al_2O_3 ve R141b-TiO_2 nano akışkanlarının verimindeki değişim %1 iken, 0,09 kütle konsantrasyonunda verimdeki değişim R141b-Al_2O_3 için %13, R141b-TiO_2 için ise %12 olmaktadır.

R32 akışkanına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek elde edilen nano akışkanlar için 0,01 kütle konsantrasyonunda verimin yüzdelik değişimlerinin aynı olduğu görülmektedir.

Fakat 0,03 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 nano partikülü eklenmiş halinin TiO_2 eklenmiş haline göre verimindeki yüzdelik daha fazladır.

6.5. 0,7 Basınç Oranında Farklı Kütle Konsantrasyonlarında ORÇ Hesaplamaları

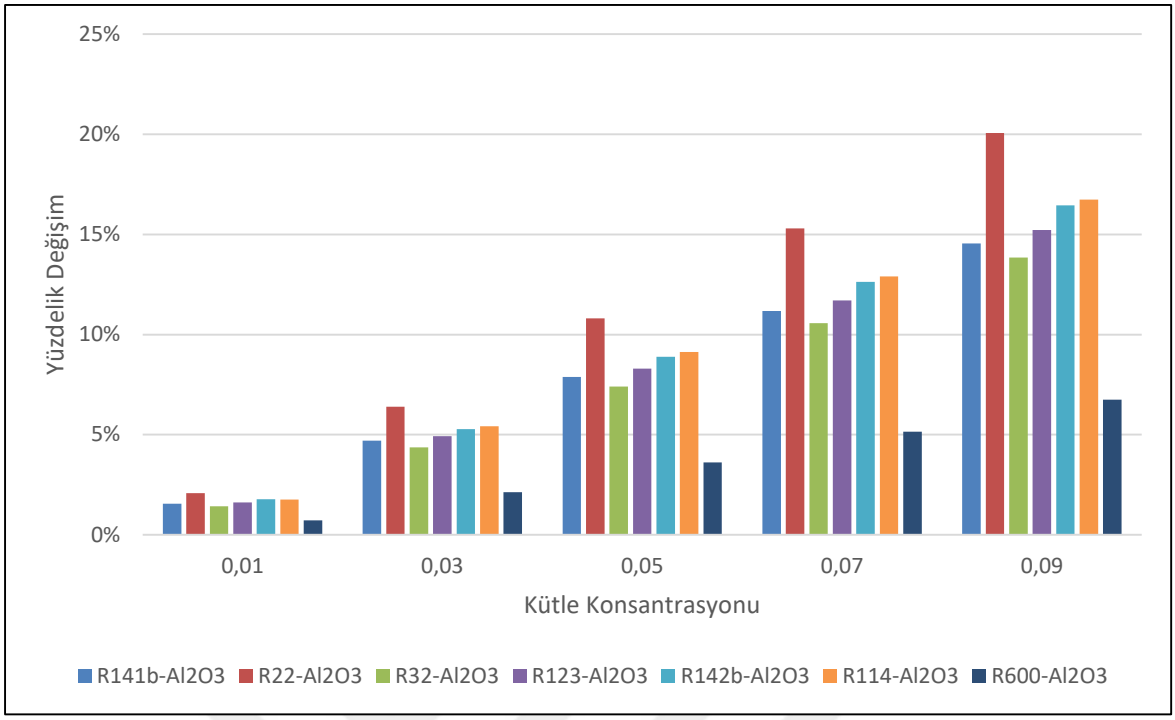
ORÇ sisteminde 0.7 basınç oranı için R141b, R123, R142b, R22, R32, R114 ve R600 akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek 0,01; 0,03; 0,05; 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonlarında nano akışkan elde edilmiştir. Her bir nano akışkan için sistem performansı hesaplanmıştır. Şekil 6.16 ile 0,7 basınç oranında kütle konsatrasyonlarındaki değişim ve sistem performansları gösterilmiştir.



Şekil 6.17. 0,7 basınç oranında kütle konsantrasyonu ve verim değişimleri

ORÇ sisteminin basınç oranının 0,7 olarak sabit tutulduğu durum şekil 4.16. ile gösterilmiştir. Çalışma akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek elde edilen nano akışkanların kütle konsantrasyonları arttıkça sistem veriminin arttığı gözlemlenmektedir. En düşük verim değerlerinin R22-Al_2O_3, R22-TiO_2, R32- Al_2O_3 ve R32-TiO_2 nano akışkanlarında olduğu anlaşılmaktadır.

0,7 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen Al_2O_3 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 6.17 ile gösterilmiştir.

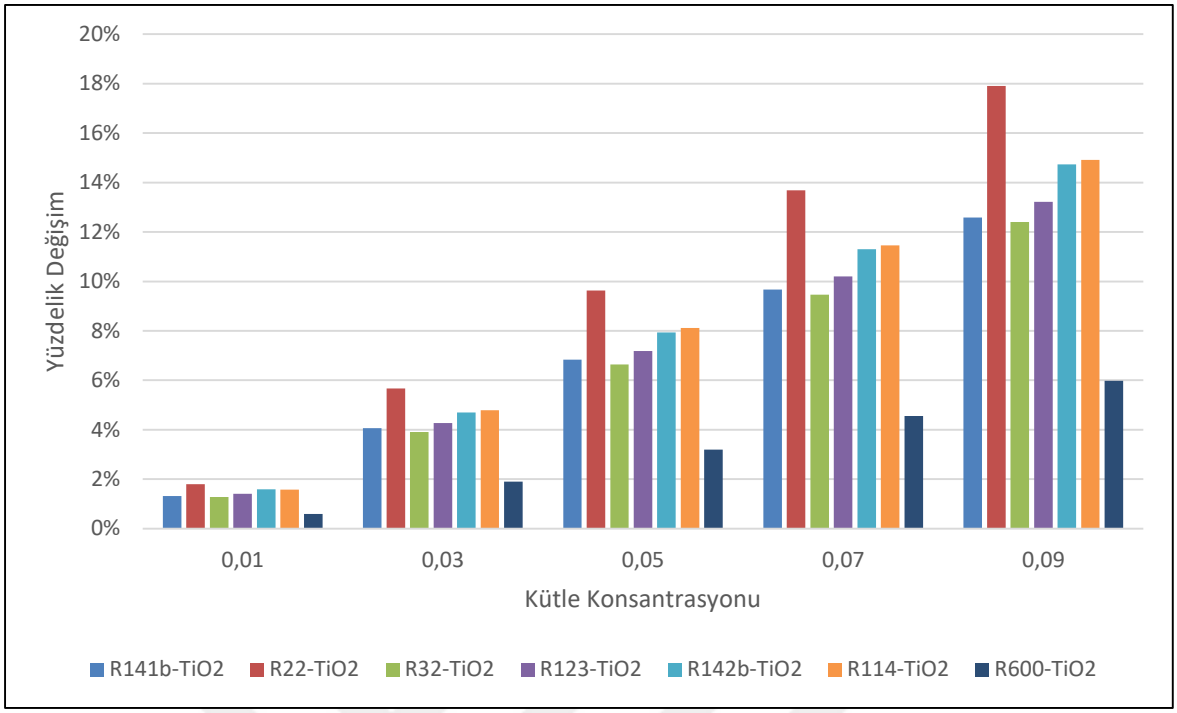


Şekil 6.18. 0,7 basınç oranında Al_2O_3 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzdelik değişimi

ORÇ sisteminde 0,7 sabit basınç oranında Al_2O_3 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkan R22-Al_2O_3 nano akışkanı olmuştur. ORÇ sistemi verim değişiminin yüzdelik artışın en az olarak gözlemlendiği nano akışkan ise R600-Al_2O_3'tür.

0,09 kütle konsantrasyonunda R114-Al_2O_3 nano akışkanının ORÇ sistemindeki verim değişimi %17 olmuştur. Aynı şekilde 0,07 kütle konsantrasyonunda R142b-Al_2O_3 ve R114-Al_2O_3 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %13 olmuştur.

0,7 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen TiO_2 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 6.18 ile gösterilmiştir.

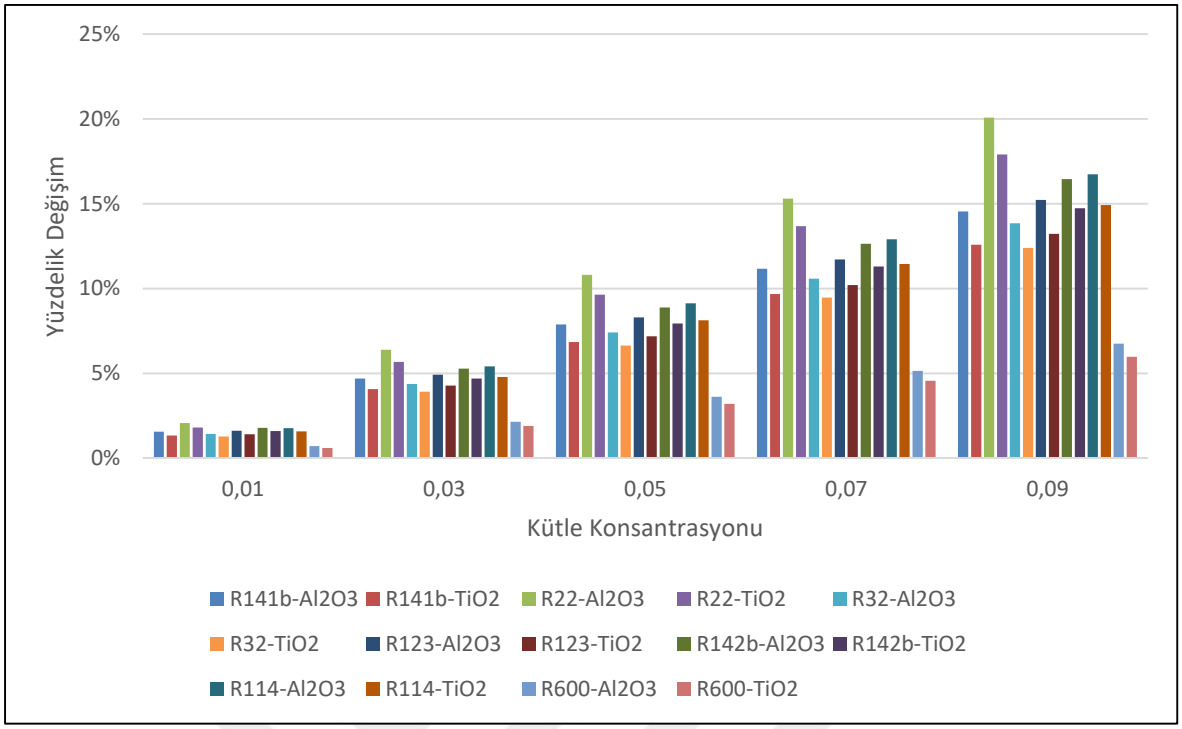


Şekil 6.19. 0,7 basınç oranında TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,7 sabit basınç oranında TiO_2 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkan R22-TiO_2 nano akışkanı olmuştur. ORÇ sistemi verim değişiminin yüzdelik artışın en az olarak gözlemlendiği nano akışkan ise R600-TiO_2'dir.

