



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN NİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DÜŞÜK KAPASİTELİ DEĞİŞİK ISI
KAYNAKLI, AKIŞKANLI VE
KONFIGÜRASYONLU ORGANİK RANKİNE
ÇEVİRİMLERİNİN TASARIMI VE
TERMODİNAMİK OPTİMİZASYONU

Sadık ATA

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Sadık ATA tarafından hazırlanan “Düşük Kapasiteli Değişik Isı Kaynaklı, Akışkanlı ve Konfigürasyonlu Organik Rankine Çevrimlerinin Tasarımı ve Termodinamik Optimizasyonu” adlı tez çalışması 28/02/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. H. Kürşad ERSOY



Danışman

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN



Üye

Prof. Dr. Hüseyin KURT



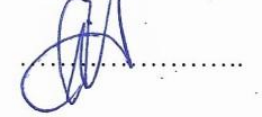
Üye

Dr. Öğr. Üyesi Fatih AKKURT



Üye

Dr. Öğr. Üyesi Nagihan BİLİR SAĞ



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. S. Savaş DURDURAN
FBE Müdürü

*Dr. Öğr. Üyesi Remzi ŞAHİN bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Sadık ATA

Tarih: 28.02.2020

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DÜŞÜK KAPASİTELİ DEĞİŞİK ISI KAYNAKLI, AKIŞKANLI VE KONFIGÜRASYONLU ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMLERİNİN TASARIMI VE TERMODİNAMİK OPTİMİZASYONU

Sadık ATA

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

2020, 191 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

Prof. Dr. H. Kürşad ERSOY

Prof. Dr. Hüseyin KURT

Dr. Öğr. Üyesi Fatih AKKURT

Dr. Öğr. Üyesi Nagihan BİLİR SAĞ

Bu tez çalışmasında düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı, akışkanlı ve konfigürasyonlu Organik Rankine Çevrimlerinin (ORÇ) tasarımı ve termodinamik optimizasyonu yapılmıştır. Tez çalışması 4 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde farklı tür akışkan sınıflandırmaları kullanılarak tasarlanan ORÇ'nin termodinamik analizi belirlenmiştir. Toplam 40 farklı organik akışkanın ORÇ performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Farklı sınıflandırmalar altında en iyi performans gösteren akışkanlar tespit edilmiştir.

Daha sonra ikinci bölümde bu akışkanlar ile düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı ORÇ için termodinamik optimizasyon ile optimum akışkan belirlenmiştir. Çok amaçlı genetik algoritma optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Bunun için sistemde 6 farklı amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Bunlar; ısıl verim, türbin gücü ve ekserji verimi maksimizasyonu ile toplam tersinmezlik, hacimsel debi oranı ve çevresel etki faktörünün minimizasyonudur. Öncelikle ORÇ'nin düşük ve yüksek sıcaklıklı uygulamaları kapsamında 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için optimum evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı belirlenmiştir. Ardından, ağırlık fonksiyonu sonucu her bir ısı kaynağı sıcaklığı için optimum akışkan belirlenmiştir. Bu akışkanlar; düşük sıcaklıklı ORÇ için 90 °C'de R141b, 100 ve 110 °C'de R1234yf, 120 °C'de R1234ze, 130 °C'de ise R152a olarak; yüksek sıcaklıklı ORÇ için 250, 260, 270 °C'de benzen, 280 ve 290 °C'de ise MM olarak tespit edilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde ise bu akışkanların kullanılmasıyla tasarlanan ORÇ sistemleri için performans parametrelerinin parametrik optimizasyonu ve hassasiyet analizi yapılmıştır. Düşük ve yüksek sıcaklıklı ORÇ'de performansı en fazla etkileyen parametrenin sırasıyla %42,7 ile evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı ve %40,3 ile türbin izantropik verimi olduğu tespit edilmiştir. Hassasiyet analiz sonuçları dikkate alınarak 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığında 6 farklı amaç fonksiyonu için regresyon denklemleri türetilmiştir. Bu denklemlerin güvenilirliği farklı istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Son olarak tezin dördüncü bölümünde ise optimum olarak belirlenen akışkan ve tasarım parametreleri altında farklı konfigürasyonlu ORÇ modellerinin performansı belirlenmiştir. Bunlar, Rejeneratif ORÇ (R-ORÇ), Ara Isıtmalı ORÇ (A-ORÇ), Rejeneratif Ara Isıtmalı ORÇ (RA-ORÇ), Reküperatörlü ORÇ (r-ORÇ), Rejeneratif Reküperatörlü ORÇ (Rr-ORÇ)'dir. Değişik ısı kaynakları sıcaklıkları için 6 farklı amaç fonksiyonunun değerlendirilmesiyle optimum konfigürasyon modeli belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Değişik Isı Kaynağı, Optimum Akışkan, Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), ORÇ Konfigürasyonları, Hassasiyet Seviyesi, Termodinamik Optimizasyon, Yeni-nesil Organik Akışkan

ABSTRACT

Ph.D THESIS

DESIGN AND THERMODYNAMIC OPTIMIZATION OF LOW-CAPACITY ORGANIC RANKINE CYCLES WITH DIFFERENT HEAT SOURCES, FLUIDS AND CONFIGURATIONS

Sadık ATA

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

2020, 191 Pages

Jury

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

Prof. Dr. H. Kürşad ERSOY

Prof. Dr. Hüseyin KURT

Asst. Prof. Dr. Fatih AKKURT

Asst. Prof. Dr. Nagihan BİLİR SAĞ

In this thesis, design and thermodynamic optimization of low-capacity Organic Rankine Cycles (ORC) with different heat sources, fluids and configurations have been made. The thesis consists of four main sections. In the first part, thermodynamic analysis of ORC which is designed by using different types of fluid classifications is determined. The effect of 40 different organic fluids on ORC performance was determined. The best performing fluids have been identified under different classifications.

Then, in the second part, the optimum fluid was determined by thermodynamic optimization for low-capacity with different heat source ORC with these fluids. Multi-objective genetic algorithm optimization technique was used. For this purpose, 6 different purpose functions are defined in the system. These; maximization of thermal efficiency, turbine power and exergy efficiency, minimization of total irreversibility, volume flow rate and environmental effect factor. Firstly, the optimum evaporator pinch point temperature difference was determined for 10 different heat source temperatures within the scope of low and high temperature applications of ORC. Then, as a result of the weight function, the optimum fluid for each heat source temperature was determined. These fluids; for low temperature ORC, R141b at 90 °C, R1234yf at 100 and 110 °C, R1234ze at 120 °C, R152a at 130 °C; for high temperature ORC, benzene at 250, 260, 270 °C, and MM at 280 and 290 °C.

In the third part of the thesis, parametric optimization and sensitivity analysis of performance parameters for ORC systems designed by using these fluids are performed. In the low and high temperature ORC, the parameters affecting the performance the most were 42.7% evaporator pinch point temperature difference and 40.3% isentropic efficiency of turbine respectively. Taking the sensitivity analysis results into consideration, the regression equation is derived for 6 different purpose functions at 10 different heat source temperatures. The reliability of these equations was compared using different statistical methods.

In the fourth part of the thesis, finally, the performance of different configurable ORC models under optimum fluid and design parameters is determined. These are Regenerative ORC (R-ORC), Reheated ORC (A-ORC), Regenerative Reheated ORC (RA-ORC), Recuperated ORC (r-ORC), Regenerative Recuperated ORC (Rr-ORC). The optimum configuration model was determined by evaluating 6 different purpose functions for different heat sources temperatures.

Keywords: Different Heat Source, Optimum Fluid, Organic Rankine Cycle (ORC), ORC Configurations, Sensitivity Level, Thermodynamic Optimization, New-generation Organic Fluid
ÖNSÖZ

Tez çalışmasında, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, kıymetli fikir ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocalarım Prof. Dr. Ali KAHRAMAN ve Dr. Öğr. Üyesi Remzi ŞAHİN'e anlayışlarından ve bana olan desteklerinden dolayı teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Tez çalışmam süresince öneri ve tavsiyeleriyle tezime katkı sağlayan Tez İzleme Komitesi Üyesi hocalarım Prof. Dr. H. Kürşad ERSOY ve Prof. Dr. Hüseyin KURT'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde en büyük katkı ve emeğe sahip olan çok değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sadık ATA
KONYA-2020



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ (ORÇ)	7
2.1. Klasik Rankine Çevrimi	8
2.2. ORÇ Çalışma Prensipleri.....	10
2.3. ORÇ’de Akışkan Seçiminin Önemi	11
3. FARKLI TÜR AKIŞKAN KULLANILARAK TASARLANAN ORÇ’NİN TERMODİNAMİK ANALİZİ	14
3.1. Kaynak Araştırması	14
3.2. Materyal ve Yöntem	23
3.3. Model Doğrulanması	25
3.4. Araştırma Bulguları ve Tartışma	25
4. DÜŞÜK KAPASİTELİ DEĞİŞİK ISI KAYNAKLI ORÇ İÇİN TERMODİNAMİK OPTİMİZASYON İLE OPTİMUM AKIŞKANIN BELİRLENMESİ.....	48
4.1 Kaynak Araştırması	48
4.2. Materyal ve Yöntem	52
4.3. Model Doğrulanması	60
4.4. Araştırma Bulguları ve Tartışma	60
5. DÜŞÜK KAPASİTELİ DEĞİŞİK ISI KAYNAKLI ORÇ PERFORMANS PARAMETRELERİNİN PARAMETRİK OPTİMİZASYONU VE HASSASİYET ANALİZİ.....	107
5.1. Kaynak Araştırması	107
5.2. Materyal ve Yöntem	110
5.3. Model Doğrulanması	113
5.4. Araştırma Bulguları ve Tartışma	116
6. FARKLI KONFIGÜRASYONLU ORÇ’LERİN DEĞİŞİK ISI KAYNAĞI SICAKLIKLARI ALTINDA TERMODİNAMİK OPTİMİZASYON İLE PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	144
6.1. Kaynak Araştırması	144

6.2. Materyal ve Yöntem	150
6.3. Model Doğrulanması	157
6.4. Araştırma Bulguları ve Tartışma	158
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	179
8. KAYNAKLAR	187
ÖZGEÇMİŞ.....	193



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Tez çalışması kapsamında incelenen bölümlere ait akış diyagramı	7
Şekil 2.1. İdeal Rankine Çevrimi ve T-s diyagramı.....	8
Şekil 2.2. ORÇ çalışma prensibi	10
Şekil 2.3. Organik Akışkanların T-s Diyagramında Gösterimi a)Kuru, b)İzantropik, c)Islak	11
Şekil 2.4. Akışkanların çevresel özelliklerini belirleyen güvenlik gruplandırması	13
Şekil 3.1. Kuru akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.....	26
Şekil 3.2. Kuru akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi	27
Şekil 3.3. İzantropik akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması	29
Şekil 3.4. İzantropik akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi	30
Şekil 3.5. Islak akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması	32
Şekil 3.6. Islak akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi	33
Şekil 3.7. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların ve yeni-nesil organik akışkanların tasarım değerlerinin karşılaştırılması.....	36
Şekil 3.8. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların ve yeni-nesil organik akışkanların performans parametreleri bakımından karşılaştırılması	37
Şekil 3.9. Alkan grubu akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.....	38
Şekil 3.10. Alkan grubu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi	39
Şekil 3.11. Aromatik hidrokarbon grubu akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması	40
Şekil 3.12. Aromatik hidrokarbon grubu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi.....	41
Şekil 3.13. Siloksan grubu akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.....	42
Şekil 3.14. Siloksan grubu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi	43

Şekil 3.15. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların tasarım değerlerinin karşılaştırılması	45
Şekil 3.16. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların performans parametreleri bakımından karşılaştırılması	46
Şekil 3.17. Farklı Tür Akışkan Kullanılarak Tasarlanan ORÇ'nin Termodinamik Analizini içeren akış diyagramı	47
Şekil 4.1. ORÇ Çalışma prensibi ve $\Delta T_{PP,e}$ ile $\Delta T_{PP,k}$ 'nin T-s diyagramında gösterilmesi	53
Şekil 4.2. GA çalışma prensibi.....	57
Şekil 4.3. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için $\Delta T_{PP,e}$ değişiminin net güce etkisinin belirlenerek optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinin elde edilmesi.....	62
Şekil 4.4. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi.....	64
Şekil 4.5. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi.....	65
Şekil 4.6. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi.....	66
Şekil 4.7. 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi.....	67
Şekil 4.8. 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi.....	68
Şekil 4.9. 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi.....	69
Şekil 4.10. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi.....	71
Şekil 4.11. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi.....	72
Şekil 4.12. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi.....	73
Şekil 4.13. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi.....	75
Şekil 4.14. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi.....	76
Şekil 4.15. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi.....	77

Şekil 4.16. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi.....	79
Şekil 4.17. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi.....	80
Şekil 4.18. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi.....	81
Şekil 4.19. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için $\Delta T_{PP,e}$ değişiminin net güce etkisinin belirlenerek optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinin elde edilmesi.....	83
Şekil 4.20. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi.....	85
Şekil 4.21. 260 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi.....	86
Şekil 4.22. 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi.....	87
Şekil 4.23. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi.....	88
Şekil 4.24. 260 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi.....	89
Şekil 4.25. 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi.....	90
Şekil 4.26. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi.....	91
Şekil 4.27. 260 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi.....	92
Şekil 4.28. 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi.....	93
Şekil 4.29. 280 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi.....	95
Şekil 4.30. 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi.....	96
Şekil 4.31. 280 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi.....	97
Şekil 4.32. 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi.....	98

Şekil 4.33. 280 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi.....	99
Şekil 4.34. 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi.....	100
Şekil 4.35. Düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı ORÇ için optimum akışkanın belirlenmesine ait akış diyagramı	103
Şekil 4.36. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında tasarlanan ORÇ’de basınç kaybı oranının amaç fonksiyonlarına etkisi	105
Şekil 4.37. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında tasarlanan ORÇ’de basınç kaybı oranının amaç fonksiyonlarına etkisi	106
Şekil 5.1. ORÇ Taguchi Optimizasyon Akış Diyagramı	117
Şekil 5.2. R141b’li ORÇ’nin ısı veriminin ‘en büyük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği.....	121
Şekil 5.3. R141b’li ORÇ’nin türbin gücünün ‘en büyük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği.....	121
Şekil 5.4. R141b’li ORÇ’nin ekserji veriminin ‘en büyük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği.....	122
Şekil 5.5. R141b’li ORÇ’nin toplam tersinmezliğinin ‘en küçük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği	122
Şekil 5.6. R141b’li ORÇ’nin VFR değerinin ‘en küçük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği.....	123
Şekil 5.7. R141b’li ORÇ’nin EEF değerinin ‘en küçük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği.....	123
Şekil 5.8. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ’nin faktör değerlerinin amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları	131
Şekil 5.9. ORÇ’nin düşük sıcaklıklı uygulamaları için faktör değerlerinin amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları.....	133
Şekil 5.10. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ’nin faktör değerlerinin amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları	135
Şekil 5.11. ORÇ’nin yüksek sıcaklıklı uygulamaları için faktör değerlerinin amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları	136
Şekil 5.12. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığı için regresyon ile elde edilen tahmin değerlerinin EES sonuçları ile karşılaştırılması.....	141

Şekil 5.13. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığı için regresyon ile elde edilen tahmin değerlerinin EES sonuçları ile karşılaştırılması.....	142
Şekil 6.1. B-ORÇ Çalışma prensibi ve T-s diyagramı	150
Şekil 6.2. R-ORÇ Çalışma prensibi ve T-s diyagramı	151
Şekil 6.3. A-ORÇ Çalışma prensibi ve T-s diyagramı.....	152
Şekil 6.4. RA-ORÇ Çalışma prensibi ve T-s diyagramı	152
Şekil 6.5. r-ORÇ Çalışma prensibi ve T-s diyagramı	153
Şekil 6.6. Rr-ORÇ Çalışma prensibi ve T-s diyagramı.....	154
Şekil 6.7. R-ORÇ’de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında A-BSI basınç değişiminin ısı verime etkisi	159
Şekil 6.8. A-ORÇ’de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında ara ısıtma basınç oranının (k) ısı verime etkisi	161
Şekil 6.9. RA-ORÇ’de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında optimum A-BSI basıncı ve k değerinin belirlenmesiyle elde edilen ısı verim değerleri	163
Şekil 6.10. r-ORÇ’de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında reküperatör etkenliğinin (ϵ) ısı verime etkisi	164
Şekil 6.11. Rr-ORÇ’de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında $P_{7,opt}$ ve ϵ_{max} değerlerinin belirlenmesiyle elde edilen ısı verim değerleri	166
Şekil 6.12. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ’lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında ısı verimlerinin karşılaştırılması	167
Şekil 6.13. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ’lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında türbin güçlerinin karşılaştırılması	168
Şekil 6.14. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ’lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında ekserji verimlerinin karşılaştırılması.....	169
Şekil 6.15. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ’lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında toplam tersinmezlik değerlerinin karşılaştırılması.....	170
Şekil 6.16. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ’lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında VFR değerlerinin karşılaştırılması.....	170
Şekil 6.17. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ’lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında EEF değerlerinin karşılaştırılması	171
Şekil 6.18. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ’lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında ısı verimlerinin karşılaştırılması	173
Şekil 6.19. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ’lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında türbin güçlerinin karşılaştırılması	173

Şekil 6.20. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında ekserji verimlerinin karşılaştırılması.....	174
Şekil 6.21. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında toplam tersinmezlik değerlerinin karşılaştırılması	174
Şekil 6.22. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında VFR değerlerinin karşılaştırılması	175
Şekil 6.23. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında EEF değerlerinin karşılaştırılması.....	176
Şekil 6.24. Konfigürasyonlu ORÇ'nin Termodinamik Opt. içeren akış diyagramı.....	178



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Suyun termodinamik özellikleri.....	9
Çizelge 3.1. ORÇ Termodinamik Analiz Bağlıntıları.....	23
Çizelge 3.2. EES ile hazırlanan modelin aynı tasarım parametreleri kullanılarak başka bir çalışma ile karşılaştırılması	25
Çizelge 3.3. Kuru akışkanların çevresel özellikleri	25
Çizelge 3.4. İzantropik akışkanların çevresel özellikleri	28
Çizelge 3.5. Islak akışkanların çevresel özellikleri.....	30
Çizelge 3.6. Düşük sıcaklıklı ORÇ için yapılan akışkan sınıflandırması ve her bir gruba ait en iyi performans gösteren akışkanlar	34
Çizelge 3.7. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların ve yeni-nesil organik akışkanların çevresel özellikleri.....	35
Çizelge 3.8. Yüksek sıcaklıklı ORÇ için yapılan akışkan sınıflandırması ve her bir gruba ait en iyi performans gösteren akışkanlar.....	44
Çizelge 4.1. GA işlem parametre değerleri.....	57
Çizelge 4.2. GA kullanılarak elde edilen verilerin aynı tasarım parametreleri kullanılarak başka bir çalışma ile karşılaştırılması.....	60
Çizelge 4.3. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için değişik ısı kaynağı sıcaklıkları altında farklı akışkanlar için optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinin belirlenmesi	63
Çizelge 4.4. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi	66
Çizelge 4.5. 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi.....	69
Çizelge 4.6. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi.....	73
Çizelge 4.7. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi.....	77
Çizelge 4.8. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi.....	81

Çizelge 4.9. ORÇ'nin düşük sıcaklıklı uygulamalarında farklı amaç fonksiyonları altında optimum akışkanın belirlenmesi	82
Çizelge 4.10. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için değişik ısı kaynağı sıcaklıkları altında farklı akışkanlar için optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinin belirlenmesi	84
Çizelge 4.11. 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi	94
Çizelge 4.12. 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi.....	101
Çizelge 4.13. ORÇ'nin yüksek sıcaklıklı uygulamalarında farklı amaç fonksiyonları altında optimum akışkanın belirlenmesi	101
Çizelge 5.1. Isıl verim maksimizasyonu için belirlenen performans parametreleri ve seviye değerleri.....	113
Çizelge 5.2. S/N Oran Tablosu ve Parametrelerin Önem Sırası	114
Çizelge 5.3. R245fa için performans parametrelerinin değişimiyle ısıl verimin belirlenmesine yönelik EES ile regresyon tahmin sonuçlarının karşılaştırılması.....	115
Çizelge 5.4. EES ile hazırlanan modelin aynı tasarım parametreleri kullanılarak başka bir çalışma ile karşılaştırılması	116
Çizelge 5.5. ORÇ Taguchi optimizasyonu için belirlenen faktör ve seviye değerleri.....	119
Çizelge 5.6. L_{25} (5^6) ortogonal dizi tasarımı	120
Çizelge 5.7. R141b'li ORÇ'de ısıl verim maksimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi	124
Çizelge 5.8. R141b'li ORÇ'de türbin gücü maksimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi.....	124
Çizelge 5.9. R141b'li ORÇ'de ekserji verimi maksimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi.....	125
Çizelge 5.10. R141b'li ORÇ'de toplam tersinmezlik minimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi.....	125
Çizelge 5.11. R141b'li ORÇ'de VFR değerinin minimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi.....	125
Çizelge 5.12. R141b'li ORÇ'de EEF değerinin minimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi.....	126
Çizelge 5.13. 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi.....	127

Çizelge 5.14. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi.....	128
Çizelge 5.15. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi.....	128
Çizelge 5.16. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi.....	128
Çizelge 5.17. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi.....	129
Çizelge 5.18. 260 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi.....	129
Çizelge 5.19. 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi.....	130
Çizelge 5.20. 280 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi.....	130
Çizelge 5.21. 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi.....	130
Çizelge 5.22. Düşük Sıcaklıklı ORÇ’de Belirlenen Amaç Fonksiyonlarına Ulaşılmasında Hassasiyet Seviyesi En Fazla Olan İki Parametre ve Katkı Oranları.....	134
Çizelge 5.23. Yüksek Sıcaklıklı ORÇ’de Belirlenen Amaç Fonksiyonlarına Ulaşılmasında Hassasiyet Seviyesi En Fazla Olan İki Parametre ve Katkı Oranları.....	137
Çizelge 5.24. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ’nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri	138
Çizelge 5.25. 100 ve 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ’nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri	138
Çizelge 5.26. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ’nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri	139
Çizelge 5.27. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ’nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri	139
Çizelge 5.28. 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ’nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri.....	140
Çizelge 5.29. 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ’nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri	140

Çizelge 5.30. Değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında farklı amaç fonksiyonları bakımından tahmin edilen değerlerin EES sonuçları ile farklı istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırıl.....	143
Çizelge 6.1. ORÇ konfigürasyonları için enerji ve ekserji denge bağıntıları	155
Çizelge 6.2. ORÇ'nin farklı konfigürasyonları için hazırlanan termodinamik modelin aynı tasarım parametreleri kullanılarak başka bir çalışma ile karşılaştırılması	157
Çizelge 6.3. R-ORÇ'de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında $P_{6,opt}$ basıncı için türetilen denklemler.....	158
Çizelge 6.4. A-ORÇ'de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında $P_{4,opt}$ için türetilen denklemler..	160
Çizelge 6.5. RA-ORÇ'de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında $P_{8,opt}$ basıncı için türetilen denklemler.....	162
Çizelge 6.6. Rr-ORÇ'de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında $P_{7,opt}$ basıncı ve ϵ_{max} belirlenmesi için türetilen denklemler.....	164
Çizelge 6.7. Düşük Sıcaklıklı ORÇ Uygulamaları İçin Değişik Isı Kaynağı Sıcaklıklarında ORÇ Konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdesi (%)	171
Çizelge 6.8. Yüksek Sıcaklıklı ORÇ Uygulamaları İçin Değişik Isı Kaynağı Sıcaklıklarında ORÇ Konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdesi (%)	176
Çizelge 7.1. ORÇ'nin Farklı Uygulama Alanları İçin Belirlenen Akışkan Sınıflandırmaları Altında En İyi Performans Gösteren Akışkanlar.....	180
Çizelge 7.2. Termodinamik optimizasyonda ağırlık fonksiyonu sonucu değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için optimum akışkanların belirlenmesi ve kullanılabilme oranı	181
Çizelge 7.3. Değişik Isı Kaynaklı ORÇ'de Belirlenen Amaç Fonksiyonlarına Ulaşılmasında Hassasiyet Seviyesi En Fazla Olan İki Parametre ve Katkı Oranları.....	183
Çizelge 7.4. Değişik Isı Kaynaklı ORÇ'de Optimum Konfigürasyon kullanımında Oluşan Performans Artış Yüzdesi (%)	186

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_p	: Özgül Isı (kJ/kg°C)
E	: Ekserji
$f(x)$: Amaç fonksiyonu
$G(x)$: Ağırlık fonksiyonu
h	: Entalpi (kJ/kg)
I	: Tersinmezlik
J	: Joule
kg	: Kilogram
kPa	: Kilopaskal
kW	: Kilowatt
\dot{m}_{ORC}	: Organik akışkanın kütleli debisi (kg/s)
\dot{m}_h	: Sıcak akışkan kütleli debisi (kg/s)
\dot{m}_c	: Soğutma suyu kütleli debisi (kg/s)
$\eta_{ısıl}$: Isıl Verim
η_{II}	: Ekserji Verimi
η_p	: Pompa izantropik verimi
η_t	: Türbin izantropik verimi
$^{\circ}C$: Santigrat derece
P	: Basınç (kPa)
P_{kritik}	: Akışkanın kritik basıncı (kPa)
s	: Entropi (kJ/kg°C)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_{ak}	: Aşırı kızdırma sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{c,i}$: Soğutma suyu giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{c,o}$: Soğutma suyu çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{h,i}$: Isı kaynağı giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{h,o}$: Isı kaynağı çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{kritik}	: Akışkanın kritik sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{p,e}$: Evaporatör pinch noktası sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{p,k}$: Kondenser pinch noktası sıcaklığı ($^{\circ}C$)
W	: Güç (Watt)
X	: Kuruluk derecesi
ΔT_{PP}	: Pinch noktası sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
$\Delta T_{PP,e}$: Evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
$\Delta T_{PP,k}$: Kondenser pinch noktası sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
ε	: Etkenlik değeri

Kısaltmalar

A-BSI	: Açık Besleme Sıvı Isıtıcısı
ANOVA	: Varyans Analizi (Analysis of Variance)
A-ORÇ	: Ara Isıtmalı ORÇ
B-ORÇ	: Basit ORÇ
COP	: Performans katsayısı (Coefficient of Performance)
D4	: Octamethylcyclotetrasiloxane
D5	: Decamethylcyclopentasiloxane
EEF	: Çevresel Etki Faktörü (Environmental Effect Factor)
EES	: Engineering Equation Solver
ESI	: Ekserji Sürdürülebilirlik İndeksi (Exergy Sustainability Index)
GA	: Genetik Algoritma
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential)
MAPE	: Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error)
MM	: Hexamethyldisiloxane
MDM	: Octamethyltrisiloxane
MD4M	: Tetradecamethylhexasiloxane
ODP	: Ozon Delme Potansiyeli (Ozone Depletion Potential)
opt	: Optimum
ORÇ	: Organik Rankine Çevrimi
PP	: Pinch Point
PR	: Türbin Basınç Oranı (Pressure Ratio)
R^2	: Düzeltilmiş Belirleme Katsayısı (Determination of Coefficient)
RA-ORÇ	: Rejeneratif Ara Isıtmalı ORÇ
RMSE	: Hata Karelerinin Ortalama Kökü (Root Mean Squared Error)
R-ORÇ	: Rejeneratif ORÇ
r-ORÇ	: Reküperatörlü ORÇ
RRMSE	: Oransal Hata Kareleri Ortalamasının Karekökü (Relative Root Mean Squared Error)
Rr-ORÇ	: Rejeneratif Reküperatörlü ORÇ
S/N	: Sinyal/Gürültü
SP	: Türbin Boyut Parametresi (Size Parameter)
VFR	: Hacimsel Debi Oranı (Volume Flow Ratio)
WER	: Atık Ekserji Oranı (Waste Exergy Ratio)

1. GİRİŞ

Dünya üzerinde sürekli artış eğiliminde olan nüfus ve sanayileşme sonucunda Türkiye ve pek çok gelişmekte olan ülkenin enerji ihtiyacı da artmaktadır. Ülkemiz enerji açısından büyük ölçüde dışa bağımlıdır. İhtiyacımız olan enerjinin büyük bir kısmını ithal etmekteyiz ve bu ithal edilen enerjide fosil kökenli yenilenemeyen enerjilerdir. Ayrıca fosil kaynaklı enerjilerin çevreye zarar verdiği de bilinmektedir. Bu nedenlerle dünya üzerindeki birçok ülke enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir (güneş, rüzgâr, biyokütle, jeotermal vb.).

Elektrik enerjisi günümüzün en büyük ihtiyaçları arasındadır. Gelişen teknoloji, artan elektronik cihazlar elektrik tüketimini de her geçen gün arttırmaktadır. Günümüzde elektrik üretmek için kullanılan birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerin büyük bir kısmı termik santrallerde kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtların yakılıp enerjisinin bir akışkana aktarılarak, elde edilen buharın bir türbine hareket vermesiyle gerçekleşmektedir. Elektrik enerjisi üretiminde termik santrallerin payı ülkelere bağlı olarak %50 ile %95 arasında değişmektedir.

Rankine Çevrimi yüksek kapasiteli termal enerjinin güce dönüştürülmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Örnek olarak nükleer santraller ve kömür santralleri verilebilir. Birçok ülke elektrik üretimini bu tarz fosil kökenli kaynakla çalışan termik santrallerden sağlamaktadır. Fakat bu santrallerin çevreye zarar verdiği bilinmektedir. Ayrıca fosil kökenli kaynakların zamanla tükeneceği göz önüne alındığında, elektrik üretimi için yeni arayışlar içine giren birçok ülke gibi bizim ülkemizin de elektrik üretmek için yeni ve temiz kaynakları değerlendirmesi gerekmektedir. Günümüzde Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) prensibine göre çalışan elektrik santralleri düşük sıcaklıklardaki kaynaklardan elektrik üretmek için karşımıza umut verici bir gelişme olarak çıkmıştır. Yeraltı enerji kaynaklarının verimli kullanılması ile yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde etkin rol oynaması; düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarının elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile mümkün olabilir.

Ülkemiz için son derece önemli olan bu santrallerin, üretime geçmeden önce, projelendirme aşamasında termodinamik analizlerinin yapılması son derece önemlidir. Ayrıca mevcut santrallerde de bu analizlerin yapılması, santral performansına ve dolayısıyla üretilen elektrik miktarına doğrudan etki edecektir. Enerji ve ekserji analizleri sistemin performansını, kayıp değerlerini ve iyileştirilmesi gereken noktaları gösterecektir. Cihazların verimini arttırmakta kullanılan termodinamik analizler ile sistemde var olan kayıpların tespit edilebilir. Bu sayede bunların geri dönüşümünün yapılıp yapılamayacağı, var olan atık ısı geri dönüşüm

sistemleri göz önünde bulundurularak tespit edilerek uygulanabilmesi mümkün olabilmektedir (Ergün, 2014; Eyidoğan 2014).

Bu tez çalışmasında düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı, akışkanlı ve konfigürasyonlu ORÇ'lerin tasarımı ve termodinamik optimizasyonu yapılmıştır. ORÇ uygulamaları temel olarak düşük sıcaklıklı ve yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları olmak üzere iki grupta ele alınmıştır. İlk olarak; termodinamik analiz ile farklı tür akışkanların ORÇ sisteminin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Engineering Equation Solver (EES) ile farklı sınıflandırma kategorilerinde iyi performans gösteren akışkanlar belirlenmiştir. Daha sonra bu akışkanlar içerisinde düşük ve yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için belirlenen 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için ORÇ'de kullanılması önerilen optimum akışkanlar tespit edilmiştir. Bu akışkanlar, çok amaçlı genetik algoritma (GA) optimizasyon tekniği kullanılarak farklı amaç fonksiyonları altında değerlendirme yapılarak belirlenmiştir. Ardından, ORÇ sisteminde performans parametrelerinin sistem üzerindeki etkisi Taguchi-ANOVA yöntemi ile belirlenmiştir. Değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında optimum olarak belirlenen akışkanların farklı amaç fonksiyonları altında performans parametrelerinin hassasiyet analizi yapılmıştır. Belirlenen bu veriler altında amaç fonksiyonlarının her biri için regresyon denklemi türetilmiştir. Bu türetilen denklemlerin güvenilirliği farklı istatistiksel yöntemler kullanılarak tespit edilmiştir. Son olarak, ORÇ'de elde edilen optimum akışkan ve tasarım parametrelerinin farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerde kullanılmasıyla performans karşılaştırılması yapılmıştır. Her konfigürasyon modelinin çalışacağı optimum basınç değerleri çok amaçlı GA yöntemi ile belirlenmiştir. 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için farklı amaç fonksiyonlarının birlikte değerlendirilmesiyle optimum konfigürasyon modeli tespit edilmiştir.

Doktora tez çalışması temel olarak 6 bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm giriş olup, ikinci bölüm ise ORÇ sistemini, ORÇ'nin klasik Rankine sistemi ile karşılaştırılmasını, ORÇ'nin çalışma prensibini ve ORÇ'de akışkan seçiminin önemini içermektedir.

Tezin üçüncü bölümü, farklı tür akışkan kullanılarak tasarlanan ORÇ'nin termodinamik analizini içermektedir. Termodinamik analiz EES ile yapılmıştır. Düşük ve yüksek sıcaklıklı ORÇ için toplam 6 farklı akışkan türünde toplam 40 farklı organik akışkanın performans karşılaştırılması yapılmıştır. Tezin üçüncü bölümünde;

- ORÇ'nin düşük sıcaklıklı uygulamaları için organik akışkanlar kuru, izantropik ve ıslak olmak üzere 3 farklı kategoride ele alınmıştır.

- ORÇ'nin düşük sıcaklıklı uygulamalarında ısı kaynakları jeotermal enerji ($T_{h,i} = 90, 100, 110 \text{ }^\circ\text{C}$) ve düşük sıcaklıklı güneş enerjisi ($T_{h,i} = 120, 130 \text{ }^\circ\text{C}$) olarak belirlenmiştir.
- Kuru (RC318, R114, Bütan-R600, İzobütan-R600a, Pentan-R601, İzopentan-R601a), izantropik (R141b, R123, R245fa, R142b, R124, R227ea) ve ıslak (R290, R32, R152a, R134a, R125, R1270) sınıflandırılmasında her bir kategoriden 6'şar akışkan olmak üzere toplam 18 akışkanın kullanılmasıyla tasarlanan ORÇ sisteminin termodinamik analizi yapılmıştır. Ayrıca bu bölümde düşük kritik sıcaklığa sahip çevresel özellikleri çok iyi durumda olan yeni-nesil organik akışkanlarında (R1234yf, R1234ze) termodinamik performansı belirlenmiştir.
- ORÇ'nin yüksek sıcaklıklı uygulamaları için ise organik akışkanlar alkanlar, aromatik hidrokarbonlar ve siloksanlar olmak üzere 3 farklı kategoride sınıflandırılmıştır.
- ORÇ'nin yüksek sıcaklıklı uygulamalarında ısı kaynakları atık ısı ($T_{h,i}=250, 260, 270 \text{ }^\circ\text{C}$) ve biyokütle ile yüksek sıcaklıklı güneş enerjisi ($T_{h,i}=280, 290 \text{ }^\circ\text{C}$) olarak belirlenmiştir.
- Alkanlar (n-hekzan, n-oktan, n-dekan, n-dodekan, n-nonan, n-heptan, izohekzan, siklohekzan), aromatik hidrokarbonlar (benzen, etilbenzen, toluen, m-ksilen, p-ksilen, o-ksilen) ve siloksanlar (D4, D5, MM, MDM, MD4M, HFE7500) sınıflandırılmasında toplam 20 akışkanın kullanılmasıyla tasarlanan ORÇ sisteminin termodinamik analizi yapılmıştır.
- Performans parametreleri, ısıl verim, türbin gücü, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik olarak belirlenmiştir. Farklı ORÇ tasarımlarının kullanılmasıyla tespit edilen sonuçların değerlendirilmesiyle 6 farklı akışkan türünde her biri için en iyi performans gösteren 2 akışkan belirlenmiştir.

Tezin dördüncü bölümü, düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı ORÇ için termodinamik optimizasyon ile optimum akışkanın belirlenmesini içermektedir. ORÇ tasarımında bir önceki bölümde en iyi performans gösteren akışkanlar kullanılmıştır.

- ORÇ performansı 3 farklı yönden ele alınmıştır. Bunlar, termodinamik performans, türbin tasarım performansı ve termodinamik sürdürülebilirlik performansıdır.
- Termodinamik performans olarak ısıl verim, türbin gücü, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik incelenmiştir. Türbin performansı olarak ise hacimsel debi oranı, türbin boyut parametresi ve basınç oranı incelenmiştir. Ayrıca, sistemin termodinamik

sürdürülebilirlik indeksleri de ele alınmıştır. Bunlar; atık ekserji oranı, çevresel etki faktörü ve ekserji sürdürülebilirlik indeksidir.

- Bu bölümde ORÇ'nin düşük ve yüksek sıcaklıklı uygulamaları kapsamında belirlenen 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için optimum akışkan belirlenmiştir.
- Her bir ısı kaynağı sıcaklığı için optimum evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı ($\Delta T_{PP,e}$) belirlenmiştir. $\Delta T_{PP,e}$, evaporatör pinch noktası sıcaklığı ($T_{P,e}$) ile organik akışkanın buharlaşma sıcaklığı arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır.
- Optimum $\Delta T_{PP,e}$ 'nin belirlenmesiyle ORÇ'nin tasarım değerleri belirlenmiştir. Çok amaçlı GA optimizasyon tekniği ile 6 farklı amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Bunlar; ısı verim, türbin gücü ve ekserji verimi maksimizasyonu ile toplam tersinmezlik, hacimsel debi oranı ve çevresel etki değerinin minimizasyonudur.
- Bu amaç fonksiyonlarında en iyi değere ulaşan akışkanın diğer akışkanlara göre ortalama performans artış yüzdesi baz alınarak elde edilen ağırlık fonksiyonu sonucunda 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için optimum akışkanlar belirlenmiştir.
- Bu bölümde ayrıca, çoğu çalışmada ihmal edilen evaporatör ve kondenserde meydana gelen basınç kayıplarının ORÇ sistemindeki etkisi belirlenmiştir. Basınç kayıp oranının %1 ile %15 arasında olmasının sistem performans parametrelerine etkisi incelenmiştir.

Tezin beşinci bölümü, düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı ORÇ performans parametrelerinin parametrik optimizasyonunu ve hassasiyet analizini içermektedir. Taguchi-Varyans Analizi (Analysis Of Variance-ANOVA) optimizasyon yöntemi kullanılmıştır.

- ORÇ tasarımı 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için bir önceki bölümde tespit edilen optimum organik akışkanlar kullanılarak yapılmıştır.
- Taguchi optimizasyonunda 6 farklı faktör 5 farklı seviye değerinde değerlendirilerek L25 (5^6) ortogonal dizilim kullanılmıştır.
- ORÇ performansı üzerinde etkisi belirlenmek istenen parametreler, evaporatör ve kondenser pinch noktası sıcaklık farkı, soğutma suyu sıcaklığı, aşırı kızdırma sıcaklığı, türbin ve pompa izantropik verimidir.
- Taguchi'de bir önceki bölümde belirlenen aynı amaç fonksiyonları bakımından sistemin optimizasyonu yapılmıştır.
- ORÇ'nin değişik ısı kaynağı sıcaklıkları ile farklı amaç fonksiyonları altında ulaştıkları optimum ortogonal dizilimler belirlenmiştir. Ayrıca, her bir amaç fonksiyonu için performans parametrelerinin hassasiyet analizi yapılmıştır.

- ANOVA ile performans parametrelerinin farklı amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları her bir ısı kaynağı sıcaklığı için ayrı ayrı belirlenmiştir.
- Taguchi-ANOVA sonuçlarına göre amaç fonksiyonlarının performans parametrelerine bağlı regresyon denklemi tespit edilmiştir. Elde edilen denklemlerin güvenilirliğini tespit etmek için 3 farklı istatistiksel yöntem ile karşılaştırması yapılmıştır. Bunlar; Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error-MAPE), Oransal Hata Kareleri Ortalamasının Karekökü (Relative Root Mean Squared Error-RRMSE), Düzeltilmiş Belirleme Katsayısı (Determination of Coefficient- R^2)'dir.

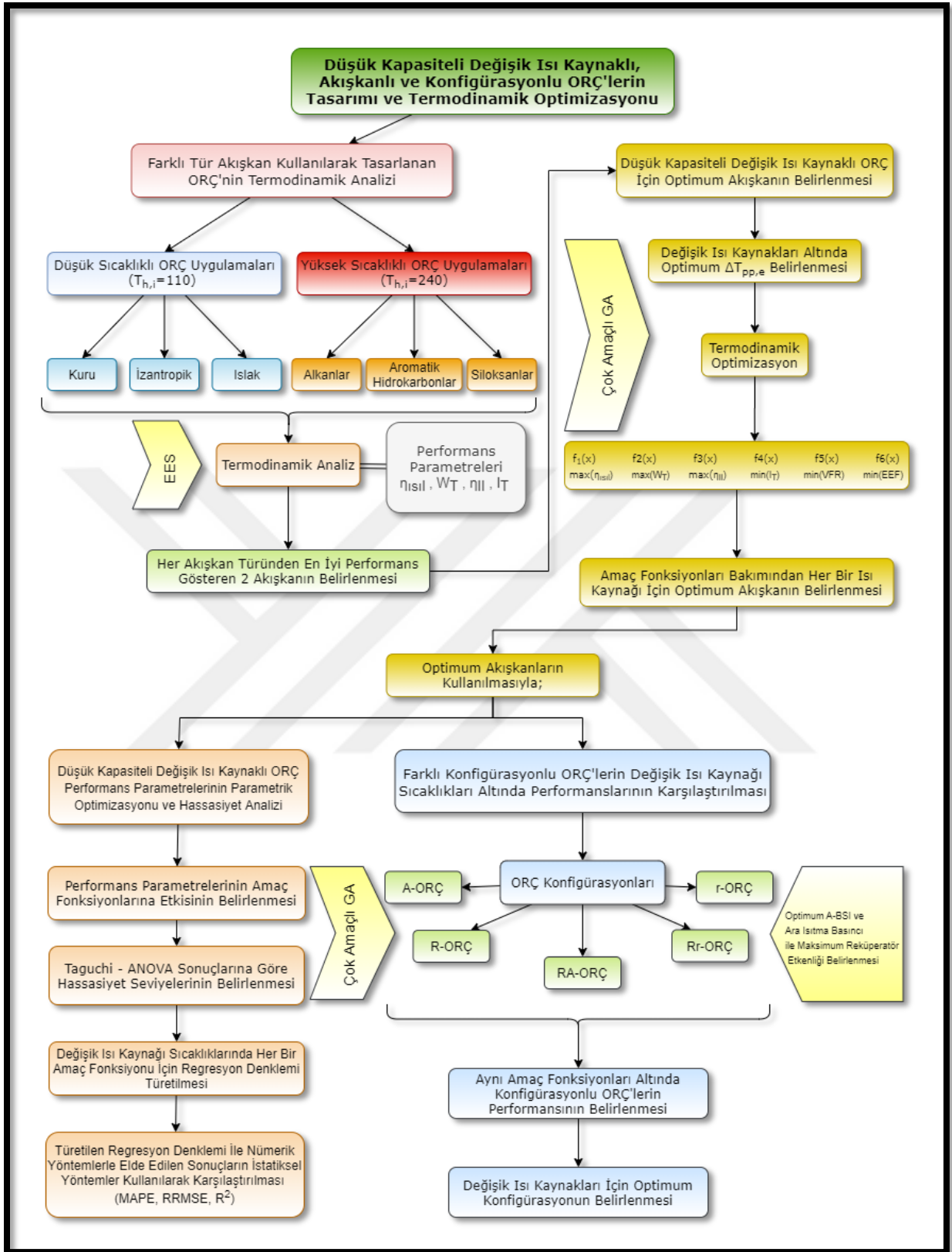
Tezin altıncı bölümü ise, farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklıkları altında termodinamik optimizasyon ile performanslarının karşılaştırılmasını içermektedir. ORÇ konfigürasyonları; Rejeneratif ORÇ (R-ORÇ), Ara Isıtmalı ORÇ (A-ORÇ), Rejeneratif Ara Isıtmalı ORÇ (RA-ORÇ), Reküperatörlü ORÇ (r-ORÇ) ve Rejeneratif Reküperatörlü ORÇ (Rr-ORÇ)'dir.

- 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için belirlenen optimum akışkanlar kullanılarak elde edilen basit ORÇ (B-ORÇ) verileri aynı tasarım parametreleri dikkate alınarak farklı konfigürasyonlu ORÇ'ler ile karşılaştırılmıştır.
- R-ORÇ'de açık besleme sıvı ısıtıcısı (A-BSI) basıncı, A-ORÇ'de ara ısıtma basınç oranı (k), RA-ORÇ'de hem A-BSI basıncı hem de k değeri, r-ORÇ'de reküperatör etkinliği (ϵ), Rr-ORÇ'de ise hem A-BSI basıncı hem de ϵ değeri incelenmiştir.
- R-ORÇ, A-ORÇ ve RA-ORÇ konfigürasyonları için çok amaçlı GA ile optimum A-BSI basıncı ve k değeri belirlenmiştir. Rr-ORÇ için optimum A-BSI basıncı belirlenirken ayrıca sınır şartlarına bağlı olarak sistemde reküperatörün ulaşabileceği maksimum ϵ değeri belirlenmiştir. r-ORÇ'de ise ϵ değerinin sistem performansına etkisi belirlenmiştir.
- Optimum değerlerin belirlenmesinin ardından bir önceki bölümde olduğu gibi yine 6 farklı amaç fonksiyonu bakımından performans karşılaştırılması yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının özgünlük değeri tezin her bir bölümü için aşağıda açıklanmıştır. Organik akışkanların farklı sınıflandırmalar altında belirlenmesiyle ORÇ'nin uygulama alanına uygun bir karşılaştırma yapılması sağlanmıştır. Bu sınıflandırmalar altında en iyi performans gösteren akışkanlar belirlenmiştir. Bu akışkanların değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için tek bir parametreye bağlı olmadan hem termodinamik performans hem türbin performansı hem de sürdürülebilirlik indeksleri bakımından termodinamik optimizasyonu ile optimum akışkan tespit edilmiştir. Optimum akışkanların farklı performans parametreleri üzerindeki

hassasiyet seviyeleri belirlenmiş, değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında farklı amaç fonksiyonları için performans parametrelerine bağlı regresyon denklemleri türetilmiştir. Bu denklemler ile ORÇ performansının herhangi bir yazılıma ihtiyaç duymadan belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Optimum akışkan ve tasarım değerlerinin belirlenmesinin ardından 5 farklı ORÇ konfigürasyon modeli ile performans karşılaştırılması yapılmıştır. ORÇ'nin uygulama alanları için optimum konfigürasyon modeli tespit edilmiştir. Doktora tez çalışmasında incelenen tüm bölümler Şekil 1.1'de verilen akış diyagramında özetlenmiştir.





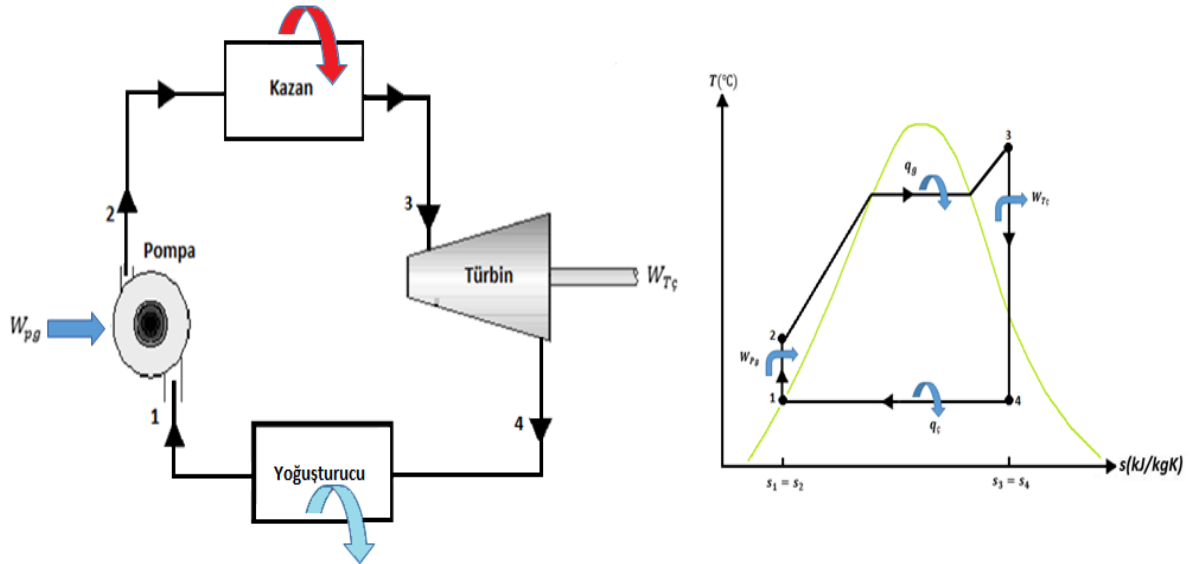
Şekil 1.1. Tez çalışması kapsamında incelenen bölümlere ait akış diyagramı

2. ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ (ORÇ)

2.1. Klasik Rankine Çevrimi

Güç üretim tesislerin çoğu Rankine çevrimine dayanmaktadır. Rankine çevrimi ısıyı işe dönüştüren bir çevrimdir. Isı genellikle dışarıdan temin edilir ve buharlı güç çevrimlerinde en ideal olanı Rankine çevrimidir. Basit bir buharlı güç santrali pompa, kazan, türbin ve yoğuşturucudan oluşur. Buharlı güç santralinde çalışma akışkanı olarak su kullanılmaktadır. Suyun basıncı pompa vasıtasıyla artırılır ve su basınçlandırılmış bir şekilde kazana gönderilir. Fosil kökenli yakıtlar (kömür, motorin ve doğalgaz) buhar kazanında yakılır. Buhar kazanı bir ocak ile boru demetlerinden oluşmaktadır. Yanma sonucu açığa çıkan ısı enerjisi kazandaki boruların içinde dolaşan suya aktarılır ve suyun kızgın buhar haline gelmesi sağlanır. Kazanda elde edilen yüksek basınçlı kızgın buhar türbine gönderilir. Yüksek basınca sahip kızgın buharın buhar türbini kanatlarına çarpması sonucu buhar türbininden mekanik enerji elde edilir. Türbinin mekanik hareketi sonucu buhar türbini miline bağlı olan jeneratörden elektrik üretimi sağlanır. Buhar türbininden düşük basınçta çıkan çürük buhar yoğuşturucuda yoğuşturularak sıcaklığı düşürülür ve tekrar sıvı hale getirilir. Yoğuşturucudan çıkan düşük sıcaklık ve düşük basınçtaki su pompalanmak üzere tekrar pompaya gelir. Suyun pompadan çıkıp bu aşamalardan geçip, tekrar pompaya dönmesiyle buharlı güç çevrimi tamamlanmış olur (Yılmaz, 2013).

Şekil 2.1'de Rankine çevrimine ait sistem ve T-s diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.1. İdeal Rankine Çevrimi ve T-s diyagramı

Klasik Rankine Çevriminde, su iş yapan akışkan olarak kullanılmaktadır. Suyun termodinamik özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Suyun termodinamik özellikleri
(Çengel ve Boles, 2015)

Özellik	Değer/Birim
Moleküler ağırlığı	18 g/mol
Kaynama noktası	100 °C (101,325 kPa)
Donma noktası	0 °C (101,325 kPa)
Üçlü nokta	0,01 °C – 0,611 kPa
Kritik nokta	374 °C – 22060 kPa
Buharlaştırma gizli ısı	2.256,6 kJ/kg – 101,325 kPa
Özgül ısı	4,18 kJ/kg°C

Termal güç üretim sistemlerinde su buharı kullanımının olumlu ve olumsuz tarafları bulunmaktadır. Avantajları;

- Çok iyi termal ve kimyasal kararlılık (çürüme riski yoktur)
- Düşük viskoziteden kaynaklanan çok küçük pompa gücü gereksinimi
- İyi derecede enerji taşınması (yüksek gizli ve özgül ısı)
- Zehirsiz olması, yanıcı özelliğinin olmaması ve aynı zamanda çevreye zararı bulunmaması
- Ucuz ve yaygın bulunmasıdır.

Olumsuz tarafları ise;

- Genleşme sırasında yoğuşmayı önlemek için aşırı kızdırmaya gerek duyulması
- Türbin kanatlarında aşınma riski olması
- Evaporatör aşınma riski olması
- Karışık ve pahalı türbin yapısı olmasıdır (Ergün, 2014).

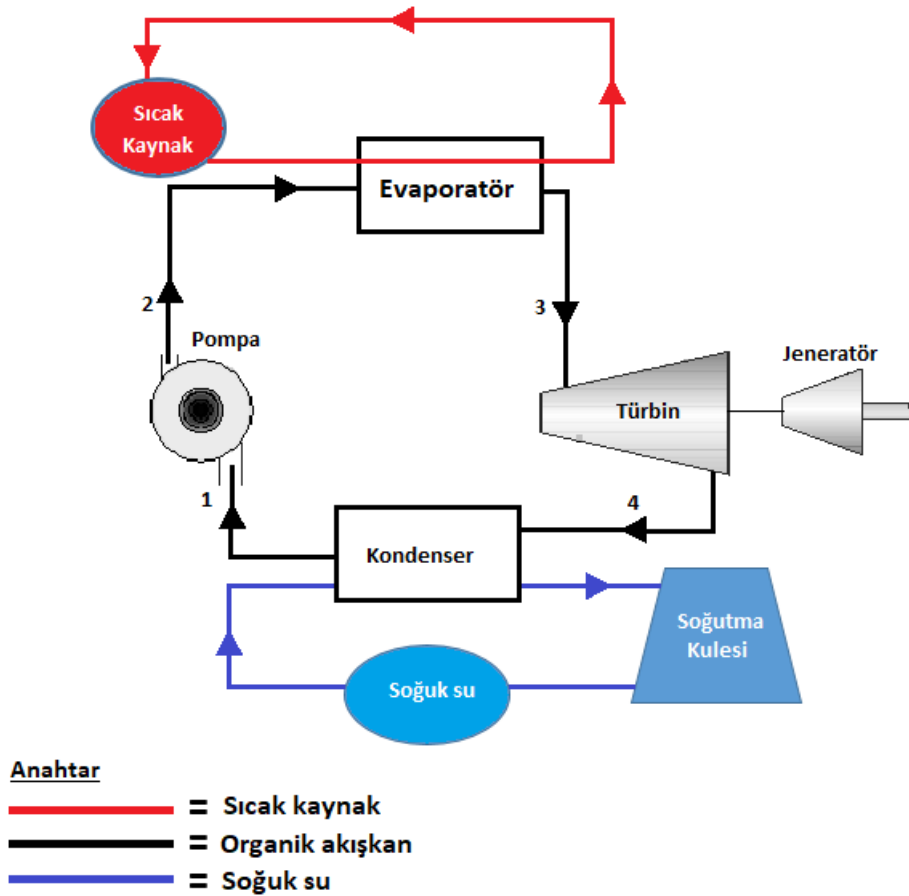
Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı su, yüksek sıcaklık uygulamaları ve büyük merkezi sistemler için daha uygundur. Küçük ve orta ölçekli güç çevrimlerinde, su kullanımıyla karşılaşılan problemler uygun akışkan kullanımıyla kısmen azaltılabilir. Bu akışkanlar sudan daha yüksek molekül ağırlığına ve düşük kritik sıcaklığa sahip olup organik akışkan olarak adlandırılırlar ve Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) adı verilen buhar çevrimlerinde kullanılırlar.

ORÇ sistemlerini diğer Rankine çevrimlerinden farklı yapan özelliği sistem ekipmanları değil, sistemde kullanılan akışkanın türüdür. ORÇ’de organik çalışma akışkanı geleneksel Rankine çevrimindeki çalışma akışkanı olan sudan daha düşük bir kaynama noktası ve daha yüksek bir buhar basıncına sahiptir. Bu temel fark, çevrimin verimini

artırdığından, seçilecek çalışma akışkanının kaynama noktası ne kadar düşük ve buhar basıncı ne kadar yüksek olursa türbinden elde edilen enerjide o kadar artar (Pelit, 2015).

2.2. ORÇ Çalışma Prensibi

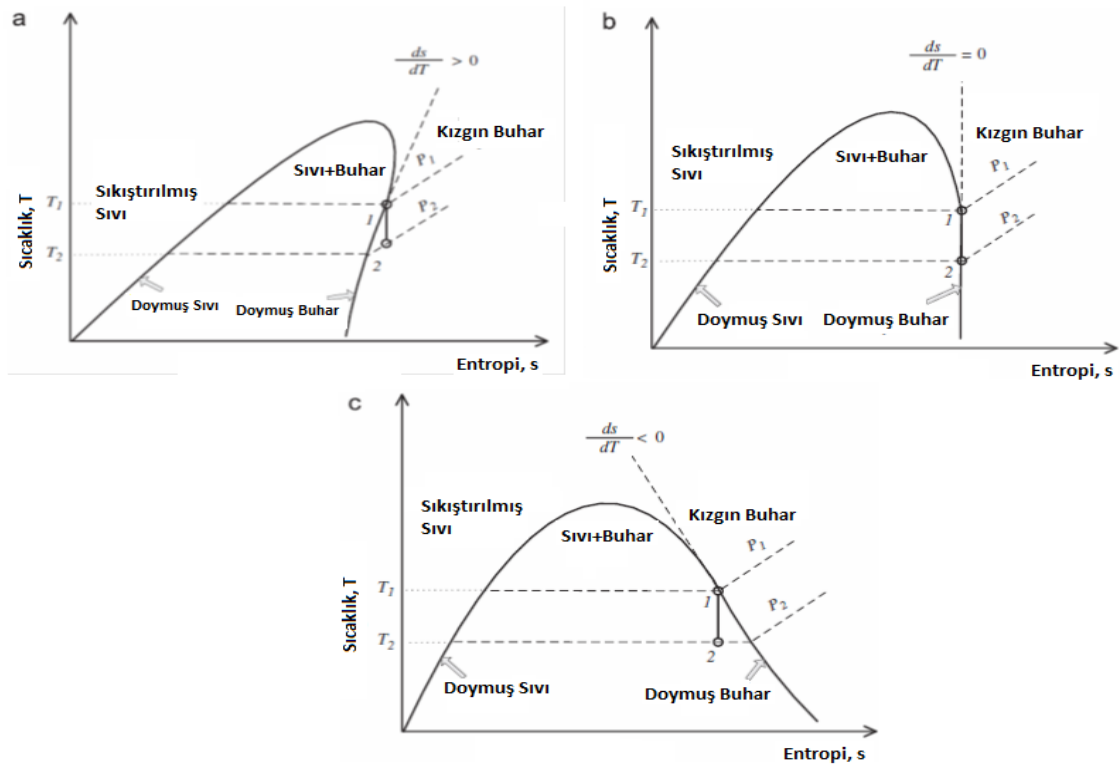
Isıdan elektrik üreten sistemi esas alan bir ORÇ teknolojisi Şekil 2.2’de görüldüğü üzere, evaporatör içerisindeki organik çalışma sıvısını (siyah çizgi) buharlaştırmak için sıcak kaynaktaki (kırmızı çizgi) ısıyı kullanır. Seçilen çalışma sıvısı silikon bazlı sıvılar olabilir veya düşük sıcaklıklar için hidrokarbon veya soğutucu bazlı sıvılar kullanılabilir. Basıncılı buhar daha sonra türbinlere yollanır ve jeneratörle birleştiğinde elektrik üretir. Buhar, kondenser içinde tekrar sıvı hale yoğunlaştırılır. Burada ya soğutma kulesi ya yeraltı suyu ya da ırmak suyu (mavi çizgi) soğutma akışkanı olarak kullanılır. Hava soğutma sistemi de alternatif olarak kullanılabilir. Sonra soğutucu pompa çalışma sıvısını tekrar buharlaştırıcıya pompalar ve bu kapalı çevrim süreci tekrar eder. Sıcak sıvı yakıt kaynağı olarak kullanıldığından yakıt maliyeti sıfırdır. Ayrıca hiçbir yanma gerçekleşmediğinden, ORÇ enerji sisteminde atmosfere hiçbir salınım oluşmaz (Ağırkaya, 2015).



Şekil 2.2. ORÇ çalışma prensibi

2.3. ORÇ’de Akışkan Seçiminin Önemi

ORÇ’de kullanılan iş akışkanlarının en temel özelliği düşük sıcaklıklarda buharlaşabilme özellikleridir. Bu sayede suyun ihtiyaç duyduğu yüksek sıcaklıklı ısı kaynaklarına ihtiyaç kalmadan elektrik üretimi mümkün olmaktadır. Akışkanlar doymuş buhar eğrisinin eğimine göre Şekil 2.3’te gösterildiği gibi kuru, izantropik ve ıslak olmak üzere üç grupta incelenir. Akışkan tipini önemli kılan en önemli etken türbinde akışkanın genişlemesinden sonra kuruluk oranının akışkanın tipine göre değişmesidir. Akışkanların T-s diyagramlarındaki doyma eğrilerinin eğimi pozitif olduğunda akışkan kuru, negatif olduğunda ıslak ve sonsuz olduğunda ise izantropik olarak isimlendirilir.



Şekil 2.3. Organik Akışkanların T-s Diyagramında Gösterimi a)Kuru, b)İzantropik, c)Islak (Bao ve Zhao, 2013)

Yapılan çalışmalarda ORÇ sistemleri için kuru ve izantropik akışkanlar daha uygun olduğu belirtilmiştir. Islak akışkanlarda türbinde genişleme sonunda akışkanın ıslak buhar fazına geçmesi söz konusudur ve bu da türbine zarar verir. Bunu önlemek için ıslak akışkanların kullanıldığı sistemlerde aşırı kızdırma işlemi uygulanmalıdır. Fakat kuru veya izantropik akışkanlarda türbinde genişleme işlemi sırasında ıslak buhar fazına geçme olayı görülmez. Kuru akışkanlarda genişleme sonrasında akışkan fazının kızgın buhar şeklinde olması yani ıslak buhar içermemesi çevrim elemanlarının en önemlilerinden biri olan ve su

damlacıklarından çok çabuk hasar görebilen türbinin zarar görmesini engeller (Günaydın, 2016).

ORÇ'de kullanılan akışkan, sistemin performansını ve güç santralinin ekonomisini belirlediği için çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu gerekçelerle farklı ısı geri kazanım uygulamalarında, iyi bir akışkana sahip olmak için literatürde birçok çalışma yapılmış olup, iyi bir akışkanda bulunması gereken özellikler aşağıda listelenmiştir.

- Eğer düşük sıcaklık da çalışan bir ORÇ sistemi gerekiyorsa düşük kaynama noktasına sahip bir akışkan tercih edilebilir. Bununla beraber düşük bir yoğunlaşma sıcaklığı gerekebilir.
- Soğutucu akışkanın donmasını önlemek için düşük donma noktası tercih edilir.
- Kondensere sıvı yürümesi olayını önlemek için nispeten özgül ısı kapasitesi daha düşük bir akışkan seçilmelidir.
- Yüksek basınç ve sıcaklıktaki ORÇ akışkanları genellikle kimyasal bozulma ve ayrışma görülür. Bu durumda çalışma sıvısını seçerken göz önüne alınması gerekir.
- Buharlaşma gizli ısı yüksek olan akışkan buharlaşma sırasında daha fazla ısıyı absorbe edebilir. Bu yüzden buharlaşma gizli ısı yüksek olan akışkanla çalışan bir sistem de atık ısıdan yararlanarak sistem verimliliği artırılabilir.
- Çalışma akışkanını seçerken ozon delme potansiyeli (Ozone Depletion Potential-ODP) ve küresel ısınma potansiyeli (Global Warming Potential-GWP) göz önüne alınarak seçilmelidir.
- Düşük toksisiteye sahip akışkan seçilmelidir
- Kolay bulunabilirlik ve düşük maliyete sahip olmalıdır.
- Güvenlik açısından sıvı, tahriş edici, yanıcı veya zehirli olmamalıdır.
- Yüksek buharlaşma ısı ve yoğunluk: gizli ısı ve yoğunluğu yüksek olan bir sıvı buharlaştırıcı içerisindeki kaynaktan daha fazla enerji emecektir. Dolayısıyla gereken akış hızı, tesis boyutu ve pompa tüketimi düşecektir (Yılmaz, 2013).
- Akışkanın tehlikelilik seviyesinin belirlenmesinde Şekil 2.4'te verilen güvenlik gruplandırmasından yararlanılır. Yanıcılık ve toksisite artışı güvenlik grubu numaraları ile belirtilmiştir.

Güvenlik Gruplandırması

Yanıcılık Artışı ↑	Yüksek Yanıcılık	A3	B3
	Düşük Yanıcılık	A2 A2L*	B2 B2L*
	Yanıcılık Yok	A1	B1
		Düşük Toksikite	Yüksek Toksikite

→ Toksikite Artışı

Şekil 2.4. Akışkanların çevresel özelliklerini belirleyen güvenlik gruplandırması

*A2L ve B2L düşük yanıcılık değeri olan ve maksimum yanma hızı 10 cm/s olan akışkanları ifade etmektedir.

3. FARKLI TÜR AKIŞKAN KULLANILARAK TASARLANAN ORÇ'NİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Bu bölümde, düşük ve yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında organik akışkan olarak farklı akışkan kullanılmasının sistem performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Termodinamik analiz EES ile yapılmıştır.

*Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

Organik akışkanlar kuru, izantropik ve ıslak olmak üzere üç farklı kategori altında sınıflandırılarak performansı karşılaştırılmıştır. Her bir akışkan türünden 6 akışkan olmak üzere toplam 18 akışkanın performansı aynı tasarım parametreleri altında belirlenmiştir. Bu akışkanlar aşağıda belirtilmiştir.

- Kuru akışkanlar: RC318, R114, R600, R600a, R601, R601a
- İzantropik akışkanlar: R141b, R123, R245fa, R142b, R124, R227ea
- Islak akışkanlar: R290, R32, R152a, R134a, R125, R1270

*Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

Organik akışkanlar alkanlar, aromatik hidrokarbonlar ve siloksanlar olmak üzere üç farklı kategori altında sınıflandırılarak performansı karşılaştırılmıştır. Alkanlar grubundan 8 akışkan, diğerlerinden 6 akışkan olmak üzere toplam 20 akışkanın performansı aynı tasarım parametreleri altında belirlenmiştir. Bu akışkanlar aşağıda belirtilmiştir.

- Alkanlar: n-hekzan, n-oktan, n-dekan, n-dodekan, n-nonan, n-heptan, izohekzan, siklohekzan
- Aromatik hidrokarbonlar: benzen, etilbenzen, toluen, m-ksilen, p-ksilen, o-ksilen
- Siloksanlar: D4, D5, MM, MDM, MD4M, HFE7500

Bu bölümde; ORÇ'nin düşük ve yüksek sıcaklıklı uygulamalarında kullanılan 6 farklı tür akışkan grubunda yer alan organik akışkanların performansının belirlenmesi amaçlanmıştır.

3.1. Kaynak Araştırması

Tezin bu bölümünde yapılan kaynak araştırmasında farklı akışkanlar kullanılarak tasarlanan ORÇ sistemleri incelenmiştir. Yazarların, akışkan performansını belirlemek için kullandıkları yöntem bilgisi verilmiş olup çalışmaları sonunda ulaştıkları sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Roy vd. (2011) R-12, R123, R134a ve R717 organik akışkanlarını kullanarak tasarlanan ORÇ sisteminin termodinamik analizini ve parametrik optimizasyonunu yapmışlardır. Optimizasyon için MATLAB yardımıyla bir bilgisayar programı geliştirilmiş, farklı ısı kaynağı sıcaklıkları altında, türbin giriş sıcaklığının artmasının net iş, sistemin ikinci yasa verimi, sistemin toplam tersinmezliği ve kütleli debi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda 277 °C sabit ısı kaynağı sıcaklığı için R123 akışkanının minimum tersinmezlikle en yüksek verime ulaştığını belirtmişlerdir.

Velez vd. (2012) ORÇ sisteminin analizi için maksimum 150 °C düşük sıcaklıkta, su, bazı hidrokarbonlar ve soğutucular gibi farklı akışkanlar üzerinde çalışmışlardır. Farklı türbin giriş sıcaklığı ve giriş basıncı altında sistem performansı değerlendirilmiştir. ORÇ'nin termodinamik analizi Aspen HYSYS yazılımı yardımıyla yapılmıştır. Çalışmalarında, basınç oranı ve türbin giriş sıcaklığının artması ile sistem veriminin arttığını belirtmişlerdir. Maksimum verim değeri olarak ise %9 değerine ulaşmışlardır.

Cataldo vd. (2014) ORÇ sisteminde uygun akışkan seçimi için genetik algoritma yöntemini kullanarak optimizasyon çalışması yapmışlardır. Organik akışkan, buharlaşma sıcaklığı ve yoğuşma sıcaklığı, performans parametreleri olarak belirlenmiştir. Sıcak su kaynağının sıcaklığı 100 °C ile 150 °C arasında değerlendirilmiştir. Suyun kütleli debisi 1 kg/s olarak sabit alınmıştır. Amaç fonksiyonu olarak tersinmezlik değeri ve net güç başına toplam ısı transfer alanını belirlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, tersinmezlik performansı olarak Novec649 akışkanını, ısı transfer alanı bakımından ise de benzen akışkanını önermişlerdir.

Kaşka (2014); çelik endüstrisinde atık ısı ile çalışan R245fa akışkanını kullanan ORÇ üzerine enerji ve ekserji analizi yapmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu basınçları ile aşırı kızdırma ve soğutma sıcaklığının sistemin enerji ve ekserji verimi üstündeki etkisini incelemiştir. ORÇ bileşenlerinin tersinmezlik sıralamasında ilk sırada evaporatörün olduğu, daha sonra türbin, kondenser ve pompa sırasıyla devam ettiğini belirtmiştir. Buharlaştırıcı basıncının hem enerji hem de ekserji verimi üzerindeki etkisinin fazla olduğunu tespit etmiştir.

Özdil vd. (2015), basit ORÇ sisteminin termodinamik analizini EES yazılımını kullanarak yapmışlardır. Çalışmalarında evaporatör girişinde suyun farklı faz durumlarında olmasının sistem verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Su karışımının kuruluk derecesinin %30, %70 ve %100 olması durumunda sırasıyla ekserji verimlerinin %41,04, %40,29 ve %39,95 olarak; tersinmezlik değerlerinin ise sırasıyla 598,39 kW, 609,5 kW ve 614,63 kW olarak tespit etmişlerdir. Suyun doymuş sıvı fazında olması durumunda ise maksimum enerji

(%9,96) ve ekserji verimine (%47,22) ulaştığını ve bu durumda oluşan tersinmezlik değerinin ise 520,01 kW olduğunu belirtmişlerdir. Evaporatör bileşeninin sistem performansının belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Zhu vd. (2015), organik akışkanların ORÇ performansındaki önemi üzerine çalışma yapmışlardır. Akışkanların buharlaşma sıcaklığının artması ile ısı verimin arttığı fakat organik akışkanın kütleli debisindeki azalıştan dolayı net güç değerinin aynı şekilde artmadığını belirtmişlerdir. Bundan dolayı ısı verimin yanında net güç değerlerinin de incelenmesi gerektiğini önermişlerdir. Çalışmaları sonunda yüksek net güç değerlerine ulaşılması için organik akışkanın kritik sıcaklığı ile ısı kaynağı sıcaklığı arasındaki farkın az olması gerektiğini tespit etmişlerdir.

Javanshir ve Sarunac (2017), basit ORÇ prensibine göre çalışan sistem için kullanılan organik akışkanların karşılaştırmasını yapmışlardır. Islak, izantropik ve kuru akışkan gruplarından olmak üzere 23 farklı akışkan ile çalışan sistemin performansı ısı verim ve net güç çıktısı bakımından analiz edilmiştir. Sistemin termodinamik modelinin oluşturulmasında Epsilon-Professional yazılımı kullanılmıştır. Yaptıkları çalışmada ile maksimum basınç arttıkça ısı verimin arttığı fakat akışkanın kritik basıncından yüksek basınçlarda ısı verimin basınçtan bağımsız olmaya başladığı belirtilmiştir. Türbin giriş sıcaklığının ısı verime etkisinde akışkan türünün önemli olduğu belirtilmiştir. Türbin giriş sıcaklığının artması ile ısı verimin T-s diyagramlarındaki eğimden dolayı ıslak akışkanlarda artarken, kuru akışkanlarda azaldığı görülmüştür. İzantropik akışkanlar için ise kısmen bağımsız olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonucunda izantropik akışkanların veriminin kuru ve ıslak akışkanlara göre daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Wang vd. (2017); hidrofloroeterleri kullanarak tasarlanan ORÇ sisteminin termodinamik analizi üzerine çalışma yapmışlardır. EES programından yararlanmışlardır. HFE7000, HFE7100 ve HFE7500 organik akışkanları, türbin giriş sıcaklığının değişmesi ile birinci-ikinci yasa verimi, net güç ve türbin boyut faktörü bakımından karşılaştırılmıştır. Yaptıkları çalışma ile en iyi termodinamik performansın HFE7000 akışkanında olduğu görülmüştür. Türbin çıkışındaki hacimsel debi değeri ve türbinde gerçekleşen entalpi farkı dikkate alınarak hesaplanan türbin boyut parametresinde en az değer HFE7000 akışkanında görüldüğü belirtilmiştir.

Li vd.(2017), çevresel özellikleri iyi durumda yeni-nesil organik bir akışkan olan R1234ze ile tasarladıkları kritik altı ORÇ ve transkritik ORÇ sisteminin performans analizini yapmışlardır. Isı kaynağında sıcak su aralığı 100-200 °C olarak belirlenmiştir. Türbin giriş sıcaklığı ve türbin giriş basıncının sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Isıyı absorbe etme

kapasitesi daha düşük olmasına rağmen transkritik ORÇ'nin verimi daha yüksek olarak belirlenmiştir. Isı kaynağı giriş sıcaklığı 100-160 °C olan sistemler için kritik altı ORÇ'nin; 160-200 °C olan sistemler için ise transkritik ORÇ'nin uygun olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca daha önceki çalışmalarda kullanılan R245fa ve R600a akışkanlarının R1234ze akışkanı ile karşılaştırması yapılmıştır. Isı kaynağı sıcaklığı 100 °C ile 167 °C için R1234ze'nin R245fa ve R600a'dan sırasıyla %31,4 ve %25,8 fazla net güç değerine sahip olduğu görülmüştür.

Özdemir ve Kılıç (2017), farklı akışkanlar kullanılmasıyla ORÇ'nin enerji ve ekserji analizi üzerine çalışma yapmışlardır. R600a, R600, R245fa, R123 ve R113 akışkanları kullanarak ORÇ'nin performansını belirlemişlerdir. Buharlaşma sıcaklığı ve ısı kaynağı sıcaklığını performans parametresi olarak almışlardır. Bazı akışkanlarda buharlaşma sıcaklığının arttıkça net güç değerinin azaldığını fakat ısıl verimin arttığını tespit etmişlerdir. Bunun nedeninin ise organik akışkanın evaporatörde absorbe ettiği ısının azalmasının net güç değerindeki azalmadan daha fazla olması ile açıklamışlardır. Isıl verim, net güç, toplam tersinmezlik ve ekserji verimi birlikte düşünüldüğünde R600a akışkanının en iyi performansı gösterdiğini belirtmişlerdir.

Giuffrida (2018), ORÇ'de 2 kW scroll kompresör kullanan sistemin performansını çevresel faktörler nedeniyle yeni-nesil organik akışkanlar kullanarak analiz etmiştir. Elde ettiği sonuçları mevcut durumda kullanılan R245fa akışkanı ile karşılaştırmıştır. İncelenen akışkanlar; R1234yf, R1234ze(E), R1234ze(Z), R1243zf, R1336mzz(Z), R1224yd(Z), R1233zd(E)'dir. Akışkan özellikleri için REFPROP yazılımından yararlanılmıştır. R245fa akışkanının GWP değerinin 858 iken seçilen tüm akışkanlarda bu değer 1'den küçük olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada ısıl verim açısından R1224yd(Z) ve R1233zd(E) akışkanlarının R245fa akışkanı olan sistemden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Yang vd. (2018), mevcut sistemlerde kullanılan R245fa akışkanının yerine çevresel özellikleri iyi olan R1233zd(E) akışkanını kullanan ORÇ sisteminin analizi üzerine iki akışkanı karşılaştırarak deneysel çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmada, R1233zd(E) akışkanına sahip sistemin ısıl veriminin %3,8 daha yüksek olduğu ve %4,5 daha fazla elektrik gücü elde edildiği tespit edilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda R1233zd(E) akışkanın R245fa akışkanına alternatif bir akışkan olduğu belirtilmiştir.

Uusitalo vd. (2018), ORÇ sisteminin termodinamik performansının belirlenmesinde organik akışkan türünün ve akışkanın termofiziksel özelliklerinin etkisini incelemişlerdir. Organik akışkanlar, hidrokarbonlar, florokarbonlar ve siloksanlar olarak gruplanmıştır. Akışkanların kritik sıcaklığı ve molar kütlelerinin sistem üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Çalışma sonunda, buharlaşma basıncının akışkanın kritik basıncının altında olduğu durumda yüksek kritik sıcaklığına sahip akışkanlarda yüksek verimin elde edilebileceği belirtilmiştir. Fakat, yüksek kritik sıcaklığında türbinde yüksek genişleme oranlarına neden olduğu görülmüştür. Florokarbonlar ve düşük kritik sıcaklığa sahip hidrokarbonların düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamalarında; siloksanlar ve yüksek kritik sıcaklığa sahip hidrokarbonların ise yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamalarında uygun olduğu tespit edilmiştir.

Kaynak araştırması kapsamında Türkiye’de bu alanda yapılan doktora tezleri incelenmiştir. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Ergün (2014), yaptığı doktora çalışmasında Çanakkale Ayvacık ilçesi Tuzla köyü mevkiinde bulunan jeotermal kaynaklı bir ORÇ santralinin termodinamik analizlerini yapmıştır. Yapılan enerji analizi sonucunda, sistemdeki en yüksek kayıp değeri 24410 kW ile kondenserde tespit edilmiştir. Sistemin ekserji analizi sonuçlarına göre ise en yüksek ekserji kaybı, 3930 kW ile buharlaştırıcıda tespit edilmiştir. Sistemin ısı ve ekserji verimi 25°C referans sıcaklıkta sırasıyla %12 ve %49 olarak hesaplanmıştır.

Eyidoğan (2014), yaptığı doktora çalışmasında biyokütleden elde edilen kızgın yağ ile elektrik ve ısı (sıcak su) üreten bir ORÇ ünitesinin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Çalışmaya temel teşkil eden veriler entegre ağaç sektöründe üretim yapan bir sanayi kuruluşundaki ORÇ ünitesinden alınmıştır. ORÇ ünitesinin başlıca ekipmanlarından olan evaporatör, kondenser, türbin ve rejeneratörün enerji ve ekserji analizleri altı farklı çalışma koşulu (tam yük ve kısmi yük) için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada hem tam yük hem de kısmi yüklerde evaporatör ve kondenser basıncının sistemin ısı ve ekserji verimine etkisi incelenmiştir.

Türkiye’de bu alanda yapılan yüksek lisans tezleri de incelenmiştir. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Özdemir (2012), parabolik kolektörlü ORÇ’nin Isparta şartlarında ekserji ve enerji analizleri üzerine çalışma yapmıştır. Çalışma ayı olarak temmuz ayının son 20 günü seçilmiştir. 6 metre uzunluğunda 1,72 m uzunluğundaki parabolik kolektörün yoğunluğu 54,77 bulunup, bu değere bağlı olarak parabolik kolektörün ekserji verimi yaklaşık olarak %23 olarak hesaplanmıştır. Soğutucu akışkan olarak R134a akışkanı seçilmiştir. Pompa giriş basıncı 1000 kPa çıkış basıncı 30 kPa iken kazan sıcaklığı 100 °C de sistemin ısı verimi %11,2 olarak hesaplanmıştır. Aynı şartlar altında sistemin toplam ekserji verimi %52 ve toplam tersinmezlik 1664 kW olarak hesaplanmıştır.

Yılmaz (2013), Isparta ili şartlarında güneş çanaklı ORÇ üzerinde deneysel çalışma yapmıştır. R134a akışkanı 120 °C kazan sıcaklığına ulaştığında elde edilen verim R410a

akışkanı için 70 °C’de elde edilen ısı veriminden daha büyük olarak hesaplanmıştır. R410a akışkanında daha düşük sıcaklıkta daha yüksek verim elde edilmiştir. R134a akışkanının kritik sıcaklığına yaklaşıldıkça verimin %12’ye doğru yükseldiği görülmüştür.

Yağlı (2014), bir tav fırınının bacasından atmosfere atılan egzoz gazı atık ısı verileri incelendikten sonra ORÇ tasarımı yapmıştır. ORÇ’nin tasarımında analitik tasarım ve simülasyon yöntemleri tolüen akışkanı kullanılarak yapılmış ve ardından çevrimin iyileştirilmesi için farklı akışkanlar incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, aynı şartlarda sikloheksan akışkanının tolüenden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Tasarımların tamamı için enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Sistemin analitik tasarımında ve hesaplamalarda Excel ve EES programları kullanılmıştır.

Ağırkaya (2015), jeotermal enerji kaynağı ile elektrik üreten ORÇ’nin analizi üzerinde çalışma yapmıştır. Isı kaynağının kütle akış hızı 0,675 kg/s ve sıcaklığı 140 °C olarak belirlenmiştir. Çevrimi oluşturan bileşenler, çalışma koşulları ve termodinamik özellikler dikkate alınarak bu çalışmada, R245fa çevrim akışkanı olarak kullanılmıştır. Sistemin tüm bileşenleri ayrı ayrı modellenmiş, kütle ve enerji dengeleri kurularak çevrim tamamlanmıştır. Program tarafından hesaplanan veriler ile toplam türbin gücü 250 kW olan analiz için gerekli demo bir model oluşturulmuştur.

Pelit (2015), termodinamik analiz için gerekli verileri ağaç sanayinde entegre üretimi yapan işletmenin ORÇ sisteminden alarak çalışma yapmıştır. ORÇ’nin ihtiyacı olan biyokütle kaynaklı termal ısı, kazanlarda biyokütlenin yakılması ile elde edilen kızgın yağdan sağlanmaktadır. Termodinamik analizde en yüksek enerji ve ekserji değerinin buharlaştırıcıya, en düşük enerji ve ekserji değerinin ise pompaya ait olduğu görülmüştür. 891,76 kW net elektrik üretimine göre sistem geri ödeme süresi 3,24 yıl olarak hesaplanmıştır. ORÇ’de birim ekserji maliyeti en yüksek ekipmanın kondenser olduğu tespit edilmiştir.

Karaman (2016), yaptığı çalışmada parabolik güneş kolektörü vasıtasıyla toplanan ısı, uygun bir çalışma sıvısına aktarılıp ısı eşanjörü vasıtasıyla ORÇ’nin ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. ORÇ’de üretilen güç ideal buhar sıkıştırımlı soğutma sistemindeki kompresöre aktarılarak soğutma elde edilmiştir. EES programı ile teorik olarak termodinamik analizleri yapılmış ve bu sistemin birinci ve ikinci kanun analizleri incelenmiştir.

Günaydın (2016), türbindeki net güç çıkışı 1,5 kW olan bir ORÇ sistemini farklı kaynak sıcaklıkları için tasarlamıştır. Sistemin enerji ve ekserji analizi, farklı organik akışkanlar ve farklı türbin izantropik verimleri parametreleri bakımından değerlendirilmiştir. En yüksek verim, R365mfc; en düşük verim R236ea akışkanında bulunmuştur.

Kaynak araştırmasında son olarak tez çalışmasının bu bölümünden türetilen yayınlar kısaca özetlenmiştir.

Kahraman vd. (2018a) ve Kahraman vd. (2018b), yaptıkları çalışmada türbin giriş sıcaklığı ve ısı kaynağı sıcaklığının farklı kuru akışkanlar kullanılarak tasarlanan ORÇ sistemine etkisini belirlemişlerdir. R601a'lı ORÇ sisteminin türbin işi performansı yüksek olmasına rağmen sistemin yüksek ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısıl verim performansının azaldığını belirtmişlerdir.

Kahraman vd. (2018c) ve Ata vd. (2019), yaptıkları çalışmada R601 akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ sistemi üzerinde buharlaşma basıncı ve aşırı kızdırma sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Buharlaşma basıncının artmasının ısıl verimi arttırdığını belirtmişlerdir. R601'lü sisteme aşırı kızdırma sıcaklığının uygulanması ile ısıl verimin azaldığını tespit etmişlerdir.

Kahraman vd. (2018d), R601 akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ sisteminin bileşenlerinde meydana gelen tersinmezlik değerleri üzerine çalışma yapmışlardır. Buharlaşma basıncının 250 kPa'dan 400 kPa'a artması sonucu yüksek basınç oranından dolayı türbin tersinmezliğinin %32 arttığını belirtilmiştir. 250 kPa ve 20 °C aşırı kızdırma sıcaklığı altında toplam tersinmezliğin %79,6'sının evaporatörde, %10,9'unun ise kondenserde, %9,4'ünün ise türbinde meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Kahraman vd. (2018e), R134a ve R152a akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ'nin enerji analizi üzerine çalışma yapmışlardır. R134a akışkanı ile GWP değeri R134a'dan çok daha düşük değere sahip R152a akışkanının performansı karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda R152a kullanılarak tasarlanan sistemin R134a'ya göre daha fazla ısı girdisine ihtiyacı olduğu belirlenmiştir. Fakat elde edilen türbin işi ve ısıl verim açısından R152a'nın daha iyi bir performans sergilediğini tespit etmişlerdir. Çalışmada maksimum ısıl verim, R134a ve R152a'lı sistemler için sırasıyla %8,123 ve %9,351 olarak bulunmuştur.

Şahin vd. (2018), ORÇ'de farklı akışkanlarda türbin giriş sıcaklığı ve basıncının sistem bileşenlerindeki tersinmezlik değerlerine etkisinin belirlenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmada akışkan seçiminin ORÇ'nin performansındaki rolü ekserji analizi yapılarak belirlenmiştir. Tasarımda R600a, R290 ve R152a organik akışkanları kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, en yüksek ısıl verime (%7,78) ve ekserji verimine (%41,05) R290 akışkanında ulaştığı görülmüştür. R290 akışkanında oluşan tersinmezliğin %60'ının evaporatörde meydana geldiği, %30'unun da kondenserde meydana geldiği belirlenmiştir.

Kahraman vd. (2019a), ORÇ'de saf akışkanlar ile zeotropik akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması üzerine çalışma yapmışlardır. Mevcut

durumda kullanılan R32, R125 ve R134a akışkanları ile aynı akışkanların belli oranlarda karışımları sonucunda oluşan zeotropik akışkanların performans analizi yapılmıştır. Belirlenen zeotropik akışkanlar; R404A [R125(%44)/R143a(%4)/R134a(%52)], R407C [R32(%23)/R125(%25)/R134a(%52)], R410A [R32(%50)/R125(%50)] ve R507A [R125(%50)/R143a(%50)]'dir. Çalışma kapsamında elde edilen maksimum ısıl verimi değerlendirildiğinde jeotermal uygulamalar için en iyi performans R134a akışkanında görülmüştür. R134a akışkanı maksimum %9,142 ısıl verime ulaşmıştır. R134a akışkanını içeren R404A ve R407C akışkanlarında maksimum ısıl verim sırasıyla %5,4 ve %6,8 olarak tespit edilmiştir. R32 ve R125 akışkanları kullanarak tasarlanan ORÇ sistemlerinde ise sırasıyla %6,682 ve %4,698 ısıl verimlerine ulaşmıştır. İki akışkanın %50 karışımıyla elde edilen R410A zeotropik akışkanında ise %5,5 değerinde ısıl verim elde edilmiştir.

Kahraman vd. (2019b), saf akışkan ve zeotropik akışkan kullanılarak tasarlanan ORÇ'nin ekserji analizi üzerine çalışma yapmışlardır. Kahraman vd. (2019a) çalışmasında belirtilen akışkanlar kullanılmıştır. Maksimum ekserji verimine ulaşılan durumlar değerlendirildiğinde en iyi performans gösteren akışkanlar, R134a, R407C ve R32 olarak sıralanmaktadır. Çalışma sonunda en fazla evaporatör tersinmezliği R32 akışkanında (18,79 kJ/kg) görülmüştür. Minimum evaporatör tersinmezliği ise R125 ve R143a akışkanlarının %50 karışımıyla hazırlanan R507A akışkanında (10,6 kJ/kg) görülmüştür.

Kahraman vd. (2019c), ORÇ'de kullanılan mevcut akışkanlar (R601, R245fa, R152a ve R134a) ile yeni-nesil organik akışkan olarak adlandırılan R1234ze ve R1234yf'nin performanslarının karşılaştırılması üzerine çalışma yapmışlardır. ORÇ'nin jeotermal uygulamalarında kullanılacak ideal akışkanın belirlenmesi amaçlandığından kaynak sıcaklığı 100 oC olarak kabul edilmiştir. Çalışma sonunda R601 akışkanının %11,34 ısıl verimi ile R1234yf'den %37 daha fazla ve R1234ze'den ise %16 daha fazla bir performans ortaya koyduğu tespit edilmiştir. Fakat, sistem bileşenlerinde meydana gelen toplam tersinmezlik değerleri incelendiğinde en iyi performansın R1234yf ve R1234ze akışkanlarında görüldüğü belirlenmiştir. Akışkanların maksimum verime ulaşıldığı durumlar değerlendirildiğinde R601 akışkanı 41,44 kJ/kg toplam tersinmezlik değerine sahip iken, R1234yf ve R1234ze akışkanları için bu değer sırasıyla 17,97 kJ/kg ve 18,79 kJ/kg olduğu belirtilmiştir.

Kahraman vd. (2019d), alüminyum üretim tesislerinden atık ısı geri kazanımı için ORÇ'de farklı yapıdaki organik akışkanların performanslarının karşılaştırılması üzerine çalışma yapmışlardır. ORÇ'nin yüksek sıcaklıktaki uygulamaları kapsamında kullanılan farklı yapıdaki 20 organik akışkanın termodinamik performansı tespit edilmiştir. Alkanlar

grubundan n-hekzan, n-oktan, n-dekan, n-dodekan, n-nonan, n-heptan, izohekzan, siklohekzan; aromatik hidrokarbonlar grubundan benzen, etilbenzen, toluen, m-ksilen, p-ksilen, o-ksilen seçilmiştir. Siloksanlar grubundan ise D4, D5, MM, MDM, MD4M ve HFE7500 akışkanları seçilmiştir. EES (Engineering Equation Solver) yazılımı ile türbin giriş sıcaklığının 160 °C ile 200 °C arasında değişen farklı modeller oluşturulmuştur. ORÇ'nin atık ısı uygulamaları kapsamında kaynak sıcaklığı 240 °C olarak belirlenmiştir. Çalışma sonunda en yüksek ısıl verimin aromatik hidrokarbon grubunda yer alan akışkanlarda elde edildiğini belirtmişlerdir. Maksimum ısıl verim %19,56 ile 200 °C türbin giriş sıcaklığında benzen akışkanının kullanılmasıyla elde edilmiştir.

Kahraman vd. (2019e), alüminyum üretim tesislerinden atık ısı geri kazanımı için ORÇ'de farklı yapıdaki organik akışkanların ekserji performansı üzerine çalışma yapmışlardır. Kahraman vd. (2019d) çalışmasında belirtilen akışkanlar kullanılmıştır. Performans parametreleri, geri kazanılan ekserji, toplam tersinmezlik ve sistemin ekserji verimi olarak belirlenmiştir. Çalışma sonunda aromatik hidrokarbon grubunda yer alan benzen'li ORÇ sisteminin %47,12 ile en yüksek ekserji verimine ulaştığı görülmüştür. Esasen Aromatik hidrokarbon grubunda geri kazanılan ekserji değerlerinde o-ksilen iyi bir performans göstermesine rağmen yüksek tersinmezlik değeri içermesi sebebiyle ekserji verimi benzen ve toluen'den düşük çıktığını belirtmişlerdir.

Bu bölüm için kaynak araştırması incelendiğinde farklı akışkanlar kullanılarak tasarlanan ORÇ sistemi için performans karşılaştırılmasının yapıldığı görülmektedir. Çalışmalarda kullanılan organik akışkanların genellikle bir kritere veya sınıflandırmaya bağlı olmadan belirlendiği görülmüştür. Özellikle yeni-nesil organik akışkanların sürekli R245fa ile karşılaştırıldığı görülmüştür. Bu doktora tez çalışmasında ise ORÇ sisteminin düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık olmak üzere iki farklı uygulama alanı için ayrı bir model oluşturulmuştur. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamalarında kullanılan organik akışkanlar, kuru, izantropik ve ıslak; yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamalarında kullanılan organik akışkanlar ise, alkanlar, aromatik hidrokarbonlar ve siloksanlar olmak üzere farklı kategorilerde incelenmiştir. Toplam 40 organik akışkan çevresel özelliklerinin yanı sıra 4 farklı performans parametresi altında değerlendirilmiştir. Tüm akışkan türü sınıflandırmalarında en iyi performans gösteren 2 akışkan belirlenmiş ve çalışmanın devamında o akışkanlar kullanılmıştır. Ayrıca, düşük kritik sıcaklığa sahip yeni-nesil organik akışkanların düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamalarında en iyi performans gösteren akışkanlar ile performansı karşılaştırılmıştır. Bu sayede yeni-nesil organik akışkanların hangi akışkan türüne yakın özellikler gösterdiği belirlenmiştir.

3.2. Materyal ve Yöntem

Farklı tür organik akışkan kullanılarak tasarlanan ORÇ sisteminin termodinamik analizi EES yazılımı ile yapılmıştır. Termodinamik analizin yapılabilmesi için gereken denklemler EES'ye tanıtılarak tasarım modeli oluşturulmuştur. Tasarım modeli için kabul edilen sınır değerlerinin belirlenmesiyle farklı tür organik akışkanların sistem performansı üzerindeki etkisi tespit edilmiştir. ORÇ'nin termodinamik analizi için gerekli bağıntılar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Aşağıdaki çizelgede verilen denklemlerde; η_t ve η_p sırasıyla türbin ve pompanın izantropik verimleri, $T_{h,i}$ ve $T_{h,o}$ sırasıyla ısı kaynağı giriş-çıkışı; $T_{c,i}$ ve $T_{c,o}$ ise sırasıyla soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıklarıdır. Çizelge 3.1'de verilen T_h ve T_c ise denklem 3.1 ve 3.2'de tanımlanmıştır.

$$T_h = (T_{h,i} - T_{h,o}) / \ln(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (3.1)$$

$$T_c = (T_{c,i} - T_{c,o}) / \ln(T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (3.2)$$

ORÇ'nin düşük ve yüksek sıcaklıklı uygulamaları kapsamında ısı kaynağı sıcaklıkları sırasıyla 110 °C ve 240 °C olarak sabit kabul edilmiştir. Soğutma suyu sıcaklığı ise 25 °C, türbin ve pompa izantropik verimleri de %75 olarak ele alınmıştır. Ölü nokta basıncı ve sıcaklığı sırasıyla 100 kPa ve 25 °C olarak kabul edilmiştir. Bu bölümde yapılan diğer kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- Bütün prosesler kararlı şartlardadır.
- Evaporatör ve kondenserdeki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Boru hatlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir.
- Analizde tüm ekipmanlar adyabatik olarak kabul edilmiş ve yüzeyleri ile çevre arasında bir ısı transferinin olmadığı varsayılmıştır.
- Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

Çizelge 3.1. ORÇ Termodinamik Analiz Bağıntıları

ORÇ Termodinamik Analiz		
Bileşenler	Enerji Analizi	Ekserji Analizi
Pompa	Pompa İşi (kJ/kg) $w_p = (h_2 - h_1) = (h_{2s} - h_1) / \eta_p$	Pompa Tersinmezliği (kJ/kg) $i_p = T_0(s_2 - s_1)$
Evaporatör	Evaporatör ısı girdisi (kJ/kg) $q_e = (h_3 - h_2)$	Evaporatör Tersinmezliği (kJ/kg) $i_e = T_0[(s_3 - s_2) - (h_3 - h_2) / T_h]$
Türbin	Türbin İşi (kJ/kg) $w_t = (h_3 - h_4) = (h_3 - h_{4s}) \eta_t$	Türbin Tersinmezliği (kJ/kg) $i_t = T_0(s_4 - s_3)$
Kondenser	Kondenserde Atılan Isı Miktarı (kJ/kg)	Kondenser Tersinmezliği (kJ/kg)

	$q_c = (h_4 - h_1)$	$i_k = T_0[(s_1 - s_4) + (h_4 - h_1)/T_c]$
Sistem	Net İş (kJ/kg) $w_{net} = q_e - q_c$	Toplam Tersinmezlik (kJ/kg) $i_{T_{optlam}} = i_p + i_e + i_t + i_c$
	Isıl Verim $\eta_{Isıl} = w_{net}/q_e$	Harcanan Ekserji (kJ/kg) $e_{harcanan} = [1 - T_0/T_H]q_e + w_p$
		Ekserji Verimi $\eta_{II} = 1 - i_{T_{optlam}}/e_{harcanan}$

EES yazılımının kullanılma sebebi, veri tabanında birçok organik akışkanın termodinamik özelliklerini içermesidir. Termodinamik analizin yapılabilmesi için gereken denklemlerin sisteme işlenmesiyle aynı anda birçok parametrenin değişimine karşılık istenen sonuçlar alınabilmektedir. Farklı akışkan kullanılmasının sistem performansı üzerindeki etkisi kolay bir şekilde görülmektedir. Tersinmezlik bağıntılarının sisteme işlenmesiyle belli bir sıcaklık veya basınç aralığında tersinmezlik değeri negatif değere ulaşan bir bileşenin tespit edilmesinde de EES yazılımının hem denklem çözücü özelliğinden hem de termodinamik verilere sahip olmasından yararlanır. Bu sayede hazırlanan modelin termodinamiğin ikinci yasasına uygunluğu kontrol edilir.

Analizi yapılacak sistem için ilk olarak gerekli tüm denklemler programa tanıtılır. Sabit ve değişken parametreler belirlenir. ORÇ tasarımının sınır şartlarının belirlenmesinin ardından analiz sonuçları alınabilir. Normalde denklem çözücü program olarak bilinmesine rağmen içerisindeki kütüphanede akışkanların termodinamik özellikleri bulunduğu için daha çok termodinamik analiz sistemleri için kullanılır. Programa tanıtılan performans parametrelerinin aynı anda veya tek başına değişmesinin sistem verimi üzerindeki etkisi kolay bir şekilde görülebilmektedir.

ORÇ teknolojisinde farklı organik akışkanların sistem performansı üzerindeki etkisi çok önemli olduğundan EES programı içerisindeki akışkan veri tabanı ile farklı akışkanların birbiri ile kıyaslanması yapılabilmektedir.

Her bir akışkan grubu için akışkanların kaynama noktası sıcaklığı ve kritik sıcaklığı gibi termodinamik özellikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için tüm akışkanların 30 °C'ye karşılık gelen yoğuşma basıncı ile 100 °C'ye karşılık gelen buharlaşma basınçları karşılaştırılmıştır. Aynı şekilde yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için ise 40 °C'ye karşılık gelen yoğuşma basıncı ile 200 °C'ye karşılık gelen buharlaşma basınçları karşılaştırılmıştır.

Organik akışkanların performans analizinde ise düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için buharlaşma sıcaklığının 65 °C ile 100 °C; yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için ise 160 °C ile 200 °C arasında değişmesinin sistem üzerindeki etkisi tespit edilmiştir. Performans

parametreleri; ısı verim, türbin işi, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik olarak belirlenmiştir.

3.3. Model Doğrulanması

EES ile oluşturulan termodinamik modelin doğruluğunu tespit etmek için kaynak araştırması kapsamında belirlenen bir çalışmadan yararlanılmıştır. Çizelge 3.2’de aynı tasarım parametreleri altında üç farklı organik akışkan kullanılarak belirlenen ısı verim ve ekserji verim değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 3.2 incelendiğinde EES ile hazırlanan termodinamik modelin başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmektedir.

Çizelge 3.2. EES ile hazırlanan modelin aynı tasarım parametreleri kullanılarak başka bir çalışma ile karşılaştırılması

Tasarım Parametreleri	Buharlaştırma Sıcaklığı: 75 °C; Yoğuşma Sıcaklığı: 35 °C; Türbin ve pompa izantropik verimi: %70 ve %80					
Organik Akışkanlar	R600		R141b		R134a	
Performans Parametreleri	Mevcut Çalışma	Tchance (2010)	Mevcut Çalışma	Tchance (2010)	Mevcut Çalışma	Tchance (2010)
Isıl Verim (%)	4,18	4,236	4,54	4,526	3,712	3,703
Ekserji Verimi (%)	24,1	24,81	26,7	26,51	21,78	21,69

3.4. Araştırma Bulguları ve Tartışma

3.4.1. Düşük Sıcaklıklı ORÇ Uygulamaları İçin Yapılan Termodinamik Analiz Sonuçları

- Kuru Akışkanlar Kullanılarak Tasarlanan ORÇ’nin Termodinamik Analizi

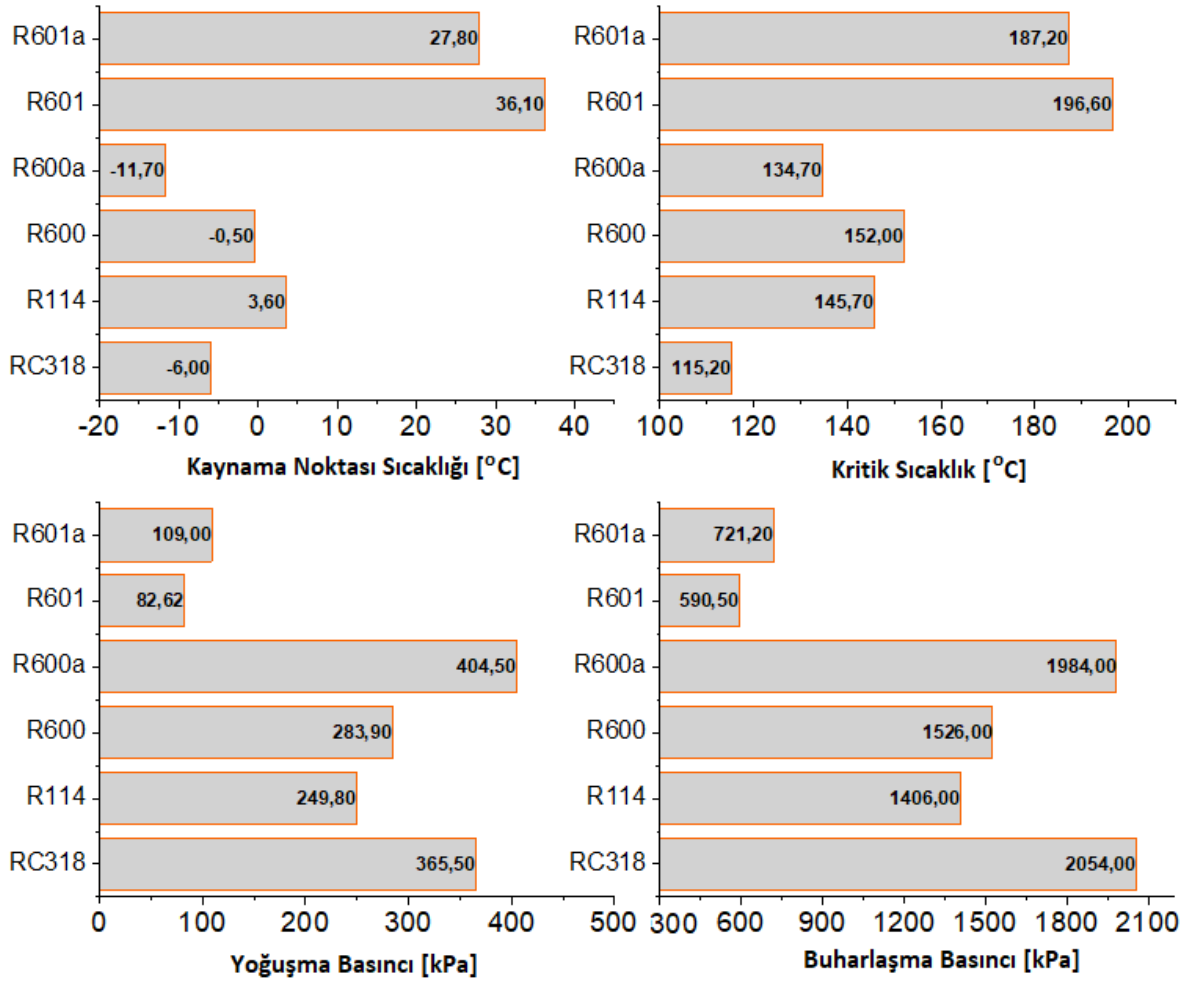
ORÇ tasarımında kullanılan kuru akışkanlar; RC318, R114, R600, R600a, R601, R601a’dır. İlk olarak akışkanların çevresel özellikleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 3.3’te RC318 ve R114’in GWP değerinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Diğer akışkanların ise düşük GWP değerine rağmen yanıcılık değerlerinin yüksek olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. Kuru akışkanların çevresel özellikleri

Akışkanlar/ Özellikler	RC318	R114	R600	R600a	R601	R601a
ASHRAE standartları güvenlik sınıfı	A1	A1	A3	A3	A3	A3

ODP	0	1.0	0	0	0	0
GWP	10250	10040	20	20	20	20

Şekil 3.1’de kuru akışkanların termofiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Aynı akışkan grubunda yer almalarına rağmen, R601 ile R601a’nın diğer akışkanlara göre daha yüksek kaynama noktası ve kritik sıcaklığa sahip olduğu görülmektedir. En düşük kaynama noktası sıcaklığı ise R600a’da, en düşük kritik sıcaklık ise RC318’de görülmüştür. Tüm akışkanların 30 °C’ye karşılık gelen yoğuşma basınçları ile 100 °C’deki buharlaşma basınçları incelendiğinde R601’in düşük basınç değerlerine sahip olduğu dikkat çekmektedir.