0,09 kütle konsantrasyonunda R114-TiO_2 ve R142b-TiO_2 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %15 olmuştur. Aynı şekilde 0,07 kütle konsantrasyonunda R114-TiO_2 ve R142b-TiO_2 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %11 olmuştur.

0,7 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 4.19 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.20. 0,7 basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,7 sabit basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkanlar R22-Al_2O_3 ve R22-TiO_2 nano akışkanları olmuştur.

ORÇ sisteminde 0,7 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonlarında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenmiş nano akışkanların yüzdelik değişiminin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,03 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 eklenmiş nano akışkanların sistem verimindeki yüzdelik değişimin TiO_2 eklenmiş nano akışkanlara göre daha fazla olduğu görülmektedir.

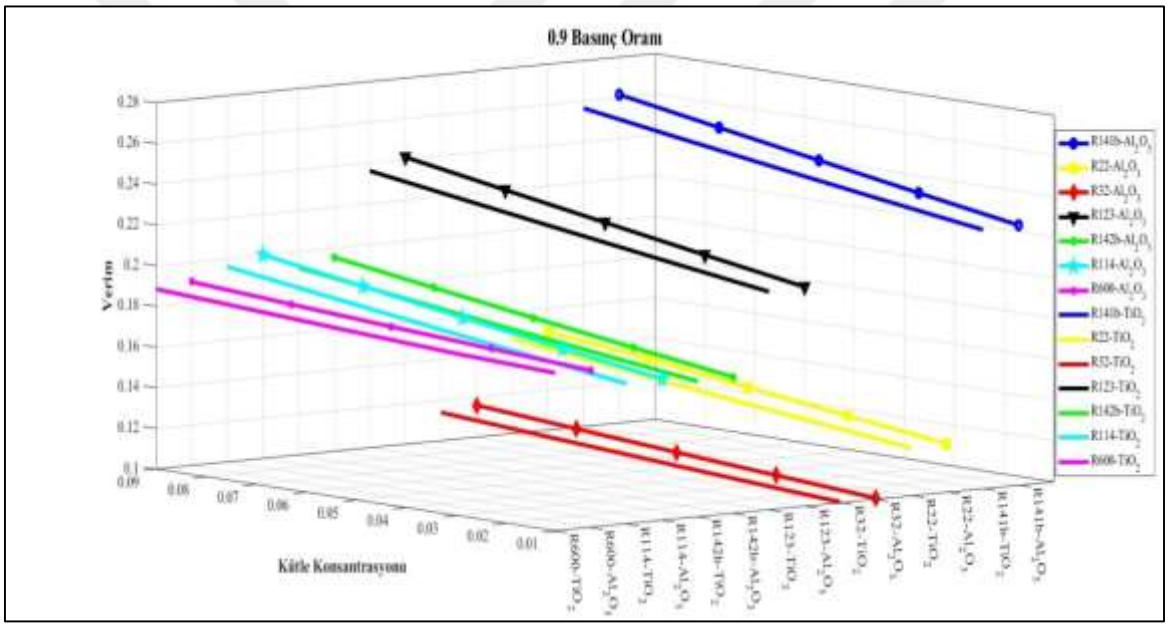
ORÇ sisteminde 0,7 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonunda R141b-Al_2O_3 ve R141b-TiO_2 nano akışkanlarının verimindeki değişim %1 iken, 0,09 kütle konsantrasyonunda verimdeki değişim R141b-Al_2O_3 için %15, R141b-TiO_2 için ise %13 olmaktadır.

ORÇ sisteminde 0,7 sabit basınç oranında R32 akışkanına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek elde edilen nano akışkanlar için 0,01; 0,03 ve 0,05 kütle konsantrasyonunda verimin yüzdelik değişimlerinin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,07 kütle

konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 nano partikülü eklenmiş halinin TiO_2 eklenmiş haline göre verimindeki yüzdelik daha fazladır.

6.6. 0,9 Basınç Oranında Farklı Kütle Konsantrasyonlarında ORÇ Hesaplamaları

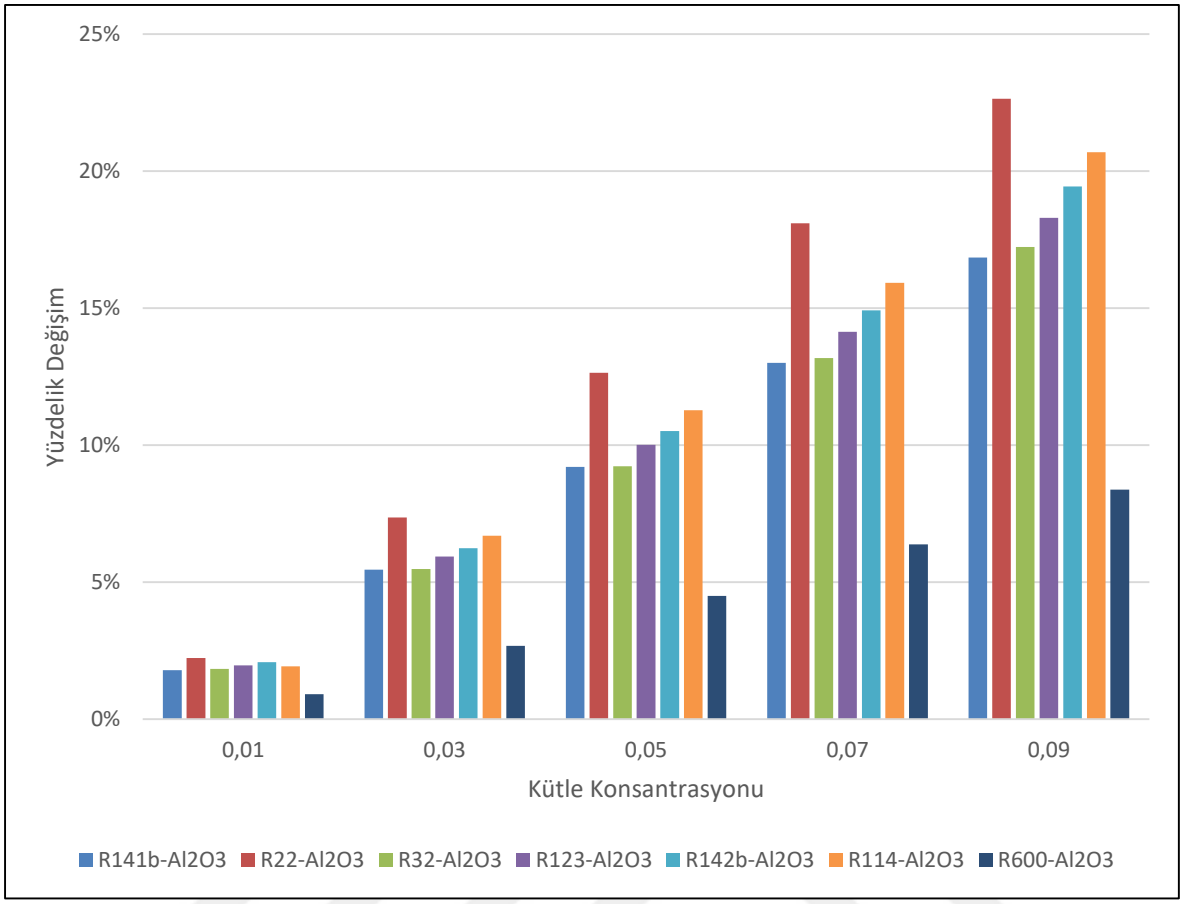
ORÇ sisteminde 0.9 basınç oranı için R141b, R123, R142b, R22, R32, R114 ve R600 akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek 0,01; 0,03; 0,05; 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonlarında nano akışkan elde edilmiştir. Her bir nano akışkan için sistem performansı hesaplanmıştır. Şekil 6.20 ile 0,9 basınç oranında kütle konsatrasyonlarındaki değişim ve sistem performansları gösterilmiştir.



Şekil 4.21. 0,9 basınç oranında kütle konsantrasyonu ve verim değişimleri

ORÇ sisteminin basınç oranının 0,9 olarak sabit tutulduğu durum şekil 6.16. ile gösterilmiştir. Çalışma akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek elde edilen nano akışkanların kütle konsantrasyonları arttıkça sistem veriminin arttığı gözlemlenmektedir. En düşük verim değerlerinin R22-Al_2O_3, R22-TiO_2, R32- Al_2O_3 ve R32-TiO_2 nano akışkanlarında olduğu anlaşılmaktadır.

0,9 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen Al_2O_3 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 6.21 ile gösterilmiştir.

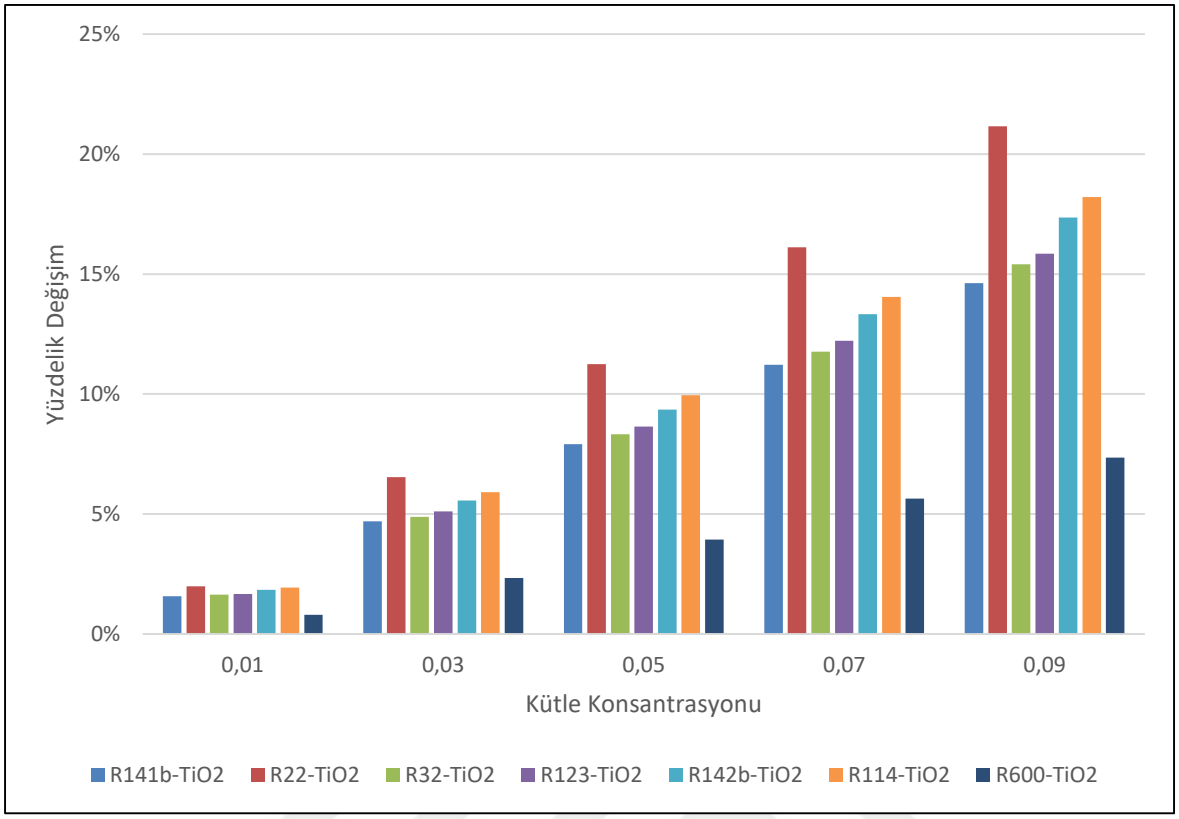


Şekil 6.22. 0,9 basınç oranında Al_2O_3 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzdelik değişimi