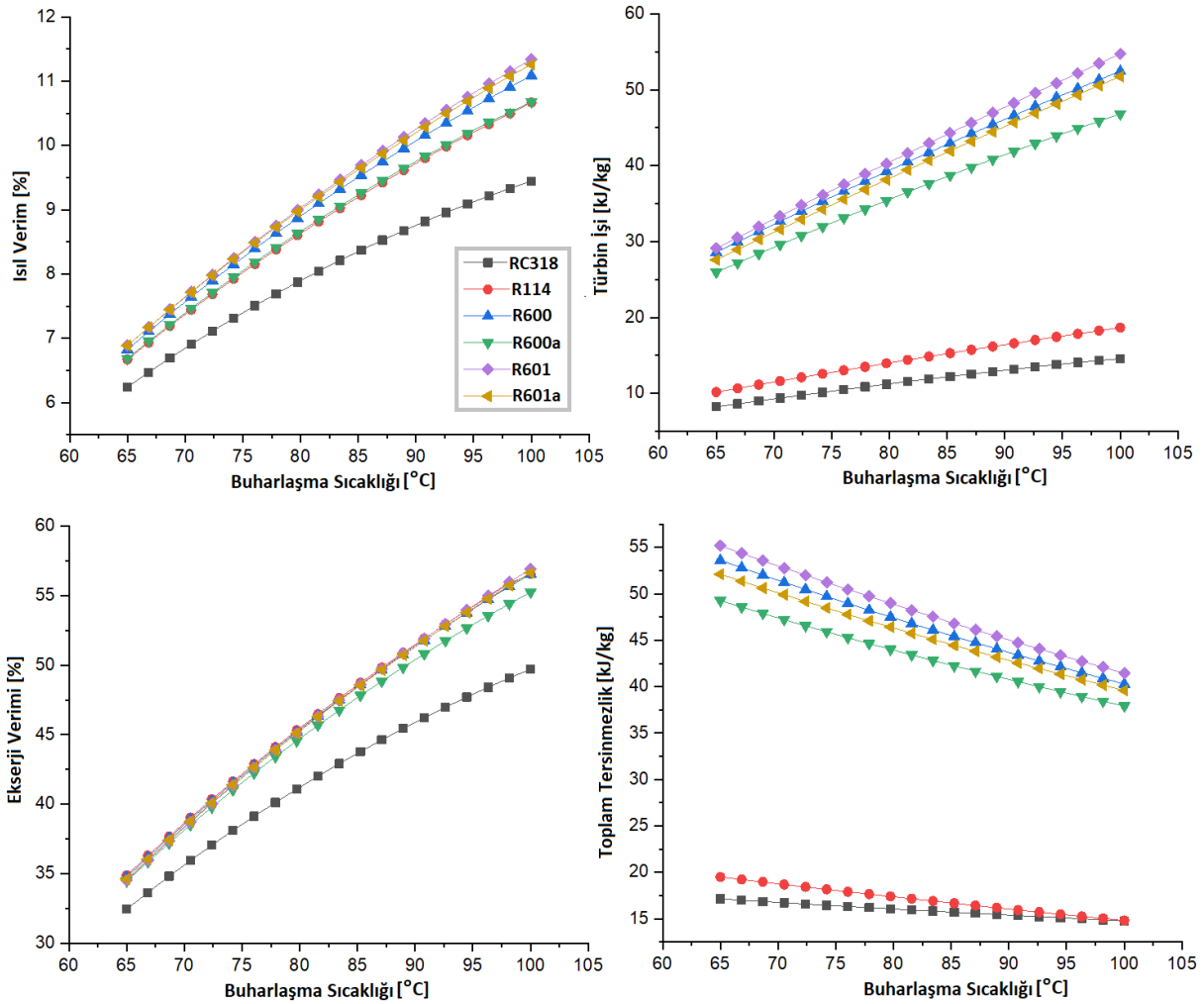


Şekil 3.1. Kuru akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.2’de kuru akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.2 incelendiğinde;

- RC318’in diğer akışkanlara göre daha düşük ısı verim ve ekserji verimine sahip olduğu,

- RC318 ve R114'in kullanılmasıyla daha düşük bir türbin işi değeri elde edildiği,
- Buna karşın en düşük toplam tersinmezlik değerin ise RC318'de elde edildiği görülmektedir.
- R114'te düşük türbin işi elde edilmesine rağmen ısı verim açısından ortalama bir değerde performans görülmüştür. Bunun nedeni sisteme sağlanması gereken ısı miktarının diğer akışkanlara göre daha düşük olmasıdır.



Şekil 3.2. Kuru akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi

Kuru akışkanların 100 °C buharlaşma sıcaklığı altında ulaştıkları analiz sonuçları dikkate alınarak en iyi performans gösteren 2 akışkanın R601 ve R601a olduğu görülmektedir.

- İzantropik Akışkanlar Kullanılarak Tasarlanan ORÇ'nin Termodinamik Analizi

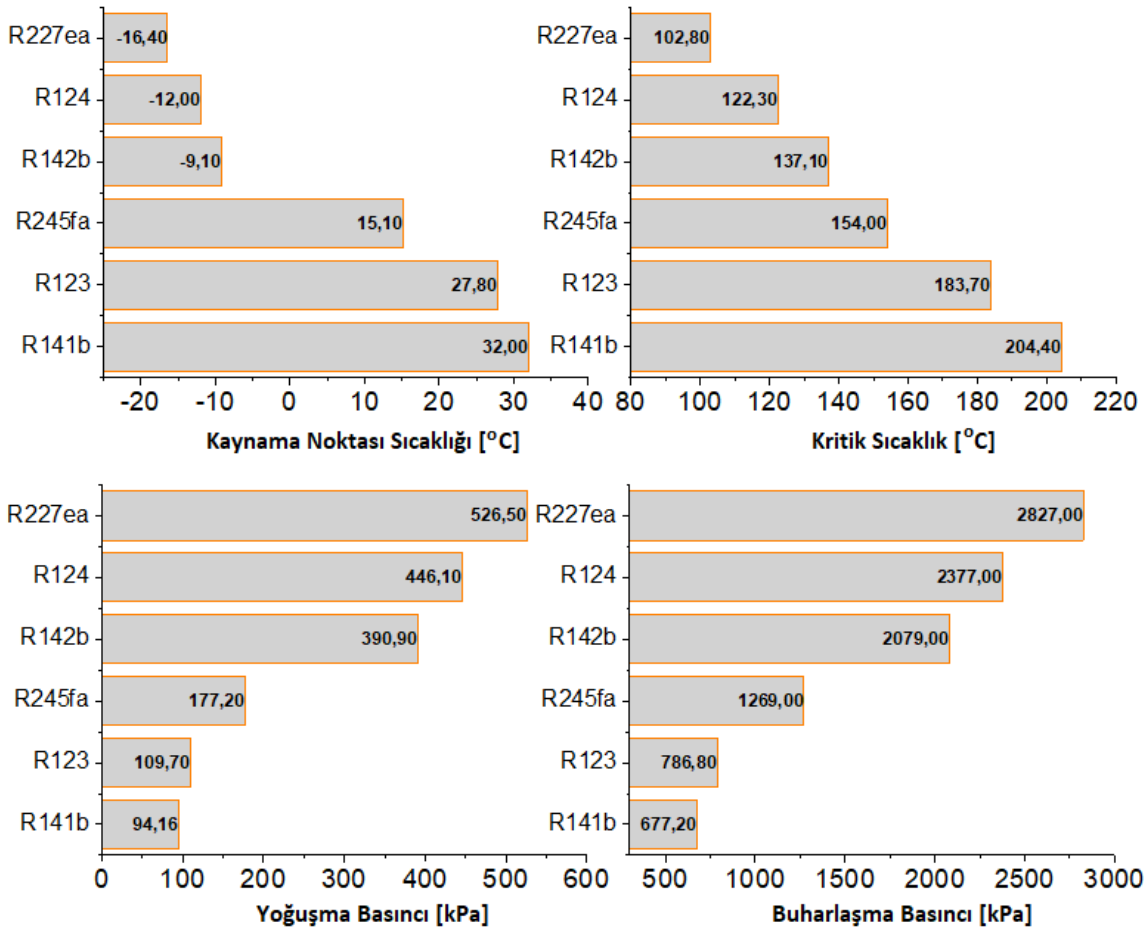
ORÇ tasarımında kullanılan izantropik akışkanlar; R141b, R123, R245fa, R142b, R124, R227ea'dır. İlk olarak akışkanların çevresel özellikleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 3.4'te

diğer akışkanlara kıyasla R123'ün GWP değerinin çok düşük olduğu görülmektedir. Fakat R123'ün R245fa ile birlikte toksisite değerinin yüksek olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 3.4. İzantropik akışkanların çevresel özellikleri

Akışkanlar/ Özellikler	R141b	R123	R245fa	R142b	R124	R227ea
ASHRAE standartları güvenlik sınıfı	n.a	B1	B1	A2	A1	A1
ODP	0,12	0	0	0,070	0,020	0
GWP	725	77	1030	2310	609	3220

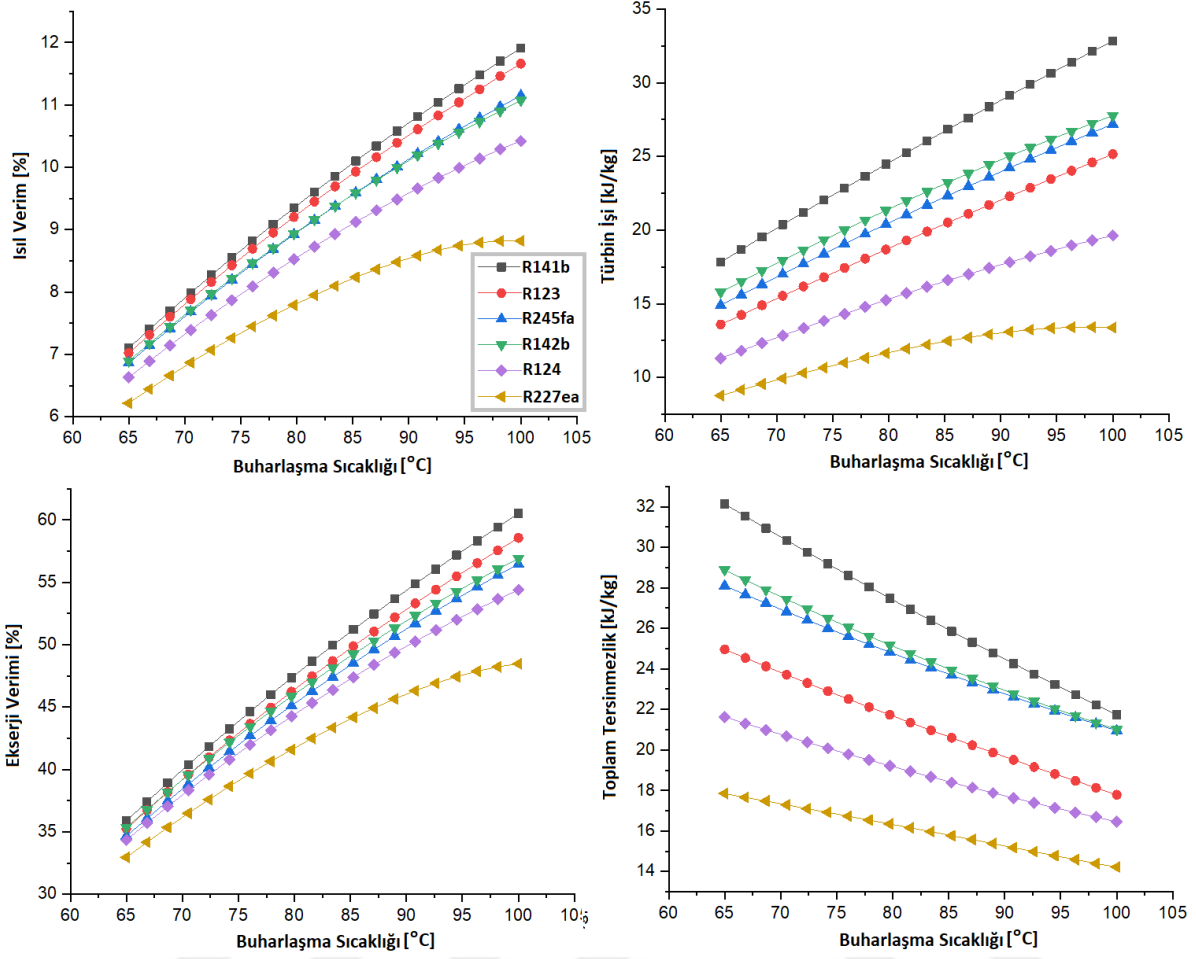
Şekil 3.3'te izantropik akışkanların termofiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Aynı akışkan grubunda yer almalarına rağmen, kaynama noktası sıcaklıkları farklılık göstermiştir. R227ea akışkanı -16,4 °C kaynama noktası sıcaklığına sahip iken R141b'nin kaynama noktası sıcaklığı ise 32 °C olarak belirtilmiştir. Özellikle R141b ve R123'ün yüksek kritik sıcaklığına sahip olduğu görülmektedir. Tüm akışkanların 30 °C'ye karşılık gelen yoğunlaşma basınçları ile 100 °C'deki buharlaşma basınçları incelendiğinde R141b ve R123'ün düşük basınç değerlerine sahip olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 3.3. İzantropik akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.4'te izantropik akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.4 incelendiğinde;

- R227ea'nın diğer akışkanlara kıyasla daha düşük ısı verim ve ekserji verimine sahip olduğu,
- R227ea hariç tüm akışkanların buharlaşma sıcaklığı değişimi ile ısı verim ve ekserji veriminin arttığı, R227ea'da ise belli bir buharlaşma sıcaklığı değerinden sonra ısı verim ve ekserji verimindeki artışın durduğu,
- R142b'li sistemin türbin işi yönünden iyi performans göstermesine rağmen yüksek ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısı veriminin yüksek olmadığı,
- Isı verim ve ekserji verimi yönünden düşük performans gösteren R227ea'nın toplam tersinmezlik değerinin ise en az olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. İzantropik akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi

İzantropik akışkanların 100 °C buharlaşma sıcaklığı altında ulaştıkları analiz sonuçları dikkate alınarak en iyi performans gösteren 2 akışkanın R141b ve R123 olduğu görülmektedir.

- Islak Akışkanlar Kullanılarak Tasarlanan ORÇ'nin Termodinamik Analizi

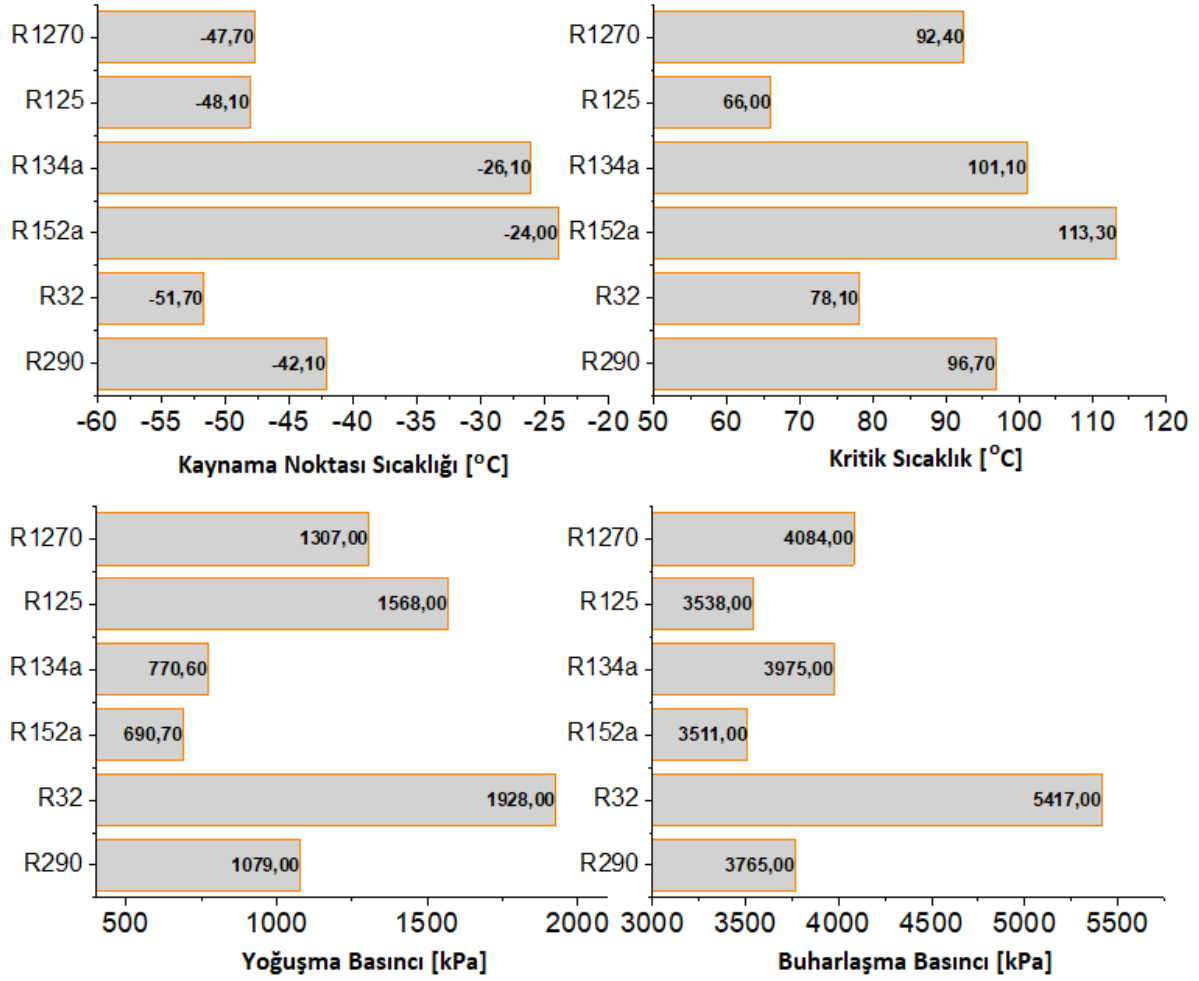
ORÇ tasarımında kullanılan ıslak akışkanlar; R290, R32, R152a, R134a, R125, R1270'tir. İlk olarak akışkanların çevresel özellikleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 3.5'te diğer akışkanlara kıyasla R125 ve R134a'nın GWP değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Islak akışkanların yanıcılık seviye değerlerinin de birbirinden farklı olduğu belirtilmiştir. R290 ve R1270'in düşük GWP değerine sahip olmalarına rağmen yanıcılık değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.5. Islak akışkanların çevresel özellikleri

Akışkanlar/ Özellikler	R290	R32	R152a	R134a	R125	R1270

ASHRAE standartları güvenlik sınıfı	A3	A2	A2	A1	A1	A3
ODP	0	0	0	0	0	0
GWP	20	675	124	1430	3500	20

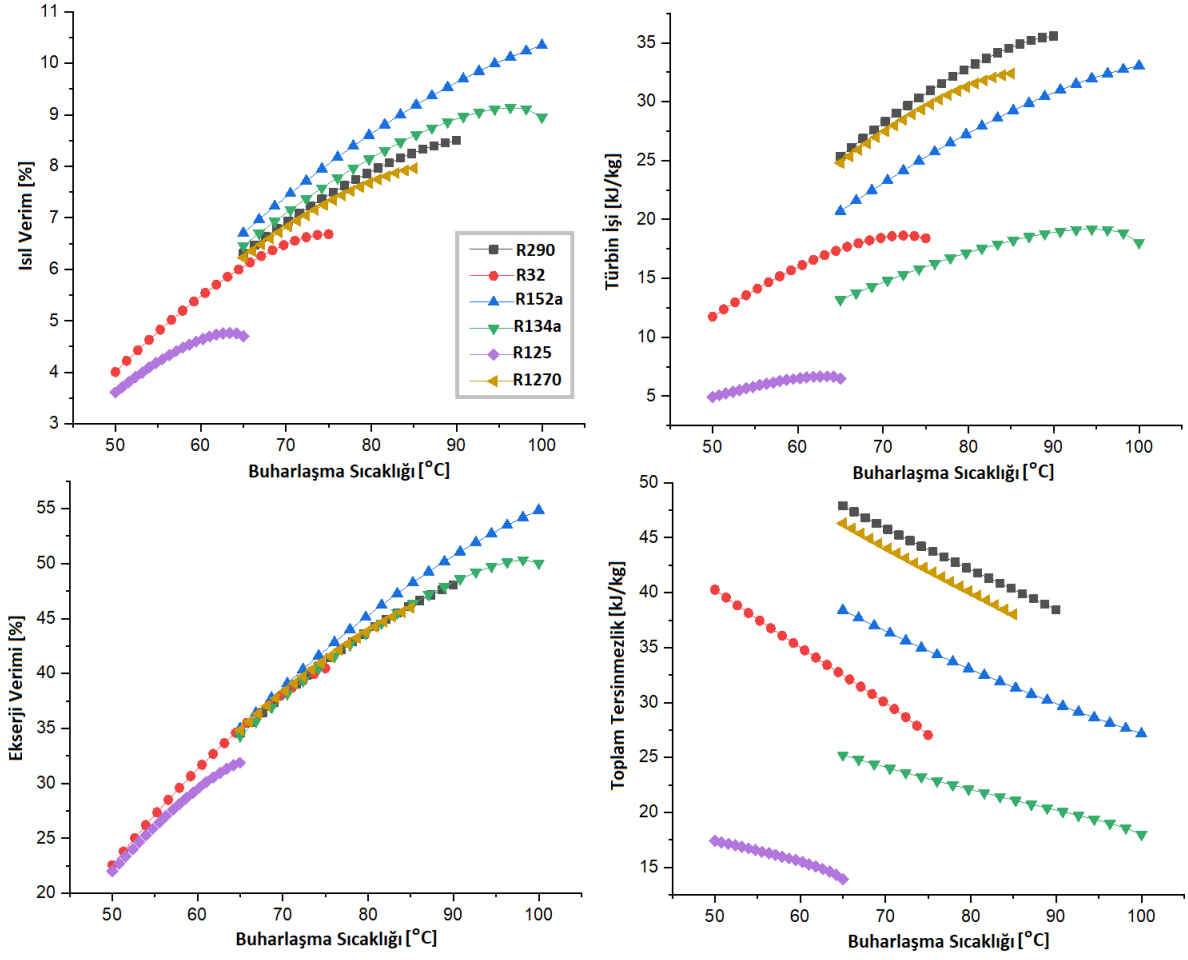
Şekil 3.5'te ıslak akışkanların termofiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Islak akışkanların kaynama noktası sıcaklıklarının diğer tür akışkanlara göre çok düşük olduğu görülmektedir. En düşük kaynama noktası sıcaklığının $-51,7$ °C ile R32'de olduğu belirtilmiştir. Kritik sıcaklıklarda ise R125 ve R32'nin düşük değere sahip olduğu, diğer akışkanların ise birbirine yakın olduğu görülmektedir. Tüm akışkanların 30 °C'ye karşılık gelen yoğuşma basınçları ile 100 °C'deki buharlaşma basınçları incelendiğinde diğer tür akışkanlara kıyasla ıslak akışkanların yüksek basınç değerlerine sahip olduğu dikkat çekmektedir. Islak akışkanlar içerisinde ise en düşük basınç değerine R152a ve R134a'da ulaşılmıştır.



Şekil 3.5. Islak akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.6’da ıslak akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.6 incelendiğinde;

- Isıl verim ve ekserji verimi yönünden en iyi değerlere R152a’da ulaşıldığı,
- Sadece R134a’da belli bir buharlaşma sıcaklığı değerinden sonra (98 °C) ısı verim ve ekserji veriminin azalmaya başladığı,
- En düşük performans değerlerinin R125’li sistemde elde edildiği,
- Türbin işi performansı bakımından en iyi değerlere R290 ve R1270’li sistemde ulaşılmasına rağmen, yüksek ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısı verim sıralamasında R152a ve R134a’nın gerisinde kaldığı,
- R134a’nın yüksek ısı verim ve ekserji veriminin olmasının yanı sıra toplam tersinmezlik değerinin de düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.6. Islak akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi

Islak akışkanların 100 °C buharlaşma sıcaklığı altında ulaştıkları analiz sonuçları dikkate alınarak en iyi performans gösteren 2 akışkanın R152a ve R134a olduğu görülmektedir.

Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için yapılan akışkan sınıflandırması ve her bir gruba ait en iyi performans gösteren akışkanlar Çizelge 3.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 3.6. Düşük sıcaklıklı ORÇ için yapılan akışkan sınıflandırması ve her bir gruba ait en iyi performans gösteren akışkanlar

$T_{h,i} = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Düşük Sıcaklıklı ORÇ Uygulamaları Akışkan Sınıflandırması		
	Kuru	İzantropik	Islak
Organik Akışkanlar	RC318	R141b	R290
	R114	R123	R32
	R600	R245fa	R152a
	R600a	R142b	R134a
	R601	R124	R125
	R601a	R227ea	R1270
En iyi performans gösteren akışkanlar	1.R601	1.R141b	1.R152a
	2.R601a	2.R123	2.R134a

- Kuru, İzantropik ve Islak Akışkanların Performans Analizlerinin Yeni-Nesil Organik Akışkanlar ile Karşılaştırılması

Bu bölümde akışkan türünün ORÇ performansındaki önemi belirlenmiştir. Kuru, izantropik ve ıslak akışkan olmak üzere üç farklı sınıflandırma altında sistem performansı incelenmiştir. Her bir akışkan türünden 6 akışkan olmak üzere 18 farklı akışkanın aynı tasarım parametreleri altında termodinamik analizi yapılmıştır.

Üç farklı tür akışkan içerisinde en iyi performans gösteren 2 akışkan belirlenmiştir. Bunlar, kuru akışkan için R601 ve R601a; izantropik akışkan için R141b ve R123 ve ıslak akışkan için R134a ve R152a'dır. Bu akışkanların kendi aralarında tekrar karşılaştırılmasıyla akışkan türünün sistem performansına etkisinin aynı grafik altında görülmesi amaçlanmıştır.

Bu bölümde ayrıca, kendi türlerinde en iyi performans gösteren akışkanlar, çevresel özellikleri bakımından çok iyi durumda yer alan düşük kritik sıcaklığa sahip olan yeni-nesil organik akışkanlar ile karşılaştırılmıştır. Bu akışkanlar R1234yf ve R1234ze'dir. Yeni-nesil organik akışkanların hangi akışkan türüne yakın özellikler sergilediği de belirlenmek istenmiştir. Çizelge 3.7'de yeni-nesil organik akışkanların termofiziksel ve çevresel

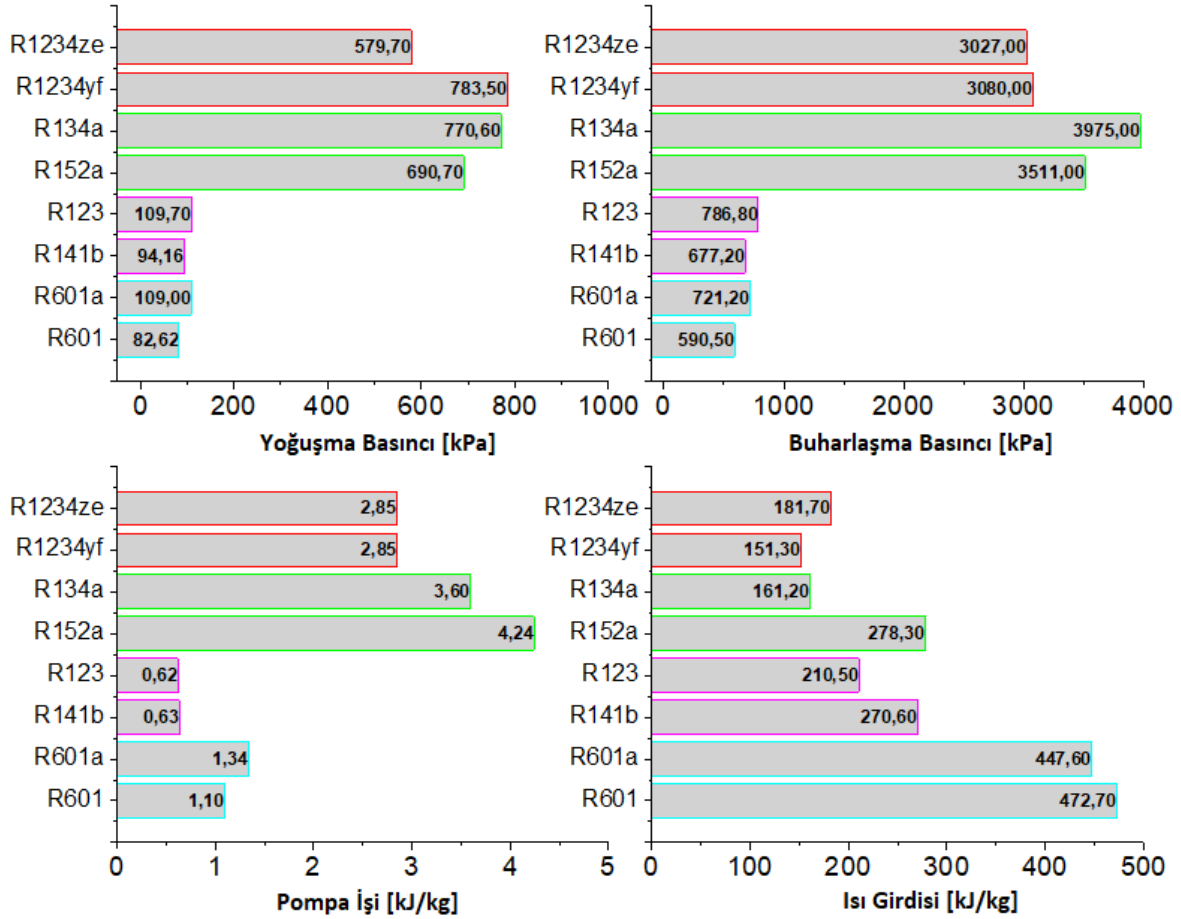
özelliklerine dair bilgiler verilmiştir. Özellikle GWP değerlerinin çok düşük olduğu, yanıcılık seviyesi olarak da R134a hariç diğer akışkanlardan iyi durumda olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.7. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların ve yeni-nesil organik akışkanların çevresel özellikleri

Akışkanlar/ Özellikler	R601	R601a	R141b	R123	R152a	R134a	R1234yf	R1234ze
Molekül Ağırlığı (g/mol)	72,15	72,15	116,95	152,93	66,05	102,03	114,04	114,04
Kaynama Noktası (°C)	36,1	27,8	32	27,8	-24	-26,1	-29,3	-18,8
Kritik Sıcaklık Değeri (°C)	196,6	187,2	204,4	183,7	113,3	101,1	94,85	109,52
Kritik Basınç Değeri (MPa)	3,37	3,38	4,21	3,66	4,52	4,06	3,38	3,63
ASHRAE standartları güvenlik sınıfı	A3	A3	n.a	B1	A2	A1	A2L	A2L
ODP	0	0	0,12	0	0	0	0	0
GWP	20	20	725	77	124	1430	4	6

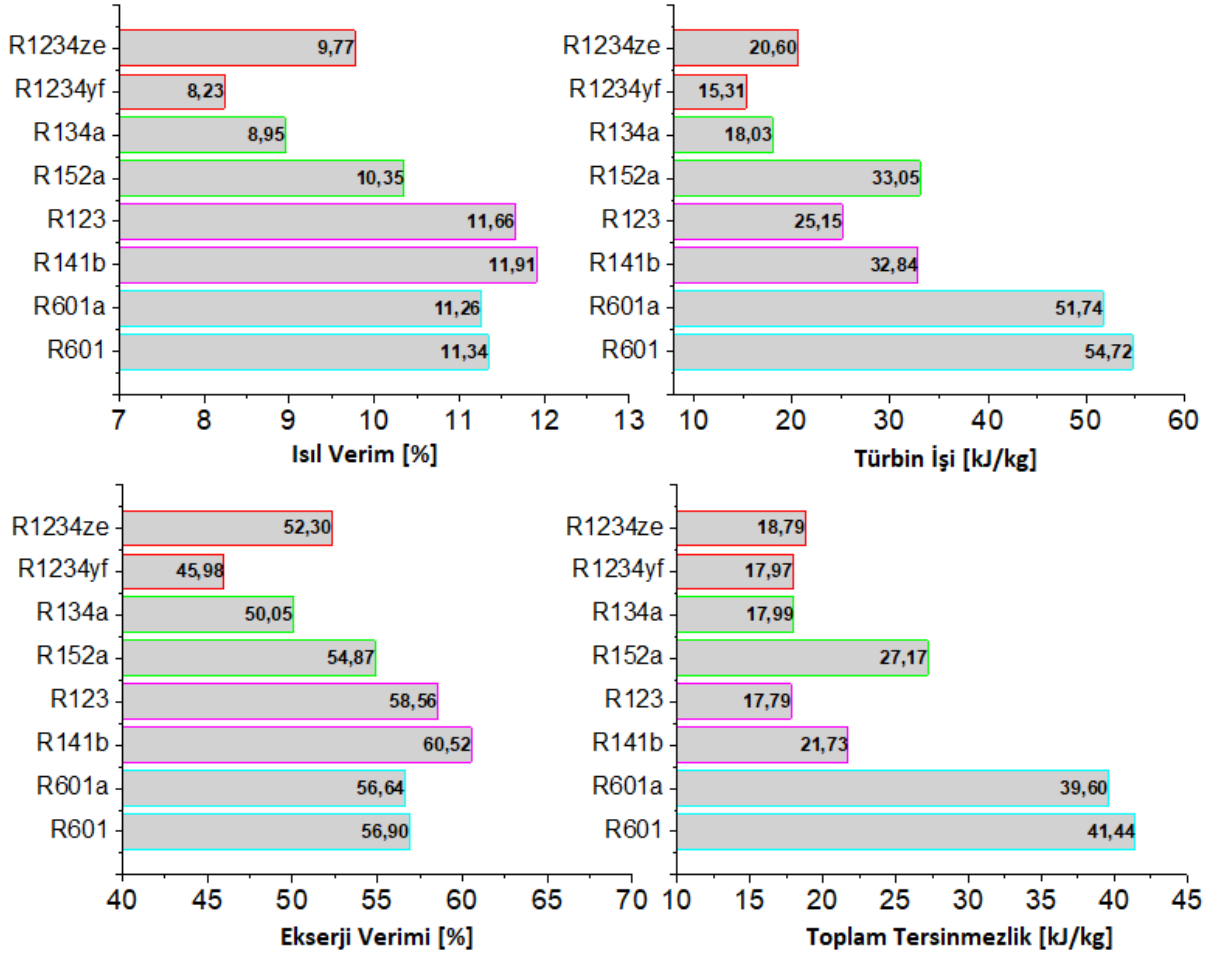
Şekil 3.7’de belirtilen akışkanların 30 °C’ye karşılık gelen yoğuşma basınçları ile 100 °C’deki buharlaşma basınçları incelendiğinde kuru ve izantropik akışkanların düşük basınç değerlerine, ıslak akışkanların ve yeni-nesil organik akışkanların yüksek basınç değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Şekilde ayrıca 100 °C buharlaşma sıcaklığı altında pompa gücü ve sistem için gerekli ısı miktarı da incelenmiştir. Sistemde oluşan basınç farkının fazla olmasından ötürü ıslak ve yeni-nesil organik akışkanların pompa güçlerinin diğerlerine göre yüksek olduğu görülmektedir. Sisteme sağlanması gereken ısı miktarında ise en yüksek değer kuru akışkanlarda görülmüştür.

R123’lü sistemde oluşan basınç farkı R152a’lı sistemde oluşan basınç farkından %75 daha azdır, ayrıca özgül hacmi de %38 daha az olarak tespit edilmiştir. Hem basınç farkının hem de özgül hacminin düşük olmasından dolayı R123’lü sistemin pompa işi R152a’lı sistemden %85 daha az bulunmuştur. R1234ze’li sistemde de yüksek basınç farkı görülmesine rağmen yine de R152a’lı sistemden %13 daha az bir basınç farkına sahiptir. Ayrıca özgül hacmi de %22 daha azdır. Bundan dolayı R1234ze’li sistemde R152a’lı sistemden %32 daha düşük pompa işi tespit edilmiştir.



Şekil 3.7. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların ve yeni-nesil organik akışkanların tasarım değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.8’de aynı akışkanların termodinamik performans parametreleri karşılaştırılmıştır. Tüm akışkanların 100 °C buharlaşma sıcaklığı altında ısı verim, türbin işi, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik değerleri belirlenmiştir. En yüksek ısı verim değerine izantropik akışkanlarda, en yüksek türbin işi değerlerine ise kuru akışkanlarda elde edilmiştir. En yüksek ekserji verimi ve en düşük toplam tersinmezlik değerlerine ise izantropik akışkanlarda ulaşıldığı görülmektedir. Tüm akışkanlar değerlendirildiğinde en iyi performans değerlerine R141b’de ulaşılmıştır. Akışkan türleri kendi aralarında incelendiğinde R152a’nın özellikle elde edilen türbin işi bakımından R134a’dan çok iyi durumda olduğu, R1234ze’nin ise R1234yf’den ısı verim ve ekserji verimi bakımından önde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların ve yeni-nesil organik akışkanların performans parametreleri bakımından karşılaştırılması

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 incelendiğinde, yeni-nesil organik akışkanların ıslak akışkan türüne yakın özellikler sergilediği görülmüştür. Fakat yeni-nesil organik akışkanların daha düşük yoğunlaşma ve buharlaşma basınç değerlerine sahip olduğu ve daha az pompa gücüne ihtiyaç duyduğu dikkat çekmektedir. Performans parametreleri altında ise özellikle R1234ze'nin R134a'dan daha iyi fakat R152a'dan ise daha düşük performansa sahip olduğu görülmektedir.

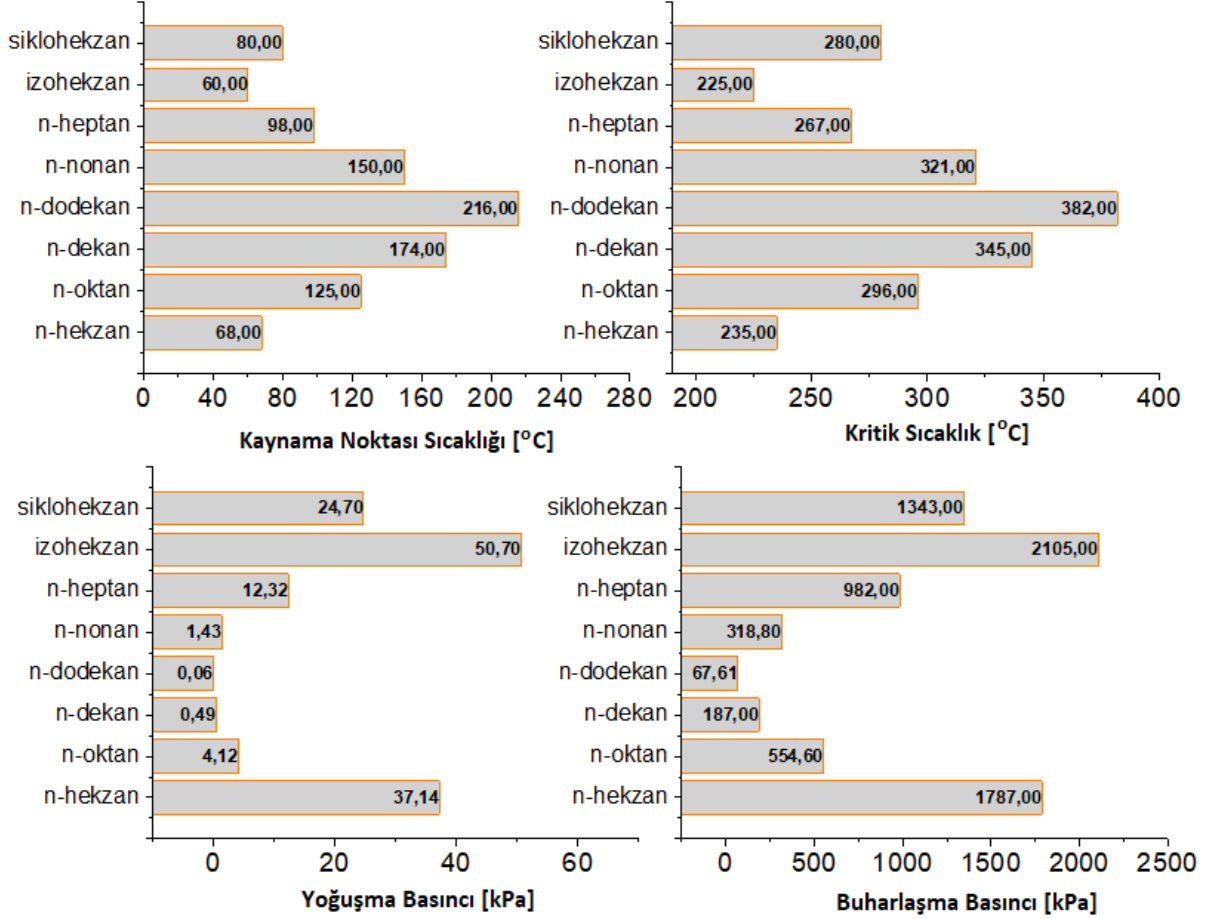
3.4.2. Yüksek Sıcaklıklı ORÇ Uygulamaları İçin Yapılan Termodinamik Analiz Sonuçları

- Alkan Grubu Akışkanlar Kullanılarak Tasarlanan ORÇ'nin Termodinamik Analizi

ORÇ tasarımında kullanılan alkan grubu akışkanlar; n-hekzan, n-oktan, n-dekan, n-dodekan, n-nonan, n-heptan, izohekzan, siklohekzan'dır.

Şekil 3.9'da alkan grubu akışkanların termofiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Kaynama noktası sıcaklığı ve kritik sıcaklıkları incelendiğinde, en düşük sıcaklık değerlerinin

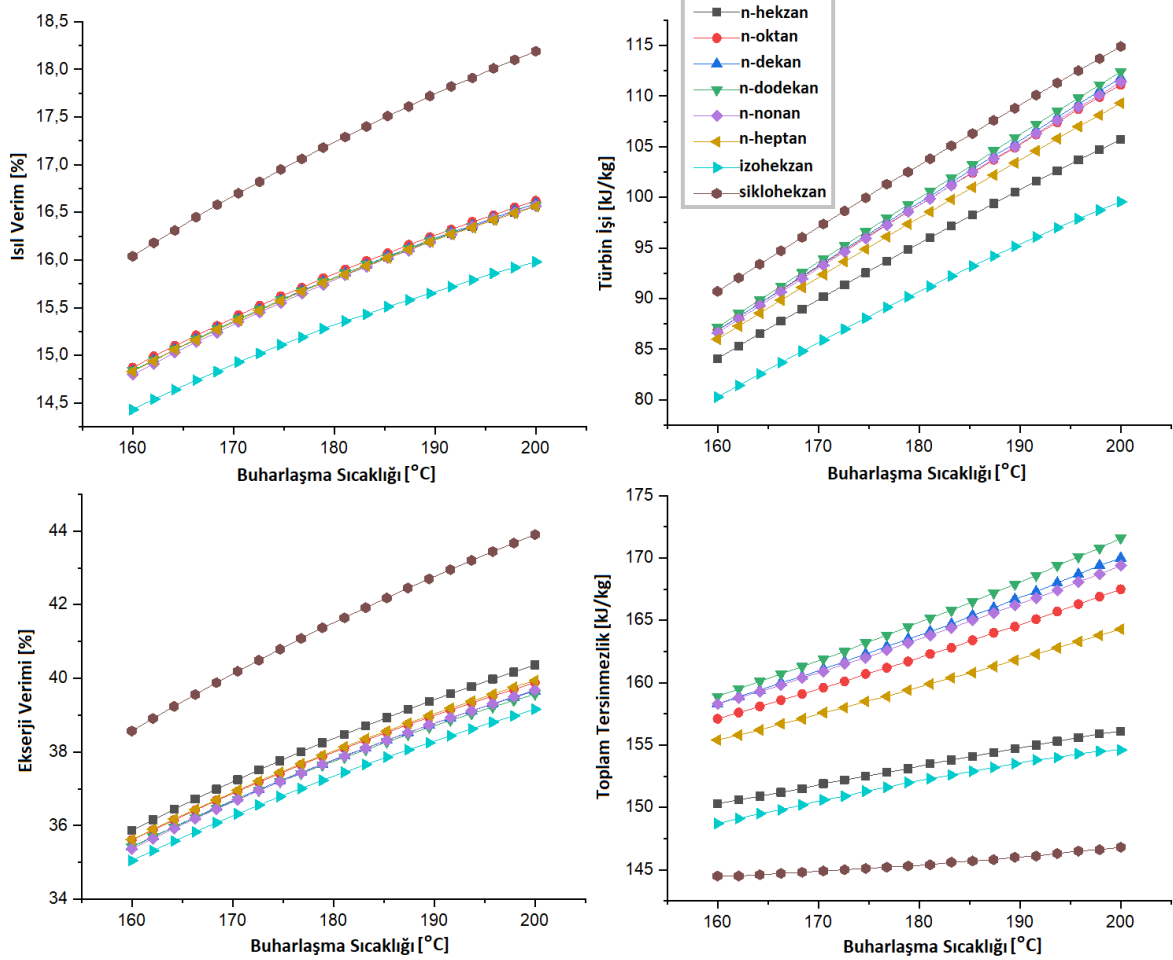
n-hekzan ve izohekzan'da, en yüksek sıcaklık değerlerinin ise n-dodekan'da olduğu görülmektedir. Tüm akışkanların 40 °C'ye karşılık gelen yoğuşma basınçları ile 200 °C'deki buharlaşma basınçları incelendiğinde n-dodekan ve n-dekan akışkanlarının diğerlerine kıyasla çok düşük basınç değerlerine sahip olduğu belirtilmiştir. En yüksek basınç değerlerinin ise hekzan akışkanlarında (n-hekzan, izohekzan ve siklohekzan) olduğu görülmektedir.



Şekil 3.9. Alkan grubu akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.10'da alkan grubu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.10 incelendiğinde;

- Siklohekzan'ın diğer alkan grubu akışkanlara kıyasla ısı verim ve ekserji veriminin çok yüksek olduğu
- n-dodekan'lı sistemin türbin işi yönünden iyi performans göstermesine rağmen yüksek ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısı veriminin yüksek olmadığı,
- En düşük toplam tersinmezlik değerlerine sırasıyla siklohekzan, izohekzan ve n-hekzan olmak üzere hekzan akışkanlarında ulaşıldığı görülmektedir.



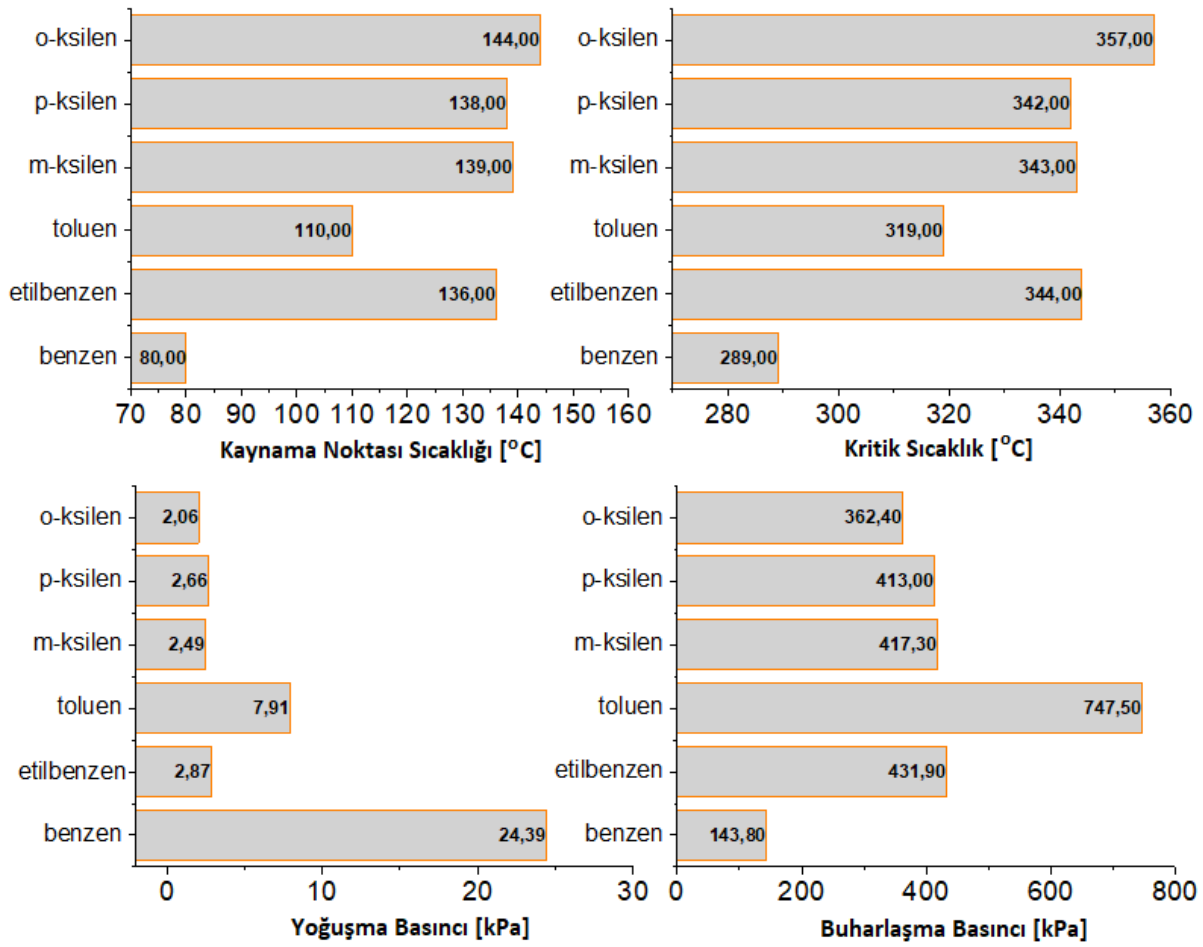
Şekil 3.10. Alkan grubu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi

Alkan grubu akışkanların 200 °C buharlaşma sıcaklığı altında ulaştıkları analiz sonuçları dikkate alınarak en iyi performans gösteren 2 akışkanın sikloheksan ve n-oktan olduğu görülmektedir.

- Aromatik Hidrokarbon Grubu Akışkanlar Kullanılarak Tasarlanan ORÇ'nin Termodinamik Analizi

ORÇ tasarımında kullanılan aromatik hidrokarbon grubu akışkanlar; benzen, etilbenzen, tolüen, m-ksilen, p-ksilen, o-ksilen'dir.

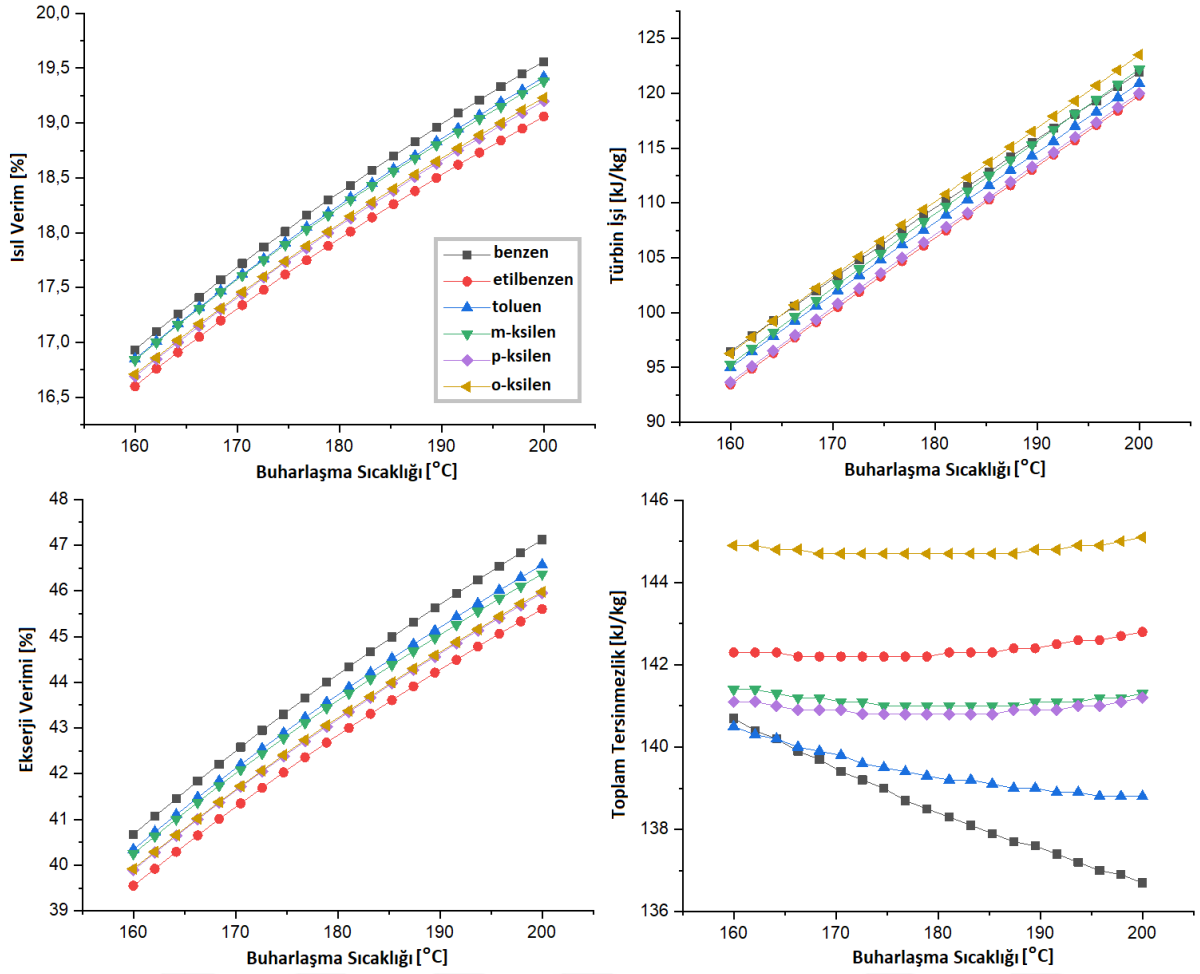
Şekil 3.11'de aromatik hidrokarbon grubu akışkanların termodinamik özellikleri karşılaştırılmıştır. Kaynama noktası sıcaklığı ve kritik sıcaklıkları incelendiğinde, benzen'in diğer akışkanlara kıyasla çok düşük sıcaklık değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Tüm akışkanların 40 °C'ye karşılık gelen yoğunlaşma basınçları ile 200 °C'deki buharlaşma basınçları incelendiğinde ise benzen'in diğerlerine kıyasla çok yüksek yoğunlaşma basıncına, tolüen'in ise çok yüksek buharlaşma basıncına sahip olduğu belirtilmiştir. Benzen'in yüksek yoğunlaşma basıncına karşın düşük buharlaşma basıncına sahip olması dikkat çekmektedir.



Şekil 3.11. Aromatik hidrokarbon grubu akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.12’te aromatik hidrokarbon grubu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.12 incelendiğinde;

- Benzen ve toluen’in ısı verim ve ekserji verim bakımından diğerlerinden önde olduğu
- Türbin işi yönünden ise m-ksilen ve o-ksilen akışkanlarının iyi performans sergilediği, fakat yüksek ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısı verimlerinin benzen ve toluen’den yüksek olmadığı,
- Benzen ve toluen hariç diğer akışkanların buharlaşma sıcaklığı artışı ile toplam tersinmezlik değerinde önemli bir değişiklik olmadığı,
- Özellikle benzen’li sistemde buharlaşma sıcaklığının artmasıyla toplam tersinmezlik değerinde ciddi bir azalma olduğu görülmektedir.