ORÇ sisteminde 0,9 sabit basınç oranında Al_2O_3 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkan R22-Al_2O_3 nano akışkanı olmuştur. ORÇ sistemi verim değişiminin yüzdelik artışın en az olarak gözlemlendiği nano akışkan ise R600-Al_2O_3'tür.

0,09 kütle konsantrasyonunda R114-Al_2O_3 nano akışkanının ORÇ sistemindeki verim değişimi %21 olmuştur. Aynı şekilde 0,07 kütle konsantrasyonunda R142b-Al_2O_3 ve R114-Al_2O_3 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %16 olmuştur.

0,9 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen TiO_2 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 6.22 ile gösterilmiştir.

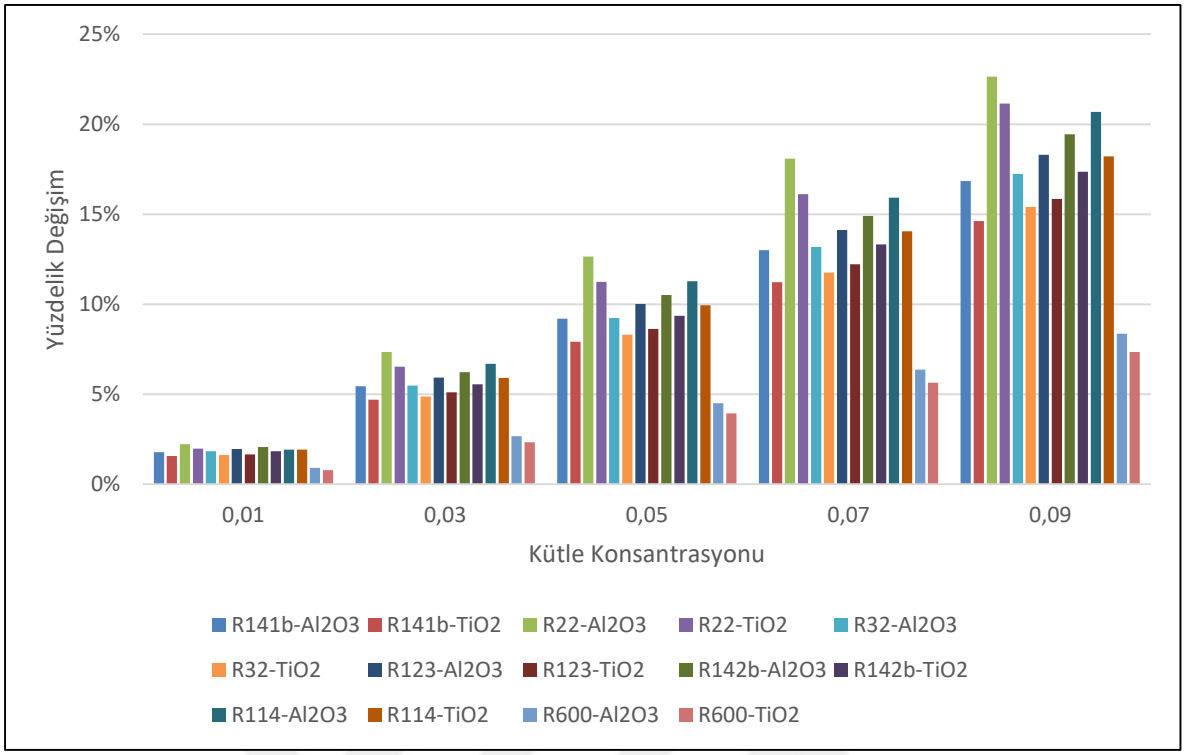


Şekil 6.23. 0,9 basınç oranında TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,9 sabit basınç oranında TiO_2 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkan R22-TiO_2 nano akışkanı olmuştur. ORÇ sistemi verim değişiminin yüzdelik artışın en az olarak gözlemlendiği nano akışkan ise R600-TiO_2'dir.

0,09 kütle konsantrasyonunda R114-TiO_2 nano akışkanının ORÇ sistemindeki verim değişimi %18 olmuştur. Aynı şekilde 0,07 kütle konsantrasyonunda R114-TiO_2 ve R142b-TiO_2 nano akışkanlarının ORÇ sistemindeki verim değişimi %14 olmuştur.

0,9 basınç oranında çalışma akışkanlarına eklenen Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikül konsantrasyonlarının ORÇ sisteminin verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki Şekil 4.23 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.24. 0,9 basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenen nano akışkanların kütle konsantrasyonu ve verimin yüzde değişimi

ORÇ sisteminde 0,9 sabit basınç oranında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek oluşturulan nano akışkanların kütle konsantrasyonlarına bağlı sistem verimindeki değişim, yüzdelik olarak verilmiştir. Her bir kütle konsantrasyonu için en fazla artışın görüldüğü akışkanlar R22-Al_2O_3 ve R22-TiO_2 nano akışkanları olmuştur.

ORÇ sisteminde 0,9 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonlarında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenmiş nano akışkanların yüzdelik değişiminin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,03 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 eklenmiş nano akışkanların sistem verimindeki yüzdelik değişimin TiO_2 eklenmiş nano akışkanlara göre daha fazla olduğu görülmektedir.

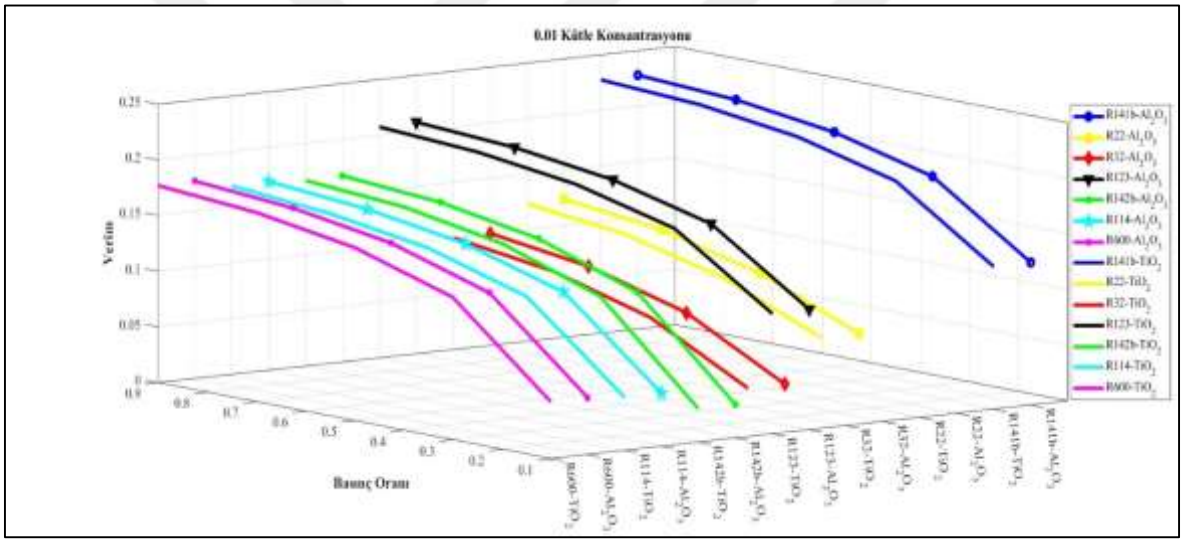
ORÇ sisteminde 0,9 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonunda R141b-Al_2O_3 ve R141b-TiO_2 nano akışkanlarının verimindeki değişim %2 iken, 0,09 kütle konsantrasyonunda verimdeki değişim R141b-Al_2O_3 için %17, R141b-TiO_2 için ise %15 olmaktadır.

ORÇ sisteminde 0,9 sabit basınç oranında R32 akışkanına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek elde edilen nano akışkanlar için 0,01 ve 0,03 kütle konsantrasyonunda verimin

yüzdelik değişimlerinin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,05 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 nano partikülü eklenmiş halinin TiO_2 eklenmiş haline göre verimindeki yüzdelik daha fazladır.

6.7. 0,01 Kütle Konsantrasyonunda Farklı Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları

ORÇ sisteminde 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 ve 0,9 basınç oranları için R141b, R123, R142b, R22, R32, R114 ve R600 akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek 0,01 kütle konsantrasyonunda nano akışkan elde edilmiştir. Her bir nano akışkan için sistem performansı hesaplanmıştır. Şekil 6.24 ile 0,01 kütle konsantrasyonunda basınç oranı değişimi ve sistem performansları gösterilmiştir.

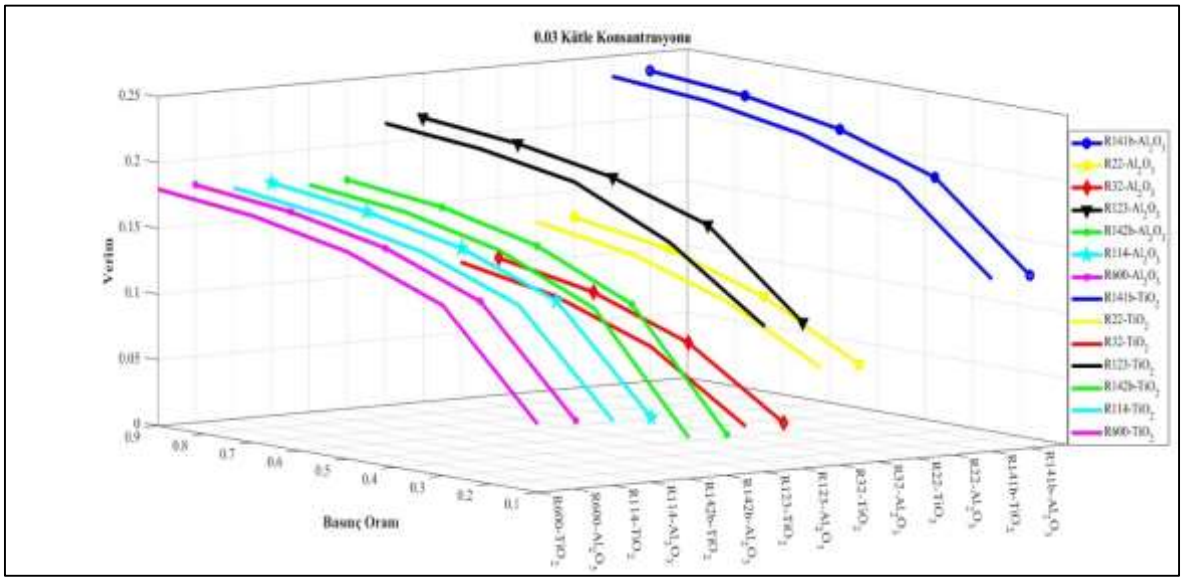


Şekil 6.25. 0,01 kütle konsantrasyonunda basınç oranı ve verim değişimi

ORÇ sisteminde kütle konsantrasyonunun 0,01 olarak sabit tutulduğu durum şekil 4.24. ile gösterilmiştir. Çalışma akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek elde edilen nano akışkanlarının sabit kütle konsantrasyonunda basınç oranı arttıkça sistem veriminin arttığı gözlemlenmektedir. En düşük verim değerlerinin R22- Al_2O_3, R22-TiO_2, R32- Al_2O_3 ve R32-TiO_2 nano akışkanlarında olduğu anlaşılmaktadır. En yüksek verim değerinin ise R141b-Al_2O_3 ve R141b-TiO_2 nano akışkanlarında olduğu görülmektedir.

6.8. 0,03 Kütle Konsantrasyonunda Farklı Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları

ORÇ sisteminde 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 ve 0,9 basınç oranları için R141b, R123, R142b, R22, R32, R114 ve R600 akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek 0,03 kütle konsantrasyonunda nano akışkan elde edilmiştir. Her bir nano akışkan için sistem performansı hesaplanmıştır. Şekil 6.25 ile 0,03 kütle konsantrasyonunda basınç oranı değişimi ve sistem performansları gösterilmiştir.

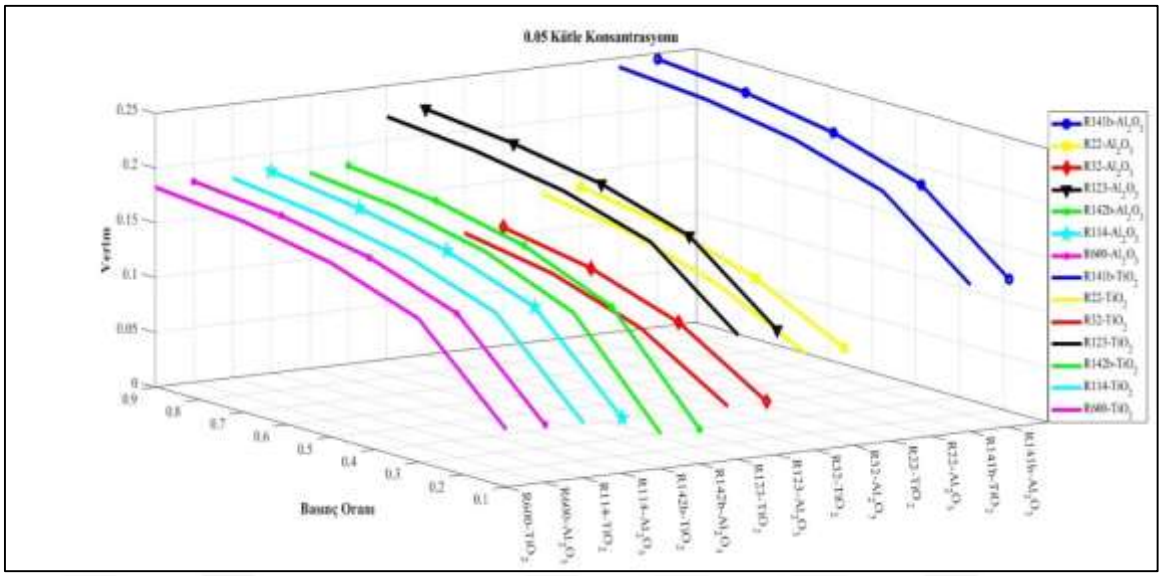


Şekil 6.26. 0,03 kütle konsantrasyonunda basınç oranı ve verim değişimi

ORÇ sisteminde kütle konsantrasyonunun 0,03 olarak sabit tutulduğu durum şekil 6.24 ile gösterilmiştir. Çalışma akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek elde edilen nano akışkanlarının sabit kütle konsantrasyonunda basınç oranı arttıkça sistem veriminin arttığı gözlemlenmektedir. En düşük verim değerlerinin R22-Al_2O_3, R22-TiO_2, R32-Al_2O_3 ve R32-TiO_2 nano akışkanlarında olduğu anlaşılmaktadır.

6.9. 0,05 Kütle Konsantrasyonunda Farklı Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları

ORÇ sisteminde 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 ve 0,9 basınç oranları için R141b, R123, R142b, R22, R32, R114 ve R600 akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek 0,05 kütle konsantrasyonunda nano akışkan elde edilmiştir. Her bir nano akışkan için sistem performansı hesaplanmıştır. Şekil 6.26 ile 0,05 kütle konsantrasyonunda basınç oranı değişimi ve sistem performansları gösterilmiştir.

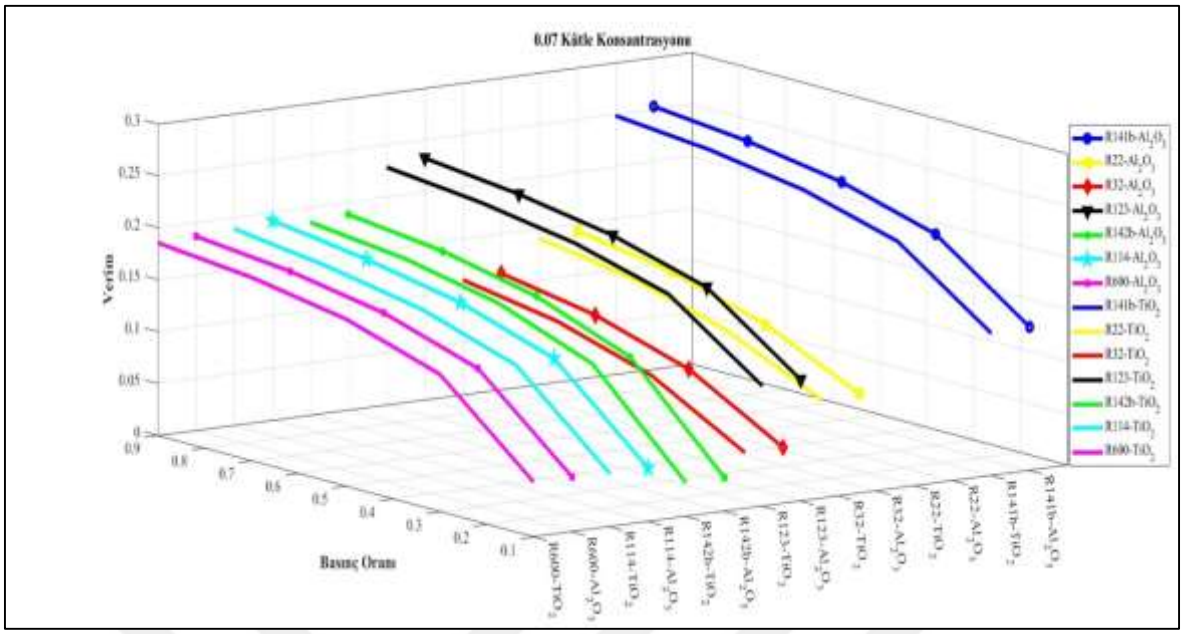


Şekil 6.27. 0,05 kütle konsantrasyonunda basınç oranı ve verim değişimi

ORÇ sisteminde kütle konsantrasyonunun 0,05 olarak sabit tutulduğu durum şekil 6.24 ile gösterilmiştir. Çalışma akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek elde edilen nano akışkanlarının sabit kütle konsantrasyonunda basınç oranı arttıkça sistem veriminin arttığı gözlemlenmektedir. En düşük verim değerlerinin R22-Al_2O_3, R22-TiO_2, R32-Al_2O_3 ve R32-TiO_2 nano akışkanlarında olduğu anlaşılmaktadır.

6.10. 0,07 Kütle Konsantrasyonunda Farklı Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları

ORÇ sisteminde 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 ve 0,9 basınç oranları için R141b, R123, R142b, R22, R32, R114 ve R600 akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek 0,07 kütle konsantrasyonunda nano akışkan elde edilmiştir. Her bir nano akışkan için sistem performansı hesaplanmıştır. Şekil 6.26 ile 0.07 kütle konsantrasyonunda basınç oranı değişimi ve sistem performansları Şekil 6.27. gösterilmiştir.