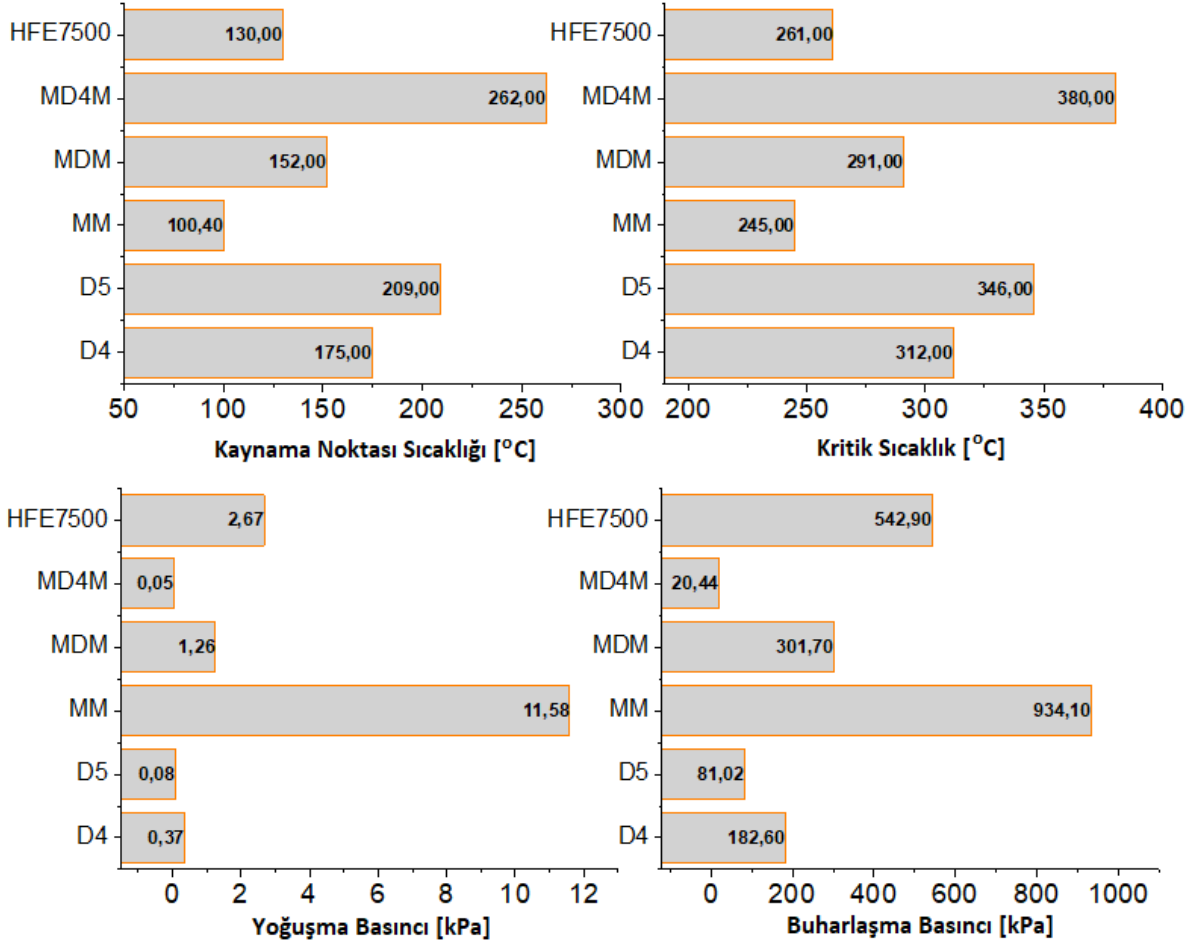
Şekil 3.12. Aromatik hidrokarbon grubu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi

Aromatik hidrokarbon grubu akışkanların 200 °C buharlaşma sıcaklığı altında ulaştıkları analiz sonuçları dikkate alınarak en iyi performans gösteren 2 akışkanın benzen ve toluen olduğu görülmektedir.

- Siloksan Grubu Akışkanlar Kullanılarak Tasarlanan ORÇ'nin Termodinamik Analizi
ORÇ tasarımında kullanılan siloksan grubu akışkanlar; D4, D5, MM, MDM, MD4M, HFE7500'dır.

Şekil 3.13'de siloksan grubu akışkanların termofiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Aynı akışkan grubunda olmalarına karşın kaynama noktası ve kritik sıcaklıklarında ciddi bir farklılık görülmektedir. En düşük kaynama noktası sıcaklığının 100,4 °C ile MM'de, en yüksek ise 262 °C ile MD4M'de olduğu belirtilmiştir. Tüm akışkanların 40 °C'ye karşılık gelen yoğuşma basınçları ile 200 °C'deki buharlaşma basınçları incelendiğinde ise MM'nin diğer akışkanlara kıyasla çok yüksek basınç değerlerine sahip olduğu görülmektedir. MM'den sonra ise HFE7500 akışkanında yüksek basınç değerleri elde edilmiştir. Diğer akışkanlar ise

düşük basınç değerlerine sahiptirler. Özellikle MD4M'nin çok düşük yoğuşma basıncı ve buharlaşma basıncına sahip olduğu dikkat çekmektedir.

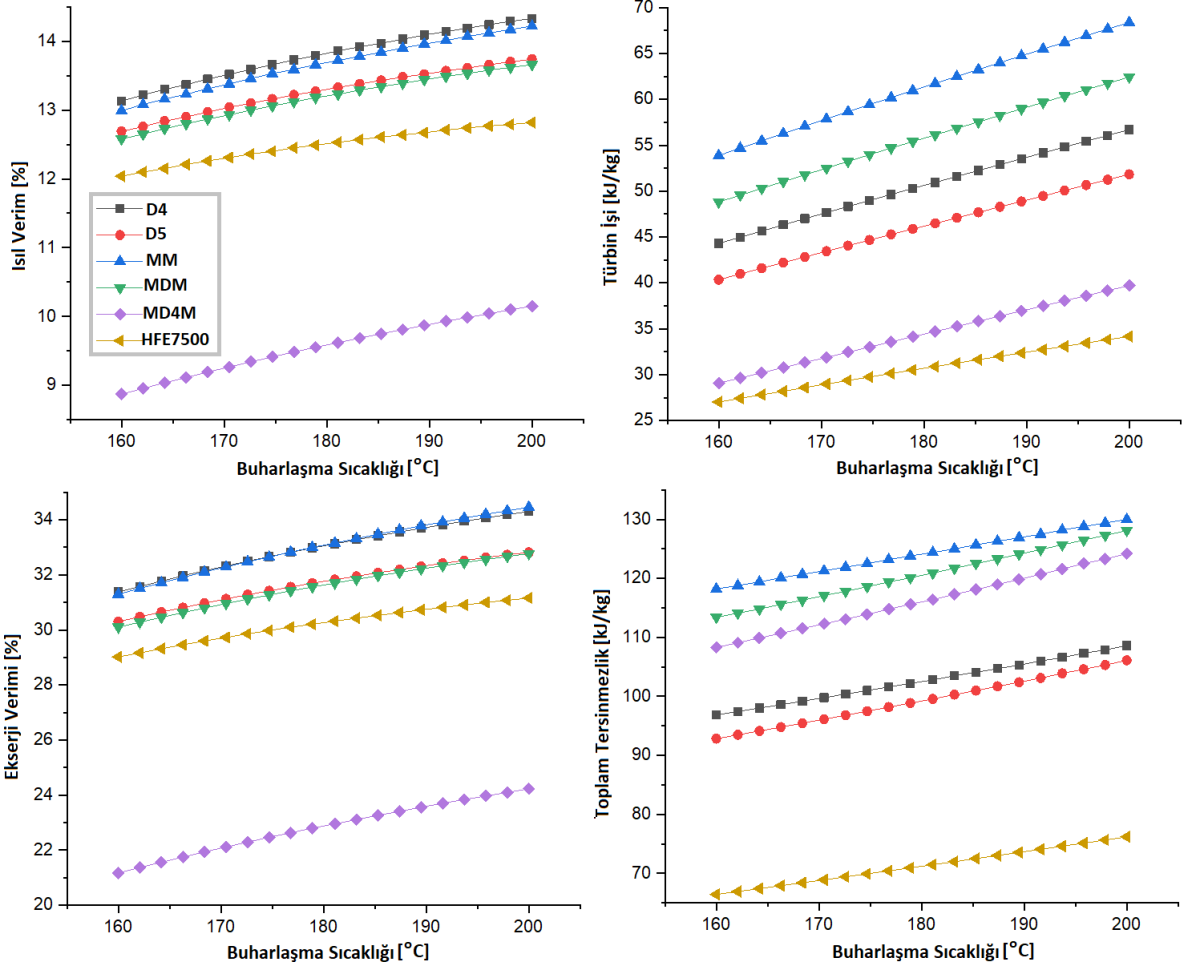


Şekil 3.13. Siloksan grubu akışkanların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.14'de siloksan grubu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.14 incelendiğinde;

- Isıl verim ve ekserji verimi bakımından D4 ve MM'nin iyi özellikler gösterdiği,
- Ekserji veriminde düşük buharlaşma sıcaklıklarında D4'ün önde olduğu, fakat buharlaşma sıcaklığının artmasıyla MM'nin daha iyi bir performansa sahip olduğu,
- Türbin işi yönünden de en iyi durumda olan akışkanın yine MM olduğu,
- D4'li sistemde elde edilen türbin işinin yüksek olmamasına rağmen düşük ısı girdisi sayesinde ısıl veriminin yüksek olduğu,
- Aynı şekilde, MDM'li sistemde de yüksek türbin işine rağmen, yüksek ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısıl verim sıralamasında geride kaldığı,
- MD4M'nin diğer siloksan grubu akışkanlara kıyasla çok düşük ısıl verim ve ekserji veriminin elde edildiği,

- En düşük toplam tersinmezlik değerine ise HFE7500'lı sistemde ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 3.14. Siloksan grubu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi

Siloksan grubu akışkanların 200 °C buharlaşma sıcaklığı altında ulaştıkları analiz sonuçları dikkate alınarak en iyi performans gösteren 2 akışkanın D4 ve MM olduğu görülmektedir.

Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için yapılan akışkan sınıflandırması ve her bir gruba ait en iyi performans gösteren akışkanlar Çizelge 3.8'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.8. Yüksek sıcaklıklı ORÇ için yapılan akışkan sınıflandırması ve her bir gruba ait en iyi performans gösteren akışkanlar

$T_{h,i} = 240 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Yüksek Sıcaklıklı ORÇ Uygulamaları		
	Akışkan Sınıflandırması		
	Alkan	Aromatik Hidrokarbon	Siloksan
Organik Akışkanlar	n-hekzan	benzen	D4
	n-oktan	etilbenzen	D5
	n-dekan, n-dodekan	toluen	MM
	n-nonan, n-heptan	m-ksilen	MDM
	izohekzan	p-ksilen	MD4M
	siklohekzan	o-ksilen	HFE7500
En iyi performans gösteren akışkanlar	1.siklohekzan	1.benzen	1.MM
	2.n-oktan	2.toluen	2.D4

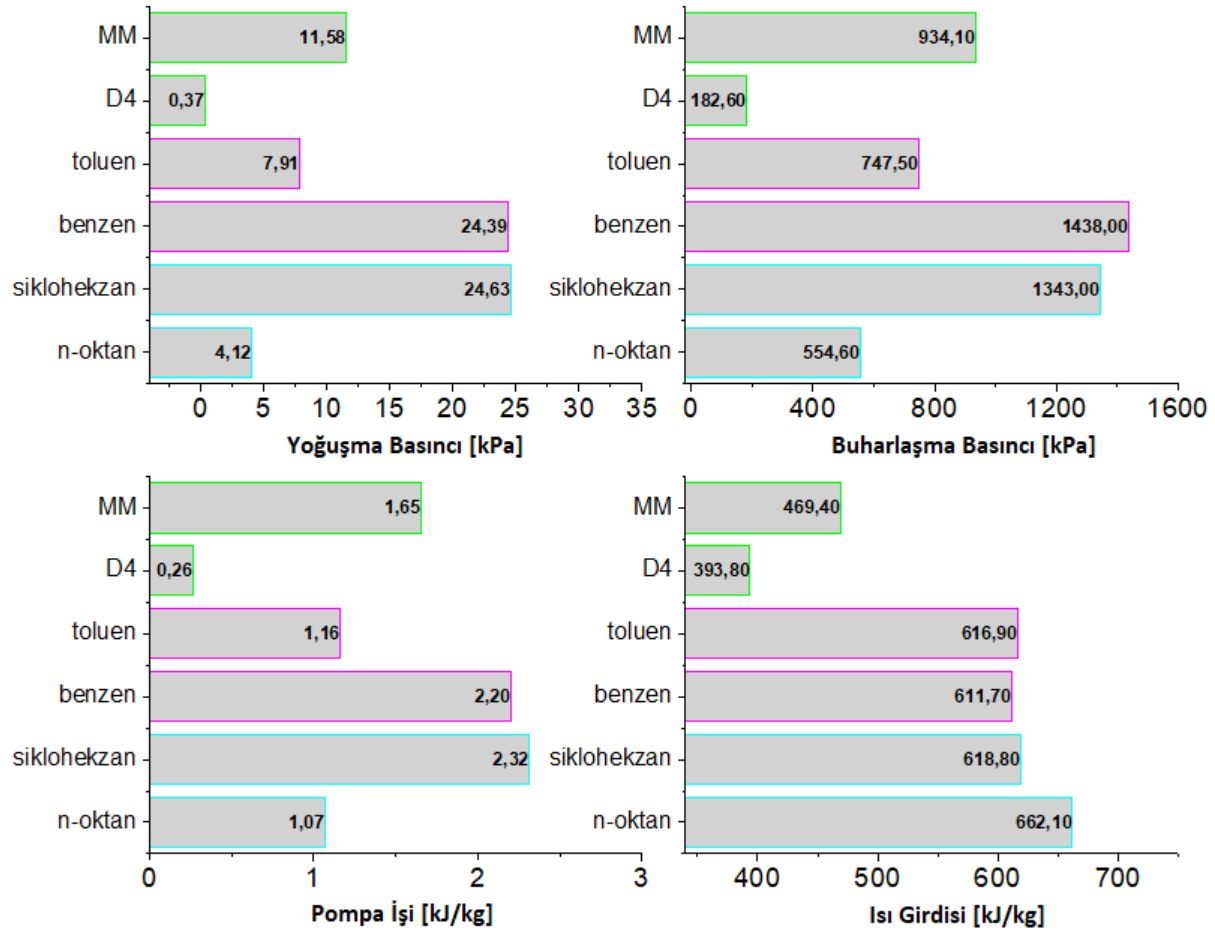
- Alkan, Aromatik Hidrokarbon ve Siloksan Grubu Akışkanların Performans Analizlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamalarında akışkan türünün sistem performansındaki önemi belirlenmiştir. Alkan, aromatik hidrokarbon ve siloksan grubu akışkan olmak üzere üç farklı sınıflandırma altında sistem performansı incelenmiştir. Alkanlar grubundan 8 akışkan, diğerlerinden 6 akışkan olmak üzere toplam 20 akışkanın aynı tasarım parametreleri altında termodinamik analizi yapılmıştır.

Üç farklı tür akışkan içerisinde en iyi performans gösteren 2 akışkan belirlenmiştir. Bunlar, alkan grubu akışkanlar için siklohekzan ve n-oktan; aromatik hidrokarbon grubu akışkan için benzen ve toluen; siloksan grubu akışkan için ise D4 ve MM'dir. Bu akışkanların kendi aralarında tekrar karşılaştırılmasıyla akışkan türünün sistem performansına etkisinin aynı grafik altında görülmesi amaçlanmıştır.

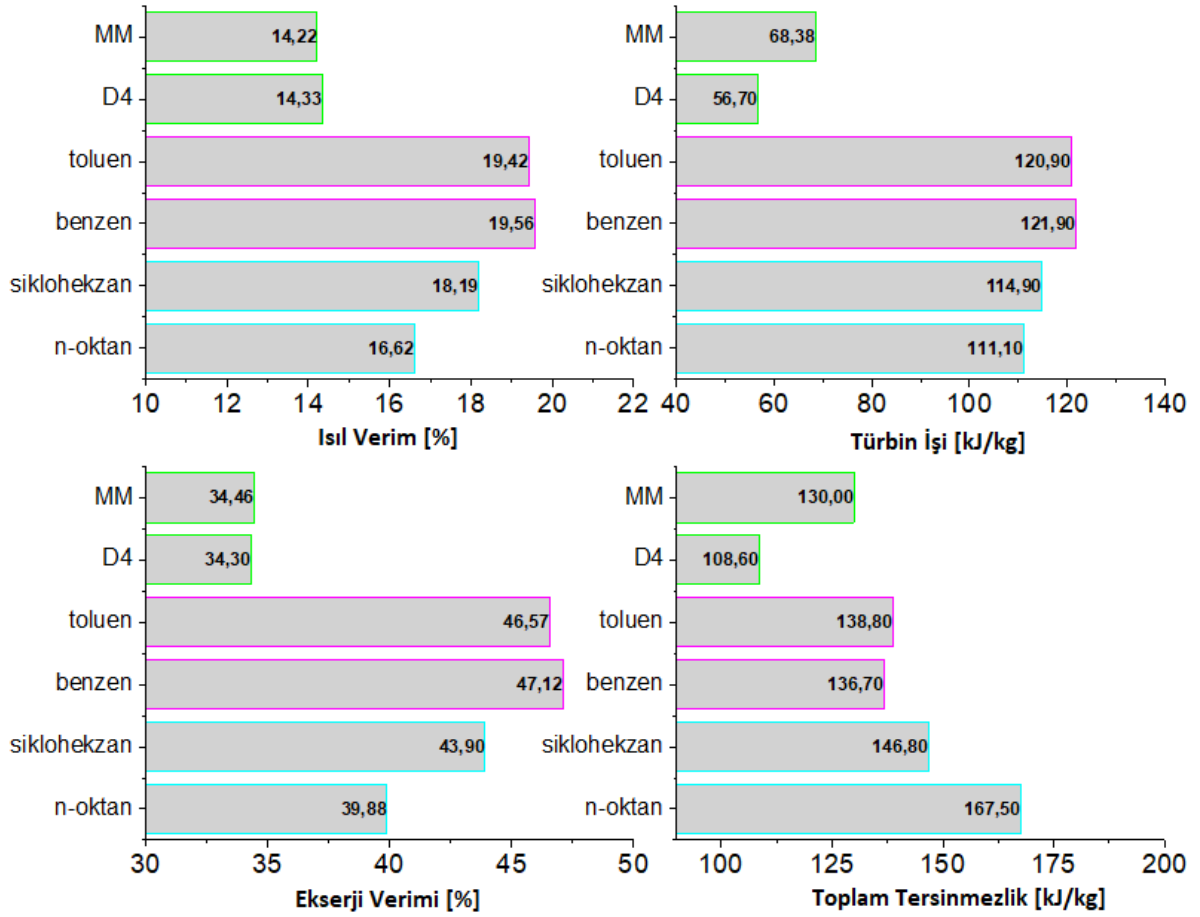
Şekil 3.15'de belirtilen akışkanların $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye karşılık gelen yoğuşma basınçları ile $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki buharlaşma basınçları incelendiğinde benzen'in diğerlerine kıyasla yüksek basınç değerlerine sahip olduğu dikkat çekmektedir. Siklohekzan ile n-oktan aynı akışkan grubunda yer almasına rağmen n-oktan için gereken basınç değerleri siklohekzan'a göre çok düşüktür. Pompa güçleri kıyaslamasında ise yine basınç değerlerinde olduğu en yüksek değerler benzen

ve sikloheksan'lı sistemlerde tespit edilmiştir. Sisteme sağlanması gereken ısı miktarında ise siloksan grubu akışkanların diğerlerine göre düşük değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.15. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların tasarım değerlerinin karşılaştırılması

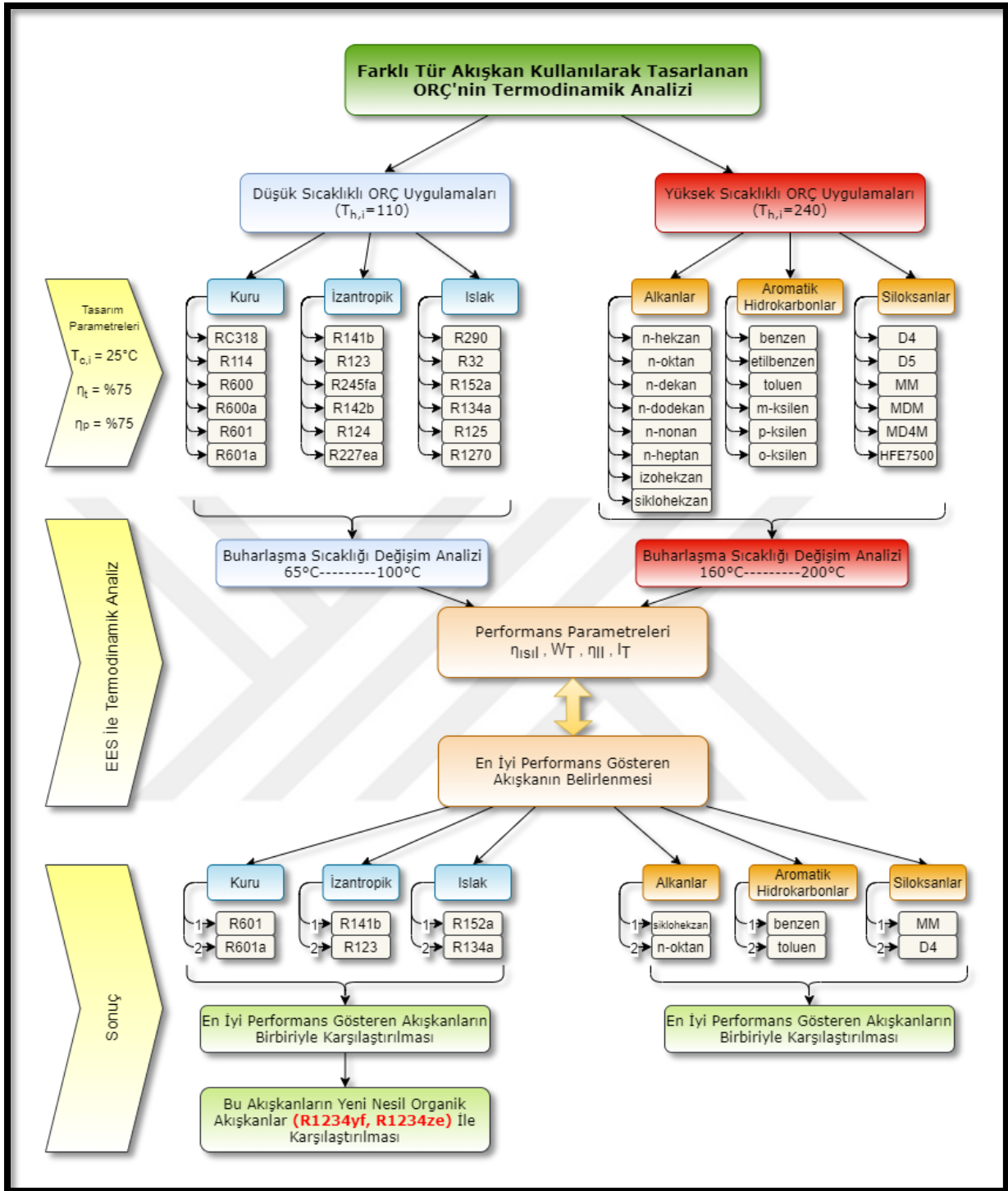
Şekil 3.16'da aynı akışkanların termodinamik performans parametreleri karşılaştırılmıştır. Tüm akışkanların 200 °C buharlaşma sıcaklığı altında ısı verim, türbin işi, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik değerleri belirlenmiştir. En yüksek ısı verim, ekserji verim ve türbin işi değerleri aromatik hidrokarbon grubu akışkanlarda elde edilmiştir. Aromatik hidrokarbon grubu akışkanlara en yakın değerlere alkan grubu akışkanlardan sikloheksan'da görülmüştür. Toplam tersinmezlik değerinin en düşük olduğu akışkan grubunun ise siloksanlar olduğu belirtilmiştir.



Şekil 3.16. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların performans parametreleri bakımından karşılaştırılması

Tezin üçüncü bölümünde özetle, 6 farklı akışkan sınıflandırması içinde toplam 40 organik akışkanın performansı karşılaştırılmıştır. Her bir sınıflandırmada en iyi performans gösteren 2 akışkan belirlenmiştir. Bu akışkanlar düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için R601, R601a, R141b, R123, R134a, R152a'dır. İyi performans gösteren akışkanlara çevresel özelliklerinden dolayı yeni-nesil organik akışkanlar olan R1234yf ve R1234ze'de eklenmiştir. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için en iyi performansa sahip akışkanlar ise n-oktan, sikloheksan, benzen, toluen, D4 ve MM olarak belirlenmiştir. Bir sonraki bölümde değişik ısı kaynağı sıcaklıkları altında termodinamik optimizasyon ile optimum akışkanın belirlenmesi çalışmasında bu akışkanlar kullanılacaktır.

Bu bölümde yapılan termodinamik analiz çalışması Şekil 3.17'de verilen akış diyagramında özetlenmiştir.



Şekil 3.17. Farklı Tür Akışkan Kullanılarak Tasarlanan ORÇ'nin Termodinamik Analizini içeren akış diyagramı

4. DÜŞÜK KAPASİTELİ DEĞİŞİK ISI KAYNAKLI ORÇ İÇİN TERMODİNAMİK OPTİMİZASYON İLE OPTİMUM AKIŞKANIN BELİRLENMESİ

Bir önceki bölümde, düşük ve yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında kullanılan akışkanlar farklı kategoriler altında birbirleriyle kıyaslanarak en iyi performans gösteren akışkanlar belirlenmişti. Bu bölümde ise düşük kapasiteli ORÇ'nin değişik ısı kaynakları için farklı amaç fonksiyonları altında çok amaçlı genetik algoritma (GA) yöntemi ile termodinamik optimizasyonu yapılarak optimum akışkan belirlenmiştir. Bunun için öncelikle değişik ısı kaynağı sıcaklıkları altında sistemde olması gereken $\Delta T_{PP,e}$ değerleri belirlenmiştir.

Aşağıda belirtilen ORÇ'nin düşük ve yüksek sıcaklıklı uygulamaları kapsamında 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı ($T_{h,i}$) için ayrı ayrı optimizasyon yapılmıştır.

Düşük sıcaklıklı ORÇ için;

- Jeotermal Enerji Uygulamaları ($T_{h,i}=90, 100, 110$ °C)
- Düşük Sıcaklıklı Güneş Enerjisi Uygulamaları ($T_{h,i}=120, 130$ °C)

Yüksek sıcaklıklı ORÇ için;

- Atık Isı Uygulamaları ($T_{h,i}=250, 260, 270$ °C)
- Biyokütle ve Yüksek Sıcaklıklı Güneş Enerjisi Uygulamaları ($T_{h,i}=280, 290$ °C)

Bu bölümde; değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için farklı amaç fonksiyonları ile belirlenen ağırlık fonksiyonu sonucunda optimum akışkanın belirlenmesi amaçlanmıştır.

4.1 Kaynak Araştırması

Tezin bu bölümünde yapılan kaynak araştırmasında $\Delta T_{PP,e}$ 'nin ORÇ performansı üzerindeki etkisi ile ilgili çalışmalar ve uygulanan termodinamik optimizasyon yöntemleri incelenmiştir. Yazarların çalışmaları sonunda ulaştıkları sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Xi vd. (2013), genetik algoritma yöntemi ile farklı konfigürasyonlardaki ORÇ'nin parametrik optimizasyonunu üzerinde çalışmışlardır. Sistem performansının belirlenmesinde termodinamiğin birinci ve ikinci yasası parametrelerinden yararlanmışlardır. R123, R113, R11, R245fa, R245ca ve R141b olmak üzere altı farklı organik akışkanın performansı karşılaştırılmıştır. R245fa'nın net güç maksimizasyonunda en iyi değere ulaştığı belirtilmiştir. Fakat, evaporatör ısı yükünün ve sistem için gereken kütleli debinin fazla olmasından dolayı ısı verim ve ekserji verimi düşük bulunmuştur. Bundan dolayı tüm parametreler düşünüldüğünde R141b ve R11 akışkanlarının daha yüksek termodinamik performansa sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Wu vd. (2014), karışım akışkanları kullanılarak tasarlanan ORÇ'de $\Delta T_{PP,e}$ ve $\Delta T_{PP,k}$ 'nin belirlenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Yıllık toplam maliyetin net güce oranı olan eksergo – ekonomik performansı değerlendirme kriteri olarak ele almışlardır. $\Delta T_{PP,e}$ artışının eksergo ekonomik performansı hızlı bir şekilde arttırdığı, fakat optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinde en iyi performansa ulaştığını belirtmişlerdir. Karışım akışkanları için optimum $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 3-6 °C arasında olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Rahbar vd. (2015), ORÇ'de küçük ölçekli radyal türbinin parametrik analizi ve optimizasyonu üzerinde çalışma yapmışlardır. GA optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Küçük ölçekli radyal türbin performansı 8 organik akışkan kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, radyal türbin veriminin %82,9 ile %84 arasında olduğu ve diğer genişleticilerin veriminden yüksek olduğu belirtilmiştir. R152a akışkanı, 7 °C aşırı kızdırma sıcaklığı altında maksimum verime ulaşmıştır. Aşırı kızdırma istenmediği durumda ise, izobütanın %83,82 ile maksimum verime ulaştığı ve bu arada ısı kaynağı sıcaklığının ise 89,2 °C olduğu belirtilmiştir.

Yu vd. (2015), ORÇ'de organik akışkan ve çalışma koşullarını ΔT_{PP} 'ye bağlı anlık olarak belirleyebilen bir metot geliştirmişlerdir. Bunun için ön ısıtıcıda oluşan ΔT_{PP} ve buharlaştırıcıda oluşan ΔT_{PP} 'yi tanımlamışlardır. Isı kaynağı giriş sıcaklığı ile akışkanın kritik sıcaklığı arasında uygun bir fark olması durumunda ve akışkanın kritik bölgesine yakın buharlaşması durumunda maksimum güce ulaşıldığını tespit etmişlerdir.

Wang vd. (2017), ORÇ sistemlerinde Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) – Entropi yöntemi kullanarak $\Delta T_{PP,e}$ optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Farklı akışkanlar kullandıkları sistemin ekonomik ve ısıl performansı birlikte değerlendirilmiştir. Performans parametresini $\Delta T_{PP,e}$ 'nin $\Delta T_{PP,k}$ 'ya oranı olarak tanımlamışlardır. Bu oranın artması ile net güç değerinin önce arttığı fakat belli bir değerden sonra azaldığını belirtmişlerdir. Türbindeki entalpi düşüş oranı ve organik akışkanın kütleli debisindeki artış oranının birlikte değerlendirilmesiyle maksimum güç noktasını tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda maksimum güç çıktısına R141b ile maksimum ısıl verim ve ekserji verim değerlerine ise R11 ile ulaştıklarını belirtmişlerdir.

Liu vd. (2017), R245fa kullanılarak tasarladıkları ORÇ sisteminde jeotermal değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için performans analizi yapmışlardır. $\Delta T_{PP,e}$ 'nin sistem performansına etkisi belirlenmiştir. Net güç türbin boyut parametresi, hacimsel debi oranı ve toplam ısıl iletkenlik hesaplanmıştır. $\Delta T_{PP,e}$ 'nin toplam ısıl iletkenlik ve net güçle ters orantılı olduğu tespit edilmiştir. Optimum $\Delta T_{PP,e}$ 'nin ısı kaynağı giriş sıcaklığı ile ilişkili olduğu düşük

$\Delta T_{PP,e}$ 'nin yüksek net gücü sağladığı belirtilmiştir. Isı kaynağı giriş sıcaklığının 80-180°C arasındaki değişimi sonucunda $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 2 °C'den 21 °C'ye kadar arttığı tespit edilmiştir.

Han vd. (2017), ORÇ'nin atık ısı uygulaması kapsamında 160 °C'de baca gazının ısı kaynağı olarak kullanıldığı reküperatörlü ORÇ'nin termodinamik ve ekonomik analizini MATLAB programını kullanarak yapmışlardır. ORÇ'de daha uygun bir organik akışkan seçimi ve optimum aşırı kızdırma sıcaklığının belirlenmesi için optimizasyon tekniği olarak bulanık çok kriterli değerlendirme yönteminden yararlanmışlardır. Isıl verim, net güç, toplam tersinmezlik, VFR değeri ve birim maliyet değerlendirme kriterleri olarak belirlenmiştir. Buharlaşma sıcaklığının artmasıyla türbinde basınç farkının artacağı bununla birlikte entalpi farkının artacağı fakat organik akışkanın kütleli debisinin azalacağını belirtmişlerdir. Bundan dolayı maksimum net gücün belirlenmesinde bu iki parametreye bağlı olarak optimum nokta olduğu belirlenmiştir. Buharlaşma sıcaklığının 80 °C'den 140 °C'ye artışı ile tüm akışkanlar için ısıl verim artmasına rağmen türbin gücü belli bir değerden sonra azalmaya başlamıştır. Uygulanan optimizasyon ile en iyi performansı bütan akışkanı optimum buharlaşma sıcaklığının 100 °C ve aşırı kızdırma sıcaklığının da 5 °C olduğu durumda göstermiştir.

Kaşka vd. (2018), Organik Rankine-Brayton birleşik çevriminin enerji ve ekserji analizi üzerine çalışma yapmışlardır. Brayton çevriminde farklı kompresör basınç oranlarının birleşik sistem üzerindeki etkileri ve ORÇ'nin ara soğutucu olarak kullanılmasının toplam sistem verimliliği üzerindeki etkilerini belirtmişlerdir. ORÇ tasarımı sıcaklık kaynağı ile iş akışkanı ısı transferinin gerçekleştiği ısı değiştiricilerinde optimum TPP sıcaklığı belirlenmesinin önemli olduğunu tespit etmişlerdir. $\Delta T_{PP,e}$ değerinin artmasıyla buharlaştırıcıya olan ısı transferi doğrusal olarak artarken ORÇ'nin ısıl veriminin azaldığı, fakat $\Delta T_{PP,e}$ değerine bağlı olarak ORÇ tarafından üretilen net gücün optimum noktasının olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile Brayton çevriminin ara soğutucusundan atılan ısının organik Rankine çevriminde kullanılmasıyla sistemin ısıl veriminin %0,2 ile %2,5 oranında arttığını belirtmişlerdir.

Sun vd. (2018), jeotermal ORÇ uygulamaları kapsamında $\Delta T_{PP,e}$ 'nin termodinamik performansına etkisini incelemişlerdir. $\Delta T_{PP,e}$ 'nin termodinamik ve ekonomik performans için önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Düşük $\Delta T_{PP,e}$ 'nin daha fazla türbin net gücünü sağlayacağı fakat ısı transfer alanını arttıracığı için ekonomik yönden olumsuz etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. 130 °C'den yüksek ısı kaynağı uygulamaları için $\Delta T_{PP,e}$ 'deki her 1 °C'lik azalma ile ORÇ'nin %1,7-2,6 arasında daha fazla güç ürettiği tespit edilmiştir. Güç

başına toplam alanın $\Delta T_{PP,e}$ 'nin yaklaşık 7 °C olduğu durumda minimum olduğu, daha sonra kısımla sıcaklığının artmasıyla birlikte arttığını belirtmişlerdir.

Sarkar (2018), ORÇ'de maksimum ısı geri kazanımı için $\Delta T_{PP,e}$ tasarımı ve optimizasyonu üzerinde çalışmıştır. $\Delta T_{PP,e}$ ve $\Delta T_{PP,k}$ 'yi anlık olarak belirleyebilen bir metod geliştirmiştir. Isı kaynağı ve soğutma suyunu bölgesini birlikte optimize ettiğinden önceki $\Delta T_{PP,e}$ tasarımlarından daha iyi bulunmuştur. Optimum noktalarda düşük kütleli debi gereksinimi, yüksek ekserji gerimi, düşük türbin boyutu bakımından amonyak akışkanında; yüksek güç çıktısı ve ısı geri kazanımı verimi bakımından ise izopentan akışkanında en iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

Behzadi vd. (2018), Tahran'da bulunan ORÇ entegre edilmiş santral üzerinde çok amaçlı optimizasyon ve ekserji-ekonomik analizi yapmışlardır. MATLAB kullanılarak GA tabanlı çok amaçlı optimizasyon tekniğinden yararlanmışlardır. Ekserji verimini ve toplam ürün birim maliyetini amaç fonksiyonu olarak belirlemişlerdir. R123 akışkanı ile 6000 kPa türbin giriş basıncı ve $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 5-25 °C ile değiştiği durumda en iyi performans değerlerine ulaşmışlardır.

Bademlioğlu vd. (2019), ORÇ'de $\Delta T_{PP,e}$ 'nin ekserji performansına etkisi üzerinde çalışmışlardır. $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 5-20 °C arasında değişmesinin farklı organik akışkanlar kullanılarak hazırlanan sistemlere etkisi belirlenmiştir. $\Delta T_{PP,e}$ değişimi ile, R152a ve R123 kullanıldığında ekserji verimindeki azalışın sırasıyla %11,7 ve %9,03 olduğunu tespit etmişlerdir. $\Delta T_{PP,e}$ ve organik akışkana bağlı olarak evaporatördeki tersinmezliğin %62,32 oranında azalabileceğini belirtmişlerdir.

Jankowski vd. (2019), çok amaçlı yaklaşım tekniğini kullanarak ORÇ sistemlerinde optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerini belirlemişlerdir. Ekonomi ve çevre olmak üzere iki amaç fonksiyonu üzerinde çalışmışlardır. Ekonomi fonksiyonunu toplam ısı transfer alanının net güce oranı; çevre fonksiyonunu ise toplam tersinmezliğin sıcak kaynaktaki ekserji düşüşüne oranı olarak tanımlamışlardır. Çalışmaları sonunda R245fa akışkanı kullanılarak optimum $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 7-10 °C arasında olması gerektiğine ulaşmışlardır.

Woodland vd. (2020), alternatif ORÇ konfigürasyonları üzerinde çalışma yapmışlardır. Bunlar iki fazlı flaş genişlemeli ORÇ ve zeotropik akışkanları kullanarak tasarlanmış ORÇ'dir. Çalışmalarında net güç maksimizasyonu amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. En yüksek ısı verimin görüldüğü noktada maksimum net güce ulaşılmadığı bundan dolayı da ısı verim maksimizasyondan daha önemli olarak net güç maksimizasyonunun incelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda, düşük ısı

kaynağı sıcaklıklarında ve yüksek kondenser fan gücünde zeotropik akışkanlı ORÇ'nin daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir.

Bu bölüm için kaynak araştırması incelendiğinde özellikle son yıllarda $\Delta T_{PP,e}$ üzerine çalışmaların arttığı görülmektedir. Fakat çoğu çalışmada $\Delta T_{PP,e}$ değişiminin sistemin performansına etkisi incelenmiştir. Tasarlanan ORÇ sistemleri için optimum $\Delta T_{PP,e}$ 'nin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olduğu gözükmemektedir. Bu çalışmada ise düşük sıcaklıklı ORÇ sistemleri için 8 akışkan ve yüksek sıcaklıklı ORÇ sistemleri için ise 6 akışkan için değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerleri belirlenmiştir. Tasarımda bir önceki bölümde en iyi performans gösteren akışkanlar kullanılmıştır. Optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerlerinin belirlenmesi ile ORÇ tasarım değerleri belirlenmiştir.

Optimum olarak belirlenen $\Delta T_{PP,e}$ değerleri kullanılarak tasarlanan ORÇ sistemlerinin 6 farklı amaç fonksiyonu altında çok amaçlı GA optimizasyon tekniği ile termodinamik optimizasyonu yapılmıştır. Kaynak araştırmasında çoğu çalışmada bir veya iki amaç fonksiyonu altında optimum değerlerin belirlendiği görülmüştür. Fakat yapılan çalışmada amaç fonksiyonu sayısının fazla olması gerektiği görülmüştür. Enerji analizinde kapsamında ısı verim ve türbin gücü maksimizasyonu ele alınarak belirlenen optimum akışkanların bile farklı bulunduğu görülmüştür. Bundan dolayı bu çalışmada enerji ve ekserji performansı, türbin performansı ve ayrıca sürdürülebilirlik performansı amaç fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Bu amaç fonksiyonlarında en iyi değere ulaşan akışkanın diğer akışkanlara göre ortalama performans artış yüzdesi baz alınarak elde edilen ağırlık fonksiyonu sonucunda değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için optimum akışkanlar belirlenmiştir.

4.2. Materyal ve Yöntem

ORÇ'de farklı ısı kaynağı sıcaklıkları için evaporatör pinch noktası sıcaklığı ($T_{p,e}$) ile organik akışkanın buharlaşma sıcaklığı arasında görülen farkın sistem performansına etkisi belirlenmiştir. Bu görülen fark, evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı ($\Delta T_{PP,e}$) olarak tanımlanmıştır. Aynı şekilde kondenser pinch noktası ($T_{p,k}$) ile organik akışkanın yoğuşma sıcaklığı arasındaki fark da kondenser pinch noktası sıcaklık farkı ($\Delta T_{PP,k}$) olarak tanımlanmıştır. $\Delta T_{PP,e}$ ve $\Delta T_{PP,k}$ Şekil 4.1'de verilen ORÇ'nin çalışma prensibi ve T-s diyagramından görülmektedir.

Bu tez çalışmasında tüm ısı kaynağı sıcaklıklarında evaporatör etkenliği (ϵ) %75 olarak sabit kabul edilmiştir. Ayrıca ısı kaynağı tarafındaki sıcak suyun hacimsel debisi düşük kapasiteli ORÇ çalışmaları referans alınarak 1000 L/h olarak kabul edilmiştir.

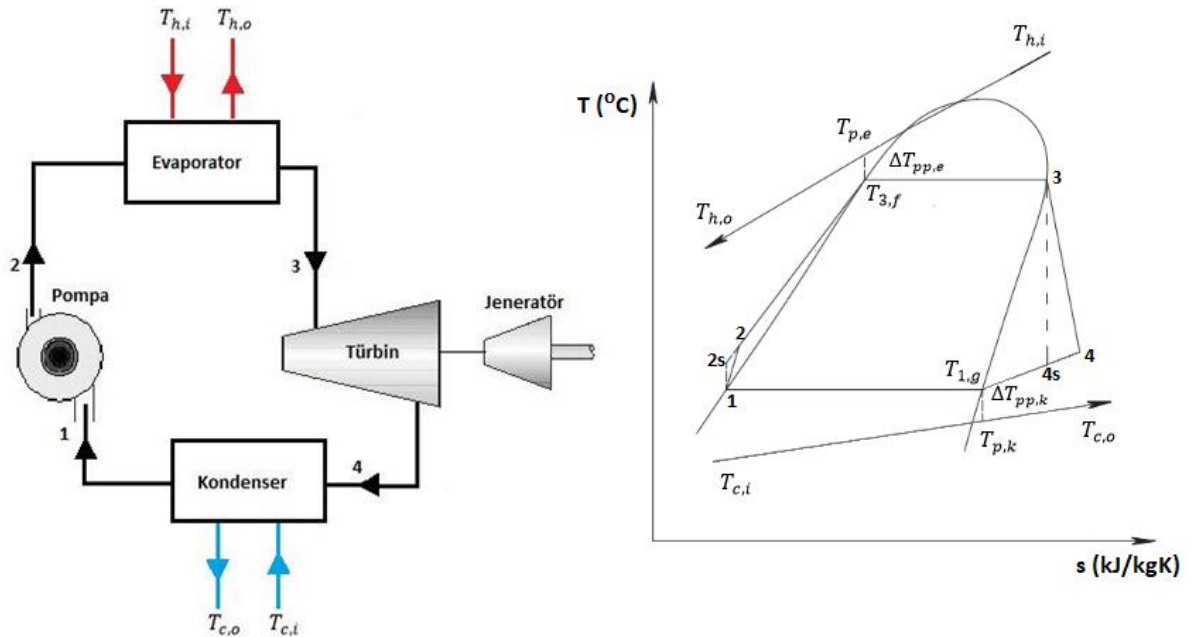
Bu değerler dışında tez çalışmasında sabit kabul edilen değerler: Türbin ve pompa izantropik verimleri (η_t, η_p) %75, $\Delta T_{PP,k}$ ve soğutma suyu sıcaklığı ($T_{c,i}$) sırasıyla 5 ve 25 °C, ölü nokta basıncı ve sıcaklığı sırasıyla 100 kPa ve 25 °C olarak sabit kabul edilmiştir. Tez çalışmasının diğer bölümlerinde $\eta_t, \eta_p, \Delta T_{PP,k}$ ve $T_{c,i}$ değerlerinin değişmesi ile sistem performansı üzerindeki etkisi ayrıca tespit edilmiştir.

Bu bölümde yapılan diğer kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- Bütün prosesler kararlı şartlardadır.
- Evaporatör ve kondenserdeki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Boru hatlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir (Bu bölümün son kısmında evaporatör ve kondenserde meydana gelebilecek basınç kayıplarının amaç fonksiyonu parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir).
- Analizde tüm ekipmanlar adyabatik olarak kabul edilmiş ve yüzeyleri ile çevre arasında bir ısı transferinin olmadığı varsayılmıştır.
- Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

Bu bölümde bağımsız değişkenler ise ısı kaynağı sıcaklığı ($T_{h,i}$) ve $\Delta T_{PP,e}$ olarak belirlenmiştir. Isı kaynağı sıcaklığı 90 °C ile 290 °C arasında 10 farklı değerde değiştirilmiştir.

$\Delta T_{PP,e}$ ise düşük sıcaklık uygulamalarında 1 °C ile 15 °C arasında; yüksek sıcaklık uygulamalarında ise 10 °C ile 40 °C arasında değiştirilmiştir.



Şekil 4.1. ORÇ Çalışma prensibi ve $\Delta T_{PP,e}$ ile $\Delta T_{PP,k}$ 'nın T-s diyagramında gösterilmesi

Termodinamik optimizasyon bağıntıları Denklem 4.1 ile 4.22 arasında verilmiştir. Analiz denklemleri uygulanma sırası ile belirtilmiştir.

- 1.adım;

Evaporatör etkenliği (ϵ):

$$\epsilon = (T_{h,i} - T_{p,e}) / (T_{h,i} - T_{3,f}) \quad (4.1)$$

$$\Delta T_{PP,e} = T_{p,e} - T_{3,f} \quad (4.2)$$

Denklem (4.1) ve denklem (4.2)'de $T_{p,e}$ ve $T_{3,f}$ bilinmemektedir. Denklemlerin birlikte çözülmesiyle bu iki değer belirlenir.

- 2.adım;

Evaporatör'ü buharlaştırıcı ve ön ısıtma olarak düşünürsek;

İlkönce buharlaştırıcı ısısı, Q_B (kW) hesaplanır.

$$Q_B = \dot{m}_h C_p (T_{h,i} - T_{p,e}) \quad (4.3)$$

Organik akışkanın kütleli debisi, (kg/s) hesaplanır.

$$\dot{m}_{ORÇ} = Q_B / (h_3 - h_{3,f}) \quad (4.4)$$

Ön ısıtma ısısı, $Q_{\ddot{O}}$ (kW) hesaplanır.

$$Q_{\ddot{O}} = \dot{m}_{ORÇ} (h_{3,f} - h_2) \quad (4.5)$$

Evaporatör kapasitesi (kW) belirlenir.

$$Q_E = Q_B + Q_{\ddot{O}} \quad (4.6)$$

Isı kaynağı çıkış sıcaklığı belirlenir.

$$T_{h,o} = T_{h,i} + Q_E / (\dot{m}_h C_p) \quad (4.7)$$

- 3.adım;

Soğutma suyu debisi (kg/s) ve soğutma suyu çıkış sıcaklığı kondenser enerji dengesi bağıntıları kullanılarak hesaplanır.

$$\Delta T_{pp,k} = (T_{1,g} - T_{p,k}) \quad (4.8)$$

$$\dot{m}_{ORÇ} * (h_{1,g} - h_1) = \dot{m}_c * C_p * (T_{p,k} - T_{c,i}) \quad (4.9)$$

$$\dot{m}_{ORÇ} * (h_{4a} - h_1) = \dot{m}_c * C_p * (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (4.10)$$

- 4.adım;

Pompa gücü (kW) ve türbin gücü (kW) hesaplanır.

$$W_p = \dot{m}_{ORÇ} (h_2 - h_1) \quad (4.11)$$

$$W_T = \dot{m}_{ORÇ} (h_3 - h_4) \quad (4.12)$$

Net güç (kW) ve ısı verim belirlenir.

$$W_{NET} = W_T - W_P \quad (4.13)$$

$$\eta_{ISIL} = W_{NET} / Q_E \quad (4.14)$$

- 5.adım;

Sistem bileşenlerinde oluşan tersinmezlik değerleri ve ekserji verimi hesaplanır. Ekserji analizi için Çizelge 3.1’de verilen tersinmezlik bağıntılarından yararlanılmıştır. Ayrıca, bulunan değerler Denklem 4.12 ile 4.19 arasında verilen ekserji bağıntıları ile teyit edilmiştir.

Özgül ekserji, e (kJ/kg);

$$e_i = h_i - h_0 - (T_0 (s_i - s_0)) \quad (4.15)$$

Denklem 4.12’de i değeri ekserjisi hesaplanacak durumu, 0 indisi ise ölü durum değerini ifade etmektedir.

Sistem bileşenleri tersinmezlik değerleri, I (kW);

$$I_p = \dot{m}_{ORÇ} (e_1 - e_2) + W_p \quad (4.16)$$

$$I_e = \dot{m}_h (e_{h,i} - e_{h,o}) - \dot{m}_{ORÇ} (e_3 - e_2) \quad (4.17)$$

$$I_t = \dot{m}_{ORÇ} (e_3 - e_4) - W_t \quad (4.18)$$

$$I_k = \dot{m}_{ORÇ} (e_4 - e_1) - \dot{m}_c (e_{c,o} - e_{c,i}) \quad (4.19)$$

$$I_{toplam} = I_p + I_e + I_t + I_k \quad (4.20)$$

Giren ekserji, E_{giren} (kW);

$$E_{giren} = \dot{m}_h [h_{h,i} - h_{h,o} - (T_0 (s_{h,i} - s_{h,o}))] \quad (4.21)$$

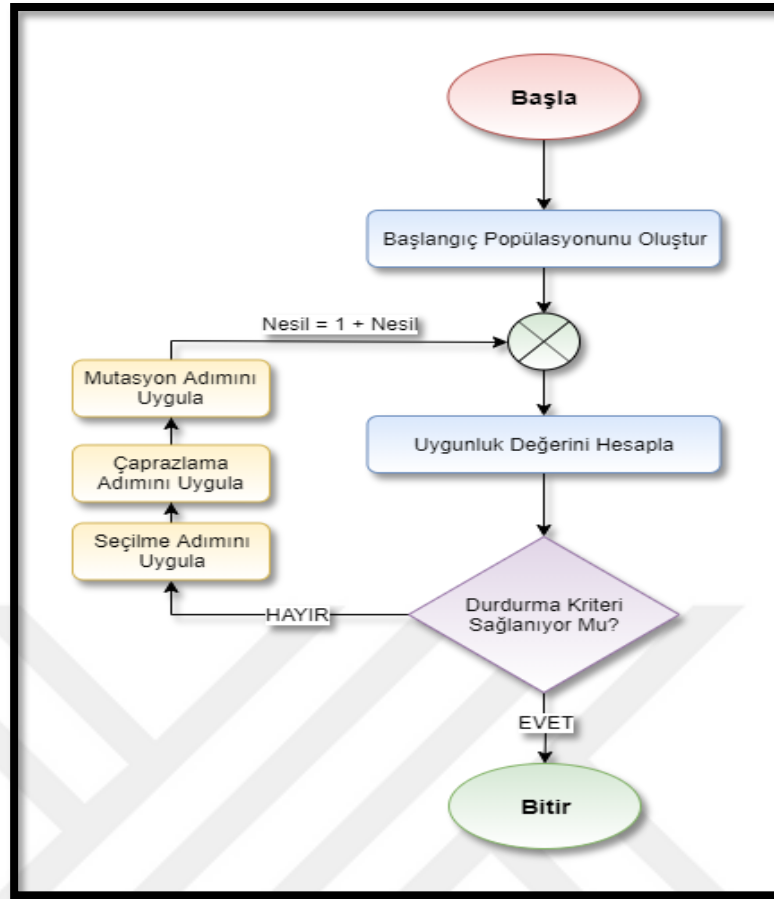
$$\eta_{II} = (E_{giren} - I_{toplam}) / E_{giren} = W_{net} / E_{giren} \quad (4.22)$$

Bu bölümde ilk olarak değişik ısı kaynaklı ORÇ sistemleri için farklı akışkanların buharlaşma sıcaklıkları altında oluşabilecek optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerleri belirlenmiştir. Daha sonra farklı amaç fonksiyonları altında sistemin değerlendirilmesiyle değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için uygun akışkan tespit edilmiştir. Genetik algoritma optimizasyon tekniğinden yararlanılmıştır.

Genetik Algoritma

Genetik algoritma (GA), optimizasyon ve arama problemlerine gerçek veya yaklaşık çözümler bulmak için hesaplamada kullanılan bir arama tekniğidir. GA, evrimsel biyolojinin kalıtım, mutasyon, seleksiyon ve çaprazlama gibi yöntemlerden esinlenen teknikleri kullanan belirli bir evrimsel algoritma sınıfıdır. Evrim, genellikle rastgele oluşturulmuş bireylerin bir popülasyonundan başlar ve nesiller halinde gerçekleşir. Her jenerasyonda, her birinin uygunluk popülasyonundaki birey değerlenir, birden fazla kişi mevcut popülasyondan seçilir ve yeni bir popülasyon oluşturmak için modifiye edilir. Yeni popülasyon, algoritmanın bir sonraki iterasyonunda kullanılır. Algoritma, azami sayıda kuşak üretildiğinde veya popülasyon için tatmin edici bir uygunluk seviyesine ulaşıldığında sona erer (Topaloğlu, 2018).

Basit ORÇ'nin genetik algoritma ile termodinamik optimizasyonunda turnuva seçim yöntemi kullanılmıştır. GA'nın çalışma prensibine ait akış diyagramı Şekil 4.2'de; GA'ya ait işlem parametreleri ise Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.2. GA çalışma prensibi

Çizelge 4.1. GA işlem parametre değerleri

GA İşlem Parametreleri	Değerler
Birey Sayısı	256
Maksimum kuşak sayısı	1024
Amaç fonksiyonu toleransı	0,0001
Çaprazlama oranı	0,75
Mutasyon oranı	0,2

Yapılan termodinamik optimizasyonda bazı akışkanlarda belli bir $\Delta T_{PP,e}$ değerinden sonra sistemin türbin gücünün değerinin azalmaya başladığı görülmüştür. $\Delta T_{PP,e}$ değişimi ile sisteme sağlanması gereken ısı girdisi artmış, bununla birlikte organik akışkanın kütleli debisi artış göstermiştir. Fakat aynı zamanda $\Delta T_{PP,e}$ değişimi ile buharlaşma basıncı azalarak türbindeki entalpi farkı da azalış göstermiştir. Entalpi farkının azalmasının kütleli debi artışından fazla olduğu noktada sistemin net gücünün azalmaya başladığı tespit edilmiştir (Kaşka vd. 2018).

Bundan dolayı 10 farklı ısı kaynağı sıcaklığı altında organik akışkanların optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktaları belirlenmiştir. Daha sonra sistem 3 farklı türden performans parametresi altında incelenmiştir. Bu çalışmada ilgili performans terimleri literatürde yaygın olarak kullanılan İngilizce kısaltmalar ile kullanılmıştır.

Bunlar;

- **ORÇ Termodinamik Performansı:** Sistemin termodinamik performansı; ısı verim, türbin gücü, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik parametreleri yönünden incelenmiştir. Bu değerlere ilişkin bağıntılar Çizelge 3.1’de ve denklem 4.8-4.19’da verilmiştir.
- **ORÇ Türbin Performansı:** ORÇ performansında önemli bir yere sahip olan türbinin tasarım parametreleri ayrıca incelenmiştir. Bu parametreler, hacimsel debi oranı (Volumetric Flow Ratio-VFR), türbin boyut parametresi (Size Parameter-SP), türbin basınç oranı (Pressure Ratio-PR)’dır. Bu değerlere ilişkin bağıntılar denklem 4.23-4.27’de verilmiştir. Düşük VFR sahip ORÇ sistemleri yüksek türbin verim değerlerine ulaşabilmektedir. Ayrıca yüksek SP değerleri ise yüksek türbin boyutu gerektirmektedir.

$$\dot{m}_{ORC} = \rho_3 \dot{V}_3 \quad (4.23)$$

$$\dot{m}_{ORC} = \rho_4 \dot{V}_4 \quad (4.24)$$

$$VFR = \dot{V}_4 / \dot{V}_3 \quad (4.25)$$

$$SP = \frac{\sqrt{\dot{V}_4}}{[(h_3 - h_{4S})\eta_t]^{1/4}} \quad (4.26)$$

$$PR = P_3 / P_4 \quad (4.27)$$

- **ORÇ Termodinamik Sürdürülebilirlik İndeksleri:** ORÇ sisteminde akışkanın termodinamik performansı kadar o akışkanın kullanılması durumundaki çevresel etkisi de önemli bir yer tutmaktadır. Bu kapsamda atık ekserji oranı (Waste Exergy Ratio-WER), çevresel etki faktörü (Environmental Effect Factor-EEF), ekserji sürdürülebilirlik indeksi (Exergy Sustainability Index-ESI) incelenmiştir. Bu değerlere ilişkin bağıntılar denklem 4.28-4.30’da verilmiştir.

$$WER = I_{toplam} / E_{harcanan} \quad (4.28)$$

$$EEF = WER / \eta_{u1} \quad (4.29)$$

$$ESI = 1/EEF \quad (4.30)$$

Bu farklı kategorilerdeki performans parametreleri ile ilgili 6 farklı amaç fonksiyonunun tanımlanmasıyla değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için optimum akışkan belirlenmiştir. Bunlar;

- **$f_1(x)$: $\max (\eta_{\text{ısı}})$** ; Isıl verim maksimizasyonu
- **$f_2(x)$: $\max (W_T)$** ; Türbin gücü maksimizasyonu
- **$f_3(x)$: $\max (\eta_{\text{II}})$** ; Ekserji verimi maksimizasyonu
- **$f_4(x)$: $\min (I_T)$** ; Toplam tersinmezlik minimizasyonu
- **$f_5(x)$: $\min (VFR)$** ; Hacimsel debi oranı minimizasyonu
- **$f_6(x)$: $\min (EEF)$** ; Çevresel etki değeri minimizasyonu

$G(x)$ ağırlık fonksiyonu istenilen amaç fonksiyonuna ulaşan akışkanın diğerlerine göre sağladığı performans artış yüzdesi değerlendirilerek belirlenmiştir. Sistemde en düşük türbin gücü 1 kW; en yüksek türbin gücü ise düşük sıcaklıklı ORÇ için 10 kW, yüksek sıcaklıklı ORÇ için ise 50 kW olarak ayarlanmıştır. En düşük türbin giriş sıcaklığı 70 °C; türbin çıkışı kuruluk derecesi ($X_{4,\text{min}}$) ise en düşük %85 olması istenmiştir. Basit ORÇ'nin çok amaçlı GA ile termodinamik optimizasyonunda belirlenen sınır şartlar aşağıda belirtilmiştir.

- $T_3 \leq T_{\text{kritik}}$
- $T_{3,\text{min}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
- $W_{T,\text{min}} = 1 \text{ kW}$
- $W_{T,\text{max}} = 10 \text{ kW}$ (ORÇ Düşük Sıcaklıklı Uygulamalar)
- $W_{T,\text{max}} = 50 \text{ kW}$ (ORÇ Yüksek Sıcaklıklı Uygulamalar)
- $I_p \geq 0; I_e \geq 0; I_t \geq 0; I_k \geq 0;$
- $X_{4,\text{min}} = \%85$
- $P_{e,\text{min}} = 1,5 P_k$
- $P_{e,\text{max}} = \min (4000 \text{ kPa}, 1,4P_{\text{kritik}})$
- $5 < \Delta T_{\text{soğutma suyu}} < 10$

ORÇ uygulamalarında farklı amaç fonksiyonları altında optimum akışkanın belirlenmesi için Bölüm 3'te en iyi performans gösteren akışkanlar kullanılmıştır. İlk olarak 10 farklı ısı kaynağı sıcaklığı altında incelenen ORÇ sistemi için optimum $\Delta T_{\text{PP,e}}$ değerleri farklı akışkan için ayrı ayrı belirlenmiştir. $\Delta T_{\text{PP,e}}$ değişiminin türbin gücü değerleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi için GA optimizasyon tekniği uygulanmıştır. Sistemin başlangıç $\Delta T_{\text{PP,e}}$ değeri 1 °C olarak düzenlenmiştir, fakat GA sınır koşulları gereğince organik akışkanların

kritik sıcaklıkları dikkate alınarak minimum $\Delta T_{PP,e}$ değeri sistem tarafından belirlenmiştir. Maksimum $\Delta T_{PP,e}$ değeri de yine GA sınır koşulları gereğince belirlenerek optimizasyon tamamlanmıştır.

Bu çalışmanın amacı bir önceki bölümde en iyi performans gösteren akışkanların kullanılmasıyla tasarlanan değişik ısı kaynağı sıcaklığına sahip ORÇ sistemleri için optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinin belirlenmesidir. Daha sonra çok amaçlı GA optimizasyon tekniği kullanılmasıyla 6 farklı amaç fonksiyonunun birlikte değerlendirilmesiyle 10 farklı ısı kaynağı sıcaklığı için uygun organik akışkanın belirlenmesi amaçlanmıştır.

4.3. Model Doğrulanması

GA optimizasyon tekniği kullanılarak elde edilen verilerin doğruluğunu tespit etmek için kaynak araştırması kapsamında belirlenen iki çalışmadan yararlanılmıştır. Çizelge 4.2’de iki farklı çalışma için aynı tasarım parametreleri altında üç farklı organik akışkan kullanılarak belirlenen net güç değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.2 incelendiğinde hazırlanan termodinamik modelin başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmektedir.

Çizelge 4.2. GA kullanılarak elde edilen verilerin aynı tasarım parametreleri kullanılarak başka bir çalışma ile karşılaştırılması

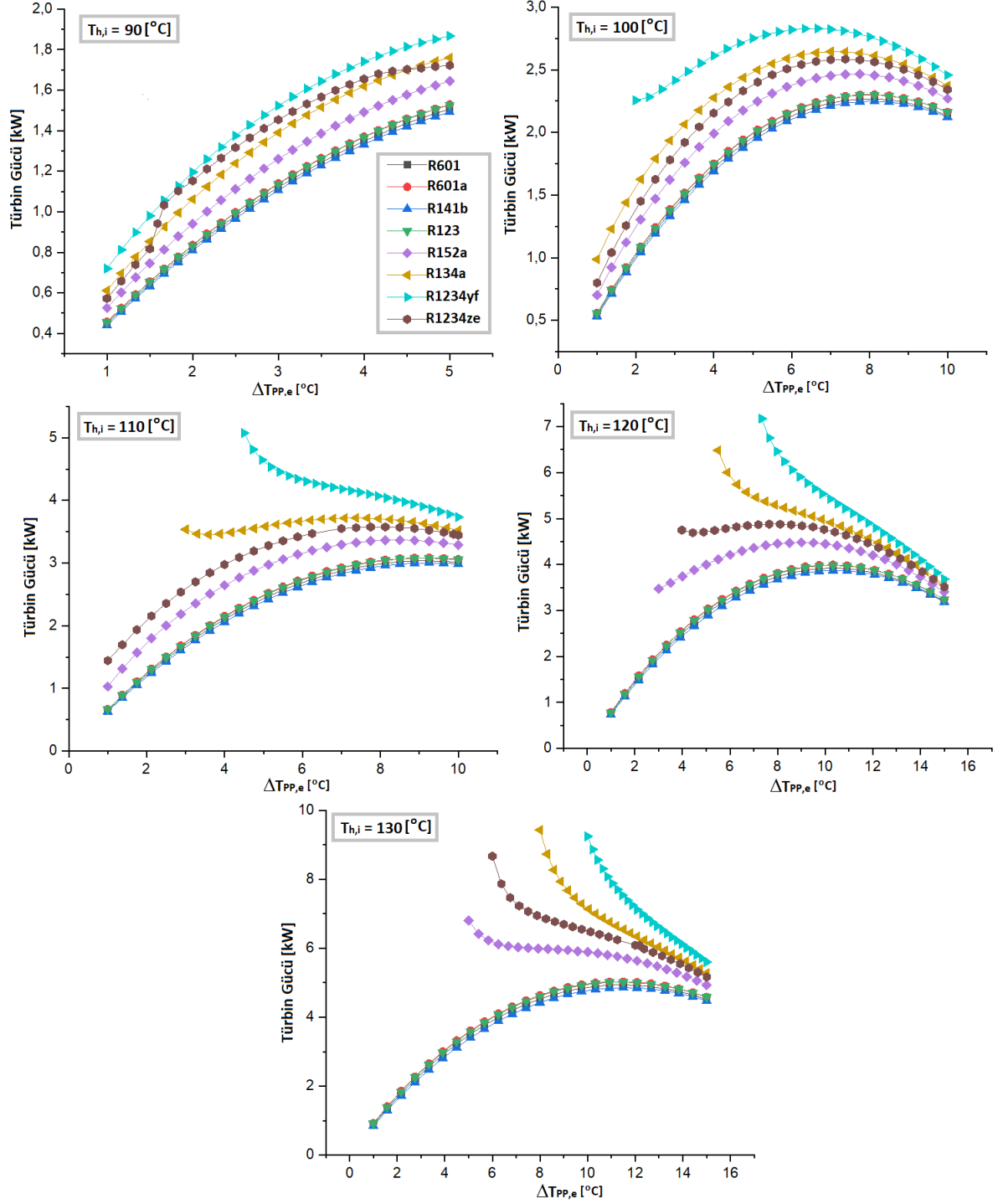
Tasarım Parametreleri	Isı Kaynağı Sıcaklığı: 150 °C; Soğutma Suyu Sıcaklığı: 20 °C; $\Delta T_{PP,e} + \Delta T_{PP,k} = 20$ °C Türbin ve pompa izantropik verimi: %85 ve %80				Buharlaşma Sıcaklığı: 80 °C $\Delta T_{PP,e} = 8$ °C Türbin ve pompa izantropik verimi: %80 ve %70	
Organik Akışkanlar	R113		R11		R245fa	
Performans Parametreleri	Mevcut Çalışma	Wang (2017)	Mevcut Çalışma	Wang (2017)	Mevcut Çalışma	Jankowski (2019)
Net Güç (kW)	73,12	73,91	70,24	70,93	50,2	51,0

4.4. Araştırma Bulguları ve Tartışma

4.4.1. Düşük Sıcaklıklı ORÇ Uygulamaları İçin Termodinamik Optimizasyon Sonuçları

Şekil 4.3’te sırasıyla 90 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C ve 130 °C ısı kaynağı sıcaklıkları için $\Delta T_{PP,e}$ değişiminin sistemin türbin gücü değerlerine etkisi görülmektedir. Bu şekiller incelendiğinde;

- 90 °C ısı kaynağı sıcaklığı için belirlenen optimizasyon sonuçları hariç diğer tüm ısı kaynağı sıcaklıklarında belli bir $\Delta T_{PP,e}$ değerinden sonra türbin gücünün azalmaya başladığı görülmektedir.
- Islak akışkan ve yeni-nesil organik akışkanlar için belli bir ısı kaynağı sıcaklığı değerinden sonra $\Delta T_{PP,e}$ 'nin türbin gücüne etkisi diğer akışkanlardan daha farklı bir şekilde gerçekleşmiştir.
- Diğer akışkanlarda düşük $\Delta T_{PP,e}$ değerlerinde düşük türbin gücü elde edilmiş, $\Delta T_{PP,e}$ arttıkça türbin gücü değeri artmış, belli bir değerden sonra ise azalış göstermiştir.
- Fakat ıslak akışkan ve yeni-nesil organik akışkanlarda sistemin sağladığı minimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinde yüksek türbin gücü değeri sağlanmış, $\Delta T_{PP,e}$ arttıkça türbin gücünün ya aynı oranda kaldığı ya da direkt azalmaya başladığı görülmüştür.
- Bu akışkanlar, 100 °C ısı kaynağı sıcaklığı için R1234yf; 110 °C için R1234yf ve R134a; 120 ve 130 °C için R1234yf, R1234ze, R134a ve R152a'dır.
- Bu akışkanların düşük kritik sıcaklığa sahip olmalarından dolayı ısı kaynağı sıcaklığı arttıkça minimum $\Delta T_{PP,e}$ noktası da artış göstermiştir.



Şekil 4.3. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için $\Delta T_{PP,e}$ değişiminin net güce etkisinin belirlenerek optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinin elde edilmesi

8 farklı akışkanın 5 farklı ısı kaynağı sıcaklığı altında maksimum türbin gücünün elde edildiği optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktaları Çizelge 4.3'te özetlenmiştir. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında tüm akışkanlarda $\Delta T_{PP,e}$ değerinin aynı olduğu, diğer sıcaklıklarda ise kuru ve izantropik akışkanların aynı $\Delta T_{PP,e}$ değerine sahip olduğu dikkat çekmektedir.

Çizelge 4.3. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için değişik ısı kaynağı sıcaklıkları altında farklı akışkanlar için optimum $\Delta T_{pp,e}$ değerinin belirlenmesi

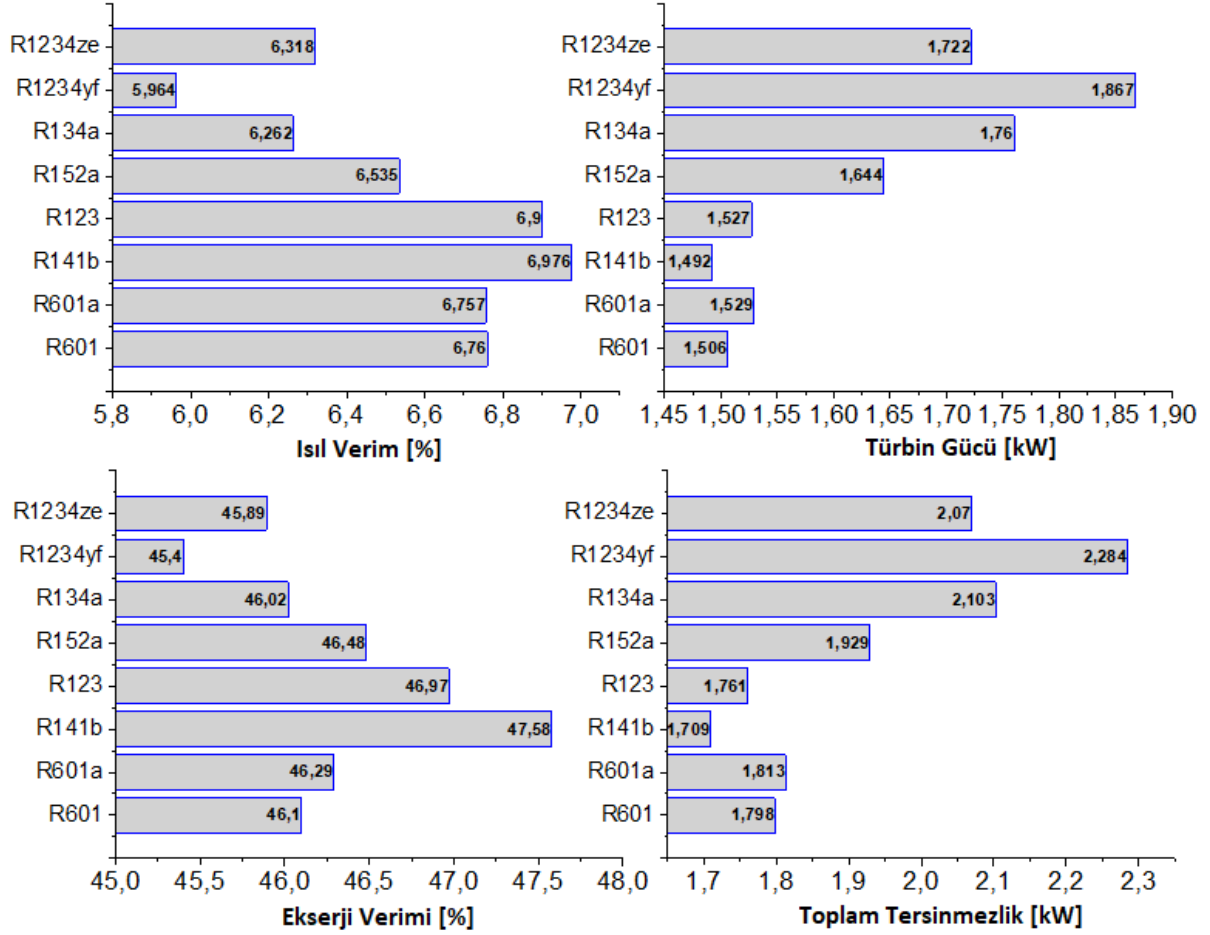
$T_{h,i}$	Optimum $\Delta T_{pp,e}$ (°C)							
	R601a	R601	R141b	R123	R152a	R134a	R1234yf	R1234ze
90 °C	5							
100 °C	8,125				7,75	7	6,67	7,38
110 °C	9,25				8,5	7,375	4,5	8,125
120 °C	10,33				9	5,5	7,33	3,98
130 °C	11,5				5	8	10	6

8 farklı akışkan için Çizelge 4.3'te belirtilen optimum $\Delta T_{pp,e}$ noktası altında istenen amaç fonksiyonları doğrultusunda çalıştırılmasıyla elde edilen optimizasyon sonuçlarına ilişkin grafikler farklı ısı kaynakları için ayrı ayrı aşağıda verilmiştir.

➤ $T_{h,i} = 90$ °C için;

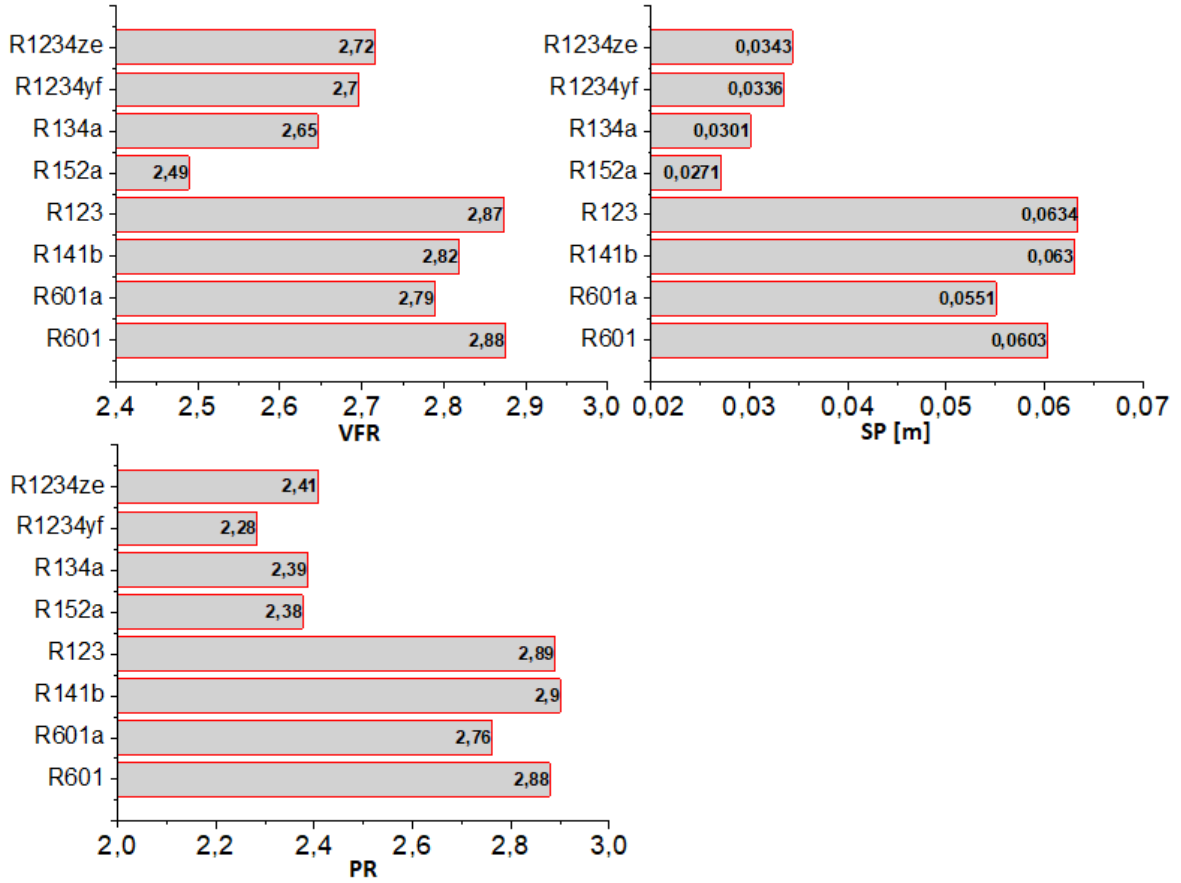
Şekil 4.4'te 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{pp,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları ısı verim, türbin gücü, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik değerleri görülmektedir.

- Isıl verim maksimizasyonu bakımından en iyi durumda olan akışkanın R141b olduğu görülmektedir. Fakat türbin gücü olarak ise R1234yf akışkanın önde olduğu görülmektedir.
- R1234yf'li sistemde ısı girdisi ihtiyacının fazla olmasından dolayı ısı verimi yüksek bulunmamıştır. R141b'li sistemde R1234yf'ye göre %16,9 daha fazla ısı verim elde edilmiştir. Fakat, R1234yf'li sistemde R141b'den %25,1 daha fazla türbin gücü elde edilmiştir.
- Ekserji verimi maksimizasyonu ve toplam tersinmezlik minimizasyonu değerlerinde ise yine R141b'nin önde olduğu görülmektedir.



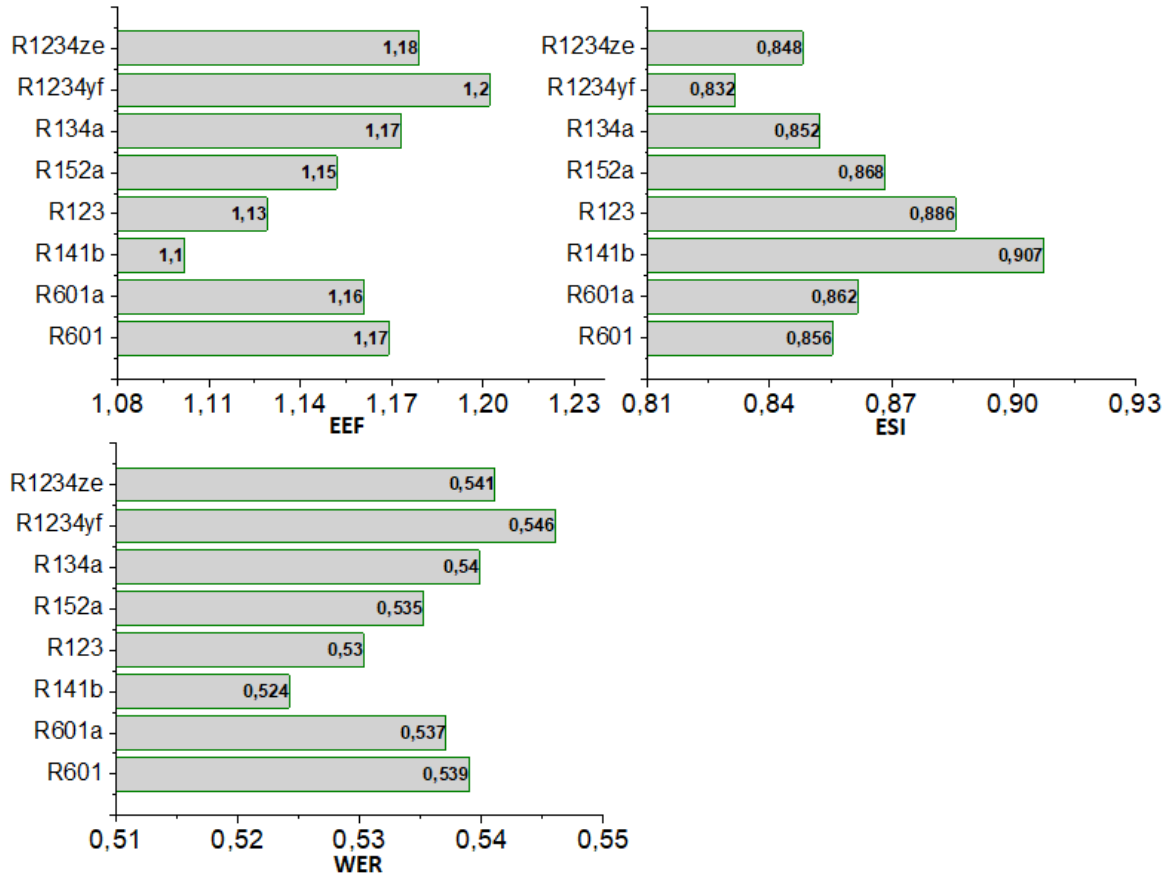
Şekil 4.4. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.5'te 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{pp,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları hacimsel debi oranı, türbin boyut parametresi ve türbin basınç oranı yer almaktadır. Diğer akışkanlara kıyasla R152a'nın çok düşük VFR ve SP değerine sahip olduğu görülmektedir. Türbin basınç oranı değerlerinde ise en düşük değer R1234yf'de olduğu belirtilmiştir.



Şekil 4.5. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.6'da 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları termodinamik sürdürülebilirlik indeksleri yer almaktadır. En düşük çevresel etki faktörünün R141b akışkanında elde edildiği görülmektedir. R1234yf'li sistemin EEF değerinin R141b'li sistemden %9,1 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.6. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi

Çizelge 4.4'te 90 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında belirlenen amaç fonksiyonları için en iyi performans gösteren akışkanlar özetlenmiştir. Çizelgede amaç fonksiyonları altında optimum olarak belirlenen akışkanın diğer akışkanlara göre ortalama performans artış yüzdesi belirtilmiştir. Performans artış yüzdelere göre belirlenen ağırlık fonksiyonu sonucu 90 °C ısı kaynağı sıcaklığı için %51 oranında R141b optimum akışkan olarak belirlenmiştir.

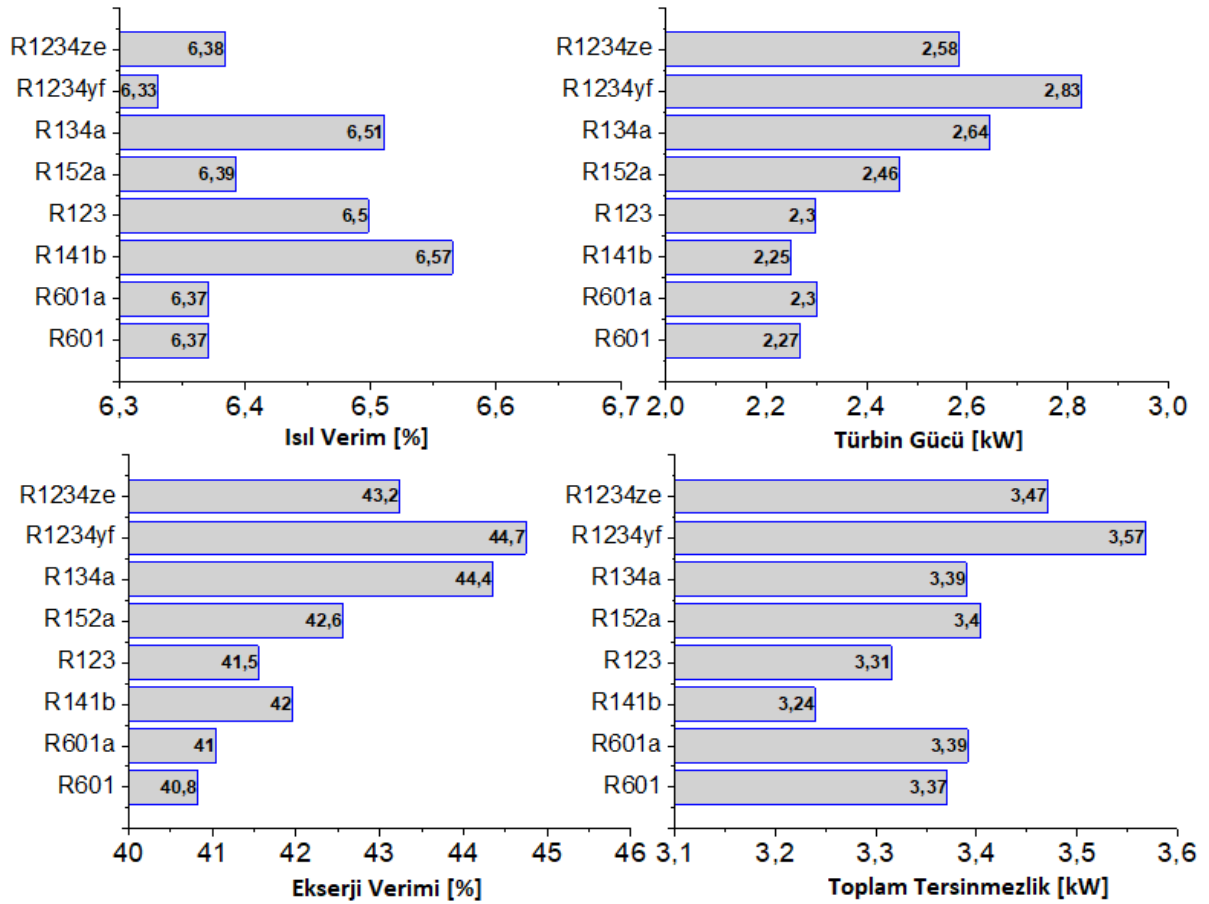
Çizelge 4.4. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi

$T_{h,i}$	$f_1(x)$ max (η_{Isil})	$f_2(x)$ max (W_T)	$f_3(x)$ max (η_{II})	$f_4(x)$ min (I_T)	$f_5(x)$ min (VFR)	$f_6(x)$ min (EEF)	G(x)
90 °C	R141b (%7,58)	R1234yf (%17,36)	R141b (%3,07)	R141b (%12,34)	R152a (%10,17)	R141b (%5,49)	%51, R141b %31, R1234yf %18, R152a

➤ $T_{h,i} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ için;

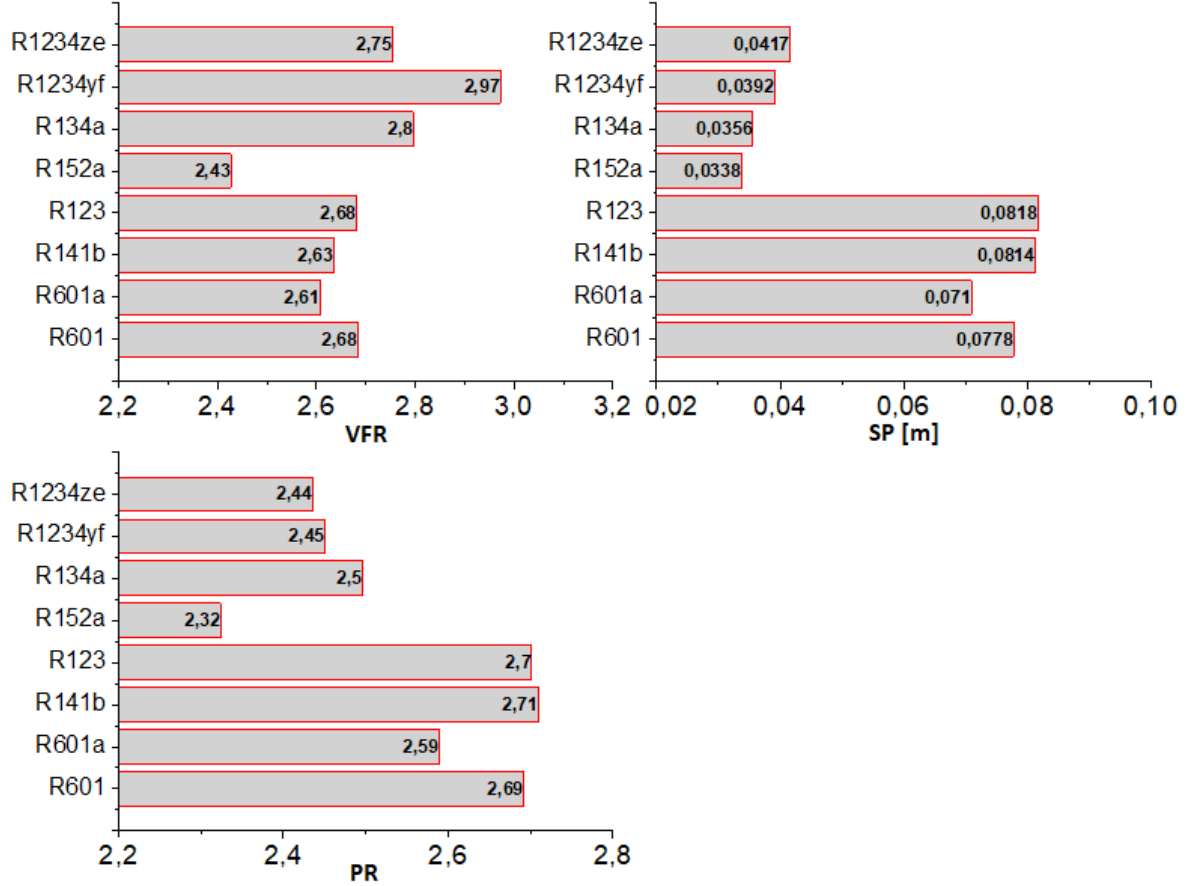
Şekil 4.7’de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları ısı verim, türbin gücü, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik değerleri görülmektedir.

- Isıl verimde R141b önde olmasına rağmen türbin gücünde yine R1234yf öndedir. Fakat $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ısı kaynağı sıcaklığından farklı olarak ekserji veriminde R1234yf’nin önde olduğu görülmektedir.
- R1234yf’li sistemin ekserji verimi R141b’li sistemden %6,4 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Fakat toplam tersinmezlik değerinde en düşük değer R141b’de elde edilmiştir.
- Toplam tersinmezlik değeri düşük olmasına rağmen geri kazanılan ekserji değerinin R1234yf’de daha fazla olması nedeniyle R141b’nin ekserji verimi daha düşük bulunmuştur.



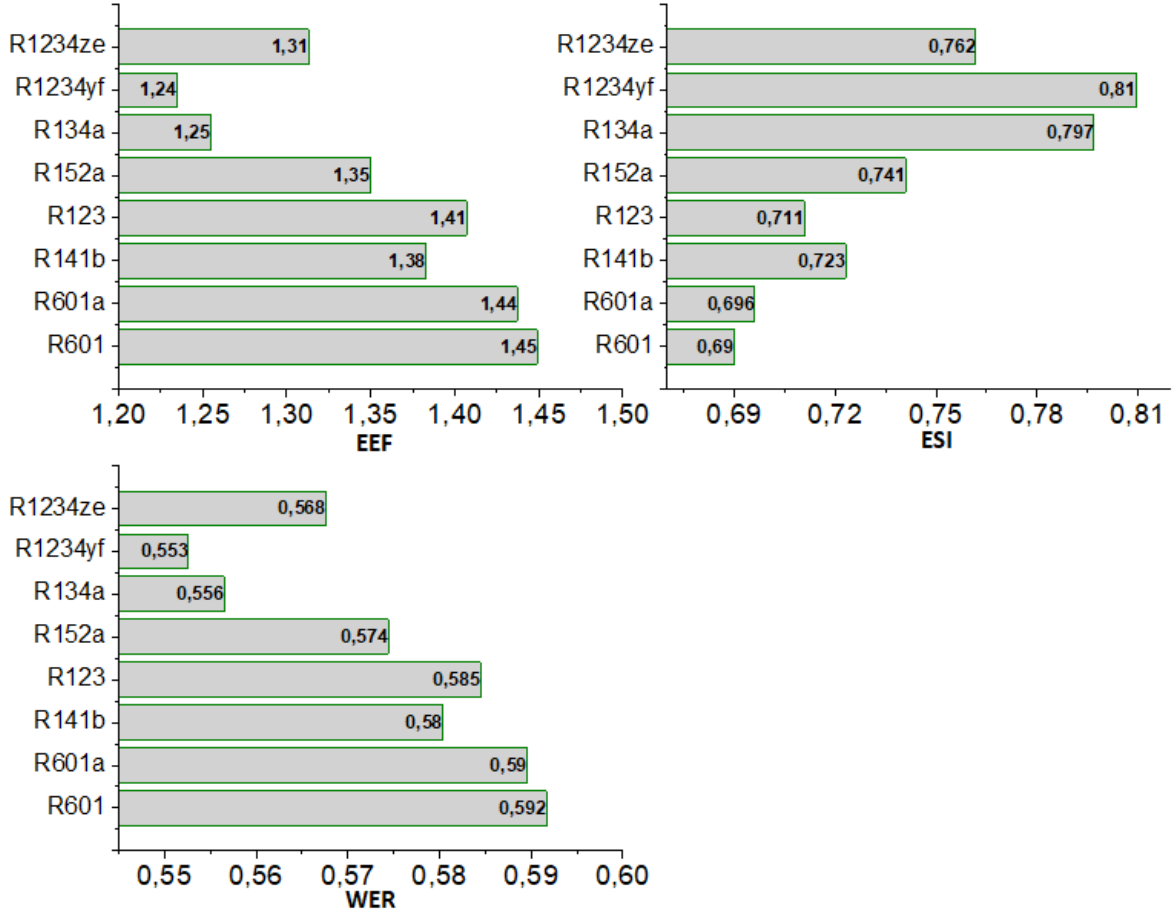
Şekil 4.7. $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.8’de 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{pp,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları hacimsel debi oranı, türbin boyut parametresi ve türbin basınç oranı yer almaktadır. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında olduğu gibi en düşük VFR ve SP değerleri R152a’da elde edilmiştir. Türbin basınç oranında da 2,32 değeri ile R152a’nın en düşük değere sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8. 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.9’da 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{pp,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları termodinamik sürdürülebilirlik indeksleri yer almaktadır. En düşük EEF değeri R1234yf’de elde edilmiştir. R1234yf’nin, 90 °C’de R141b’li sistemden %9,1 daha fazla EEF değerine sahip iken, 100 °C’de %10,1 daha az EEF değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.9. 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi

Çizelge 4.5'te 100 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında belirlenen amaç fonksiyonları için en iyi performans gösteren akışkanlar özetlenmiştir. Çizelgede amaç fonksiyonları altında optimum olarak belirlenen akışkanın diğer akışkanlara göre ortalama performans artış yüzdesi belirtilmiştir. Performans artış yüzdelere göre belirlenen ağırlık fonksiyonu sonucu 100 °C ısı kaynağı sıcaklığı için %65 oranında R1234yf optimum akışkan olarak belirlenmiştir.

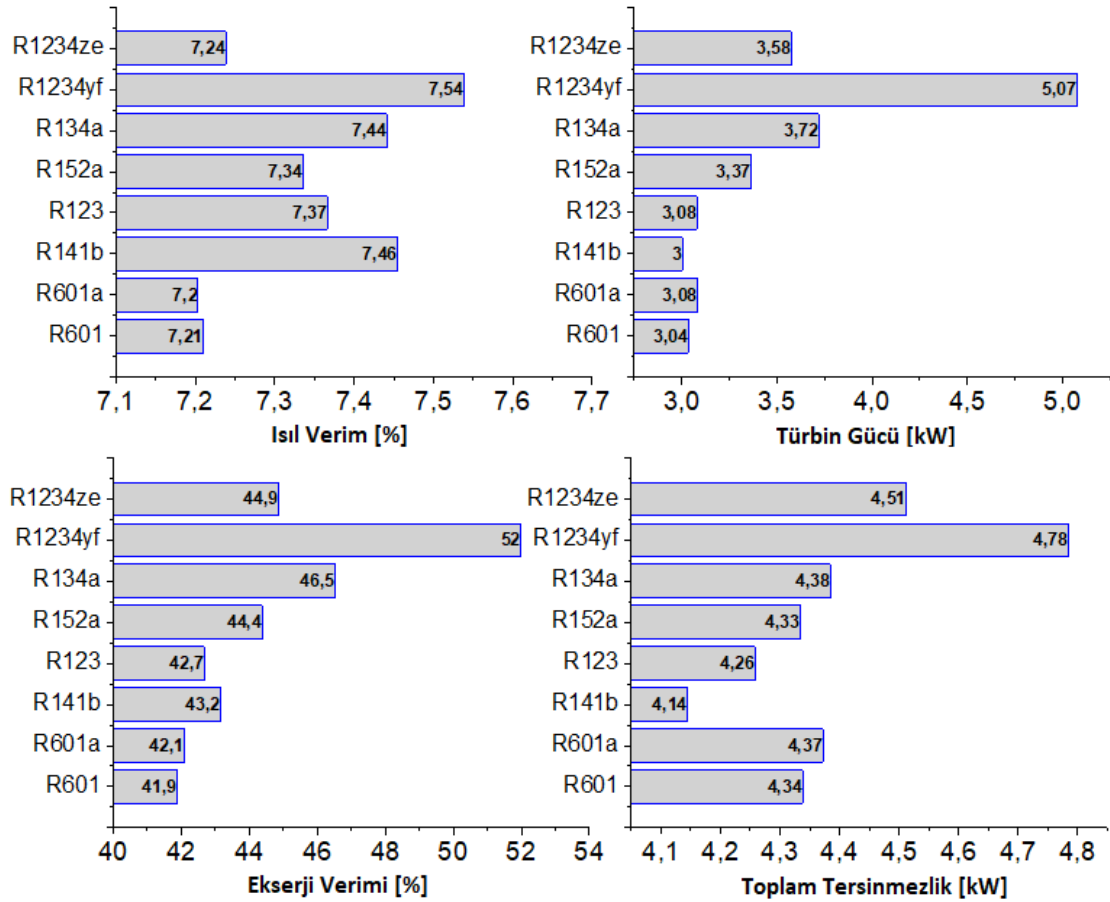
Çizelge 4.5. 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi

$T_{h,i}$	$f_1(x)$ max (η_{isil})	$f_2(x)$ max (W_T)	$f_3(x)$ max (η_{II})	$f_4(x)$ min (I_T)	$f_5(x)$ min (VFR)	$f_6(x)$ min (EEF)	G(x)
100 °C	R141b (%2,45)	R1234yf (%18,23)	R1234yf (%6,05)	R141b (%5,12)	R152a (%11,04)	R1234yf (%9,68)	%65, R1234yf %21, R152a %14, R141b

➤ **$T_{h,i} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ için;**

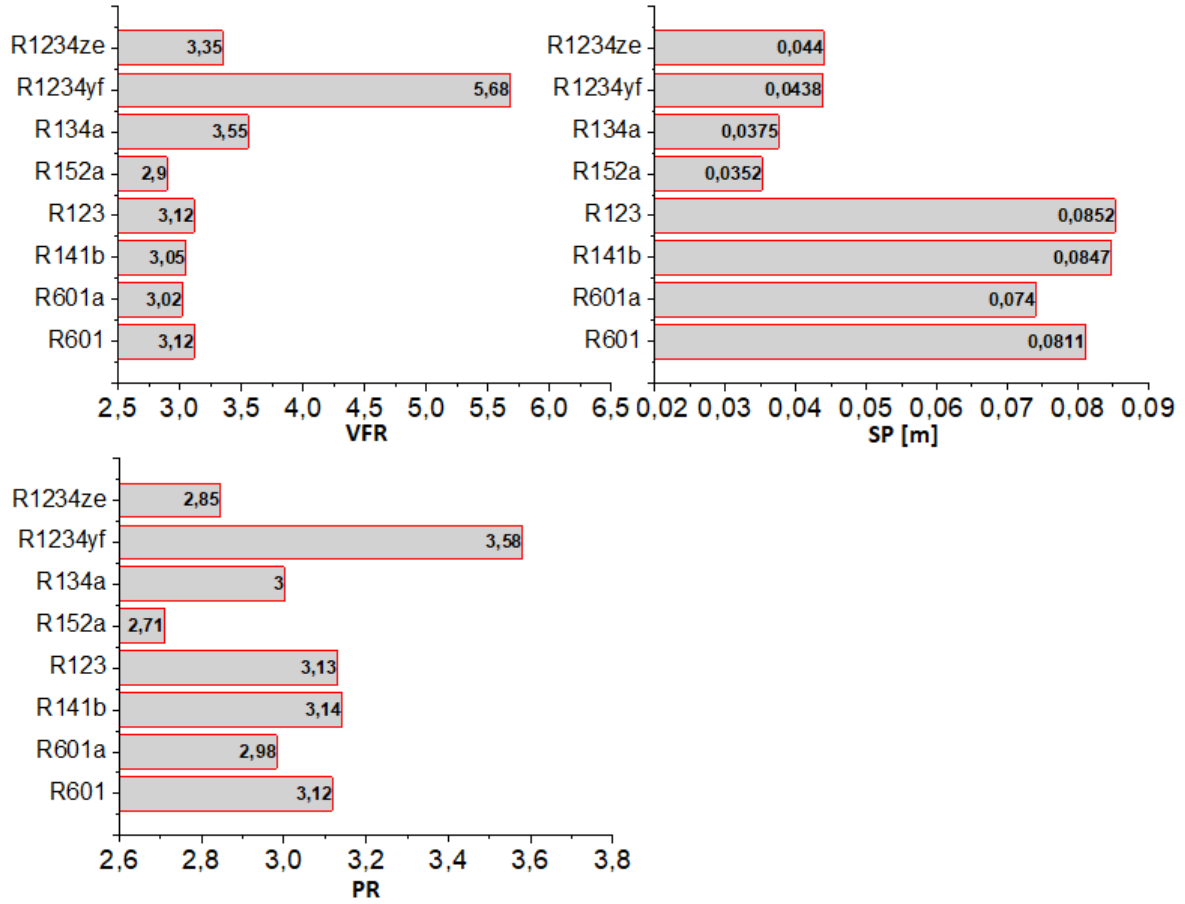
Şekil 4.10'da $110 \text{ }^\circ\text{C}$ ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{pp,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları ısı verim, türbin gücü, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik değerleri görülmektedir.

- Isıl verim kıyaslamasında $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ısı kaynağı sıcaklığında R141b önde iken, $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de R1234yf'li sistemde daha iyi bir ısı verim değeri elde edilmiştir.
- Türbin gücü değerlerinde ise R1234yf diğer akışkanlara göre çok daha iyi bir performans ortaya koymuştur. R1234yf'de 5,07 kW türbin gücü elde edilirken o değere en yakın olarak R134a'da 3,72 kW türbin gücü elde edilmiştir.
- Geri kazanılan ekserji değerinin fazla olması R1234yf'nin ekserji veriminin de diğerlerine göre daha yüksek çıkmasını sağlamıştır. $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de R1234yf'li sistemin ekserji verimi R141b'li sistemden %6,4 daha fazla iken $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ise %20,3 daha fazla bulunmuştur.
- R141b'nin geri kazanılan ekserji değerinin çok düşük olması nedeniyle ekserji verimi yüksek olmamasına rağmen toplam tersinmezlik değeri çok düşük olarak tespit edilmiştir.



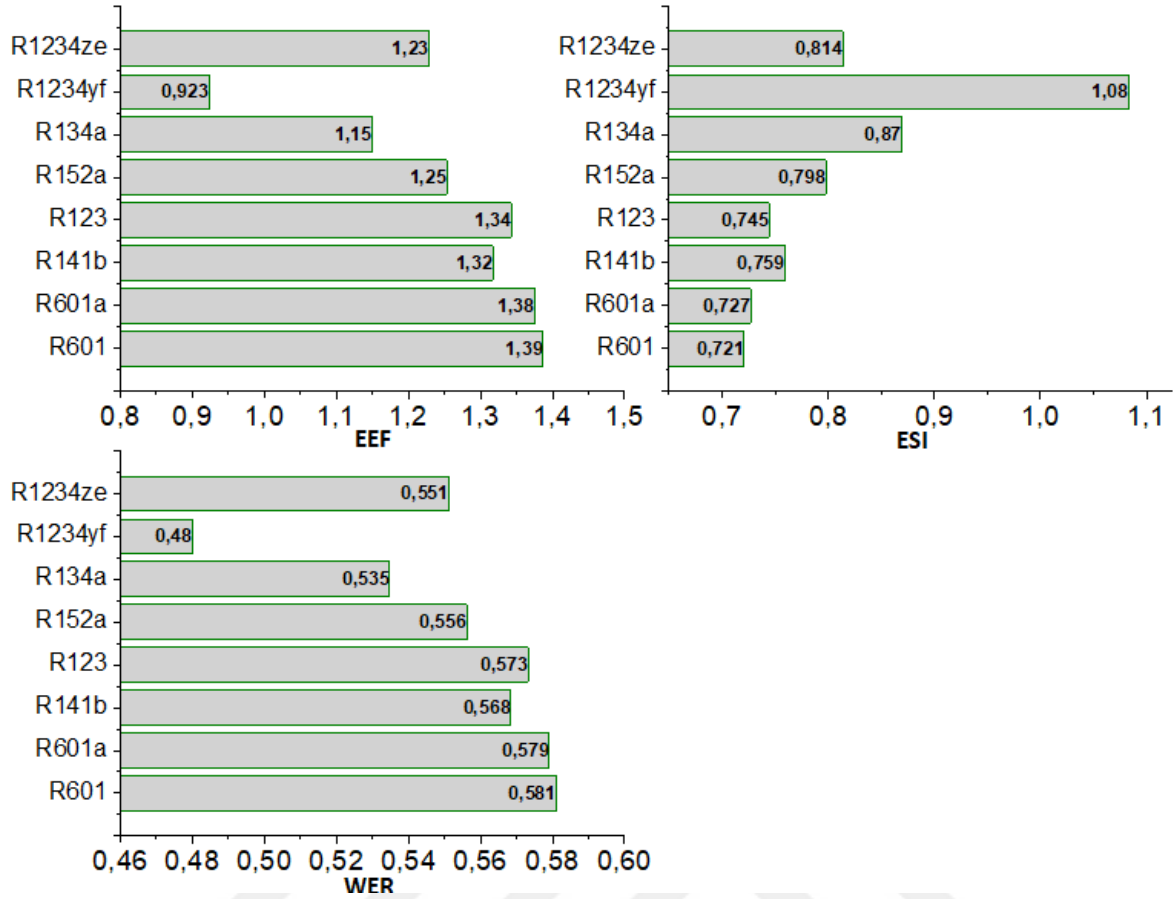
Şekil 4.10. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.11’de 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları hacimsel debi oranı, türbin boyut parametresi ve türbin basınç oranı yer almaktadır. En düşük VFR değeri 90 °C ve 100 °C’de olduğu gibi yine R152a’da elde edilmiştir. Fakat R1234yf hariç diğer akışkanların VFR değerlerinin 2,9 ile 3,55 arasında olup birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. En yüksek VFR değeri ise diğerlerinden çok farklı olarak 5,68 değeri ile R1234yf’de görülmüştür. En yüksek VFR değeri R1234yf’de görülmesine rağmen en yüksek SP değerleri kuru ve izantropik akışkanlarda elde edilmiştir.



Şekil 4.11. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.12’de 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları termodinamik sürdürülebilirlik indeksleri yer almaktadır. En düşük EEF değeri 100 °C’de olduğu gibi R1234yf’de elde edilmiştir. R1234yf’nin bir diğer yeni-nesil organik akışkan olan R1234ze’den %24,9 daha az EEF değerine sahip olduğu görülmektedir. Kuru ve izantropik akışkanların yüksek EEF değerlerine sahip olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 4.12. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi

Çizelge 4.6'de 110 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında belirlenen amaç fonksiyonları için en iyi performans gösteren akışkanlar özetlenmiştir. Çizelgede amaç fonksiyonları altında optimum olarak belirlenen akışkanın diğer akışkanlara göre ortalama performans artış yüzdesi belirtilmiştir. Performans artış yüzdelere göre belirlenen ağırlık fonksiyonu sonucu 110 °C ısı kaynağı sıcaklığı için %83 oranında R1234yf optimum akışkan olarak belirlenmiştir.