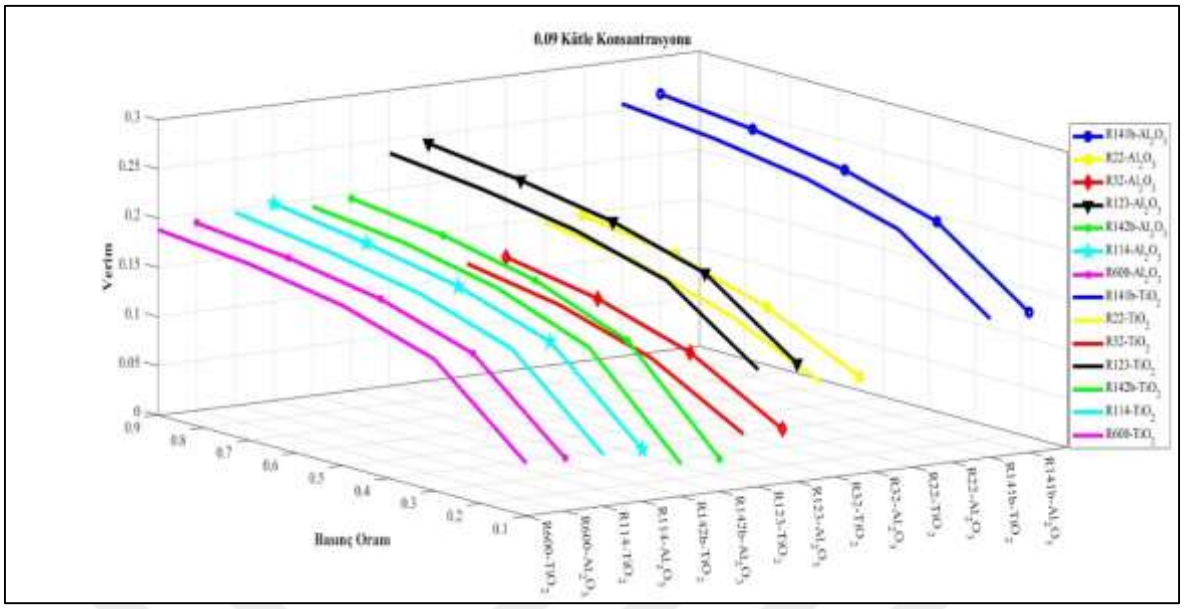


Şekil 6.28. 0,07 kütle konsantrasyonunda basınç oranı ve verim değişimi

ORÇ sisteminde kütle konsantrasyonunun 0,07 olarak sabit tutulduğu durum şekil 6.24. ile gösterilmiştir. Çalışma akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek elde edilen nano akışkanlarının sabit kütle konsantrasyonunda basınç oranı arttıkça sistem veriminin arttığı gözlemlenmektedir. En düşük verim değerlerinin R22-Al_2O_3, R22-TiO_2, R32-Al_2O_3 ve R32-TiO_2 nano akışkanlarında olduğu anlaşılmaktadır.

6.11. 0,09 Kütle Konsantrasyonunda Farklı Basınç Oranlarında ORÇ Hesaplamaları

ORÇ sisteminde 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 ve 0,9 basınç oranları için R141b, R123, R142b, R22, R32, R114 ve R600 akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek 0,09 kütle konsantrasyonunda nano akışkan elde edilmiştir. Her bir nano akışkan için sistem performansı hesaplanmıştır. Şekil 6.28 ile 0,09 kütle konsantrasyonunda basınç oranı değişimi ve sistem performansları gösterilmiştir.



Şekil 6.29. 0,09 kütle konsantrasyonunda basınç oranı ve verim değişimi

ORÇ sisteminde kütle konsantrasyonunun 0,09 olarak sabit tutulduğu durum şekil 6.24. ile gösterilmiştir. Çalışma akışkanlarına Al_2O_3 ve TiO_2 eklenerek elde edilen nano akışkanlarının sabit kütle konsantrasyonunda basınç oranı arttıkça sistem veriminin arttığı gözlemlenmektedir. En düşük verim değerlerinin R22-Al_2O_3, R22-TiO_2, R32-Al_2O_3 ve R32-TiO_2 nano akışkanlarında olduğu anlaşılmaktadır.

Nano partikül eklenerek oluşturulan nano akışkanların sistem performansı incelendiğinde, her döngünün veriminde bir artış olduğu gözlemlenir. Al_2O_3 içeren nano akışkanlar, TiO_2 içerenlere göre daha yüksek verimler gösterir. Nano akışkanların verimleri kütlesel konsantrasyonla lineer olarak artar. Alınan verim değerleri R600, R144 ve R142b için eklenen nano partiküllerle birbirine oldukça yakındır.

R141b ve R123 ile oluşturulan nano akışkanlar en yüksek verimi gösterirken, her kütlesel konsantrasyon için en düşük verim R32 ile oluşturulan nano akışkanlara aittir.

R600, R144 ve R142b akışkanlarına nano partikül eklenmiş durumları ile elde edilen verim değerleri birbirine oldukça yakındır. Ancak, R142b'nin izentropik bir akışkan olmasına rağmen, R141b ve R123 ile oluşturulan nano akışkanlar daha yüksek verime sahiptir. Bu durum, kritik sıcaklıklar arasındaki benzerlikten kaynaklandığı düşünülmektedir. Kritik sıcaklıkları birbirine oldukça yakın olan R114 (418,83 K), R600 (425,13 K) ve R142b (410,2

K) akışkanları, benzer termodinamik özelliklere sahip olabilir. Ancak, farklı moleküler yapıları ve nano partikül etkileşimleri nedeniyle farklı sistem verimlilikleri sergileyebilirler.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, ORÇ sisteminde kullanılan iş akışkanlarına nano partikül eklenmesinin sistem performansı üzerinde etkisini incelemektedir. R141b, R123, R142b (izentropik), R22 ve R32 (ıslak), R114 ve R600 (kuru) olmak üzere 7 farklı iş akışkanı seçilmiştir. Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri iş akışkanlarına eklenerek oluşturulan 14 farklı nano akışkan için performanslar hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar ve değerlendirmeler göre başlıca sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Sabit basınç oranında kütle konsantrasyonları arttıkça sistem performansı artmaktadır.
- Basınç oranları arttıkça türbin giriş sıcaklığı artmakta bu da sistem performansını artırmaktadır.
- ORÇ sisteminde değerlendirilen 14 nano akışkan içerinde Al_2O_3 nano partikül eklenmiş olanlar TiO_2 nano partikül eklenmiş olanlara göre daha iyi sonuç vermiştir.
- Sistemin en verimli olduğu hal 0,9 basınç oranı için 0,09 kütle konsantrasyonuna sahip R141b-Al_2O_3 nano akışkanı içindir. Ardından R123-Al_2O_3 nano akışkanı gelmektedir.
- Akışkan türleri arasında izentropik akışkanların R141b ve R123'ün ORÇ sistemi için daha kullanışlı olduğu görülmüştür. R142b, izentropik olmasına rağmen sistem performansı R114 ve R600 akışkanlarına yakındır.
- ORÇ sisteminde akışkan türü olarak performans incelendiğinde izentropik akışkanların daha yüksek verim elde edildiği, ardından kuru tür akışkanların geldiği görülmüştür. En düşük verim değerleri ıslak (R22 ve R32) akışkanları için bulunmuştur.
- ORÇ sisteminde verimin %24-26 aralığında olması istenirse 0,9 basınç oranında 0,05; 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonuna sahip R141b-Al_2O_3 ve R141b-TiO_2 akışkanları ve 0,09 kütle konsantrasyonuna sahip R123-Al_2O_3 akışkanları ile çalışılabilir.
- ORÇ sisteminde verimin %24-26 aralığında olması istenirse 0,7 basınç oranında 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonuna sahip R141b-Al_2O_3 ve R141b-TiO_2 akışkanları ve 0,09 kütle konsantrasyonuna sahip R123-Al_2O_3 akışkanı ile çalışılabilir.
- ORC sisteminde en iyi verim aralığı 0,7 ve 0,9 basınç oranları için bulunmuştur.
- ORÇ sisteminde verimin %20-24 aralığında olması istenirse 0,5 basınç oranında 0,01; 0,03; 0,05; 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonuna sahip R141b-Al_2O_3 ve R141b-TiO_2 akışkanları, 0,05; 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonuna sahip R123-Al_2O_3 akışkanı, 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonuna sahip R123-TiO_2 akışkanı seçilebilir. 0,7 basınç

oranında 0,01; 0,03; 0,05; 0,07 ve 0,09 kütle konsantrasyonuna sahip R123-Al_2O_3 ve R123-TiO_2 akışkanları ile çalışılabilir. 0,9 basınç oranında yukarıdaki akışkanlara ek olarak 0,09 kütle konsantrasyonuna sahip R114-Al_2O_3 akışkanı seçilebilir.

- ORÇ sistem veriminin en düşük olduğu 0,1 basınç oranında R22 ve R32 akışkanlarının iş akışkanı olarak seçilmemesi gerektiği anlaşılmıştır.
- ORÇ sisteminde 0,1 sabit basınç oranında 0,01 ve 0,03 kütle konsantrasyonlarında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenmiş nano akışkanların yüzdelik değişiminin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,05 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 eklenmiş nano akışkanların sistem verimindeki yüzdelik değişimin TiO_2 eklenmiş nano akışkanlara göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.
- ORÇ sisteminde 0,1 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonunda R141b- Al_2O_3 ve R141b-TiO2 nano akışkanlarının verimindeki değişim %1 iken, 0,09 kütle konsantrasyonunda verimdeki değişim R141b- Al_2O_3 için %13, R141b-TiO_2 için ise %11 olmaktadır.
- ORÇ sisteminde 0,1 sabit basınç oranında R32 akışkanına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek elde edilen nano akışkanlar için her bir kütle konsantrasyonunda verimin yüzdelik değişimlerinin aynı olduğu görülmektedir.
- ORÇ sisteminde 0,3 sabit basınç oranında 0,01 ve 0,03 kütle konsantrasyonlarında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenmiş nano akışkanların yüzdelik değişiminin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,05 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 eklenmiş nano akışkanların sistem verimindeki yüzdelik değişimin TiO_2 eklenmiş nano akışkanlara göre daha fazla olduğu görülmektedir.
- ORÇ sisteminde 0,3 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonunda R141b-Al_2O_3 ve R141b-TiO_2 nano akışkanlarının verimindeki değişim %1 iken, 0,09 kütle konsantrasyonunda verimdeki değişim R141b-Al_2O_3 için %12, R141b-TiO_2 için ise %11 olmaktadır.
- ORÇ sisteminde 0,3 sabit basınç oranında R32 akışkanına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek elde edilen nano akışkanlar için her bir kütle konsantrasyonunda verimin yüzdelik değişimlerinin aynı olduğu görülmektedir.
- ORÇ sisteminde 0,5 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonlarında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenmiş nano akışkanların yüzdelik değişiminin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,03 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 eklenmiş nano akışkanların sistem verimindeki yüzdelik değişimin TiO_2eklenmiş nano akışkanlara göre daha fazla olduğu görülmektedir.

- ORÇ sisteminde 0,5 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonunda R141b- Al_2O_3 ve R141b- TiO_2 nano akışkanlarının verimindeki değişim %1 iken, 0,09 kütle konsantrasyonunda verimdeki değişim R141b- Al_2O_3 için %13, R141b- TiO_2 için ise %12 olmaktadır.
- ORÇ sisteminde 0,5 sabit basınç oranında R32 akışkanına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek elde edilen nano akışkanlar için 0,01 kütle konsantrasyonunda verimin yüzdelik değişimlerinin aynı olduğu görülmektedir.
- ORÇ sisteminde 0,7 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonlarında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenmiş nano akışkanların yüzdelik değişiminin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,03 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 eklenmiş nano akışkanların sistem verimindeki yüzdelik değişimin TiO_2 eklenmiş nano akışkanlara göre daha fazla olduğu görülmektedir.
- ORÇ sisteminde 0,7 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonunda R141b- Al_2O_3 ve R141b- TiO_2 nano akışkanlarının verimindeki değişim %1 iken, 0,09 kütle konsantrasyonunda verimdeki değişim R141b-Al2O3 için %15, R141b- TiO_2 için ise %13 olmaktadır.
- ORÇ sisteminde 0,7 sabit basınç oranında R32 akışkanına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek elde edilen nano akışkanlar için 0,01; 0,03 ve 0,05 kütle konsantrasyonunda verimin yüzdelik değişimlerinin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,07 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 nano partikülü eklenmiş halinin TiO_2 eklenmiş haline göre verimindeki yüzdelik daha fazladır.
- ORÇ sisteminde 0,9 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonlarında Al_2O_3 ve TiO_2 eklenmiş nano akışkanların yüzdelik değişiminin aynı olduğu görülmektedir. Fakat 0,03 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 eklenmiş nano akışkanların sistem verimindeki yüzdelik değişimin TiO_2 eklenmiş nano akışkanlara göre daha fazla olduğu görülmektedir.
- ORÇ sisteminde 0,9 sabit basınç oranında 0,01 kütle konsantrasyonunda R141b- Al_2O_3 ve R141b- TiO_2 nano akışkanlarının verimindeki değişim %2 iken, 0,09 kütle konsantrasyonunda verimdeki değişim R141b- Al_2O_3 için %17, R141b- TiO_2 için ise %15 olmaktadır.
- ORÇ sisteminde 0,9 sabit basınç oranında R32 akışkanına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri eklenerek elde edilen nano akışkanlar için 0,01 ve 0,03 kütle konsantrasyonunda verimin yüzdelik değişimlerinin aynı olduğu görülmektedir. Fakat

0,05 kütle konsantrasyonundan sonra Al_2O_3 nano partikülü eklenmiş halinin TiO_2 eklenmiş haline göre verimindeki yüzdelik daha fazladır.

- Bu çalışma gelecekte düşük kaynak sıcaklıkları ile farklı soğutucu akışkan kombinasyonları ve farklı nano partikül seçimi ile araştırılabilir.
- İş Akışkanı Seçimi: İzentropik, ıslak ve kuru akışkanlar arasından yapılan seçimde R141b, R142b ve R123 gibi geleneksel akışkanların yanı sıra çevre dostu alternatifler olarak R32 ve R600 tercih edilmiştir. Bu seçim, eski ve yeni nesil akışkanların ORÇ sisteminde birbirlerinin yerine kullanılma potansiyelini araştırmayı hedeflemektedir.
- Nano Partikül Katkısı: Al2O3 ve TiO2 nano partiküllerin seçimi, iş akışkanlarının ısı transfer özelliklerini artırmayı amaçlamaktadır. Yüksek ısı iletkenliği ve termal kararlılık gibi avantajları ile nano partiküller, ORÇ sisteminin verimliliğini artırmak için potansiyel bir strateji olarak öne çıkmaktadır.
- Sistem Performansı: Yapılan hesaplamalar, belirli koşullar altında sistem performansının arttığını göstermektedir. Özellikle sabit basınç oranları ve belirli kütle konsantrasyonları altında elde edilen verimli sonuçlar, ORÇ sistemi için optimize edilmiş çalışma koşullarını belirleme açısından önemli bulgular sunmaktadır.
- Nano Akışkanlar Arası Karşılaştırma: Al2O3 nano partikül içeren nano akışkanların, TiO2 içerenlere göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, belirli nano partikül seçimlerinin ORÇ sistemi üzerindeki etkilerini anlamak adına önemli bir katkı sağlamaktadır.
- Yenilikler: Yapılan bu çalışma, geleneksel ORÇ sistemlerinden farklı olarak nano partikül katkısı ile iş akışkanlarının kullanımını içermekte olup, bu yöntemin sistem verimliliği üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmektedir. Bu, ORÇ teknolojisinin geliştirilmesi ve çevre dostu alternatiflerin belirlenmesi açısından önemli bir adım olabilir.

Bu çalışma, ORÇ sistemi üzerinde yedi farklı iş akışkanının analizini içermekte olup, izentropik, ıslak ve kuru akışkanlar arasında seçim yaparak gruplandırmıştır. Akışkan seçiminde geleneksel ve çevre dostu alternatifler bir arada kullanılmıştır. Ancak, gelecekteki araştırmalarda daha fazla iş akışkanı veya nano partikül kombinasyonunun incelenmesi, düşük ısı kaynağı sıcaklıklarında daha geniş bir uygulama yelpazesini keşfetmek adına olumlu bir adım olabilir. Mevcut çalışma, özellikle R32 ve R600 gibi çevre dostu alternatiflerin performansını vurgulamıştır, ancak gelecekteki araştırmalar farklı çevre dostu soğutucu ve nano partikül kombinasyonlarını içerebilir.

Öneri olarak, bu tezde elde edilen bulgular ışığında, deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi ve elde edilecek verilerin detaylı bir şekilde analiz edilmesi tavsiye edilmektedir. Farklı iş akışkanları ve nano partikül kombinasyonlarının performansını içeren kapsamlı bir değerlendirme yapılması, gelecekteki çalışmalara sağlam bir temel oluşturabilir. Bu deneysel çalışmalar, özellikle çalışma akışkanları için optimum çalışma aralığının belirlenmesi sürecine önemli bir katkı sağlayabilir ve ORÇ teknolojisinin daha etkili bir şekilde geliştirilmesine yönelik stratejilerin belirlenmesine yardımcı olabilir.

KAYNAKLAR

1. T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). *Türkiye Ulusal Enerji Planı*. Ankara: T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 1-42.

2. Cihan, E. (2014). Organik Rankine Çevrimi ile Çalışan Atık Isı Kaynaklı Bir Soğutma Sisteminin Performansının Araştırılması. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi,* 34(1), 101-109.

3. Yağlı, H., Koç, Y. ve Kalay, H. (2021). Optimisation and exergy analysis of an organic Rankine cycle (ORC) used as a bottoming cycle in a cogeneration system producing steam and power. *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* 44(1), 1-17.

4. Çengel, Y. A. ve Boles, M. A. (2012). *Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımıyla*. (5. Baskı). İzmir: Güven Bilimsel Kitabevi, 2018-2021.

5. Loni, R., Najafi, G., Bellos, E., Rajaee, F., Said, Z. ve Mazlan, M. (2021). A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future outlook. *Journal of Cleaner Production,* 287, 1-28.

6. Bianchi, M. ve Pascale, A. (2011). Bottoming Cycles for Electric Energy Generation: Parametric Investigation of Available and Innovative Solutions for the Exploitation of Low and Medium Temperature Heat Sources. *Applied Energy,* 88 (5), 1500-1509.

7. Jradi, M. ve Riffat, S. (2014). Experimental investigation of a biomass-fuelled micro-scale trigeneration system with an organic Rankine cycle and liquid desiccant cooling unit. *Energy,* 71, 80-93.

8. Özdemir Küçük, E. ve Kılıç, M. (2021). Comparative performance analysis of ORC-VCRC combines systems based on refrigerant selection. *Science and Technology for the Built Environment,* 27, 70-84.

9. Kosmadakis, G. ve Neofytou, P. (2020). Investigating the performance and cost effects of nanorefrigerants in a low-temperature ORC unit for waste heat recovery. *Energy,* 204.

10. Choi, S. U. ve Eastman, J. A. (1995). *Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles in Proceedings*. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Francisco, USA.

11. Feng, Y.-q., Shi, R.-J., Liu, Y.-Z., Wang, X., Wu, X.-Z., Huang, X.-L., He, Z.-X. ve Hung, T.-C. (2023). Flow and heat transfer characteristics of nano-organic working fluid during evaporation for organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering,* 218.

12. Singh, J., Kumar, R., Gupta, M. ve Kumar, H. (2020). Thermal conductivity analysis of GO-CuO/DW hybrid nanofluid. *Materialstoday: Proceedings,* 28, 1714-1718.

13. Cotana, F., Messineo, A., Petrozzi, A., Coccia, A., Cavalaglio, G. ve Aquino, A. (2014). Comparison of ORC Turbine and Stirling Engine to Produce Electricity from Gasified Poultry Waste. *Sustainability,* 6, 5714-5729.

14. Nemati, A., Nami, H., Ranjbar, F. ve Yari, M. (2017). A Comparative Thermodynamic Analysis of ORC and Kalina Cycles for Waste Heat Recovery: A Case Study for CGAM Cogeneration System. *Case Studies in Thermal Engineering,* 9, 1-13.

15. Zare, V. ve Mahmoudi, S. M. (2015). A Thermodynamic Comparison Between Organic Rankine and Kalina Cycles for Waste Heat Recovery from the Gas-Turbine-Modular Helium Reactor. *Energy,* 79, 398-406.

16. Wang, Y., Tang, Q., Wang, M. ve Feng, X. (2017). Thermodynamic Performance Comparison between ORC and Kalina Cycles for Multi-Stream Waste Heat Recovery. *Energy Conversion and Management,* 143, 482-492.

17. Fu, W., Zhu, J., Li, T., Zhang, W. ve Li, J. (2013). Comparison of a Kalina Cycle Based Cascade Utilisation System with an Existing Organic Rankine Cycle based Geothermal Power System in an Oilfield. *Applied Thermal Engineering,* 58 (1-2), 224-233.

18. Refiei, A., Loni, R., Najafi, G., Sahin, A. Z. ve Bellos, E. (2020). Effect of use of MWCNT/oil nanofluid on the performance of solar organic Rankine cycle. *Energy Reports,* 6, 782-794.

19. Zhang, X., Yamaguchi, H., Fujima, K. ve Enomoto, M. (2007). Theoretical Analysis of a Thermodynamic Cycle for Power and Heat Production Using Supercritical Carbon Dioxide. *Energy,* 32(4), 591-599.

20. Tiwari, D., Sherwani, A. F., Atheaya, D., Kumar, A. ve Kumar, N. (2020). Thermodynamic analysis of Organic Rankine cycle driven by reversed absorber hybrid photovoltaic thermal compound parabolic concentrator system. *Renewable Energy,* 147, 2118-2127.

21. Helvacı, H. U. (2017). Thermodynamic Modelling and Analysis of a Solar Organic Rankine Cycle Employing Thermofluids. *Energy Conversion and Management,* 138, 493-510.

22. Freeman, J., Hellgardt, K. ve Markides, C. N. (2017). Working fluid selection and electrical performance optimisation of a domestic solar-ORC combined heat and power system for year-round operation in the UK. *Applied Energy,* 186, 291-303.

23. Alvi, J. Z., Feng, Y., Wang, Q., Imran, M. ve Alvi, J. (2020). Modelling, simulation and comparison of phase change material storage based direct and indirect solar organic Rankine cycle systems. *Applied Thermal Engineering,* 170.