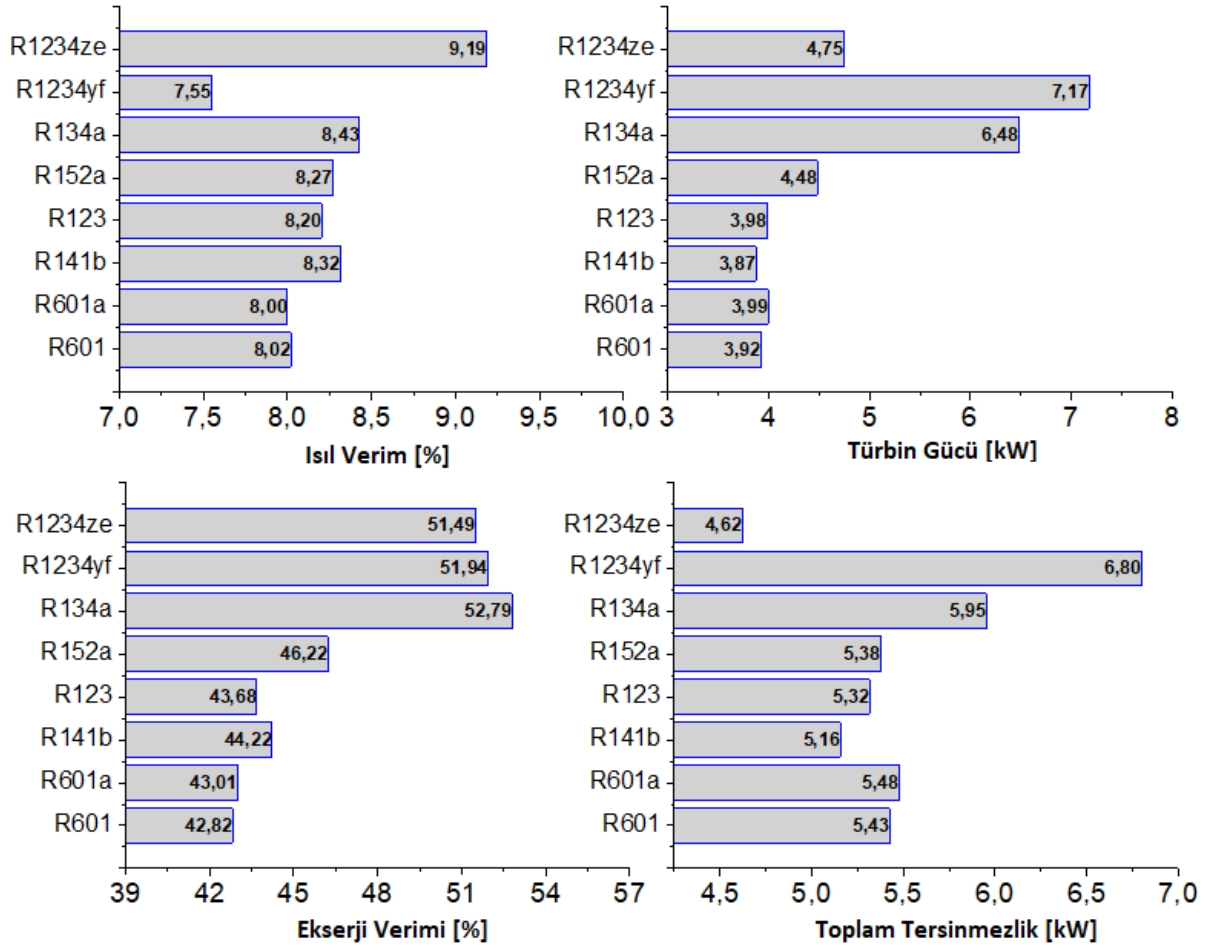
Çizelge 4.6. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi

$T_{h,i}$	$f_1(x)$ max (η_{isil})	$f_2(x)$ max (W_T)	$f_3(x)$ max (η_{II})	$f_4(x)$ min (I_T)	$f_5(x)$ min (VFR)	$f_6(x)$ min (EEF)	G(x)
110 °C	R1234yf (%2,97)	R1234yf (%56,36)	R1234yf (%19,23)	R141b (%6,23)	R152a (%14,93)	R1234yf (%28,33)	%83, R1234yf %12, R152a %5, R141b

➤ **$T_{h,i} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ için;**

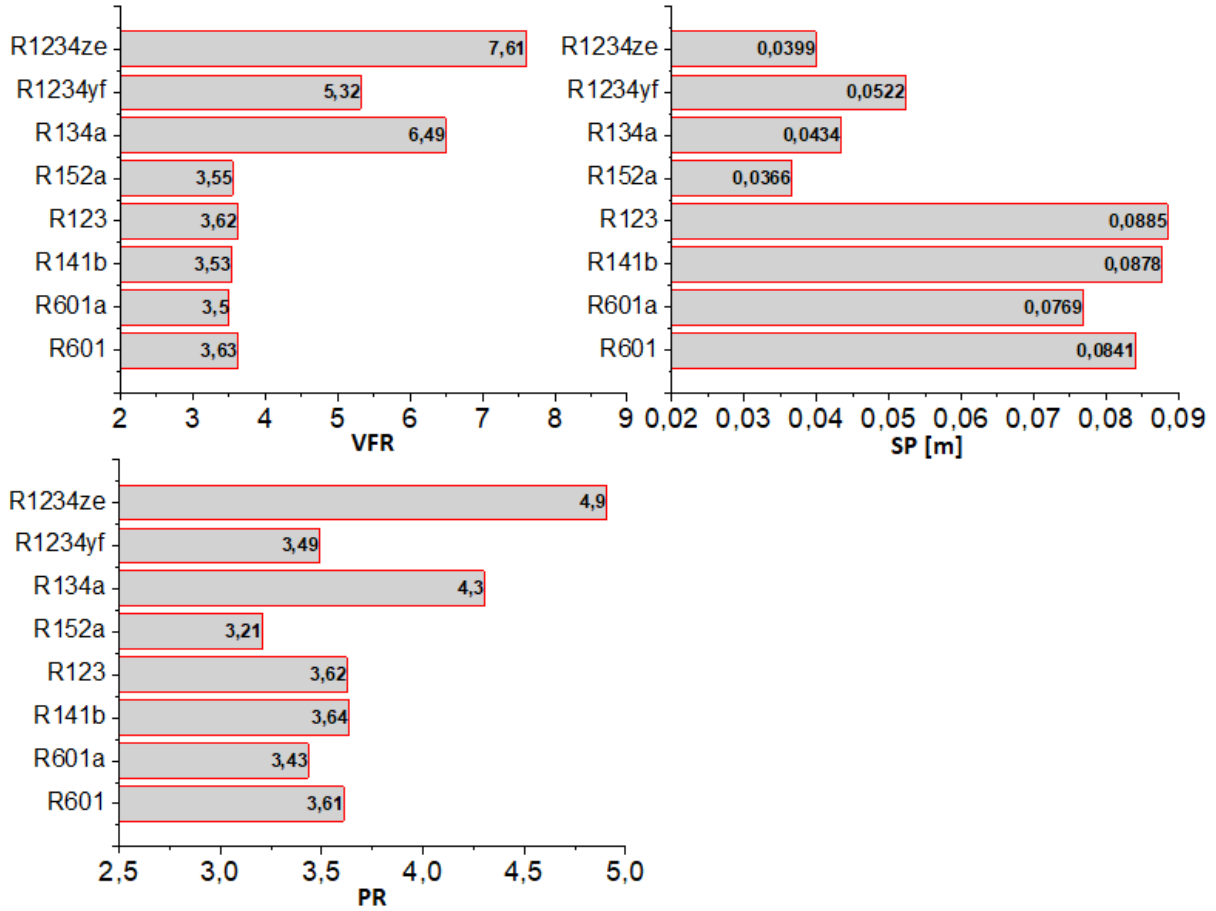
Şekil 4.13'te $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{pp,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları ısı verim, türbin gücü, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik değerleri görülmektedir.

- Isıl verim maksimizasyonunda $90 \text{ }^\circ\text{C}$, $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de R141b; $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de R1234yf önde iken $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ise R1234ze diğerlerinden daha iyi bir performans göstermiştir.
- R1234yf'nin ısı verim performansı dikkat çekmektedir, çünkü $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de en iyi ısı verim değerine sahip olan R1234yf, $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de en kötü performansa sahip olduğu görülmektedir. Sisteme sağlanan ısı girdisindeki artış yüzdesi bunda etkili rol oynamıştır.
- Maksimum türbin gücü ise diğer ısı kaynağı sıcaklıklarında olduğu gibi yine R1234yf'li sistemde elde edilmiştir.
- Ekserji verim kıyaslamasında ise geri kazanılan ekserji değerinin yüksek olması neticesinde R1234yf avantajlı iken, harcanan ekserji değerinin daha düşük olması nedeniyle R134a en iyi değere ulaşmıştır. R134a'lı sistemin ekserji veriminin R1234yf'den %1,6 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Toplam tersinmezlik değerlerinde ise en düşük değer R1234ze'li sistemde elde edilmiştir. Daha önceki ısı kaynağı sıcaklıklarında R141b daha iyi bir performans göstermiş olmasına rağmen bu sefer performans sıralamasında R1234ze'den sonra gelmektedir. R1234ze'li sistemin, R141b'den %10,4 daha az toplam tersinmezlik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.



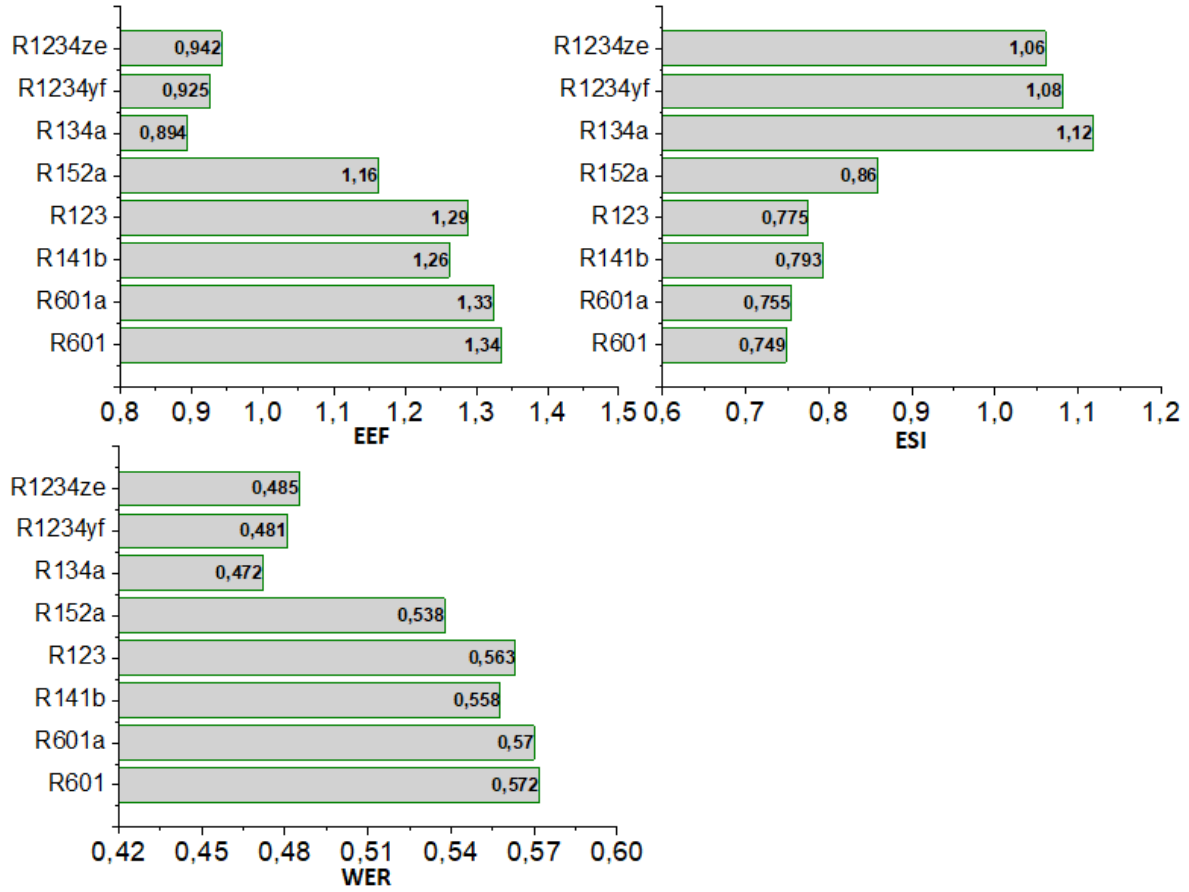
Şekil 4.13. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.14'te 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{pp,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları hacimsel debi oranı, türbin boyut parametresi ve türbin basınç oranı yer almaktadır. En düşük VFR değeri diğer ısı kaynağı sıcaklıklarından farklı olarak R152a'da değil, R601a'da elde edilmiştir. Fakat yine en düşük SP değerinin R152a'da olduğu görülmektedir. En düşük türbin basınç oranı ise yine R152a'da elde edilmiştir.



Şekil 4.14. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.15'te 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları termodinamik sürdürülebilirlik indeksleri yer almaktadır. 100 °C ve 110 °C'de R1234yf'nin daha iyi bir EEF değerine sahip olduğu, fakat 120 °C'de R134a'nın EEF bakımından daha iyi bir performans ortaya koyduğu görülmektedir. R134a'nın EEF değerinin, R1234yf'den %3,3 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.15. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi

Çizelge 4.7’de 120 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında belirlenen amaç fonksiyonları için en iyi performans gösteren akışkanlar özetlenmiştir. Çizelgede amaç fonksiyonları altında optimum olarak belirlenen akışkanın diğer akışkanlara göre ortalama performans artış yüzdesi belirtilmiştir. Performans artış yüzdelere göre belirlenen ağırlık fonksiyonu sonucu 120 °C ısı kaynağı sıcaklığı için %32 oranında R1234ze optimum akışkan olarak belirlenmiştir. Diğer ısı kaynağı sıcaklıklarından farklı olarak akışkan performans artış yüzdeleri yakın bulunmuştur. R1234ze akışkanından sonra %27 ve %26 oranında R1234yf ve R134a akışkanları önerilmektedir.

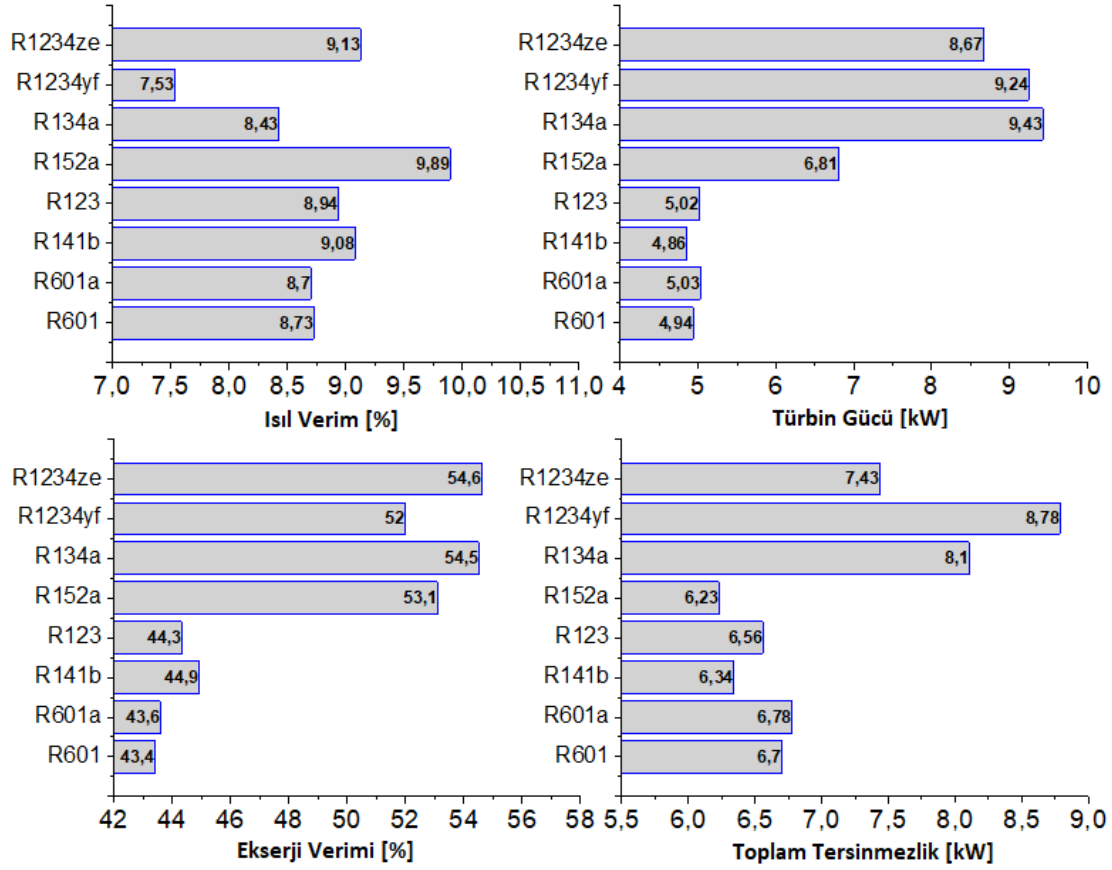
Çizelge 4.7. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi

$T_{h,i}$	$f_1(x)$ max (η_{isil})	$f_2(x)$ max (W_T)	$f_3(x)$ max (η_{II})	$f_4(x)$ min (I_T)	$f_5(x)$ min (VFR)	$f_6(x)$ min (EEF)	G(x)
120 °C	R1234ze (%13,37)	R1234yf (%38,24)	R134a (%14,94)	R1234ze (%31,5)	R601a (%20,52)	R134a (%22,4)	%32, R1234ze %27, R1234yf %26, R134a %15, R601a

➤ **$T_{h,i} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ için;**

Şekil 4.16'da $130 \text{ }^\circ\text{C}$ ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{pp,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları ısı verim, türbin gücü, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik değerleri görülmektedir.

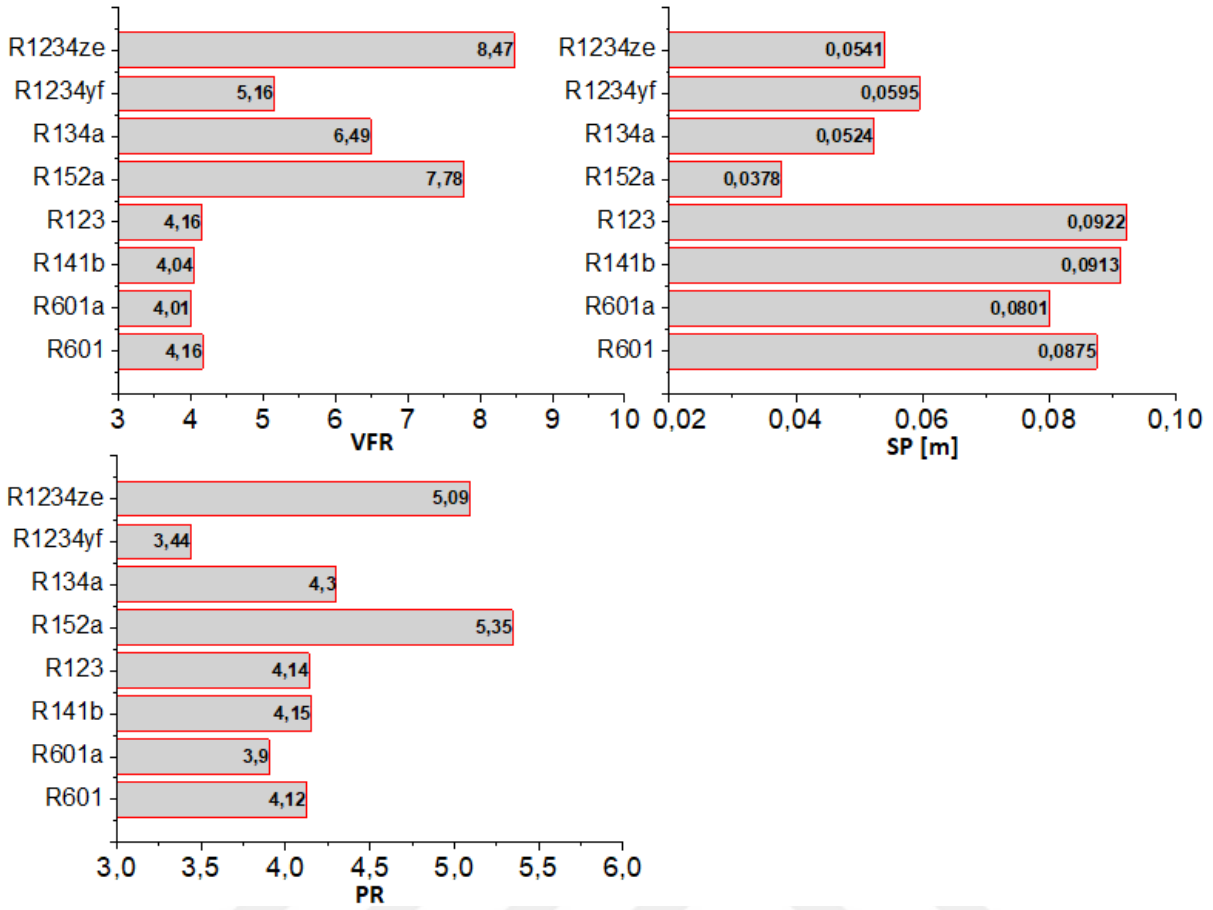
- Isıl verim kıyaslamasında diğer ısı kaynağı sıcaklıklarından farklı olarak R152a iyi bir performans göstermiştir. $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de R1234ze en yüksek ısı verim değerine sahip iken $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de R152a'dan %7,6 daha düşük bir değere ulaşmıştır.
- Daha önceki tüm ısı kaynağı sıcaklıklarında maksimum türbin gücü R1234yf'de elde ediliyor iken bu sefer R134a'da elde edilmiştir. R134a'lı sistemde elde edilen türbin gücünün R1234yf'den %2 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Geri kazanılan ekserji değerinde R134a önde olmasına rağmen, harcanan ekserji miktarının daha az olması neticesinde R1234ze'nin çok az bir farkla R134a'dan daha yüksek bir ekserji verimine sahip olduğu görülmüştür.
- Toplam tersinmezlik değerinde ise R152a en düşük değere ulaşmıştır. $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de en düşük toplam tersinmezlik R1234ze'de görülmesine rağmen $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de R1234ze'nin en kötü üçüncü performansa sahip olduğu görülmektedir. R1234ze'nin toplam tersinmezlik performansı kötü olmasına rağmen harcanan ekserji değerinin düşük olması nedeniyle ekserji verimi yüksek bulunmuştur.



Şekil 4.16. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi

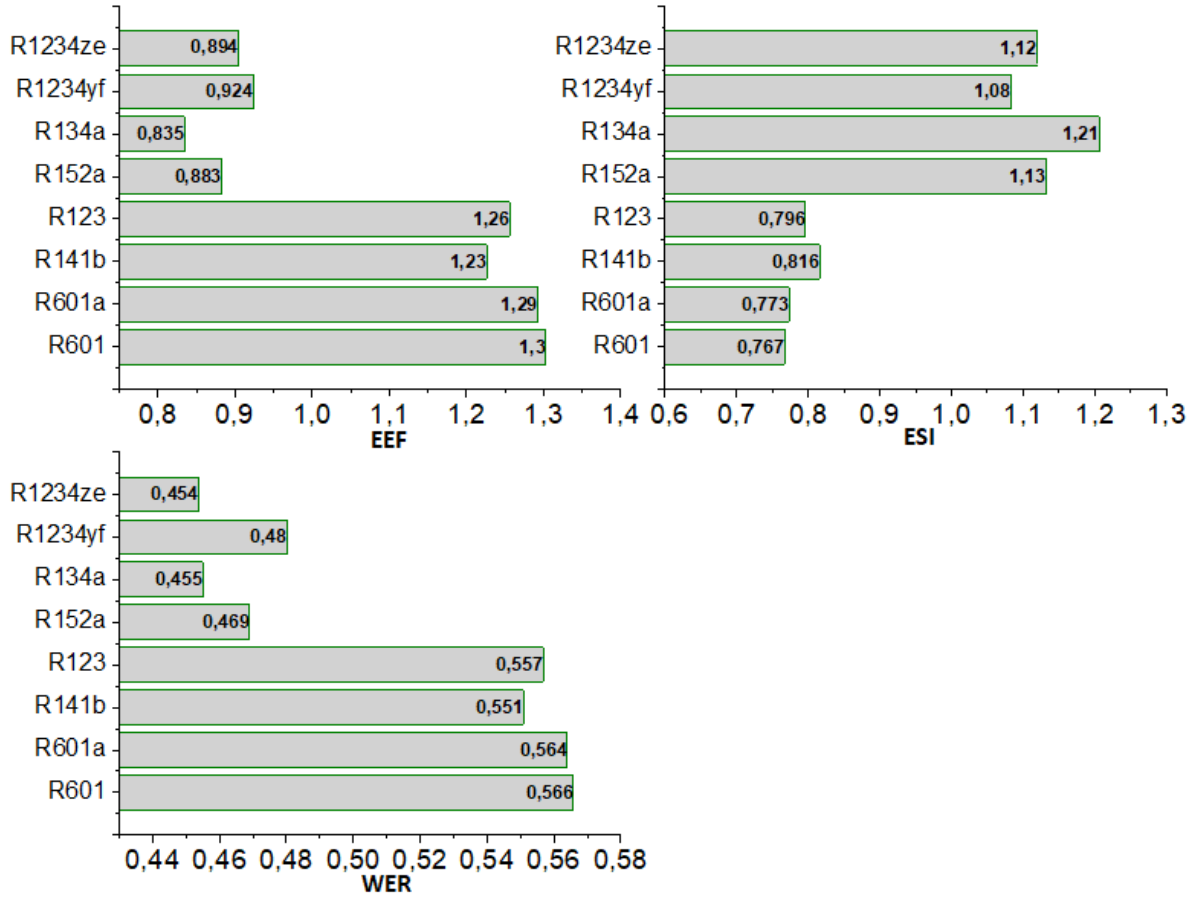
Şekil 4.17’de 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{pp,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları hacimsel debi oranı, türbin boyut parametresi ve türbin basınç oranı yer almaktadır.

- En düşük VFR değeri 120 °C’de olduğu gibi R601a’da elde edilmiştir. Kuru ve izantropik akışkanların VFR değerinin düşük, SP değerinin ise yüksek olduğu dikkat çekmektedir. En düşük SP değeri tüm ısı kaynağı sıcaklıklarında olduğu gibi yine R152a’da elde edilmiştir.
- Türbin basınç oranları incelendiğinde aynı kategoride yer alan akışkanların çok farklı değerler aldığı görülmektedir. Yeni-nesil organik akışkanlarda R1234ze’nin basınç oranının R1234yf’den %47,9 daha fazla; ıslak akışkanlarda ise R152a’nın basınç oranının R134a’dan %24,4 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.17. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.18’de 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında 8 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları termodinamik sürdürülebilirlik indeksleri yer almaktadır. En düşük EEF değeri 120 °C’de olduğu gibi R134a’da elde edilmiştir. 120 °C’de R134a’nın EEF değeri R1234yf’den %3,3 daha az iken 130 °C’de ise %9,6 daha az olduğu tespit edilmiştir. Kuru ve izantopik akışkanların diğerlerine göre ciddi oranda daha yüksek EEF değerine sahip olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 4.18. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi

Çizelge 4.8’de 130 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında belirlenen amaç fonksiyonları için en iyi performans gösteren akışkanlar özetlenmiştir. Çizelgede amaç fonksiyonları altında optimum olarak belirlenen akışkanın diğer akışkanlara göre ortalama performans artış yüzdesi belirtilmiştir. Performans artış yüzdelere göre belirlenen ağırlık fonksiyonu sonucu 130 °C ısı kaynağı sıcaklığı için %36 oranında R152a optimum akışkan olarak belirlenmiştir. R134a’nın 120 °C’de olduğu gibi optimum akışkana yakın bir yüzdesi olduğu dikkat çekmektedir.

Çizelge 4.8. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi

$T_{h,i}$	$f_1(x)$ max ($\eta_{\text{ısı}}$)	$f_2(x)$ max (W_T)	$f_3(x)$ max (η_{II})	$f_4(x)$ min (I_T)	$f_5(x)$ min (VFR)	$f_6(x)$ min (EEF)	G(x)
130 °C	R152a (%14,84)	R134a (%21,5)	R1234ze (%14,85)	R152a (%28,91)	R601a (%24,31)	R134a (%17,66)	%36, R152a %32, R134a %20, R601a %12, R1234ze

Çizelge 4.9’da düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında 5 farklı ısı kaynağında 6 farklı amaç fonksiyonu dikkate alınarak belirlenen optimum akışkanların listesi verilmiştir. Tüm sıcaklık değerleri ve amaç fonksiyonlarının olduğu liste dikkate alındığında ısı verim ve toplam tersinmezlik yönünden R141b’nin, ekserji verimi ve türbin gücü olarak R1234yf’nin, minimum VFR açısından R152a’nın, minimum EEF’de ise R1234yf ve R134a akışkanlarının ön planda olduğu görülmektedir.

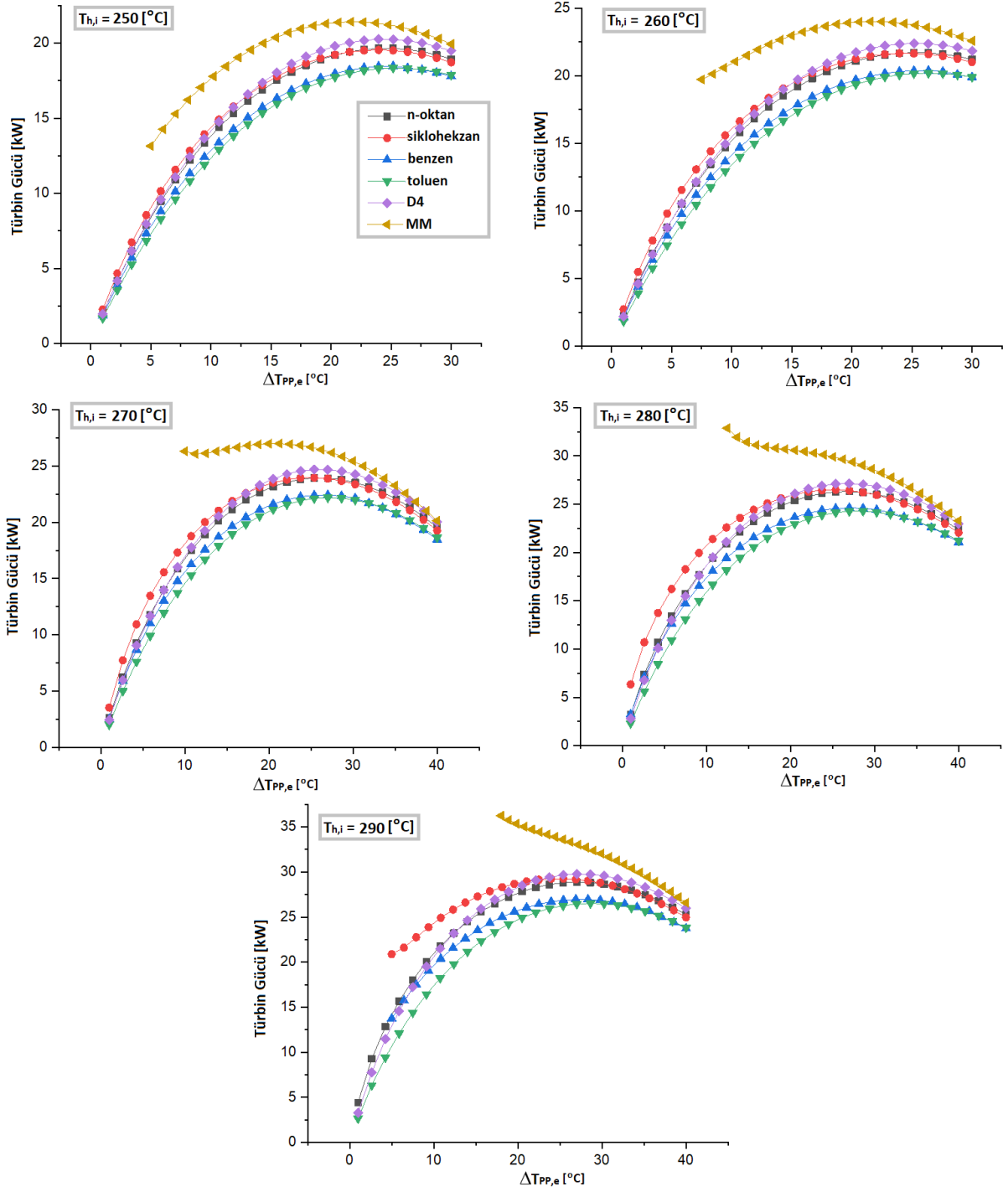
Çizelge 4.9. ORÇ’nin düşük sıcaklıklı uygulamalarında farklı amaç fonksiyonları altında optimum akışkanın belirlenmesi

$T_{h,i}$	$f_1(x)$ max ($\eta_{\text{ısı}}$)	$f_2(x)$ max (W_T)	$f_3(x)$ max (η_{II})	$f_4(x)$ min (I_T)	$f_5(x)$ min (VFR)	$f_6(x)$ min (EEF)	G(x)
90 °C	R141b	R1234yf	R141b	R141b	R152a	R141b	R141b
100 °C	R141b	R1234yf	R1234yf	R141b	R152a	R1234yf	R1234yf
110 °C	R1234yf	R1234yf	R1234yf	R141b	R152a	R1234yf	R1234yf
120 °C	R1234ze	R1234yf	R134a	R1234ze	R601a	R134a	R1234ze
130 °C	R152a	R134a	R1234ze	R152a	R601a	R134a	R152a

4.4.2. Yüksek Sıcaklıklı ORÇ Uygulamaları İçin Termodinamik Optimizasyon Sonuçları

Şekil 4.19’da sırasıyla 250 °C, 260 °C, 270 °C, 280 °C ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıkları için $\Delta T_{PP,e}$ değişiminin sistemin türbin gücü değerlerine etkisi görülmektedir. Bu şekiller incelendiğinde;

- MM akışkanı hariç tüm ısı kaynağı sıcaklıklarında belli bir $\Delta T_{PP,e}$ değerinden sonra türbin gücünün azalmaya başladığı görülmektedir.
- 250 °C ve 260 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında MM akışkanı için $\Delta T_{PP,e}$ değeri arttıkça türbin gücü azalış gösterse de diğer ısı kaynağı sıcaklıklarında direk azalmaya başlamıştır.
- MM’nin diğer akışkanlara kıyasla düşük kritik sıcaklığa sahip olmasından dolayı ısı kaynağı sıcaklığı arttıkça minimum $\Delta T_{PP,e}$ noktası da artış göstermiştir.
- Düşük $\Delta T_{PP,e}$ noktalarında en iyi performans sikloheksan’lı sistemde elde edilirken yüksek $\Delta T_{PP,e}$ noktalarında D4’lü sistem daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 4.19. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için $\Delta T_{PP,e}$ değişiminin net güce etkisinin belirlenerek optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinin elde edilmesi

6 farklı akışkanın 5 farklı ısı kaynağı sıcaklığı altında maksimum türbin gücünün elde edildiği optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktaları Çizelge 4.10'da özetlenmiştir. Aynı akışkan grubunda yer alan akışkanlarda birbirine çok yakın $\Delta T_{PP,e}$ değerleri elde edildiği belirtilmiştir. Diğer akışkanlara göre daha düşük kritik sıcaklığa sahip olan MM'nin 280 °C'den itibaren optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.10. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için değişik ısı kaynağı sıcaklıkları altında farklı akışkanlar için optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinin belirlenmesi

$T_{h,i}$	Optimum $\Delta T_{PP,e}$ (°C)					
	n-octane	sikloheksan	benzen	toluen	MM	D4
250 °C	23,96	23,96	25,17	25,17	21,67	23,96
260 °C	25,17	23,96	26,38	26,38	21,56	25,17
270 °C	25,38	25,38	27	27	21,25	25,38
280 °C	27	25,38	27	28,63	12,5	27
290 °C	27	25,42	26,88	28,63	18	27

6 farklı akışkan için Çizelge 4.10'da belirtilen optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktası altında istenen amaç fonksiyonları doğrultusunda çalıştırılmasıyla elde edilen optimizasyon sonuçlarına ilişkin grafikler farklı ısı kaynakları için ayrı ayrı aşağıda verilmiştir.

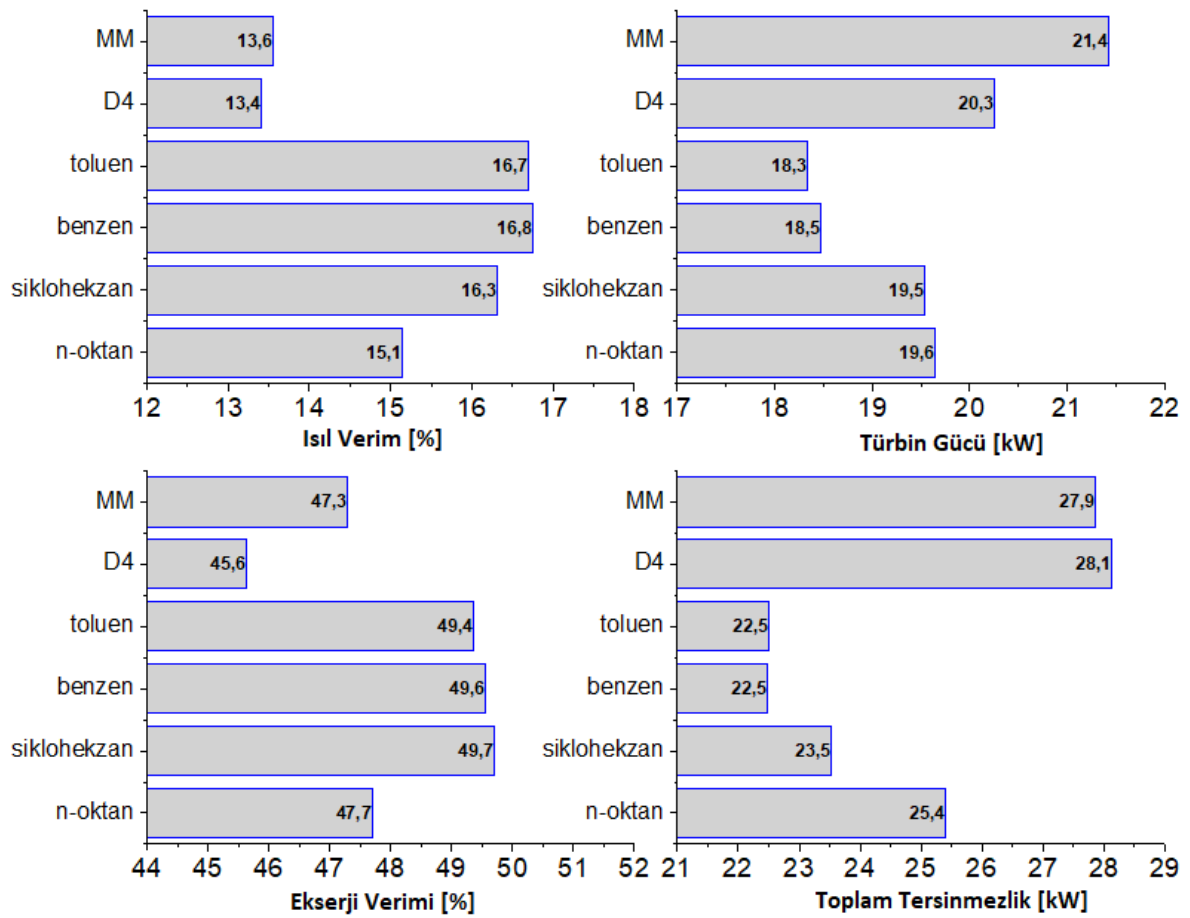
Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamalarından farklı olarak 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarının amaç fonksiyonlarında benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bundan dolayı üç farklı ısı kaynağı sıcaklığı için tek bir değerlendirme yapılmıştır. Aynı şekilde 280 °C ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında da benzer sonuçlar elde edildiği için bu iki ısı kaynağı sıcaklığı da birlikte değerlendirilmiştir.

➤ **$T_{h,i}$ = 250, 260 ve 270 °C için;**

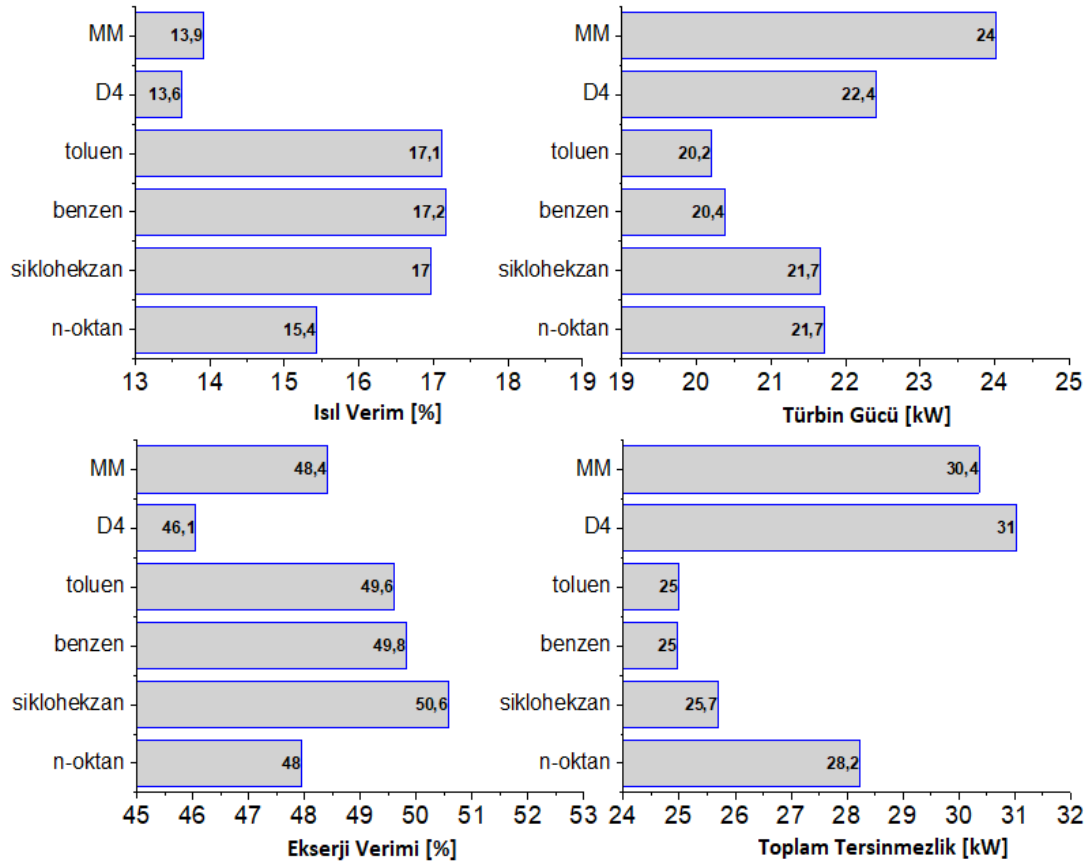
Şekil 4.20-4.22'de 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında 6 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları ısıl verim, türbin gücü, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik değerleri görülmektedir.

- Isıl verim maksimizasyonu bakımından en iyi durumda olan akışkanların aromatik hidrokarbon grubu akışkanlar olan benzen ve toluen'in olduğu görülmektedir. Sikloheksan'ın ısıl veriminde ise iki akışkana yakın değerler elde edilmiştir.
- Fakat türbin gücü olarak ise siloksan grubunda yer alan MM ve D4'ün önde olduğu görülmektedir. Yüksek ısı girdisi ihtiyacından dolayı MM ve D4 ısıl verim sıralamasında geride kalmıştır.

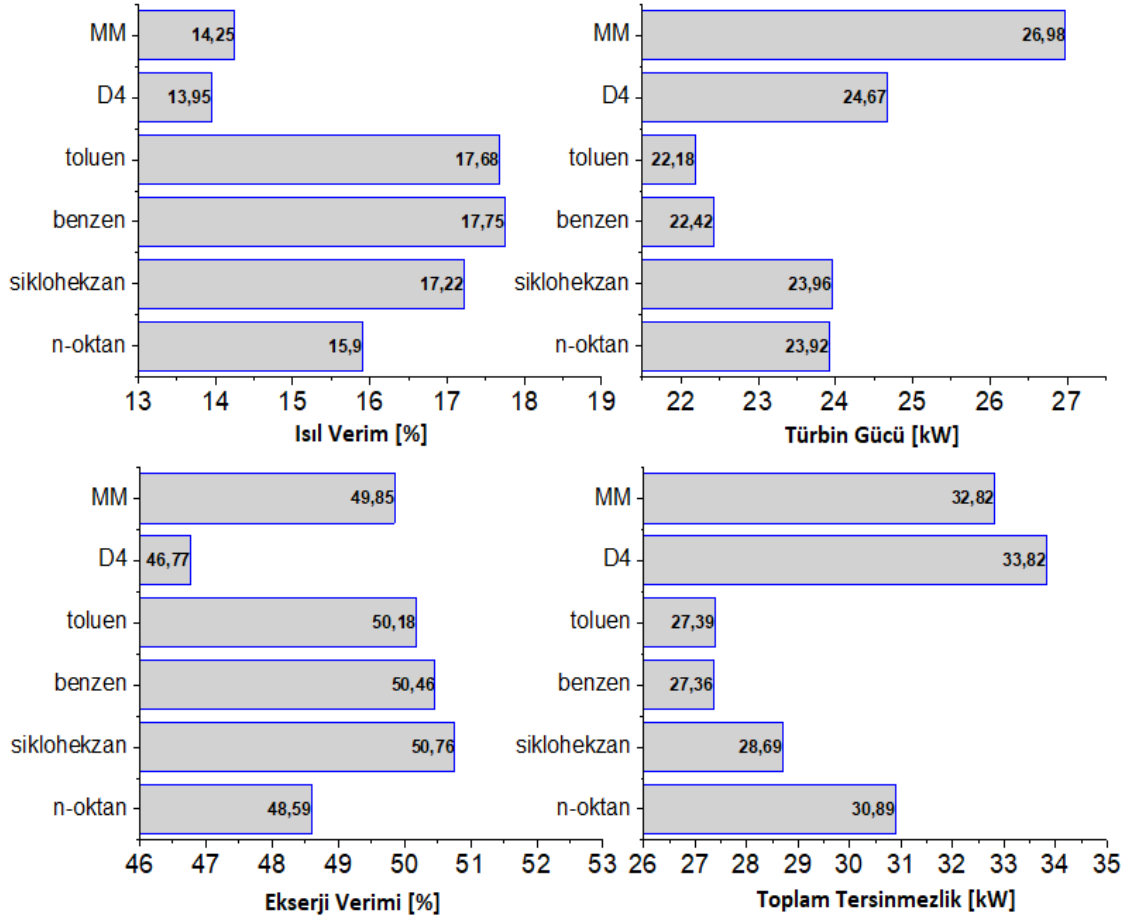
- 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında benzen’li sistemde MM’ye göre sırasıyla %23,5, %23,7 ve %24,5 daha fazla ısıl verim elde edilmiştir. Fakat, MM’li sistemde benzen’den sırasıyla %15,6, %17,6 ve %20,3 daha fazla türbin gücü elde edilmiştir.
- Ekserji verim maksimizasyonunda ise sikloheksan’lı sistemin benzen’li sistemi az bir oranda geçtiği tespit edilmiştir. Toplam tersinmezlik minimizasyonunda ise en iyi sonuçlara benzene ve toluen’de ulaşılmıştır. Geri kazanılan ekserji değeri en fazla MM’li sistemde olmasına rağmen toplam tersinmezliğin yüksek olması nedeniyle ekserji veriminde aromatik hidrokarbonlardan daha kötü bir performans sergilemiştir.



Şekil 4.20. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi



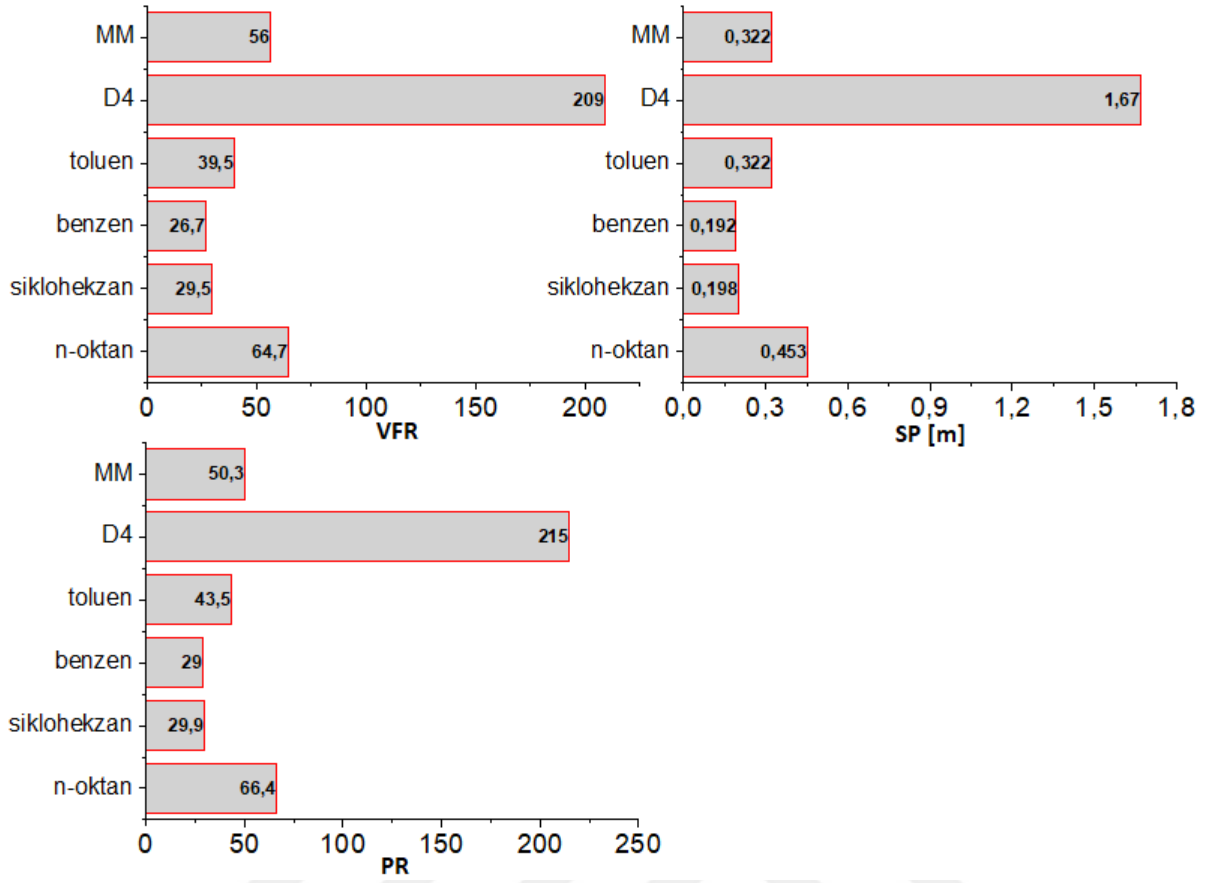
Şekil 4.21. 260 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi



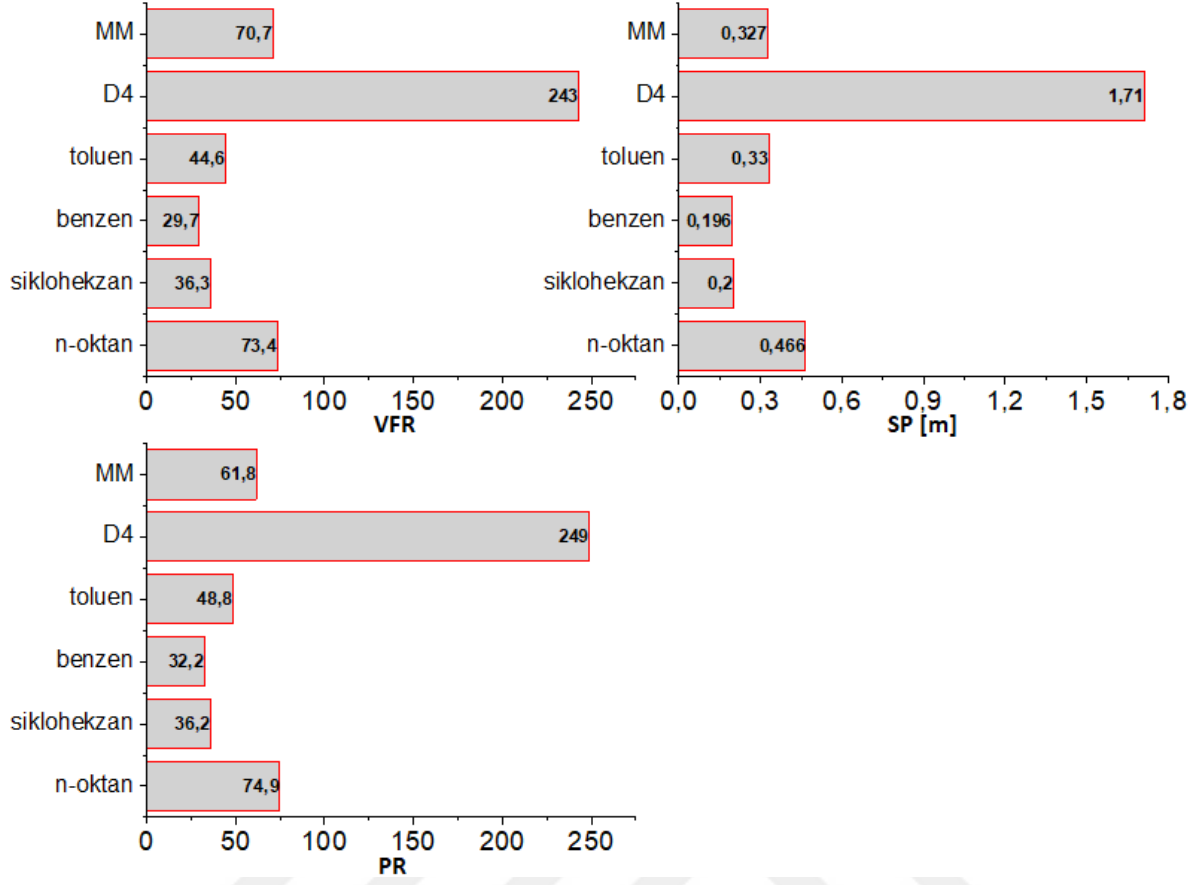
Şekil 4.22. 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.23-4.25'te 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında 6 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları hacimsel debi oranı, türbin boyut parametresi ve türbin basınç oranı yer almaktadır.