24. Tzivanidis, C., Bellos, E. ve Antonopoulos, K. A. (2016). Energetic and financial investigation of a stand-alone solar-thermal Organic Rankine Cycle power plant. *Energy Conversion and Management,* 126, 421-433.

25. Wu, D., Aye, L., Ngo, T. ve Mendis, P. (2017). Optimisation and Financial Analysis of an Organic Rankine Cycle Cooling System Driven by Facede Integrated Solar Collectors. *Applied Energy,* 185, 172-182.

26. Shahverdi, K., Loni, R., Ghobadian, B., Monem, M. J., Gohari, S., Marofi, S. ve Najafi, G. (2019). Energy harvesting using solar ORC system and Archimedes Screw Turbine (AST) combination with different refrigerant working fluids. *Energy Conversion and Management,* 187, 205-220.

27. Boyaghchi, F. ve Heidarnejad, P. (2015). Thermo-economic assessment and multi objective optimization of a solar micro CCHP based on Organic Rankine Cycle for domestic application. *Energy Conversion and Management,* 97, 224-234.

28. Cammarata, G., Cammarata, L. ve Petrone, G. (2014). Thermodynamic Analysis of ORC for energy production from geothermal resources. *Energy Procedia,* 45, 1337-1343.

29. Liu, X., Zhang, Y. ve Shen, J. (2017). System Performance Optimisation of ORC-based geo-plant with R245fa under different geothermal water inlet temperatures. *Geothermics,* 66, 134-142.

30. Astolfi, M., Romano, M., Bombarda, P. ve Macchi, E. (2014). Binary ORC (organic Rankine cycles) power plants for the exploitation of medium-low temperature geothermal sources- Part A: Thermodynamic optimisation. *Energy,* 66, 423-434.

31. Walraven, D., Laenen, B. ve D'haeseleer, W. (2015). Minimising the levelised cost of electricity production from low-temperature geothermal heat sources with ORCs: Water or air cooled. *Applied Energy,* 142, 144-153.

32. Akkurt, F. (2020). Düşük Sıcaklıkta Jeotermal Enerji Kaynaklı Organik Rankine Çevrimi Sisteminin Enerji Ve Ekserji Analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25 (2), 729-742.

33. Tartiere, T. ve Astolfi, M. (2017). A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market. *Energy Procedia,* 129, 2-9.

34. Barbier, E. (2002). Geothermal Energy Technology and Current Status: an Overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 6 (1-2), 3-65.

35. Ata, S., Aksoy, M., Şahin, R. ve Kahraman, A. (2022). Comparison of the environmental effects and thermodynamic performances of dry and isentropic fluids in a geothermal heat sourced Organic Rankine Cycle. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12 (3), 726-743.

36. Cao, Y., Li, P., Qiao, Z., Ren, S. ve Si, F. (2022). A concept of a supercritical CO2 Brayton and organic Rankine combined cycle for solar energy utilization with typical geothermal as auxiliary heat source: Thermodynamic analysis and optimization. *Energy Reports,* 8, 322-333.

37. Garcia-Saez, I., Mendez, J., Ortiz, C., Loncar, D., Becerra, J. ve Chacartegui, R. (2019). Energy and economic assessment of solar organic Rankine cycle for combined heat and power generation in residential applications. *Renewable Energy,* 140, 461-476.

38. Papapetrou, M., Kosmadakis, G., Cipollina, A., La Commare, U. ve Micale, G. (2018). Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country. *Applied Thermal Engineering,* 138, 207-216.

39. Zhao, Y., Liu, G., Li, L., Yang, Q., Tang, B. ve Liu, Y. (2019). Expansion devices for organic Rankine cycle (ORC) using in low temperature heat recovery: A review. *Energy Conversion and Management,* 199.

40. Önal, A. S., Etemoğlu, A. B. ve Can, M. (2017). Düşük Sıcaklıklı Atık Akışkan Destekli Organik Rankine Çevrimlerinin Optimizasyonu. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering,* 22(2), 35-52.

41. Unamba, C. K., Sapin, P., Li, X., Song, J., Wang, K., Tian, H. ve Markides, C. (2019). Operational Optimisation of a Non-Recuperative 1-kWe Organic Rankine Cycle Engine. *Applied Sciences,* 9.

42. Enayatollahı, H. (2021). *Modelling and Control of Waste Heat Recovery Systems for Heavy-Duty Applications.* Doktora Tezi, University of Sussex, Birleşik Krallık, 121-125.

43. Kavasoğulları, B. ve Cihan, E. (2015). Organik Rankine Çevrimi (ORC) ile Birlikte Çalışan Buhar Sıkıştırmalı Bir Soğutma Çevriminin Ekserji Analizi. *Tesisat Mühendisliği,* 150, 74-85.

44. Obi, J. (2015). State of art on ORC applications for waste heat recovery and micro-cogeneration for installations up to 100kWe. *Energy Procedia,* 82, 994-1001.

45. Uris, M., Linares, J. ve Arenas, E. (2015). Size Optimisation of a Biomass-Fired Cogeneration Plant CHP/CCHP (Combined Heat and Power/Combined Heat, Cooling and Power) based on Organic Rankine Cycle for a District Network in Spain. *Energy,* 88, 935-945.

46. Collings, P. ve Zhibin, Y. (2017). Numerical Analysis of an Organic Rankine Cycle with Adjustable Working Fluid Composition, a Volumetric Expander and a Recuperator. *Energies,* 10, 440-453.

47. Şencan Şahin, A., Ağ, C., Özyurt, O. ve Aslan, Y. (2021). İç Isı Değiştiricili Bir Organik Rankin Çevriminin Enerji ve Ekserji Analizi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* 12(1), 31-40.

48. Ndamé Ngangué, M., Nguefack Lekané, N., Njock, J. P., Sosso, O. T. ve Stouffs, P. (2023). Working fluid selection for a high efficiency integrated power/cooling system combining an organic Rankine cycle and vapor compression-absorption cycles. *Energy,* 277.

49. Lakew, A. ve Bolland, O. (2011). Working Fluids for Low-Temperature Heat Sources. *Applied Thermal Engineering,* 30.

50. Boydak, Ö., Ekmekçi, İ. ve Yılmaz, M. A. (2022). Thermodynamic Analysis And Comparison Of An Organic Rankine Cycled (ORC) System With Six Different Wet, Dry And Isentropic Working Fluids. *Journal of New Results in Engineering and Natural Science,* 17, 1-8.

51. Dai, Y., Wang, J. ve Gao, L. (2013). Parametric Optimisation and Comparative Study of Organic Rankine Cycle (ORC) for Low Grade Waste Heat Recovery. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 576-582.

52. Wang, E. ve Yu, Z. (2016). A numerical analysis of a composition-adjustable Kalina Cycle power plant for power generation fron low-temperature geothermal heat sources. *Applied Energy,* 180, 834-848.

53. Hung, T. (2011). Waste Heat Recovery of Organic Rankice Cycle Using Dry Fluids. *Energy Conversion and Management,* 42, 539-553.

54. Mago, P. J., Chamra, L. M., K, S. ve C, S. (2013). An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids. *Applied Thermal Engineering,* 28, 998-1007.

55. Zhang, T., Zhu, T., An, W., Song, X., Liu, L. ve Liu, H. (2016). Unsteady Analysis of a Bottoming Organic Rankine Cycle for Exhaust Heat Recovery from and Internal Combustion Engine using Monte Carlo Simulation. *Energy Conversion and Management,* 124, 357-368.

56. Yu, G., Shu, H., Tian, H., Huo, Y. ve Zhu, W. (2016). Experimental investigations on a cascaded steam-/organic-Rankine-cycle (RC/ORC) system for waste heat recovery (WHR) from diesel engine. *Energy Conversion and Management,* 129, 43-51.

57. Shangjun, Z., Huaixin, W. ve Tao, G. (2011). Performance Comparison and Parametric Optimisation of Subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and Transcritical Power Cycle System or Low-Temperature Geothermal Power Generation. *Applied Energy,* 88, 2740-2754.

58. Devendiran, D. K. ve Amirtham, V. A. (2016). A Review on Preparation, Characterization, Properties and Applications of Nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 60, 21-40.

59. Kumar, A., Gupta, P. R., Tiwari, A. K. ve Said, Z. (2022). Performance evaluation of small scale solar organic Rankine cycle using MWCNT + R141b nanorefrigerant. *Energy Conversion and Management,* 260.

60. Bashirnezhad, K., Bazri, S., Safaei, M. R., Goodarzi, M. ve Dahari, M. (2016). Viscosity of Nanofluids: A Review of Recent Experimental Studies. *International Communications in Heat and Mass Transfer,* 73, 114-123.

61. Majgaonkar, A. (2016). *Use of Nanoparticles In Refrigeration Systems: A Literature Review Paper*. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, India.

62. Şahin, F. ve Namlı, L. (2018). Nanoakışkanlarda Kararlılığın Isı Transferini İyileştirme Açısından Önemi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 7, 880-898.

63. Prajapati, P. P. ve Patel, V. K. (2020). Thermo-economic optimization of a nanofluid based organic Rankine cycle: A multi-objective study and analysis. *Thermal Science and Engineering Progress,* 17.

64. Atmaca, İ., Koçak Soylu, S., Özdemir, O. S. ve Asiltürk, M. (2019). *Nanoakışkanlar ve Güneş Enerjili Sıcak Su Sistemlerinde Kullanımı*. 8. Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, Mersin.

65. Zhang, X., Zhang, Y. ve Wang, J. (2020). New classification of dry and isentropic working fluids and a method used to determine their optimal or worst condensation temperature used in Organic Rankine Cycle. *Energy,* 201.

66. Bellos, E. ve Tzivanidis, C. (2017). Parametric analysis and optimization of an Organic Rankine Cycle with nanofluid based solar parabolic trough collectors. *Renewable Energy,* 114, 1376-1393.

67. Bolton, J., Liu, L., Hinks, J. A. ve Chai, J. C. (2018). Critical Heat Flux Enhancement Using Nanofluids and Hybrid Nanofluids: A Review. *International Journal of Nanoscience and Nanoengineering,* 4, 35-56.

68. Bilen, K., Dağıdır, K. ve Arcaklıoğlu, E. (2021). Buhar Sıkıştırmalı Soğutma Çevriminde R134a Yerine R1234yf ve R1234yf/Al2O3 ile R1234yf/CNTs Nanosoğutucu Akışkanların Kullanımının Termodinamiğin I. ve II. Kanunları Bakımından Teorik Olarak İncelenmesi. *Gazi Journal of Engineering Sciences,* 7(3), 183-195.

69. Cavazzini, G., Bari, S., McGrail, P., Benedetti, V., Pavesi, G. ve Ardizzon, G. (2019). Contribution of Metal-Organic-Heat Carrier nanoparticles in a R245fa low-grade heat recovery Organic Rankine Cycle. *Energy Conversion and Management,* 199.