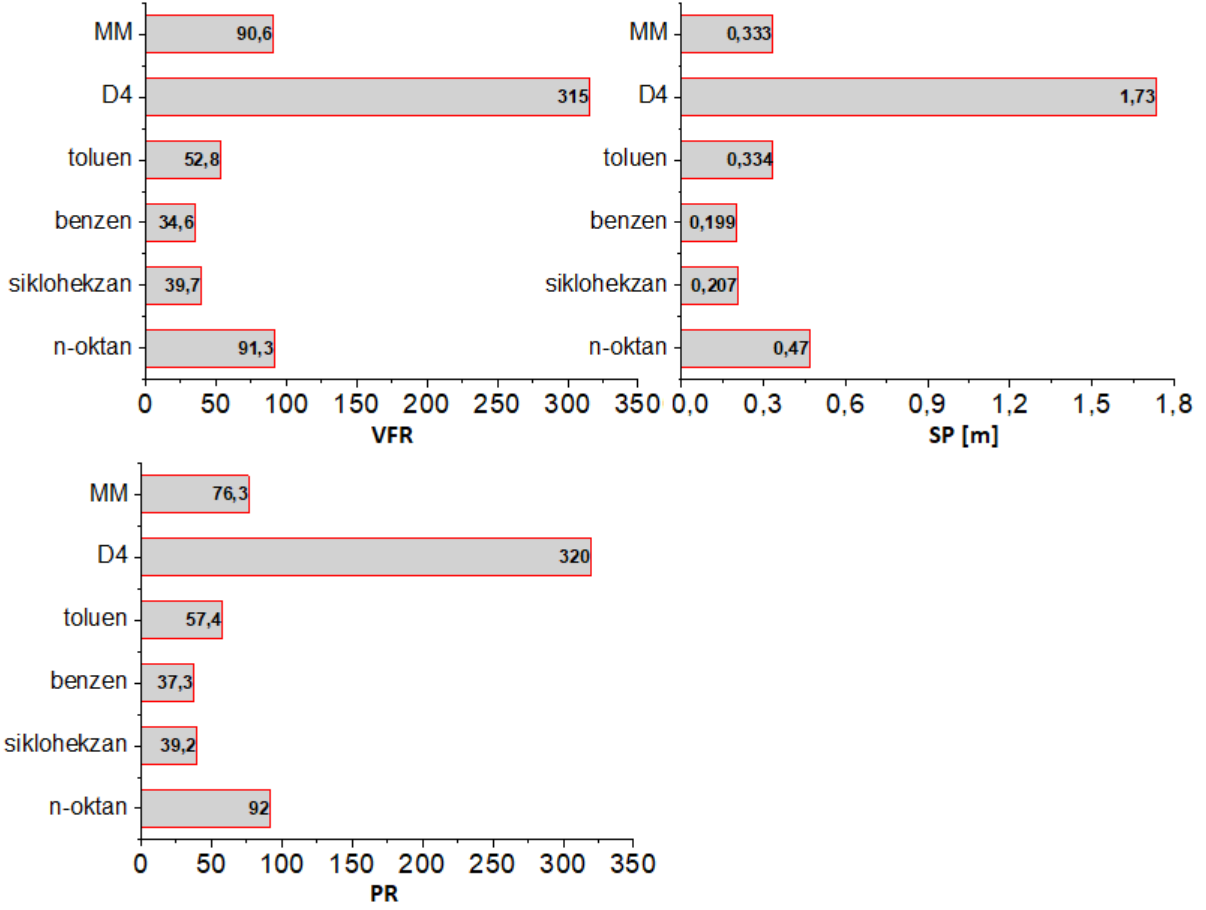
- Diğer akışkanlara kıyasla D4'ün yüksek VFR, SP ve basınç oranlarına sahip olduğu görülmektedir. En düşük VFR ve SP değeri benzene akışkanında elde edilmiştir.
- Benzen'li sistemde elde edilen sonuçlara en yakın değerler farklı akışkan grubunda yer almalarına rağmen sikloheksan'da elde edilmiştir.
- Toluene'li sistemin düşük VFR değerlerine sahip olmasına rağmen yüksek SP değerleri olması dikkat çekmektedir.



Şekil 4.23. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi



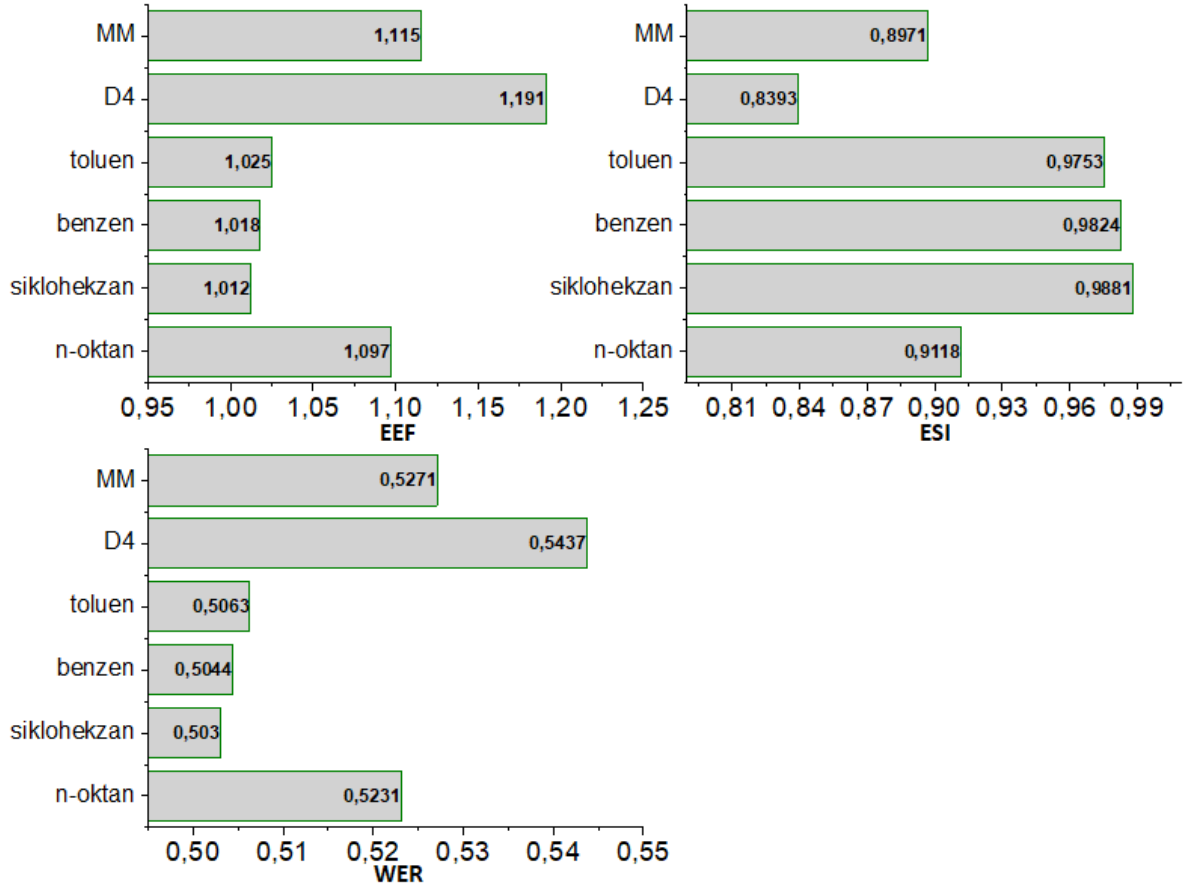
Şekil 4.24. 260 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi



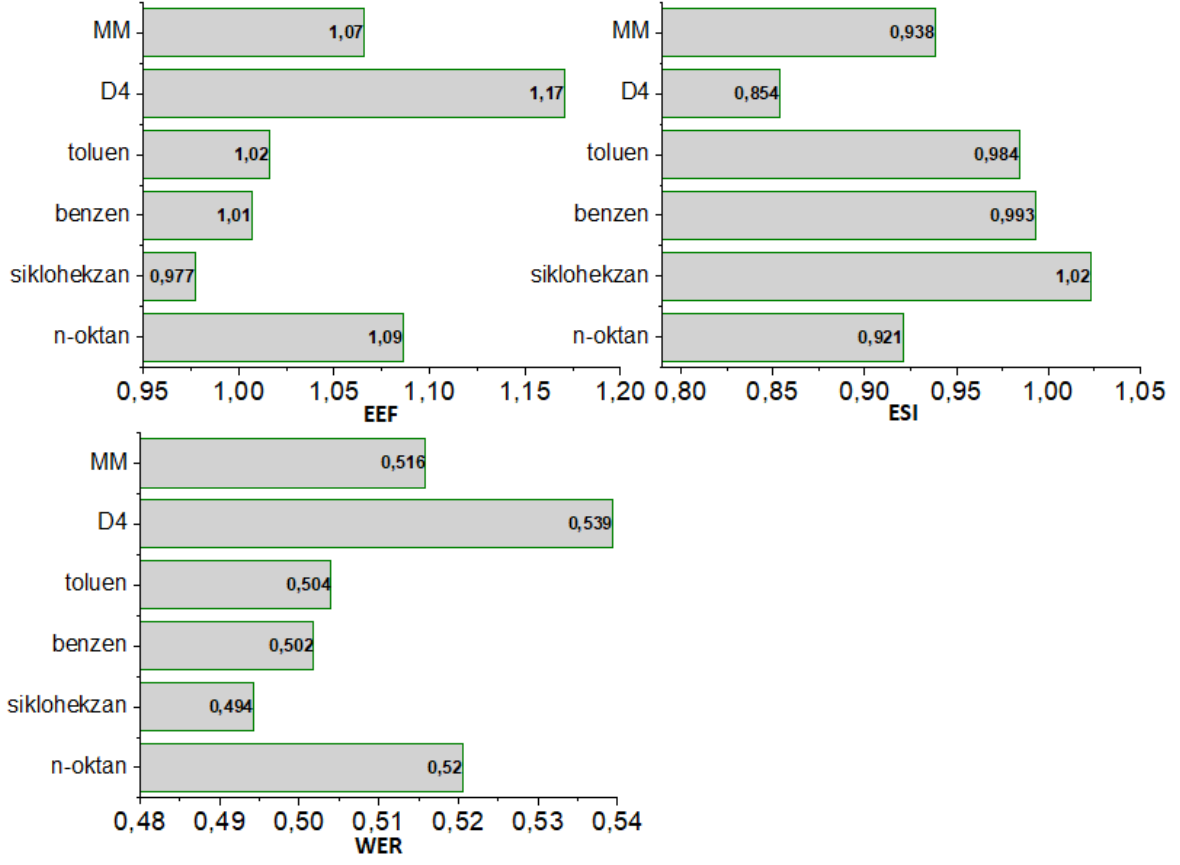
Şekil 4.25. 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.26-4.28'de 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında 6 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları termodinamik sürdürülebilirlik indeksleri yer almaktadır.

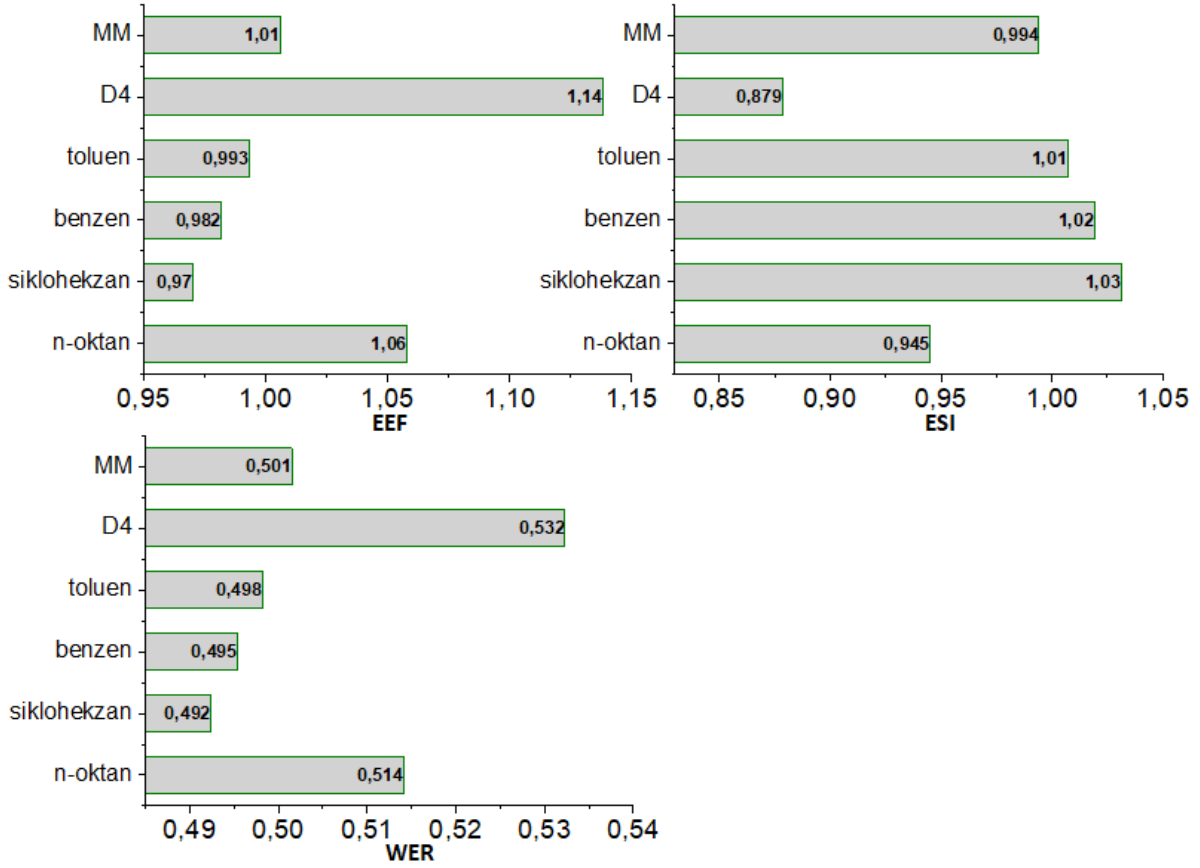
- En düşük ve en yüksek çevresel etki faktörünün sikloheksan ve D4 akışkanlarında elde edildiği görülmektedir.
- 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında D4'lü sistemin EEF değerinin sikloheksan'lı sistemden sırasıyla %17,6, %19,7 ve %17,5 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.26. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi



Şekil 4.27. 260 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi



Şekil 4.28. 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi

Çizelge 4.11’de 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıkları altında belirlenen amaç fonksiyonları için en iyi performans gösteren akışkanlar özetlenmiştir. Çizelgede amaç fonksiyonları altında optimum olarak belirlenen akışkanın diğer akışkanlara göre ortalama performans artış yüzdesi belirtilmiştir. Performans artış yüzdelere göre belirlenen ağırlık fonksiyonu sonucu 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında yaklaşık %70 oranında benzen optimum akışkan olarak belirlenmiştir.

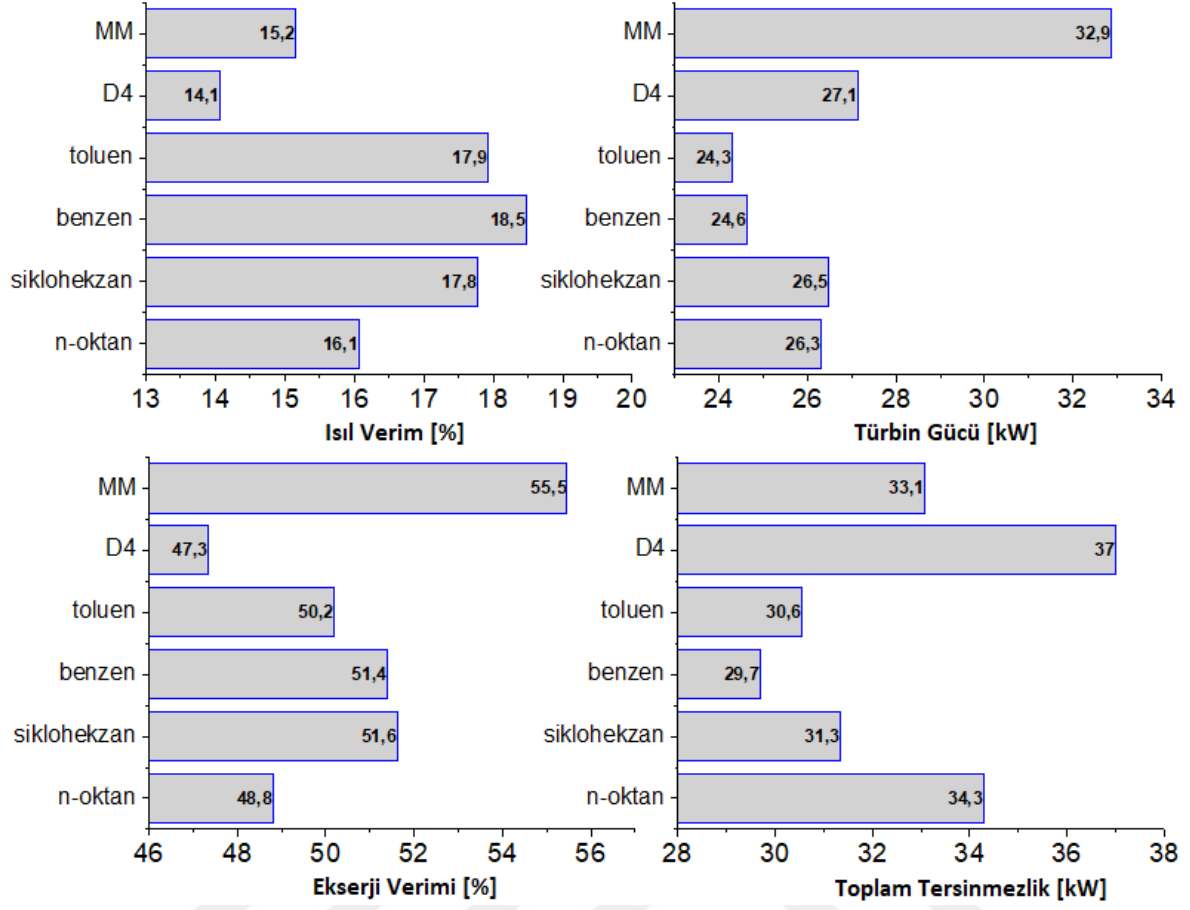
Çizelge 4.11. 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi

$T_{h,i}$	$f_1(x)$ max ($\eta_{\text{ısı}}$)	$f_2(x)$ max (W_T)	$f_3(x)$ max (η_{II})	$f_4(x)$ min (I_T)	$f_5(x)$ min (VFR)	$f_6(x)$ min (EEF)	G(x)
250 °C	benzen (%12,42)	MM (%11,44)	sikloheksan (%3,83)	benzen (%11,08)	benzen (%33,49)	sikloheksan (%6,77)	%72, benzen %15, MM %13, sikloheksan
260 °C	benzen (%12,47)	MM (%13,06)	sikloheksan (%4,63)	benzen (%10,34)	benzen (%36,98)	sikloheksan (%8,32)	%70, benzen %15, MM %15, sikloheksan
270 °C	benzen (%13,38)	MM (%16,34)	sikloheksan (%3,31)	benzen (10,38)	benzen (%36,43)	sikloheksan (%6,04)	%70, benzen %19, MM %11, sikloheksan

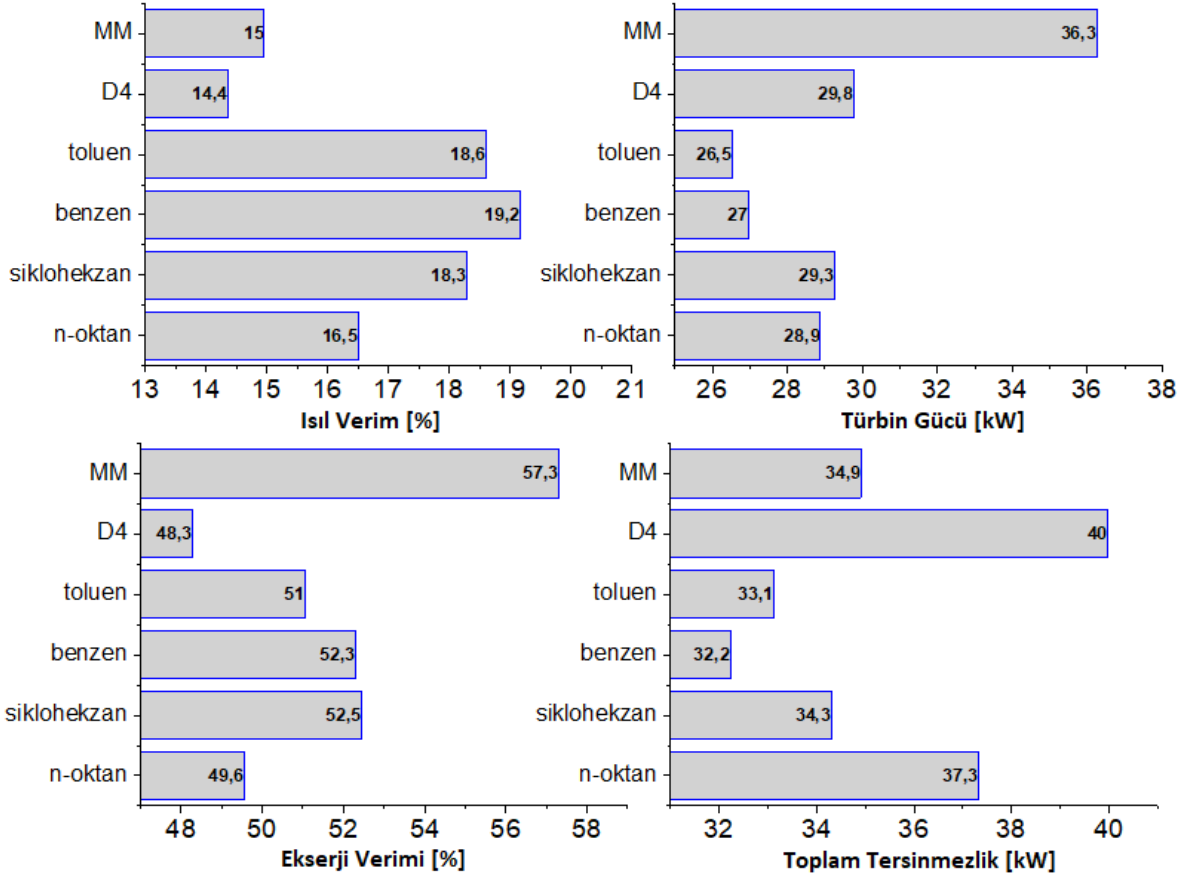
➤ $T_{h,i} = 280$ ve 290 °C için;

Şekil 4.29-4.30'da 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında 6 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları ısı verim, türbin gücü, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik değerleri görülmektedir.

- Isıl verim ve türbin gücü maksimizasyonu bakımından en iyi durumda olan akışkanların atık ısı uygulamalarında olduğu gibi yine sırasıyla benzene ve MM'de elde edildiği görülmektedir.
- Fakat, ekserji verim maksimizasyonunda atık ısı uygulamalarından farklı olarak MM akışkanının en yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. En kötü ekserji verim değerleri MM ile aynı akışkan grubunda yer almasına rağmen D4'lü sistemde görülmüştür.
- En düşük toplam tersinmezlik değerleri ise yine benzen'li sistemde elde edilmiştir.



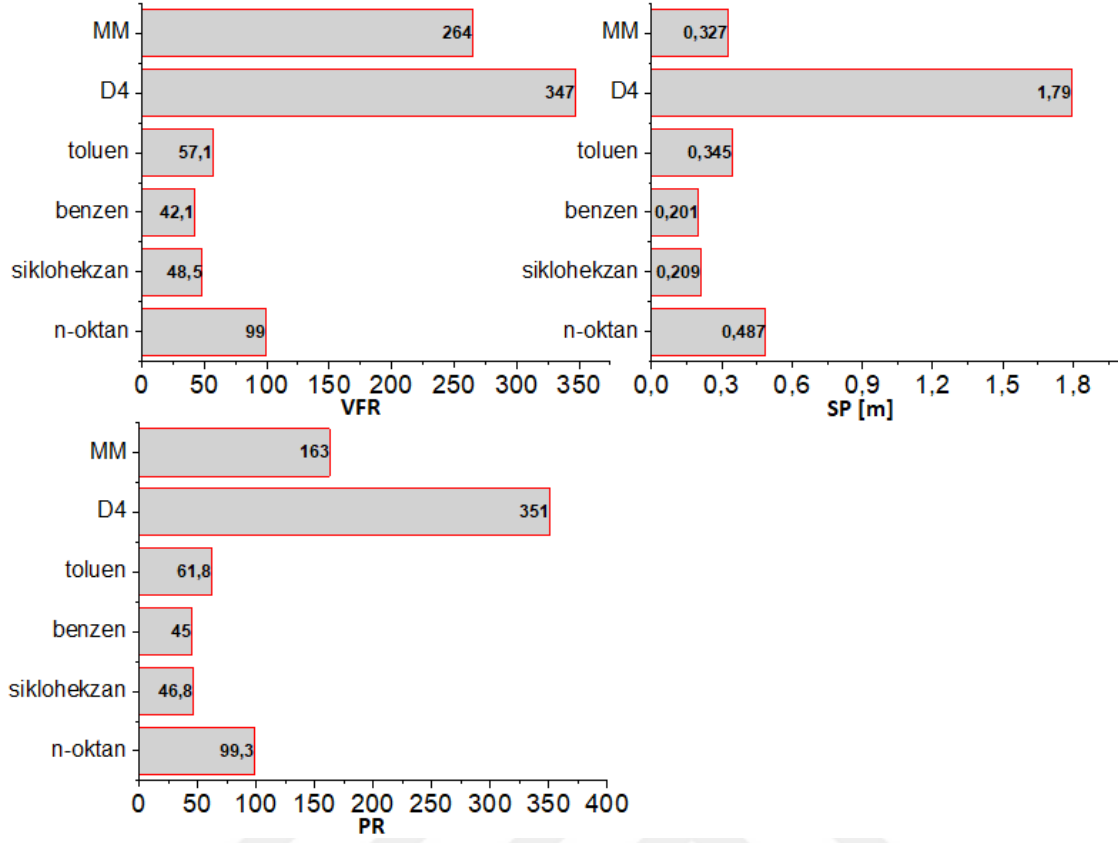
Şekil 4.29. 280 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi



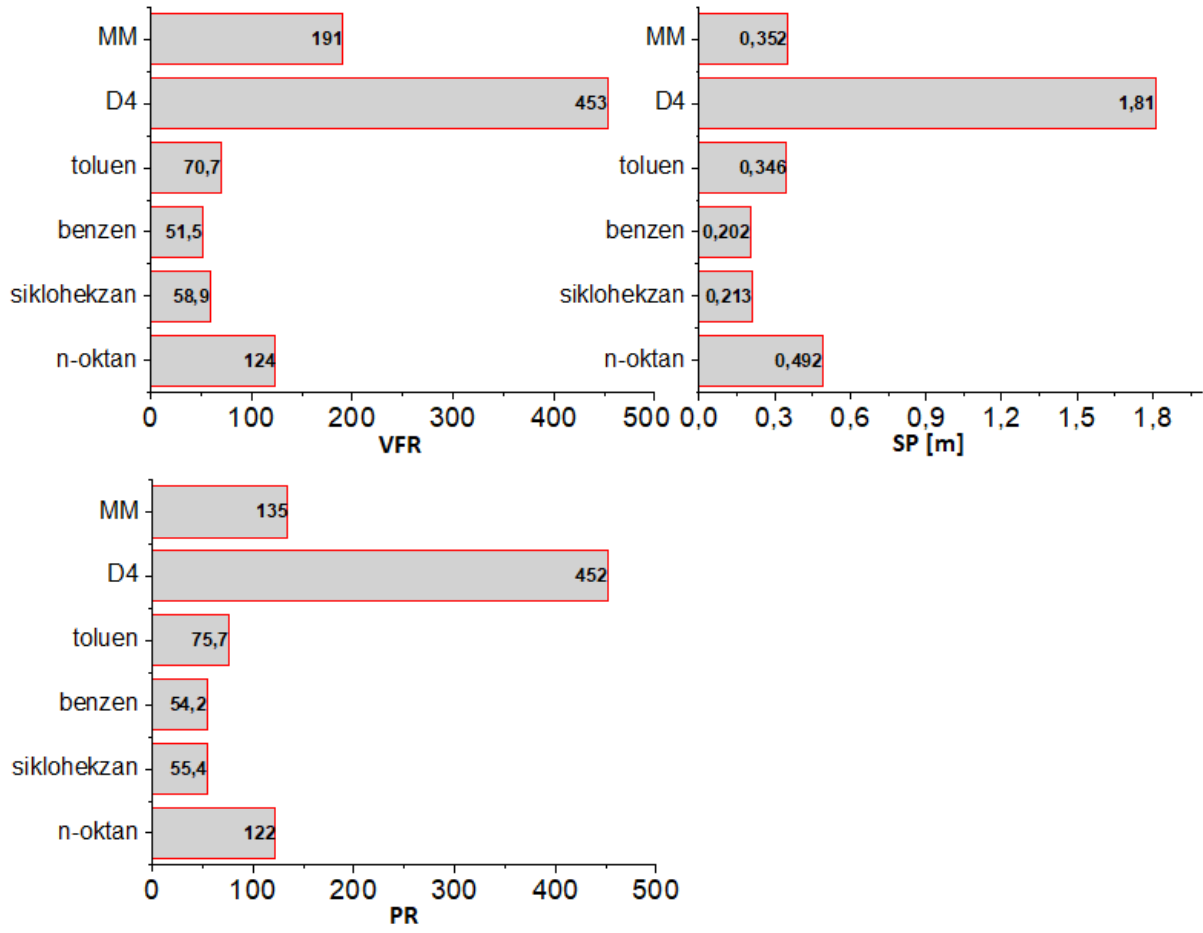
Şekil 4.30. 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.31-4.32’de 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında 6 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{PP,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları hacimsel debi oranı, türbin boyut parametresi ve türbin basınç oranı yer almaktadır.

- Atık ısı uygulamalarında olduğu gibi en iyi türbin tasarım parametreleri benzene akışkanında elde edilmiştir.
- Atık ısı uygulamalarında en olumsuz akışkan D4’ten sonra n-oktan akışkanı iken bu ısı kaynağı sıcaklıklarında D4’ten sonra MM akışkanının geldiği görülmektedir.
- MM’li sistemin toluen’den daha yüksek VFR değerlerine sahip olmasına rağmen SP analizinde toluen’den daha iyi bir performansa sahip olduğu belirtilmiştir.



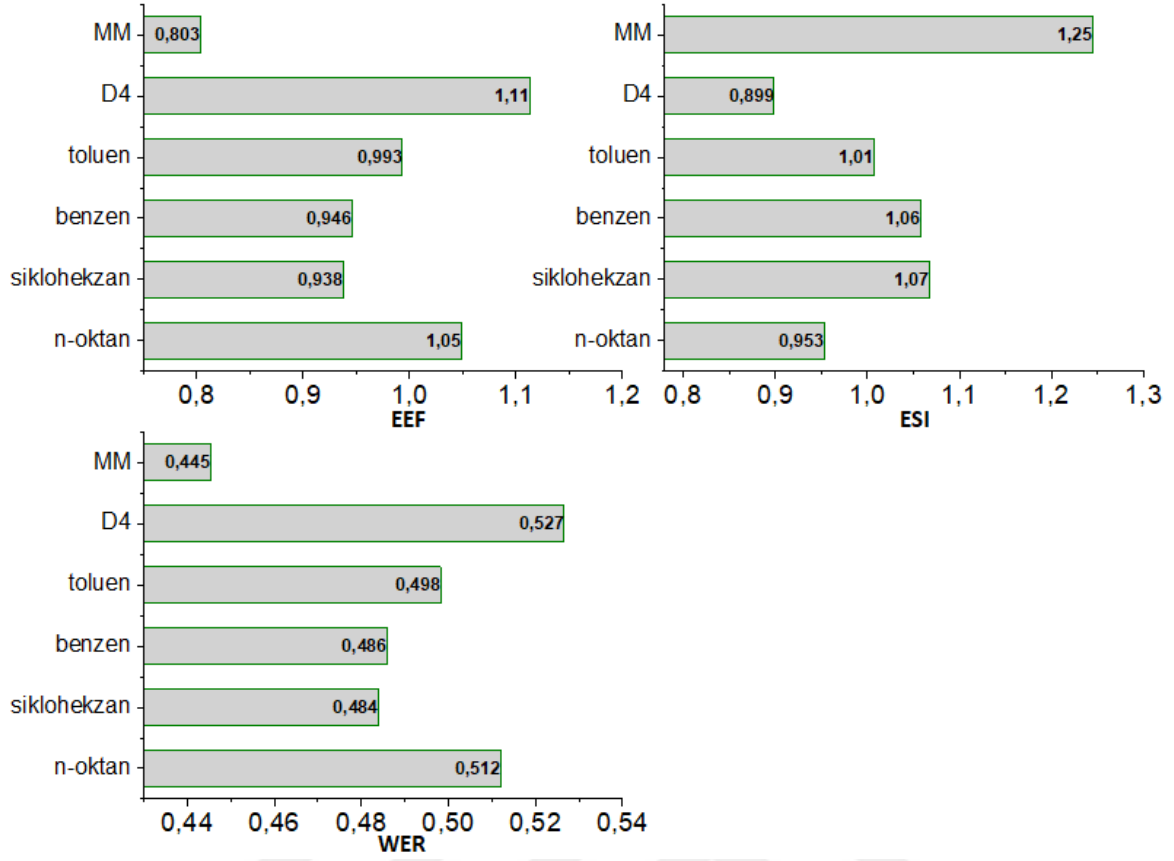
Şekil 4.31. 280 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi



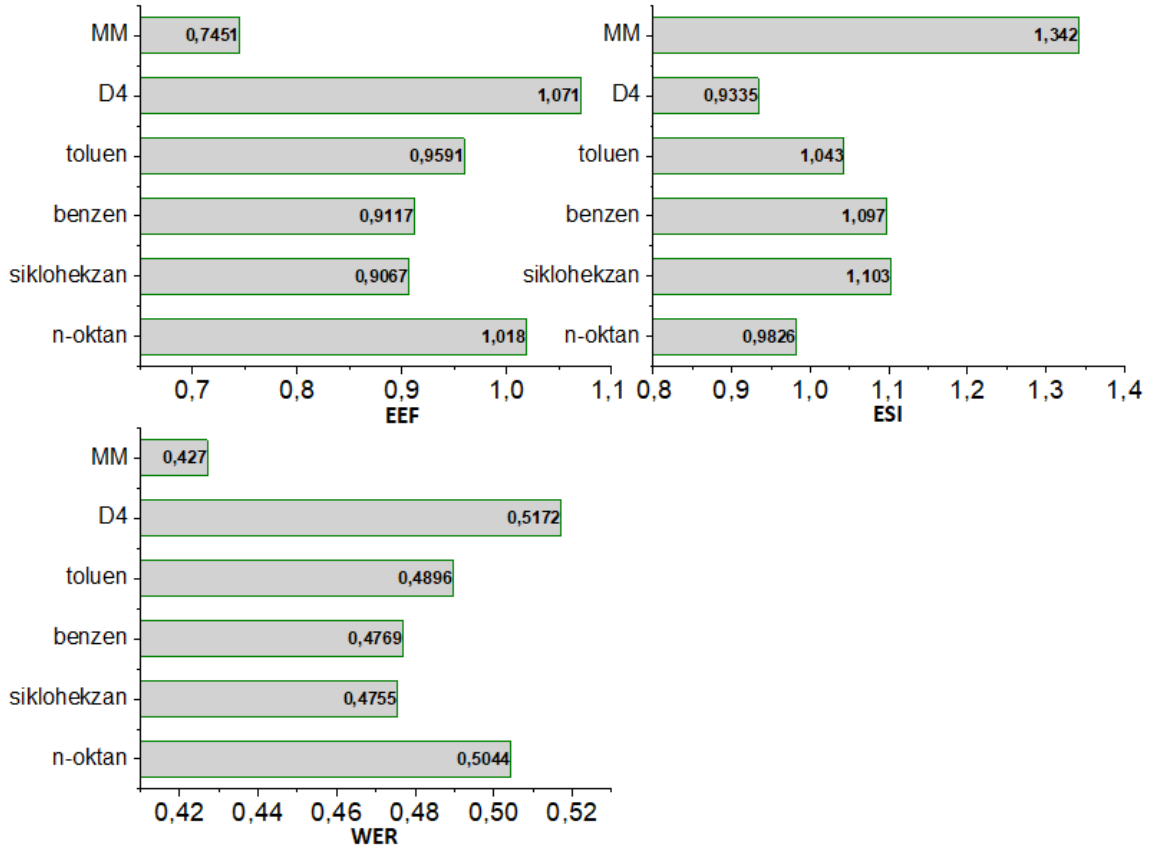
Şekil 4.32. 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların türbin performans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 4.33-4.34'te 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında 6 farklı akışkanın optimum $\Delta T_{pp,e}$ noktasında istenen amaç fonksiyonları altında ulaştıkları termodinamik sürdürülebilirlik indeksleri yer almaktadır.

- Atık ısı uygulamalarında en düşük EEF değerleri sikloheksan'da elde edilirken biyokütle ve yüksek sıcaklıklı güneş enerjisi uygulamalarında ise MM akışkanında elde edilmiştir.
- 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında MM'li sistemin EEF değerinin sikloheksan'lı sistemden sırasıyla %14,3 ve %17,8 daha az olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.33. 280 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi



Şekil 4.34. 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı akışkanların termodinamik sürdürülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi

Çizelge 4.12’de 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıkları altında belirlenen amaç fonksiyonları için en iyi performans gösteren akışkanlar özetlenmiştir. Çizelgede amaç fonksiyonları altında optimum olarak belirlenen akışkanın diğer akışkanlara göre ortalama performans artış yüzdesi belirtilmiştir. Performans artış yüzdelere göre belirlenen ağırlık fonksiyonu sonucu 280 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında yaklaşık %52 oranında MM optimum akışkan olarak belirlenmiştir. 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında iyi bir performans gösteren benzen akışkanının 280 ve 290 °C’de de optimum olarak belirlenen MM akışkanına yakın bir performans gösterdiği dikkat çekmektedir.

Çizelge 4.12. 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi

$T_{h,i}$	$f_1(x)$ max ($\eta_{\text{ısı}}$)	$f_2(x)$ max (W_T)	$f_3(x)$ max (η_{II})	$f_4(x)$ min (I_T)	$f_5(x)$ min (VFR)	$f_6(x)$ min (EEF)	G(x)
280 °C	benzen (%15,0)	MM (%27,81)	MM (%12,33)	benzen (%10,32)	benzen (%32,22)	MM (%21,95)	%52, MM %48, benzen
290 °C	benzen (%17,05)	MM (%29,48)	MM (%13,07)	benzen (%9,92)	benzen (%32,73)	MM (%24,12)	%53, MM %47, benzen

Çizelge 4.13'te yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında 5 farklı ısı kaynağında 6 farklı amaç fonksiyonu dikkate alınarak belirlenen optimum akışkanların listesi verilmiştir. Tüm sıcaklık değerleri ve amaç fonksiyonlarının olduğu liste dikkate alındığında maksimum ısı verim ve minimum toplam tersinmezlik ve VFR açısından benzen'in tüm ısı kaynağı sıcaklıklarında önde olduğu görülmektedir. Aynı şekilde maksimum türbin gücü olarak ise MM'nin tüm ısı kaynağı sıcaklıklarında iyi bir performans ortaya koyduğu görülmektedir.

Çizelge 4.13. ORÇ'nin yüksek sıcaklıklı uygulamalarında farklı amaç fonksiyonları altında optimum akışkanın belirlenmesi

$T_{h,i}$	$f_1(x)$ max ($\eta_{\text{ısı}}$)	$f_2(x)$ max (W_T)	$f_3(x)$ max (η_{II})	$f_4(x)$ min (I_T)	$f_5(x)$ min (VFR)	$f_6(x)$ min (EEF)	G(x)
250 °C	benzen	sikloheksan	MM	benzen	benzen	sikloheksan	benzen
260 °C	benzen	sikloheksan	MM	benzen	benzen	sikloheksan	benzen
270 °C	benzen	sikloheksan	MM	benzen	benzen	sikloheksan	benzen
280 °C	benzen	MM	MM	benzen	benzen	MM	MM
290 °C	benzen	MM	MM	benzen	benzen	MM	MM

Tezin dördüncü bölümünün bu kısmında özetle, ORÇ'nin düşük ve yüksek sıcaklıklı uygulamaları kapsamında 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için farklı amaç fonksiyonları altında optimum organik akışkan belirlenmiştir.

Özellikle düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamalarında ısı kaynağı sıcaklığında 10 °C'lik artışın amaç fonksiyonu sonuçlarını değiştirdiği görülmüştür. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığı için R141b optimum akışkan olarak tespit edilmesine rağmen 100 ve 110 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında ise R1234yf optimum akışkan olarak önerilmiştir. Isı kaynağı sıcaklığının 120 °C'ye yükselmesi ile R1234yf'nin performansının azaldığı; R1234ze'nin ise ısı verim maksimizasyonu ve toplam tersinmezlik minimizasyonu bakımından iyi bir performans

gösterdiği belirlenmiştir. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığı için ise R152a optimum akışkan olarak tespit edilmiştir. 90, 100 ve 110 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında toplam tersinmezlik minimizasyonunda R141b'nin; VFR minimizasyonunda ise R152a'nın performansı dikkat çekmektedir. Kuru akışkanların sadece 120 ve 130 °C'deki VFR minimizasyonu hariç hiçbir amaç fonksiyonunda iyi bir performans sergilemediği tespit edilmiştir.

ORÇ'nin yüksek sıcaklıklı uygulamalarında ise ısı kaynağı sıcaklık artışının optimum akışkanı daha az etkilediği belirlenmiştir. 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında benzen; 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında MM akışkanı optimum olarak belirlenmiştir. Isı kaynağı sıcaklığının artması ile benzen'li sistemin performansında değişim gözlenmezken MM'nin performansı yüksek oranda artmıştır. MM'nin 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında sadece türbin gücü maksimizasyonunda iyi bir performans göstermesine rağmen ısı kaynağı sıcaklığının artması ile ekserji verimi ve EEF değerinde de en iyi performansı gösteren akışkan olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında sikloheksan'lı sistemin benzen'li sisteme yakın bir performans sergilediği görülmüştür. Siloksan grubu akışkanların hiçbir amaç fonksiyonu altında iyi bir performans sergilemediği tespit edilmiştir.

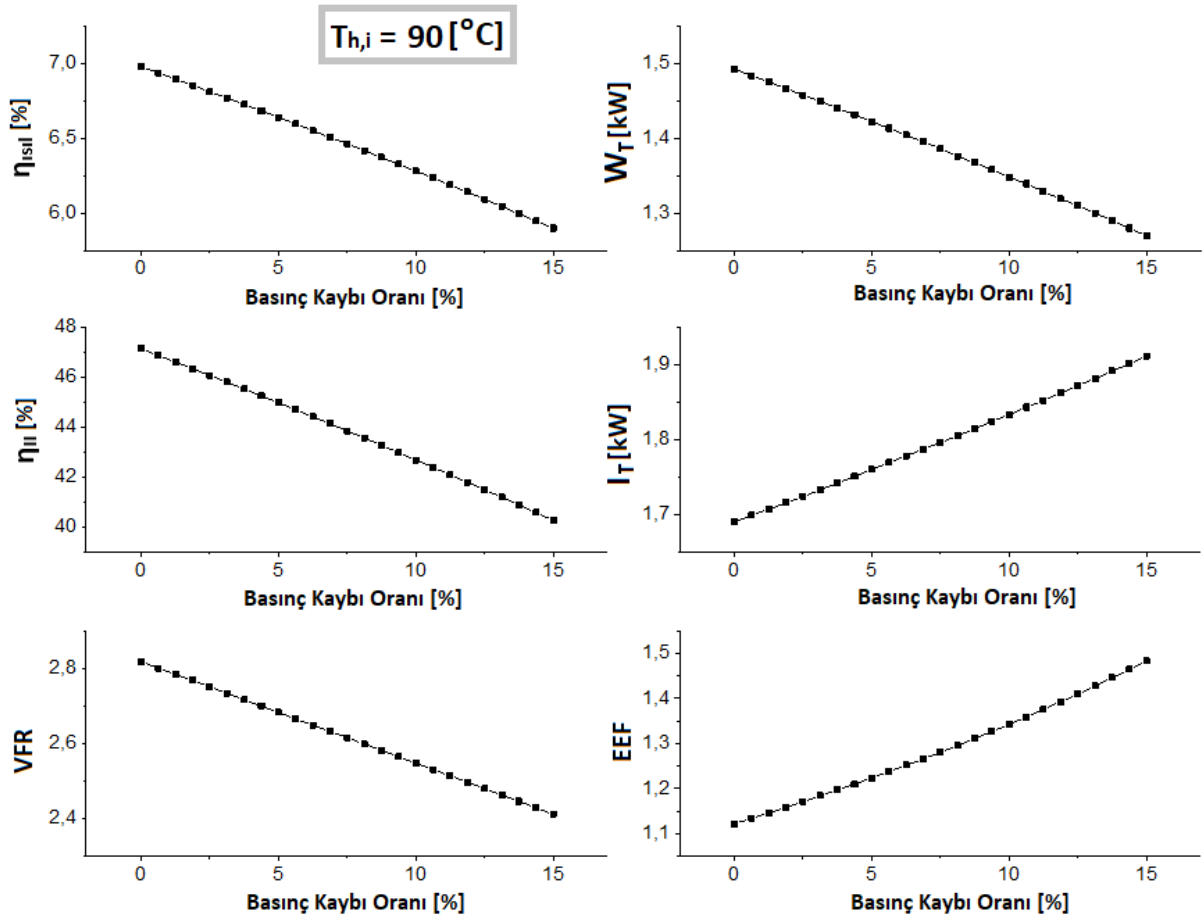
10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için 6 farklı amaç fonksiyonu altında optimum akışkanın belirlenmesi üzerine yapılan çalışmanın akış diyagramı Şekil 4.35'te verilmiştir.

4.4.3. ORÇ Sisteminde Oluşan Basınç Kaybının Amaç Fonksiyonlarına Etkisinin Belirlenmesi

Tezin dördüncü bölümünde ayrıca evaporatör ve kondenserde oluşan basınç kayıplarının sistemin performansına etkisi belirlenmiştir. Yukarıdaki kısımda belirlenen çok amaçlı genetik algoritma sınır şartları sabit tutulmuştur. Sadece ihmal edilen basınç kaybı özelliği değiştirilmiştir. Evaporatör ve kondenserde oluşabilecek basınç kaybı oranı sisteme tanıtılmıştır. Basınç kaybının ihmal edildiği durumdan başlayarak basınç kaybı oranının %1 ile %15 arasında değişmesinin farklı amaç fonksiyonlarındaki etkisi tespit edilmiştir. Düşük ve yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamalarından birer ısı kaynağı sıcaklığı için termodinamik optimizasyon uygulanmıştır.

Şekil 4.36 ve 4.37’de 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında R141b akışkanı; 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında ise benzene akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ sisteminde oluşabilecek basınç kaybının performansa etkisi 6 farklı amaç fonksiyonuna etkisi görülmektedir. R141b kullanılarak tasarlanan 90 °C ısı kaynağındaki ORÇ için Şekil 4.36 incelendiğinde;

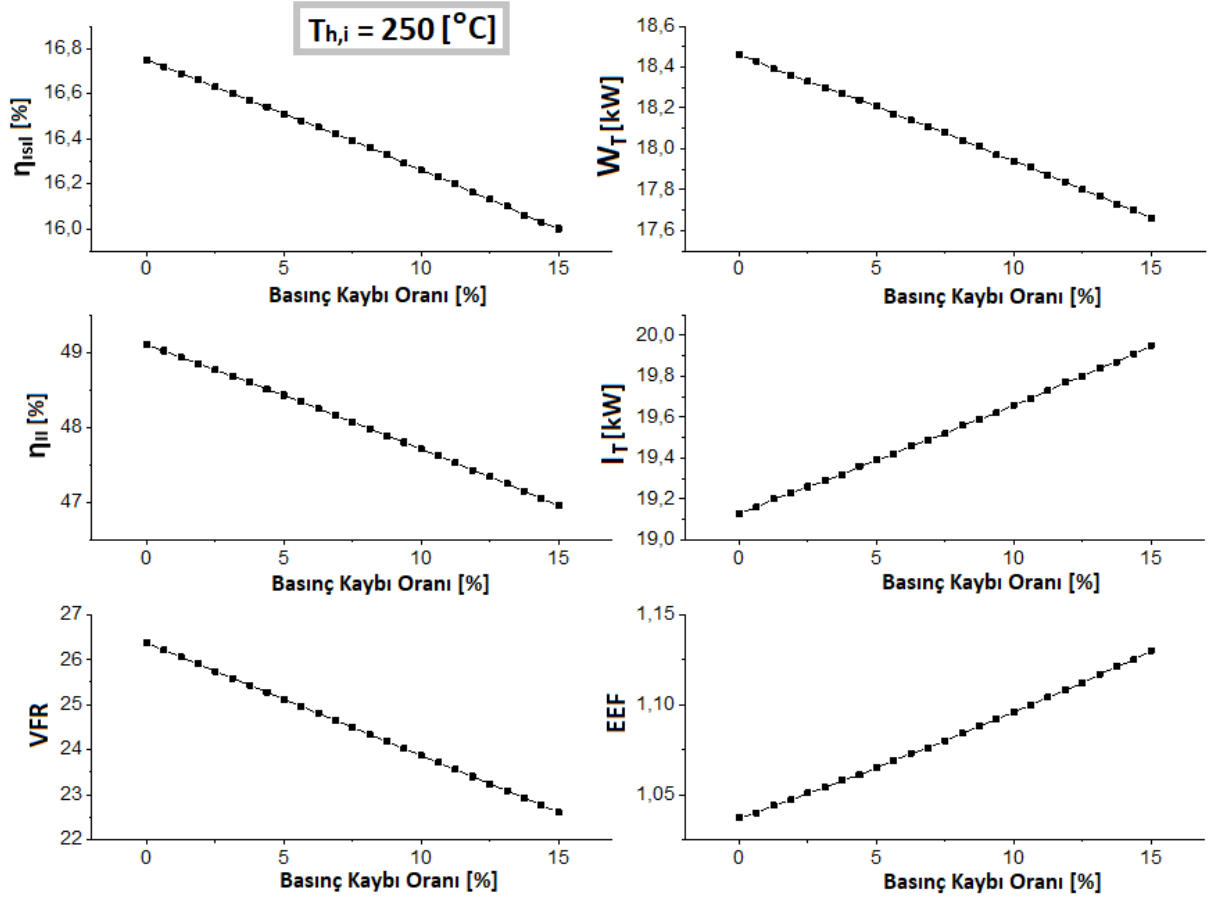
- Basınç kaybı ihmal edildiğinde %6,97 oranında ısı verim elde edilirken, basınç kaybı oranının %15 olduğu durumda ısı verim değeri %5,9 değerine azalmaktadır.
- Basınç kaybının ihmal edildiği durumdan basınç kaybı oranının %15’e yükselmesi arasındaki durumda ısı verim, türbin gücü, ekserji verimi ve VFR sırasıyla %15,42, %14,87, %14,55 ve %14,4 azalmaktadır. Toplam tersinmezlik değerinin ise %13 arttığı belirlenmiştir.
- Evaporatör ve kondenserde meydana gelen basınç kaybının en fazla EEF değerini etkilediği belirtilmiştir. Basınç kaybı ihmal edildiğinde EEF değeri 1,122 iken, basınç kaybı oranının %15 olduğu durumda EEF değeri %32,2 oranında artarak 1,484 değerine yükselmektedir.



Şekil 4.36. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında tasarlanan ORÇ’de basınç kaybı oranının amaç fonksiyonlarına etkisi

Benzen kullanılarak tasarlanan 250 °C ısı kaynağındaki ORÇ için Şekil 4.37 incelendiğinde;

- Basınç kaybı ihmal edildiğinde %16,75 oranında ısı verim elde edilirken, basınç kaybı oranının %15 olduğu durumda ısı verim değeri %15,9 değerine azalmaktadır.
- Basınç kaybının ihmal edildiği durumdan basınç kaybı oranının %15’e yükselmesi arasındaki durumda ısı verim, türbin gücü ve ekserji verimi sırasıyla %5, %4,3 ve %4,4 azalmaktadır. Toplam tersinmezlik ve EEF değerinin ise sırasıyla %3,5 ve %8,9 arttığı belirlenmiştir.
- Evaporatör ve kondenserde meydana gelen basınç kaybının en fazla VFR değerini etkilediği belirtilmiştir. Basınç kaybı ihmal edildiğinde VFR değeri 26,37 iken, basınç kaybı oranının %15 olduğu durumda VFR değeri %14,25 oranında artarak 22,61 değerine yükselmektedir.