70. Li, Y. ve Xu, S.-Z. (2022). Thermodynamic analysis of subcritical/transcritical ORCs with metal–organic heat carriers for efficient power generation from low-grade thermal energy. *Energy,* 255.

71. Celen, A., Çebi, A., Aktas, M., Mahian, O., Dalkilic, A. S. ve Wongwises, S. (2014). A review of nanorefrigerants: Flow characteristics and applications. *International Journal of Refrigeration,* 44, 125-140.

72. Jiang, F., Zhu, J. ve Xin, G. (2018). Experimental investigation on Al2O3-R123 nanorefrigerant heat transfer performances in evaporator based on organic Rankine cycle. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 127, 145-153.

73. Sarrafzadeh Javadi, F. ve Saidur, R. (2021). Thermodynamic and Energy Efficiency Analysis of a Domestic Refrigerator Using Al2O3 Nano-Refrigerant. *Sustainability,* 13(10).

74. Azmi, W. H., Sharif, M. Z., Yusof, T. M., Mamat, R. ve Redhwan, A. A. M. (2017). Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 69, 415-428.

75. Said, Z., Sharma, P., Tiwari, A. K., Le, V. V., Huang, Z., Bui, V. G. ve Hoang, A. T. (2022). Application of novel framework based on ensemble boosted regression trees and Gaussian process regression in modelling thermal performance of small-scale Organic Rankine Cycle (ORC) using hybrid nanofluid. *Journal of Cleaner Production,* 360.

76. Unamba, C. K., White, M., Sapin, P., Freeman, J. P., Lecompte, S. ve Markides, C. N. (2017). Experimental investigation of the operating point of a 1-kW ORC system. *Energy Procedia,* 129, 875-882.

77. Tchanche, B. F., Lambrinos, G., Frangoudakis, A. ve Papadakis, G. (2011). Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles-a review of various applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 15, 3963-3979.

78. Wang, L., Roskilly, A. P. ve Wang, R. (2014). Solar powered cascading cogeneration cycle with ORC and adsorption technology for electricit and refrigeration. *Heat Transfer Engineering,* 35, 1028-1034.

79. Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, B., Delpech, A., Chauhan, A. ve Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress,* 6, 268-289.

80. Lin, D., Zhu, Q. ve Li, X. (2015). Thermodynamic Comparative Analyses between (organic) Rankine cycle and Kalina Cycle. *Energy Procedia,* 75, 1618-1623.

81. Markides, C. N. (2015). Low-Concentration Solar-Power Systems Based on Organic Rankine Cycles for Distributed-Scale Applications: Overview and Further Developments. *Frontiers in Energy Research,* 3.

82. Bruno, J., Lopez Villada, J., Letelier, E., Romera, S. ve Coronas, A. (2008). Modelling and optimisation of solar organic rankine cycle engines for reverse osmosis desalination. *Applied Thermal Engineering*, 28(17), 2212-2226.

83. Drescher, U. ve Bruggemann, D. (2007). Fluid Selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in Biomass Power and Heat Plants. *Applied Thermal Engineering 27*.

84. Kosmadakis, G., Manolakos, D., Kyritsis, S. ve Papadakis, G. (2009). Economic assessment of a two-stage solar organic Rankine cycle for reverse osmosis desalination. *Renewable Energy,* 34.

85. İnternet: ORC. Web: https://www.exergy-orc.com/tr/teknoloji/orc/ Son Erişim Tarihi: 24.11.2023.

86. İnternet: Organik Rankine Çevrimi (ORÇ). Web: https://www.busiad.org.tr/dosyalar/etemoglu-ORC.pdf/ Son Erişim Tarihi: 24.11.2023.

87. Sarkis, R. ve Zare, V. (2018). Proposal and analysis of two novel integrated configurations for hybrid solar-biomass power generation systems: Thermodynamic and economic evaluation. *Energy Conversion and Management,* 160, 411-425.

88. Bao, J. ve zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for Organic Rankine Cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 24, 325-342.

89. Mota-Babiloni, A., Navarro-esbri, J., Barragan-Cervera, A. ve Peris, B. (2015). Analysis based on EU Regulation of new HFC/HFO mixtures as alternatives of high GWP refrigerants in refrigeration and HVAC systems. *International Journal of Refrigeration,* 52, 21-31.

90. Quoilin, S., Broek, M., Declaye, S. ve Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 22, 168-186.

91. Li, L., Ge, Y., Luo, X. ve Tassou, S. (2017). Experimental investigations into power generation with low grade waste heat and R245fa organic Rankine cycles (ORCs). *Applied Thermal Engineering,* 115, 815-824.

92. Cihan, E. ve Kavasoğulları, B. (2017). Energy and exergy analysis of a combined refrigeration and waste heat driven organic Rankine cycle system. *Thermal Science,* 21, 251-263.

93. Quoilin, S., Lemort, V. ve Lebrun, J. (2010). Experimental study and modelling of an organic Rankine cycle using scroll expander. *Applied Energy,* 87, 1260-1268.

94. Ziviani, D., Beyene, A. ve Venturini, M. (2014). Advances and challenges in ORC systems modeling for low grade thermal energy recovery. *Applied Energy,* 121, 79-95.

95. Liu, B., Chien, K. ve Wang, C. (2009). Effect of Working Fluids on Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery. *Energy,* 29, 1207-12017.

96. Lemmon, E. W., Huber, M. L. ve O, M. M. (2013). NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.1., National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg.

97. Wang, X., Levy, E. K., Pan, C., Romero, C. E., Banerjee, A., Rubio-Maya, C. ve Pan, L. (2019). Working Fluid Selection for Organic Rankine Cycle Power Generation Using Hot Produced Supercritical CO2 from a Geothermal Reservoir. *Applied Thermal Engineering,* 149, 1287-1304.

98. Borsukiewicz-Gozdur, A. (2013). Pumping Work in the Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering,* 51, 781-786.

99. Astolfi, M. ve Macchi, E. (2017). Technical options for Organic Rankine Cycle systems: Organic Rankine Cycle Power Systems. *Technologies and Applications*, 67-89.

100. Bouvier, J. L., Lemort, V., Michaux, P., Salagnac, P. ve Kientz, T. (2016). Experimental study of an oil-free steam piston expander for micro-combined heat and power systems. *Applied Energy,* 169, 788-798.

101. Markides, C. N. (2015). Low-concentration solar-power systems based on organic Rankine cycles for distributed-scale applications: overview and further developments. *Frontiers in Energy Research,* 3, 47-61.

102. Nahar, A., Rahim, N. A., Hasanuzzaman, M. ve Islam, M. K. (2019). Effect of nanofluid properties and mass-flow rate on heat transfer of parabolic-trough concentrating solar system. *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering,* 16(1), 33-44.

103. Abbas, N., Saleem, S., Nadeem, S., Alderremy, A. A. ve Khan, A. U. (2018). On stagnation point flow of a micro polar nanofluid past a circular cylinder with velocity and thermal slip. *Results in Physics,* 9, 1224-1232.

104. Baby, T. T. ve Ramaprabhu, S. (2011). Experimental Investigation of the Thermal Transport Properties of a Carbon Nanohybrid Dispersed Nanofluid. *Nanoscale,* 3, 2208-2214.

105. Aslfattahi, N., Saidur, R., Arifutzzaman, A., Abdelrazik, A. S. ve Sabri, M. F. (2020). Improved thermophysical properties and energy efficiency of hybrid PCM/graphene-silver nanocomposite in a hybrid CPV/thermal solar system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,* 142, 1-18.

106. Abdelrazik, A., Tan, K. H., Aslfattahi, N. ve Saidur, R. (2020). Optical properties and stability of water-based nanofluids mixed with reduced graphene oxide decorated with silver and energy performance investigation in hybrid photovoltaic. *International Journal of Energy Research*, 44(5), 11487-11508.

107. Aslfattahi, N., Saidur, R., Arifutzzaman, A., Bimbo, N. ve Bouscarrat, L. (2020). Experimental investigation of energy storage properties and thermal conductivity of a novel organic phase change material/MXene as A new class of nanocomposites. *Journal of Energy Storage,* 27, 101115.

108. Moghaddam, M. B., Goharshadi, E. K., Entezari, M. H. ve Nancarrow, P. (2013). Preparation, Characterization, and Rheological Properties of Graphene-Glycerol Nanofluids. *Chemical Engineering Journal,* 231, 365-372.

109. Paul, G., Das, P. K. ve Manna, I. (2016). Synthesis, Characterization and Studies on Magneto-viscous Properties of Magnetite Dispersed Water Based Nanofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* 404, 29-39.

110. Kumar, D. D. ve Arasu, A. V. (2018). A Comprehensive Review of Preparation, Characterization, Properties and Stability of Hybrid Nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 81, 1669-1689.

111. Zhu, H., Lin, Y. ve Yin, Y. S. (2004). A Novel One-Step Chemical Method for Preparation of Copper Nanofluids. *Journal of Colloid and Interface Science,* 277, 100-104.

112. Maadi, S. R., Kolahan, A., Passandideh-Fard, M. ve Sardarabadi, M. (2017). Characterization of PVT Systems Equipped with Nanofluids-Based Collector from Entropy Generation. *Energy Conversion and Management,* 150, 515-531.

113. Wu, J. M. ve Zhao, J. (2013). Review of Nanofluid Heat Transfer and Critical Heat Flux Enhancement - Research Gap to Engineering Application. *Progress in Nuclear Energy,* 66, 13-24.

114. Maxwell, J. C. (1873). *Electriticy and Magnetism*. Oxford: Clarendon Press.

115. Yu, W. ve Choi, S. U. (2003). The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model. *Journal of Nanoparticle Research,* 5, 167-171.

116. Brinkman, H. C. (1952). The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. *Journal of Chemical Physics,* 20, 571-581.

117. Li, Y., Zhou, J. E., Tung, S., Schneider, E. ve Xi, S. (2009). A Review on Development of Nanofluid Preparation and Characterization. *Powder Technology,* 196, 89-101.

118. Lundgren, T. S. (1972). Slow Flow through Stationary Random Beds and Suspensions of Spheres. *Journal of Fluid Mechanics,* 51, 273-299.

119. Pinto, R. V. ve Fiorelli, F. A. (2016). Review of the Mechanisms Responsible for Heat Transfer Enhancement using Nanofluids. *Applied Thermal Engineering,* 108, 720-739.

120. Yamamoto, T., Furuhata, T., Arai, N. ve Mori, K. (2001). Design and testing of the organic Rankine cycle. *Energy,* 26, 239-251.

121. Khanafer, K. ve Vafai, K. (2011). A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 54(19-20), 4410-4428.

Gazili olmak ayrıcalıktır