Şekil 4.37. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında tasarlanan ORÇ’de basınç kaybı oranının amaç fonksiyonlarına etkisi

ORÇ sisteminde basınç kaybı oranının etkisinin incelendiği bu kısımda; 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında basınç kaybı oranının en fazla EEF değerini etkilediği, 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında ise en fazla VFR değerini etkilediği tespit edilmiştir.

Evaporatör ve kondenserde meydana gelen basınç kaybının termodinamik performans olarak düşük sıcaklıklı ORÇ sistemini daha fazla etkilediği tespit edilmiştir. Özellikle ısı verim değerleri incelendiğinde basınç kaybı oranının %15’e ulaşması ile 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında ısı veriminin %15 azalmasına rağmen, 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında ise %5 azaldığı tespit edilmiştir.

5. DÜŞÜK KAPASİTELİ DEĞİŞİK ISI KAYNAKLI ORÇ PERFORMANS PARAMETRELERİNİN PARAMETRİK OPTİMİZASYONU VE HASSASİYET ANALİZİ

Dördüncü bölümde ORÇ'nin değişik ısı kaynakları için farklı amaç fonksiyonları altında termodinamik optimizasyon yapılarak optimum akışkan belirlenmişti. Bu bölümde ise performans parametrelerinin istenen amaç fonksiyonlarına etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu parametrelerin amaç fonksiyonları altında önem sırası hassasiyet analizi ile belirlenmiştir. Bunun için Taguchi optimizasyon tekniğinden yararlanılmıştır. Daha sonra varyans analizi (ANOVA) ile de performans parametrelerinin amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları belirlenmiştir. Son olarak ise Taguchi-ANOVA sonuçları dikkate alınarak her bir amaç fonksiyonu için ayrı regresyon denklemi elde edilmiştir. Bu denklemler kullanılarak tahmin edilen değerler ile EES analiz sonuçları farklı istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırılmıştır.

5.1. Kaynak Araştırması

Tezin bu bölümünde yapılan kaynak araştırmasında ORÇ parametrelerinin parametrik optimizasyonu ile ilgili çalışmalar araştırılmıştır. Parametrik optimizasyon için kullanılan yapay sinir ağları ve Taguchi-ANOVA yöntemleri incelenmiştir. Yazarların çalışmaları sonunda ulaştıkları sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Wang vd. (2014), jeotermal kaynaklı ORÇ'nin parametrik optimizasyonu ve hassasiyet seviyesi üzerinde çalışma yapmışlardır. Amaç fonksiyonunu termodinamik ve ekonomik performans olarak belirlemişlerdir. Performans parametreleri, net güç, ısıl verim, türbin boyut parametresi, geri iş oranı ve toplam ısı transfer kapasitesi olarak belirlenmiştir. Optimum ortogonal tasarım sonuçlarına R245fa akışkanı ile aşırı kızdırma sıcaklığının 10 °C, $\Delta T_{PP,e}$ ile $\Delta T_{PP,k}$ 'nin 5 °C, buharlaşma sıcaklığının ise 65 °C, pompa ve türbin izantropik veriminin sırasıyla %75 ve %85 olduğu durumda ulaşıldığını tespit etmişlerdir. R245fa akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ sisteminin hassasiyet seviye değerlerinde ilk sırada buharlaşma sıcaklığının olduğunu belirtmişlerdir.

Liu vd. (2014), jeotermal kaynaklı ORÇ'nin farklı parametreler üzerindeki hassasiyet seviye değerlerini belirlemişlerdir. Sistem parametreleri, organik akışkan, aşırı kızdırma sıcaklığı, $\Delta T_{PP,e}$ ile $\Delta T_{PP,e}$, buharlaşma sıcaklığı ve türbin ile pompanın izantropik verimidir. Farklı jeotermal ısı kaynağı sıcaklıklarında sistemin performansı ayrı ayrı belirlenmiştir. Jeotermal ısı kaynağı sıcaklığının değişiminin net güç, türbin boyut parametresi ve toplam ısı

transfer katsayısı üzerinde etkisi olmasına rağmen ısı verim üzerinde bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. 100 °C'nin altındaki ısı kaynağı sıcaklıklarında $\Delta T_{pp,e}$ 'nin net güç üzerindeki en önemli faktör olmasına rağmen 100 °C'nin üstündeki ısı kaynağı sıcaklıklarında ise buharlaşma sıcaklığının en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir.

Kumar vd. (2016), Taguchi metodunu kullanarak ORÇ sisteminin termodinamik optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Taguchi'de faktör değerleri olarak farklı organik akışkan, türbin giriş sıcaklığı, kondenser sıcaklığı ve kütleli debi; performans parametreleri olarak ise ısı verim, net güç ve toplam tersinmezlik belirlenmiştir. L9 ortogonal dizi kullanılmıştır. Isıl verim ve net güç üzerinde en fazla etkiye sahip parametrenin türbin giriş sıcaklığı iken; toplam tersinmezlik için ise organik akışkan ve kütleli debi olduğunu tespit etmişlerdir.

Yılmaz vd. (2016), R410a ve R407c akışkanları kullanılarak tasarladıkları reküperatörlü ORÇ'nin verimini yapay sinir ağları ile belirlenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Buharlaşma sıcaklığı, yoğuşma sıcaklığı, soğutma ve aşırı kızdırma sıcaklıklarına bağlı olarak ısı verim tahmin edilmiştir. Gerçek değerler ile yapay sinir ağlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında her iki akışkan için de R^2 değerinin %99 çıktığını tespit etmişlerdir. Herhangi bir hazır yazılıma gerek olmadan sistemin ısı veriminin belirlenmesinde yapay sinir ağlarının kullanılabilirliğini belirtmişlerdir.

Bademlioğlu vd. (2018), reküperatörlü ORÇ'de ısı verime etkileyen parametreleri Taguchi ve ANOVA yöntemlerini kullanarak incelemişlerdir. Bu parametreleri, organik akışkan, $\Delta T_{pp,e}$, $\Delta T_{pp,k}$, buharlaşma ve yoğuşma sıcaklığı, aşırı kızdırma sıcaklığı, reküperatör etkinliği ve türbin ile pompa izantropik verimi olarak belirlemişlerdir. Taguchi'de L27 ortogonal tasarımı kullanarak ısı verim değerlerini elde etmişlerdir. Isıl verim üzerinde parametrelerin katkı oranlarını belirlemişlerdir. Isıl verimi %70 oranında buharlaşma ve yoğuşma sıcaklığı ile türbin izantropik veriminin etkilediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, ısı verim yönünden en iyi ve en kötü sonucun elde edildiği ortogonal dizilimler elde edilmiştir.

Zhi vd. (2019), R1234ze akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ için yapay sinir ağları yöntemi ile çoklu parametrik analiz, optimizasyon ve verim tahmini üzerinde çalışmışlardır. Performans parametrelerinin ısı verim ve ekserji verimi üzerindeki hassasiyet analizlerini yapmışlardır. ORÇ üzerinde türbin izantropik verimi ve ısı kaynağı sıcaklığının en çok etkiye sahip olduklarını belirtmişlerdir. Yüksek basınçlı çevrimlerde parametrelerin sistem verimi üzerindeki etkisi değiştiğinden dolayı optimum yüksek basınç değerinin tahmin edildiği bir model geliştirmişlerdir.

Kılıç ve Arabacı (2019), yapay sinir ağı ve uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi kullanılarak ORÇ'nin performansını belirlemişlerdir. Organik akışkan olarak, R123, R125, R227, R365mfc, SES36'yı kullanmışlardır. Performans parametreleri, buharlaşma sıcaklığı, kondenser sıcaklığı, soğutma ve aşırı kızdırma sıcaklıkları olarak belirlenmiştir. Yapay sinir ağlarının ORÇ ısı veriminin tahmin edilmesinde başarılı sonuçlara ulaştığı tespit edilmiştir. Gerçek değerler ile yapay sinir ağlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında tüm akışkanlar için R^2 değerinin yaklaşık %99 çıktığını tespit etmişlerdir.

Zhao vd. (2019), ORÇ sisteminin performansının hızlı bir şekilde tahmin edilmesi için optimum ampirik korelasyon üzerine çalışma yapmışlardır. Isıl verim, ekserji verimi ve net gücün ısı kaynağı özelliklerine bağlı olarak ifade edilebileceğini belirtmişlerdir. Bunlar ısı kaynağı sıcaklığı ve organik akışkanın kritik sıcaklığı ile doyma basıncına bağlı olarak elde edilen bir faktör değeridir. Ampirik korelasyonun nümerik hesaplamalar ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması sonucunda R^2 değerinin %97 olduğunu tespit etmişlerdir.

Bademlioğlu vd. (2020), ORÇ sisteminin performansını çok amaçlı optimizasyon ile belirlemişlerdir. Bademlioğlu vd. (2018) çalışmasında olduğu gibi aynı performans parametreleri üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalarında ısı verimin yanı sıra ekserji verimini de incelemişlerdir. Sistem optimizasyonu için Taguchi-ANOVA yöntemlerine ek olarak Grey ilişkisel analizini kullanmışlardır. Sistem performansını buharlaşma sıcaklığı, türbin izantropik verimi, reküperatör etkenliği ve yoğunlaşma sıcaklığının sırasıyla %31,37, %19,53, %16,64 ve %16,61 oranında etkilediğini tespit etmişlerdir.

Bu bölüm için yapılan kaynak araştırmasında ORÇ'de parametrik optimizasyon ve hassasiyet analizi çalışmalarının sınırlı olduğu görülmüştür. İncelenen çalışmalarda Taguchi-ANOVA yöntemleri kullanılmasına rağmen ısı kaynağı sıcaklığının sabit kabul edildiği görülmüştür. Fakat bu tez çalışmasının dördüncü bölümünde değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında farklı amaç fonksiyonları altında sonuçların farklı çıktığı ve 10 °C'lik ısı kaynağı sıcaklığındaki artışın optimum akışkanı değiştirdiği görülmüştür. Bundan dolayı sabit ısı kaynağı sıcaklığı altında belirlenen performans parametrelerinin katkı oranları parametre etkisini tam olarak yansıtmamaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için ayrı ayrı parametrik optimizasyon çalışması yapılarak her biri için hassasiyet analizi yapılmıştır.

Kaynak araştırmasında özellikle $\Delta T_{PP,e}$ 'nin sabit ısı kaynağı sıcaklığı altında ORÇ performansı üzerindeki katkı oranı ile ilgili çalışmaların olduğu gözükmektedir. Fakat bu tez çalışmasında farklı akışkanların değişik ısı kaynağı sıcaklıkları altında optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerlerinin birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir. $\Delta T_{PP,e}$ etkisinin ısı kaynağı sıcaklığına

bağlı olduğu belirtilmiştir. İncelenen çalışmalarda sabit ısı kaynağı sıcaklığı altında $\Delta T_{PP,e}$ 'nin diğer parametreler ile karşılaştırılması ve buna bağlı olarak hassasiyet seviyesinin belirlenmesi ORÇ sistemi üzerinde $\Delta T_{PP,e}$ etkisinin anlaşılması bakımından yeterli değildir. Bu tez çalışmasının bir önceki bölümünde optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerlerinin belirlenmesinin ardından farklı amaç fonksiyonlarının incelenmesiyle uygun akışkanlar belirlenmişti. Bu akışkanların kullanılmasıyla 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında $\Delta T_{PP,e}$ 'nin etkisi tespit edilmiştir.

Kaynak araştırmasında Taguchi-ANOVA yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalarda amaç fonksiyonlarının sınırlı olduğu görülmüştür. Bazı çalışmalarda performans parametrelerinin katkı oranları sadece ısıl verim maksimizasyonuna bağlı belirlenirken birkaç çalışmada türbin boyut parametresi ve geri iş oranı gibi parametrelerden yararlandığı görülmüştür. Performans parametrelerinin termodinamik sürdürülebilirlik parametreleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu tez çalışmasında ise 6 farklı amaç fonksiyonu ele alınmış olup performans parametrelerinin çevresel etki faktörü değeri üzerindeki katkı oranları ve hassasiyet seviyeleri de belirlenmiştir.

Kaynak araştırmasında ORÇ'nin performansının herhangi bir yazılıma bağlı olmadan belirlenmesi veya ampirik bir denklem ile tahmin edilmesi üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Sadece Zhao vd. (2019) çalışmasında sadece ısı kaynağı özelliklerine bağlı olarak ısıl verim, ekserji verim ve net güç için ampirik bir denklem elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında ise Taguchi-ANOVA hassasiyet analiz sonuçları dikkate alınarak 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığında 6 farklı amaç fonksiyonu için ayrı ayrı tüm performans parametrelerini içeren ampirik denklem türetilmiştir. Bu türetilen denklemlerin güvenilirliği 3 farklı istatistiksel yöntem kullanılarak EES analiz sonuçları ile karşılaştırılmasıyla sağlanmıştır.

5.2. Materyal ve Yöntem

ORÇ'nin farklı amaç fonksiyonları altında performans parametrelerinin daha verimli bir şekilde seçilmesini sağlamak ve simülasyon için harcanan zamanı ve parametrelerin etki oranını belirlemek adına Taguchi yönteminden yararlanılmıştır.

Temel olarak Taguchi yöntemi yüksek kalite sistemleri için güçlü bir yöntemdir. Maliyet, kalite ve performans tasarımlarını optimize etmek için basit verimli ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Son yıllarda çok geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Taguchi yöntemi, bir ürün ya da prosesin mühendislik optimizasyonunu; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı gibi üç adımlık bir yaklaşım içerisinde çözebilmeyi amaçlamaktadır. Sistem tasarımında; temel fonksiyonel bir prototip tasarım üretmek için

bilimsel veri tabanı oluşturulur. Sistem tasarımını parametre tasarımı takip eder. Bu tasarımın amacı; kalite karakteristiklerini geliştirmek için proses parametre değerlerinin ayarlarını optimize etmek ve optimal proses parametreleri altında ürün parametre değerlerini tanımlamaktır.

Taguchi yönteminin kullanım sebebi, çıktı değerlerinin hedefte ve minimum varyansla sağlanmasıdır. Bu amaçla sistem tasarımında ortaya konulan tasarımın uygulanarak, etki eden faktörlerin uygun seviyelerinin belirlenmesi işlemine parametre tasarımı denir.

Parametre tasarımı özetle;

1. Kalite karakteristiklerinin ve tasarım parametrelerinin belirlenmesi,
2. Tasarım parametreleri ve etkileşimlerinin seviyelerinin belirlenmesi,
3. Uygun bir lineer grafik ya da ortogonal dizinin belirlenmesi ve bu ortogonal diziyen parametrelerin uygun seviyelerinin yerleştirmesi,
4. Ortogonal diziyen yerleştirilen seviyelerde deneysel/simülasyon çalışmanın gerçekleştirilmesi,
5. Deneysel/Simülasyon sonuçları kullanarak sinyal/gürültü (Signal/Noise-S/N) oranlarının hesaplanması ve sonuçların analiz edilmesi,
6. Optimal tasarım parametrelerinin seçilmesi,
7. Doğrulama testlerinin yapılması şeklinde sıralanabilir.

Taguchi kısmi faktöriyel deney tasarımlarına “ortogonal dizi” ismini vermiştir. Ortogonal diziler Taguchi tarafından $LX(Y^Z)$ şeklinde kodlanmıştır.

Bu kodlamada;

L: Latin kare tabanlı anlamındadır.

X: Tasarımdaki deney/simülasyon sayısı,

Y: Deney/Simülasyondaki seviye sayısı,

Z: Deney/Simülasyonda kullanılacak maksimum faktör sayısıdır (Kutlu, 2009).

Taguchi yönteminde, analiz değişkeni ya da performans ölçütü olarak kullanılması için, sisteme ait varyasyonu azaltmak için S/N oranı olarak belirtilen istatistik geliştirilmiştir. Bu tasarımda ölçülmek istenen sinyalin (Signal-S) gürültü faktörüne (Noise-N) oranıdır ve burada S sistemin verdiği gerçek değeri, N ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil eder ve bu oranının birimi dB (desibel) olarak ifade edilir. Bu yöntem ile hedeflenen; ürünün karakteristik değerlerini mümkün olduğunca hedef değerlere yaklaştırmak ve minimum sapmayı sağlamaktır. Amaçlanan kalite standardına göre üç farklı S/N oranı fonksiyonu vardır (Tuğral, 2019).

S/N oranlarına ilişkin ilgili bağıntılar Denklem 5.1-5.5 ile verilmiştir (Yıldırım, 2011).

- En küçük en iyi olduğu durumda:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5.1)$$

- En büyük en iyi olduğu durumda:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5.2)$$

- Nominal en iyi olduğu durumda:

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (5.3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5.4)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (5.5)$$

(Eşitliklerde y_i : Performans yanıtının i . gözlem değeri, n : bir denemedeki test sayısı, \bar{y} : Gözlem değerinin ortalaması ve S^2 : Gözlem değerlerinin varyansını ifade etmektedir).

Bu çalışmada 6 farklı amaç fonksiyonu bakımından sistem incelenmiştir. Buna göre, ısıl verim, türbin gücü ve ekserji verimi maksimizasyonu için ‘en büyük en iyidir’ prensibi; toplam tersinmezlik, hacimsel debi oranı ve çevresel etki faktörü minimizasyonunda ise ‘en küçük en iyidir’ prensibi uygulanmıştır.

Son olarak, farklı amaç fonksiyonları için Taguchi ve ANOVA ile elde edilen veriler kullanılarak regresyon denklemleri türetilmiştir. Bu denklemlerin güvenilirliği 3 farklı istatistiksel yöntem kullanılarak elde edilen hata oranları ile belirlenmiştir.

Bu bağıntılar Denklem 5.6-5.8 ile verilmiştir (Ayodele vd. 2019).

- Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error-MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{Y_{i,pred} - Y_{i,act}}{Y_{i,act}} \right| \right) \times 100 \quad (5.6)$$

- Oransal Hata Kareleri Ortalamasının Karekökü (Relative Root Mean Squared Error-RRMSE)

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{i,pred} - Y_{i,act})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{i,act}} \times 100 \quad (5.7)$$

- Düzeltilmiş Belirleme Katsayısı (Detemination of Coefficient- R^2)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,pred} - \bar{Y}_{i,pred})^2 \times \sum_{i=1}^n (Y_{i,act} - \bar{Y}_{i,act})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i,pred} - \bar{Y}_{i,pred})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i,act} - \bar{Y}_{i,act})^2}} \right)^2 \quad (5.8)$$

(Eşitliklerde $\gamma_{i,pred}$: Tahmin edilen değeri, $\gamma_{i,act}$: Gerçek değeri, n: bir denemedeki test sayısı, \bar{y} : İlgili değerlerin ortalamasını ifade etmektedir).

5.3. Model Doğrulanması

Bu kısımda öncelikli olarak Taguchi yönteminin ORÇ sistemlerinde kullanılabilirliği incelenmiştir.

Deneysel çalışmalarda daha ön planda olan Taguchi yönteminin ORÇ'nin parametrik optimizasyonunda kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla ön bir çalışma yapılmıştır. Bu yapılan çalışmada literatür araştırması kapsamında belirlenen iki farklı deneysel çalışma verileri dikkate alınarak Taguchi modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan Taguchi modelinin tahmin sonuçları ile deneysel veri sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Taguchi modeli ile parametrelerin etki oranlarının belirlenmesinin ardından sistemin çıktı değerine ilişkin regresyon denklemi elde edilmiştir. Bu denklemin de deneysel sonuçlara olan hassasiyeti belirlenmiştir. Taguchi model doğrulanması için yapılan çalışmanın detayları aşağıda belirtilmiştir.

Tasarlanan modelde kontrol faktörü olarak yoğunlaşma sıcaklığı (A), türbin giriş basıncı (B), türbin giriş sıcaklığı (C), türbin izantropik verimi (D) ve pompa izantropik verimi (E) seçilmiştir. Organik akışkan R245fa, amaç fonksiyonu olarak ise ısı verim maksimizasyonu seçilmiştir. Taguchi ortogonal dizi olarak L25 (5^5) belirlenmiştir. L25 ortogonal dizi kullanılarak tasarlanan sisteme ait faktörler ve seviye değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Organik akışkan ve ilgili tasarım değerleri deneysel çalışma verileri baz alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.1. Isıl verim maksimizasyonu için belirlenen performans parametreleri ve seviye değerleri

Faktörler/ Seviye Değerleri	Birim	1	2	3	4	5
Yoğuşma Sıcaklığı (A)	(°C)	27	30	33	36	39
Türbin Giriş Basıncı (B)	(kPa)	750	800	850	900	950
Türbin Giriş Sıcaklığı (C)	(°C)	90	95	100	105	110
Türbin İzantropik Verimi (D)	-	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
Pompa İzantropik Verimi (E)	-	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85

R245fa kullanılarak tasarlanan ORÇ için L25 (5^5) ortogonal dizi uygulanarak elde edilen ısı verim değerleri belirlenmiştir. Taguchi metodunda en yüksek ısı verim için optimum ortogonal dizilim ‘en büyük en iyi’ sinyal gürültü oranı (S/N) denklemi kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca performans parametrelerinin hassasiyet analizi yapılmıştır. S/N oran tablosu ve parametrelerin hassasiyet seviyesi ise Çizelge 5.2’de verilmiştir. Parametrelerin S/N oranlarının maksimum ve minimum değerleri arasındaki farktan ısı verim üzerindeki önem sırası anlaşılabilir. Türbin verimi ve yoğuşma sıcaklığının ısı verim üzerindeki etkisinin diğer parametrelere göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.2. S/N Oran Tablosu ve Parametrelerin Önem Sırası

Seviye	T ₁ (A)	P ₃ (B)	T ₃ (C)	$\eta_{\text{türbin}}$ (D)	η_{pompa} (E)
1	-20,28	-21,88	-21,19	-22,44	-21,24
2	-20,73	-21,51	-21,18	-21,81	-21,21
3	-21,20	-21,18	-21,20	-21,16	-21,26
4	-21,69	-20,90	-21,24	-20,64	-21,20
5	-22,23	-20,64	-21,31	-20,08	-21,21
$\Delta_{\text{max-min}}$	1,95	1,24	0,13	2,36	0,05
Hassasiyet Sırası	2	3	4	1	5

Çizelge 5.2’de her bir parametre için en yüksek S/N oranı görülen yerler belirtilmiştir. Buna göre R245fa’lı ORÇ için $A_1B_5C_2D_5E_4$ ortogonal dizilim kullanıldığında maksimum ısı verim değeri elde edilmektedir. Bu ortogonal dizilim kullanılması ile EES’de tespit edilen ısı verim değeri %11,75 iken Taguchi’nin tahmin ettiği değerin %11,65 olduğu tespit edilmiştir.

Taguchi hassasiyet analizinde ise performans parametrelerinin ısı verim üzerindeki önem sırası belirlenmiştir. Buna göre R245fa’lı ORÇ için performans parametrelerinin hassasiyeti $D>A>B>C>E$ olarak sıralanmıştır.

Taguchi metodu ile elde edilen S/N oranından ısı verim için optimum parametreler belirlenirken, ANOVA ile de performans parametreleri arasındaki ilişki tespit edilmiştir. S/N’nin yoğuşma sıcaklığı, türbin giriş basıncı, türbin giriş sıcaklığı, türbin ve pompa izantropik verimi arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. R245fa’lı ORÇ sisteminin ısı verimine olan en fazla etki eden parametrenin %50,26 ile türbin izantropik verimi olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra %34,57 ile yoğuşma sıcaklığı ve %14,57 ile de türbin giriş basıncı gelmektedir.

Taguchi ve ANOVA sonuçları dikkate alınarak performans parametrelerinin ısı verim üzerindeki etkisi ile ilgili olarak lineer ve ikinci dereceden regresyon denklemi elde edilmiştir. Bu bağıntılar, denklem 5.9 ve 5.10'de verilmiştir.

$$\eta_{\text{ısı}} = -0,00634 - 0,001658 * T_1 + 0,000065 * P_3 - 0,000009 * T_3 + 0,11996 * \eta_{\text{türbin}} + 0,00234 * \eta_{\text{pompa}} \quad (5.9)$$

$$\eta_{\text{ısı}} = -0,0498 - 0,000094 * T_1 + 0,000061 * P_3 - 0,000045 * T_3 + 0,1919 * \eta_{\text{türbin}} + 0,00234 * \eta_{\text{pompa}} + 0,000004 * T_1^2 + 0,0050 * \eta_{\text{türbin}}^2 - 0,002407 * T_1 * \eta_{\text{türbin}} \quad (5.10)$$

Regresyon denklemi ile yapılan tahmin değerleri ilk olarak EES termodinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. R245fa'nın yoğuşma sıcaklığı, türbin giriş sıcaklığı ve türbin izantropik veriminin rastgele belirlenen değişim aralıklarında tahmin edilen ısı verim değerleri Çizelge 5.3'te verilmiştir. MAPE istatistiksel yöntem kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Hata oranları incelendiğinde EES ile tahmin sonuçlarının yakın çıktığı görülmektedir. Lineer denklem ile ikinci dereceden denklem sonuçları çok yakın çıktığından basitliği ve kullanışlı olması bakımından lineer denklemin kullanılması önerilmektedir.

Çizelge 5.3. R245fa için performans parametrelerinin değişimiyle ısı verimin belirlenmesine yönelik EES ile regresyon tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

Performans Parametreleri					R245fa - $\eta_{\text{ısı}}$			Hata Analizi	
T_1	P_3	T_3	$\eta_{\text{türbin}}$	η_{pompa}	EES	Tahmin (L)	Tahmin (Q)	MAPE (%) (L)	MAPE (%) (Q)
27	750	90	0,75	0,75	0,09161	0,091267	0,092029	0,374959	0,457101
27,95	750	90	0,75	0,75	0,09005	0,089691	0,090433	0,398223	0,425622
28,89	750	90	0,75	0,75	0,08848	0,088133	0,088862	0,392315	0,431392
29,84	750	90	0,75	0,75	0,08692	0,086558	0,087281	0,416728	0,414844
30,79	750	90	0,75	0,75	0,08535	0,084983	0,085707	0,430369	0,417913
27	855,3	120	0,75	0,75	0,09714	0,097841	0,097102	0,721639	0,039067
27	881,6	120	0,75	0,75	0,09866	0,099551	0,098706	0,902595	0,04698
27	907,9	120	0,75	0,75	0,1001	0,10126	0,100311	1,158841	0,21044
27	934,2	120	0,75	0,75	0,1015	0,10297	0,101915	1,447783	0,408818
27	960,5	120	0,75	0,75	0,1029	0,104679	0,103519	1,728863	0,601798
28	1000	120	0,8553	0,75	0,1182	0,11822	0,118205	0,017164	0,004198
28	1000	120	0,8789	0,75	0,1216	0,121051	0,121348	0,451197	0,207326
28	1000	120	0,9026	0,75	0,125	0,123894	0,12451	0,884483	0,392205
28	1000	120	0,9263	0,75	0,1283	0,126737	0,127677	1,217889	0,485414
28	1000	120	0,95	0,75	0,1317	0,129581	0,13085	1,609339	0,645178

Daha sonra türetilen regresyon denklemi ile yapılan tahmin değerleri iki farklı deneysel çalışma verileri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar ile aynı tasarım parametreleri kullanılarak türetilen denklemlerin güvenilirliği incelenmiştir. Çizelge 5.4'te regresyon ile tahmin edilen değerler ile deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar MAPE

istatistiksel yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada meydana gelen basınç kayıpları dikkate alındığında hata oranlarının kabul edilebilir bir seviyede olduğu görülmektedir. Bundan dolayı Taguchi-ANOVA yöntemlerinin kullanılarak türetilen regresyon denkleminin R245fa'lı ORÇ sisteminin ısı veriminin belirlenmesinde başarılı bir şekilde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Çizelge 5.4. EES ile hazırlanan modelin aynı tasarım parametreleri kullanılarak başka bir çalışma ile karşılaştırılması

Tasarım Parametreleri	Yoğuşma sıcaklığı: 33,8 °C; Türbin giriş basıncı: 995 kPa; Türbin giriş sıcaklığı: 89,7 °C, Türbin ve pompa izantropik verimi: %80		Yoğuşma sıcaklığı: 30 °C; Türbin giriş basıncı: 1250 kPa; Türbin giriş sıcaklığı: 102,5 °C, Türbin ve pompa izantropik verimi: %80	
Organik Akışkanlar	R245fa		R245fa	
Performans Parametreleri	Mevcut Çalışma Tahmin Değeri	Galloni vd. (2015) Deneysel Çalışma	Mevcut Çalışma Tahmin Değeri	Muhammad vd. (2015) Deneysel Çalışma
Isıl Verim (%)	9,64	9,28	8,5	7,8
MAPE (%)	9,6		9,1	

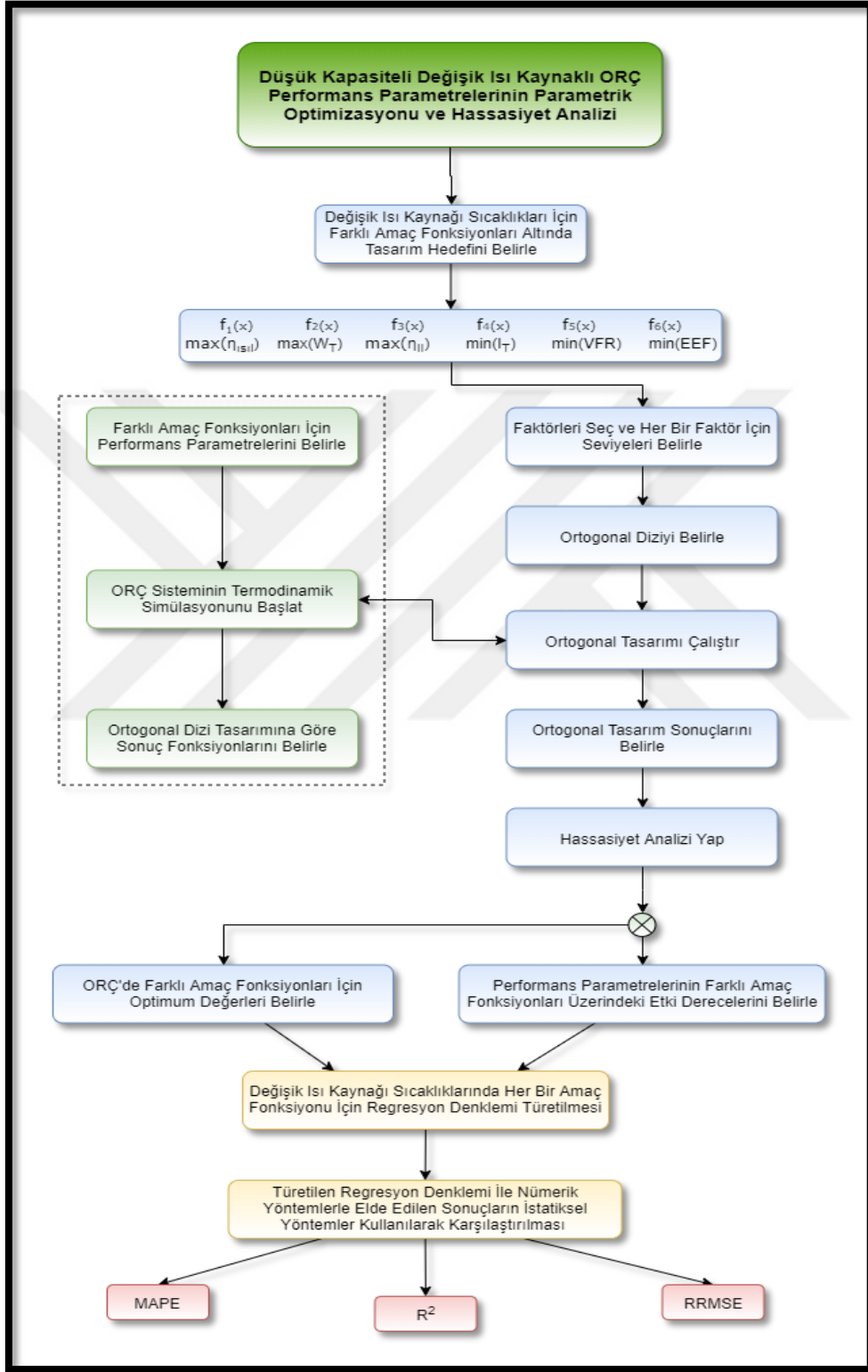
Bu örnek çalışma ile Taguchi-ANOVA optimizasyon tekniğinin ORÇ'nin performans parametrelerinin etkisinin belirlenmesinde ve türetilen regresyon denkleminin ORÇ termodinamik analizinde kullanılabileceği görülmüştür.

Bundan dolayı bu çalışmada, bir önceki bölümde değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için belirlenen optimum akışkanlar kullanılarak tasarlanan ORÇ sistemi için performans parametrelerinin farklı amaç fonksiyonlarına etkisinin Taguchi-ANOVA yöntemiyle belirlenmesi, daha sonra ise 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığında 6 farklı amaç fonksiyonu için regresyon denklem türetilmesi amaçlanmıştır.

5.4. Araştırma Bulguları ve Tartışma

ORÇ'de Taguchi-ANOVA yöntemiyle yapılan parametrik optimizasyonda organik akışkan olarak 90 °C'den 290 °C'ye kadar 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için belirlenen optimum akışkanlar kullanılmıştır. Dördüncü bölümde olduğu gibi yine 6 farklı amaç fonksiyonu için çalışma yapılmıştır. Bunlar, ısı verim, net güç ve ekserji verimi maksimizasyonu ile toplam tersinmezlik, hacimsel debi oranı ve çevresel etki faktör minimizasyonudur.

Taguchi ile ORÇ performans parametrelerinin parametrik optimizasyonu ve hassasiyet analizi için belirlenen akış diyagramı Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. ORÇ Taguchi Optimizasyon Akış Diyagramı

Faktör değerleri ise, $\Delta T_{PP,e}$, $\Delta T_{PP,k}$, $T_{c,i}$, aşırı kızdırma sıcaklığı (T_{ak}), η_t ve η_p olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin seçilme nedenleri aşağıda kısaca belirtilmiştir.

- $\Delta T_{PP,e}$: Bu değer ikinci bölümde değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için ne kadar önemli bir parametre olduğu görülmüştü. Bu parametre farklı amaç fonksiyonları altında katkı oranı yüzdesinin belirlenmesi amacıyla seçilmiştir.
- $\Delta T_{PP,k}$: Kaynak araştırmasında çoğu çalışmada düşük bir etkisi olmasından dolayı $\Delta T_{PP,k}$ değeri üzerinde çok fazla bir çalışma yapılmadığı görülmüştü. Bundan dolayı hassasiyet seviyesinin net bir şekilde görülmesi amacıyla seçilmiştir.
- $T_{c,i}$: Birinci ve ikinci bölümde yapılan tasarımda soğutma suyu sıcaklığı sabit kabul edilmişti, fakat kaynak araştırmasında soğutma suyu sıcaklık değerinin azalmasının performansa etkisinin önemli olduğu belirtildiği için bu parametrenin diğer parametreler içerisindeki etkisinin görülmesi amacıyla seçilmiştir.
- T_{ak} : Kaynak araştırmasında kuru ve izantropik akışkanlar için aşırı kızdırma sıcaklığının sistem performansına etkisinin çok az olduğu belirtilmesine rağmen bu parametrenin değişik ısı kaynağı sıcaklıklarındaki etkisinin belirlenmesi amacıyla seçilmiştir.
- η_t : ORÇ bileşenlerinden türbinin performansı sistemin ulaştığı verim bakımından önemli bir yer tutmaktadır. Bundan dolayı özellikle hangi amaç fonksiyonları için daha önemli olduğunun belirlenmesi amacıyla seçilmiştir.
- η_p : Bu değer sistemin üzerindeki etkisinin az olduğunun bilinmesine rağmen farklı amaç fonksiyonları altında diğer parametreler arasındaki yerinin görülmesi amacıyla seçilmiştir.

Bu sebeplerden dolayı belirlenen 6 farklı faktör değerinin 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için 6 farklı amaç fonksiyonu altında önem sırasının belirlenmesiyle hassasiyet analizi yapılmıştır. Taguchi'de 6 farklı faktör 5 farklı seviye değerinde ele alınarak L25 (5^6) ortogonal dizi tasarımı kullanılmıştır. Amaç fonksiyonları için belirlenen faktör ve seviye değerleri Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Taguchi'de uygulanan termodinamik simülasyonda yapılan kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- Ölü nokta basıncı ve sıcaklığı sırasıyla 100 kPa ve 25 °C olarak kabul edilmiştir.
- Bütün prosesler kararlı şartlardadır.
- Evaporatör ve kondenserdeki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Boru hatlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir.

- Analizde tüm ekipmanlar adyabatik olarak kabul edilmiş ve yüzeyleri ile çevre arasında bir ısı transferinin olmadığı varsayılmıştır.
- Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

Çizelge 5.5. ORÇ Taguchi optimizasyonu için belirlenen faktör ve seviye değerleri

Faktörler/ Seviye Değerleri	Birim	1	2	3	4	5
$\Delta T_{PP,e}$ (A)*	(°C)	2	4	6	8	10
$\Delta T_{PP,k}$ (B)*	(°C)	2	4	6	8	10
$T_{c,i}$ (C)	(°C)	10	15	20	25	30
T_{ak} (D)	(°C)	0	5	10	15	20
η_t (E)	-	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
η_p (F)	-	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85

* $\Delta T_{PP,e}$ (A) ve $\Delta T_{PP,k}$ (B) parametreleri, ısı kaynağı sıcaklığına bağlı olarak değiştirilmiştir. Atık ısı uygulamaları kapsamında ($T_{h,i}=250,260$ ve 270 °C) $\Delta T_{PP,e}$ aralığı 10 °C ile 30 °C arasında; yüksek sıcaklıklı güneş ve biyokütle uygulamaları kapsamında ise ($T_{h,i}=280$ ve 290 °C) $\Delta T_{PP,e}$ aralığı 15 °C ile 35 °C arasında olacak şekilde seviye değerleri belirlenmiştir.

Bu seviye değerlerine ilişkin L25 (5^6) ortogonal dizilim kullanarak oluşturulan tasarım Çizelge 5.6'da verilmiştir.

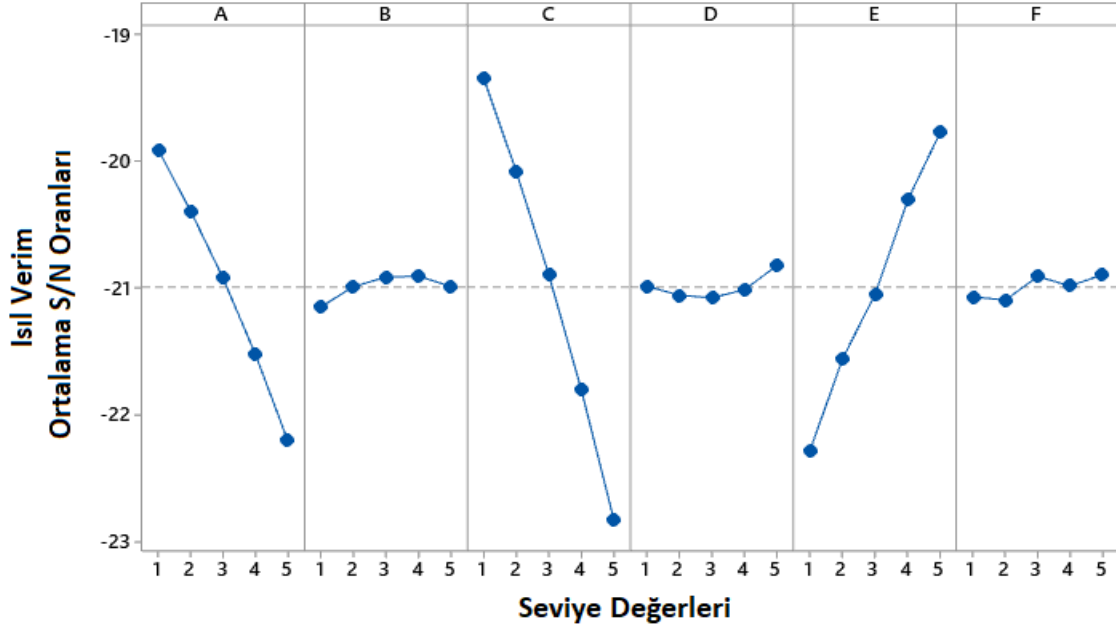
Çizelge 5.6. L₂₅ (5^6) ortogonal dizi tasarımı

Durum	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	2	3	4	5	1	2
9	2	4	5	1	2	3
10	2	5	1	2	3	4
11	3	1	3	5	2	4
12	3	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1
14	3	4	1	3	5	2
15	3	5	2	4	1	3
16	4	1	4	2	5	3
17	4	2	5	3	1	4
18	4	3	1	4	2	5
19	4	4	2	5	3	1
20	4	5	3	1	4	2
21	5	1	5	4	3	2
22	5	2	1	5	4	3
23	5	3	2	1	5	4
24	5	4	3	2	1	5
25	5	5	4	3	2	1

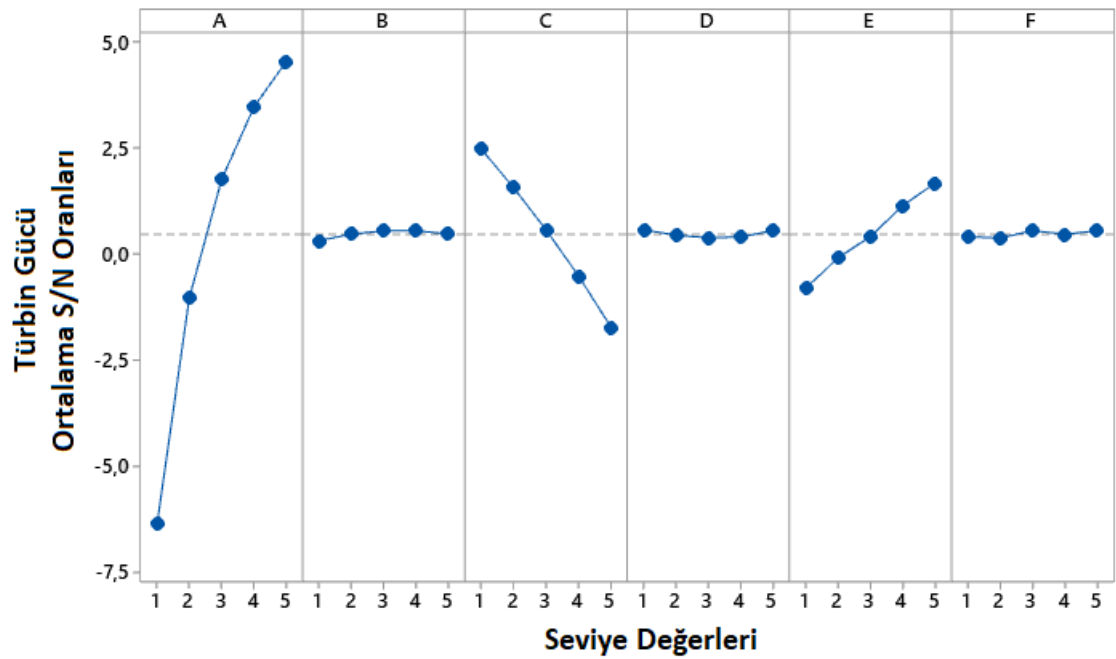
Dördüncü bölümde 90 °C ısı kaynağı sıcaklığı için optimum akışkan R141b (optimum $\Delta T_{PP,e} = 5$ °C) olarak belirlenmişti. R141b kullanılarak tasarlanan ORÇ için L25 (5^6) ortogonal dizi uygulanarak ısı verim, net güç, ekserji verimi, toplam tersinmezlik, hacimsel debi oranı ve çevresel etki faktörü belirlenmiştir. Isıl verim, net güç ve ekserji verim maksimizasyonu için Taguchi metodunda ‘en büyük en iyi’ S/N denklemi; toplam

tersinmezlik, hacimsel debi oranı ve çevresel etki faktör minimizasyonu için ise ‘en küçük en iyi’ S/N denklemi kullanılarak S/N oranlarına ait değerler belirlenmiştir.

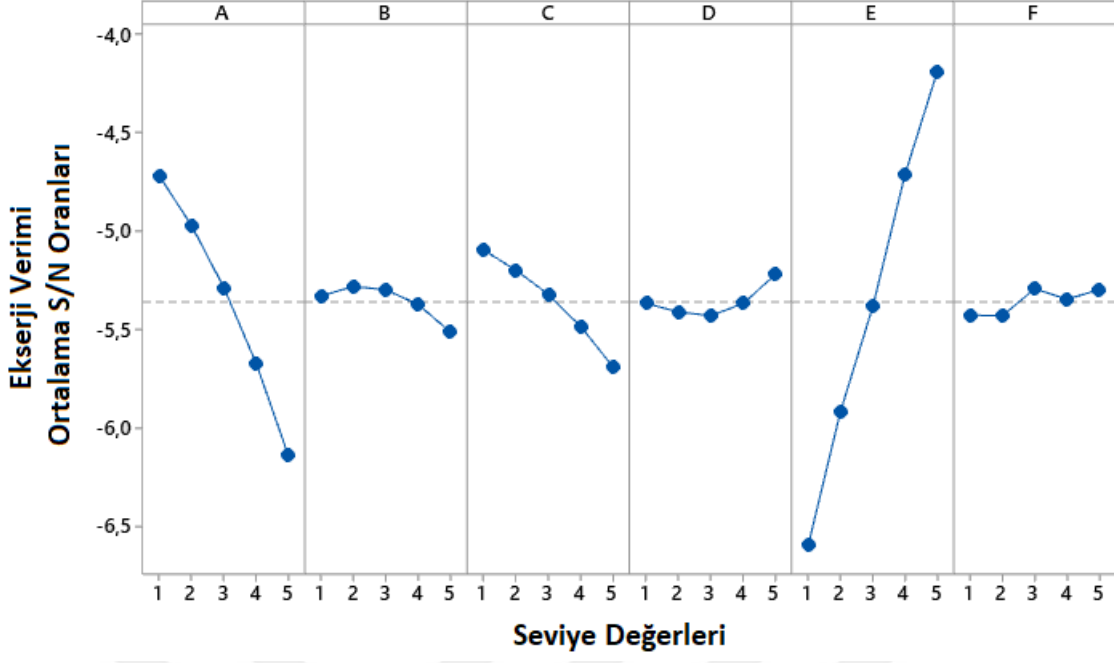
Şekil 5.2-5.7’de R141b’nin 6 farklı amaç fonksiyonu altında belirlenen faktör seviyelerinin grafikleri verilmiştir.



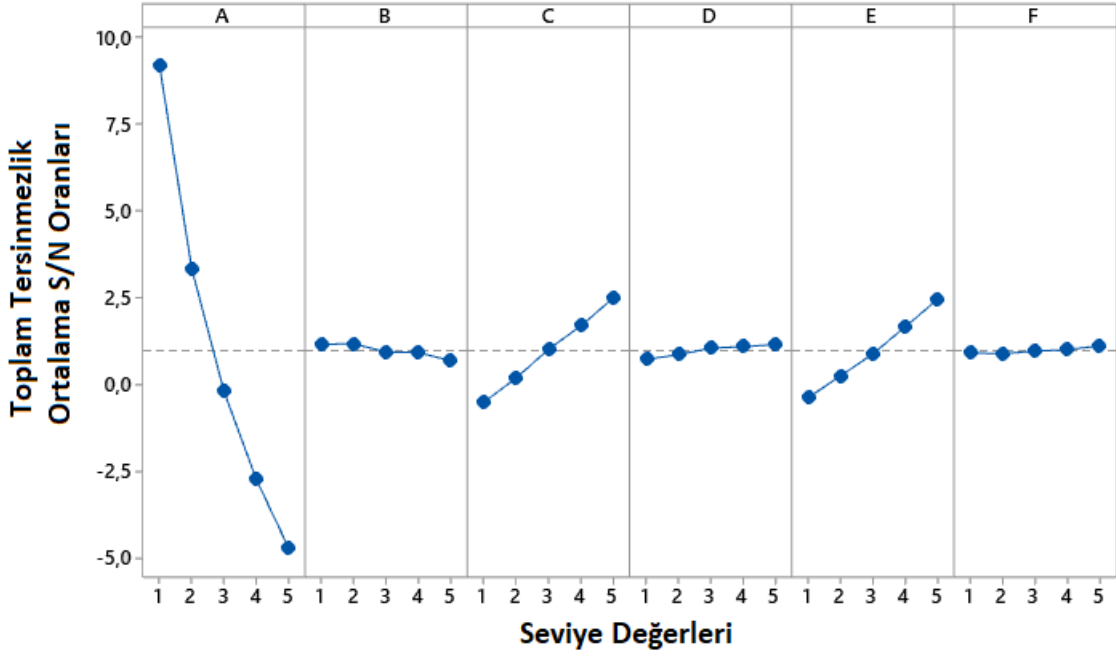
Şekil 5.2. R141b’li ORÇ’nin ısı veriminin ‘en büyük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği



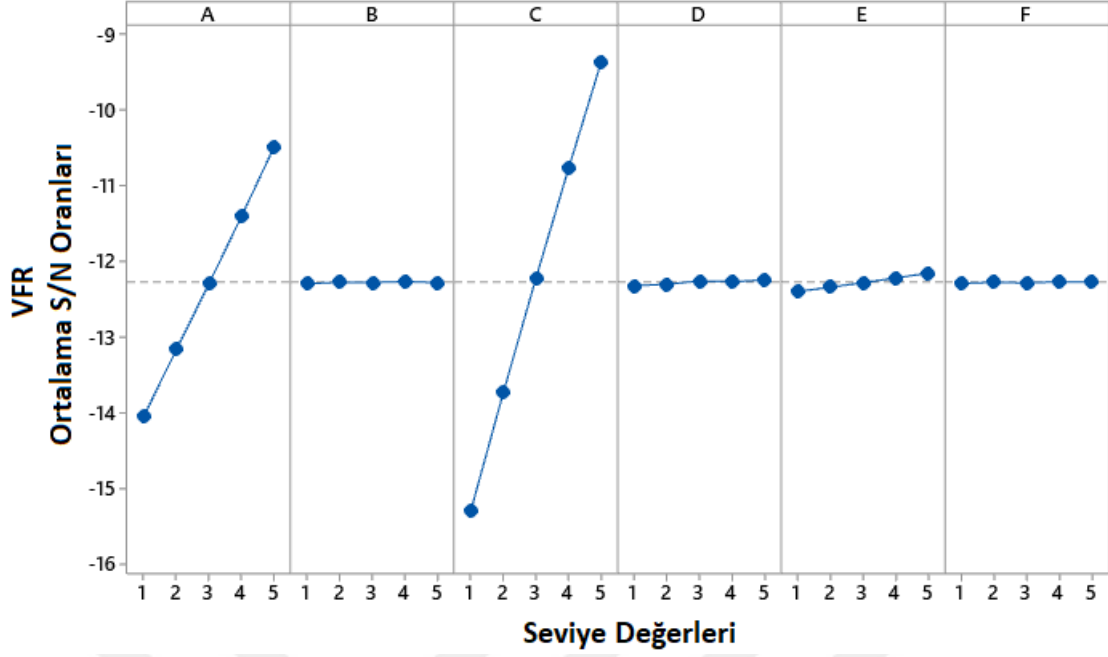
Şekil 5.3. R141b’li ORÇ’nin türbin gücünün ‘en büyük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği



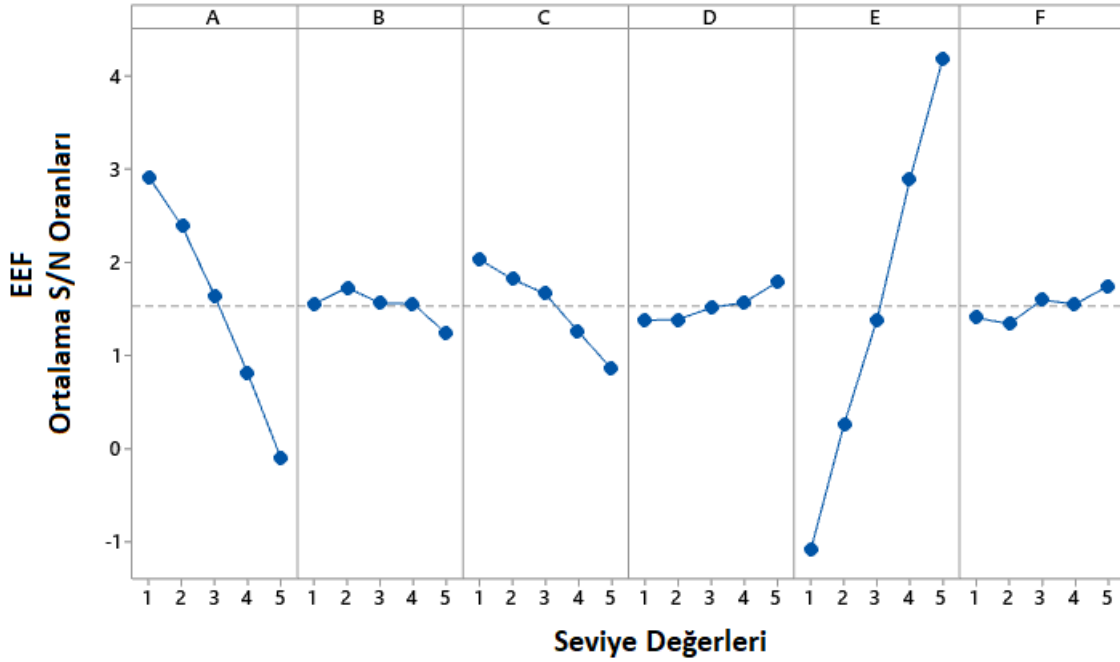
Şekil 5.4. R141b’li ORÇ’nin ekserji veriminin ‘en büyük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği



Şekil 5.5. R141b’li ORÇ’nin toplam tersinmezliğinin ‘en küçük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği



Şekil 5.6. R141b’li ORÇ’nin VFR değerinin ‘en küçük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği



Şekil 5.7. R141b’li ORÇ’nin EEF değerinin ‘en küçük en iyi S/N’ oranına göre faktör seviyelerinin grafiği

Şekildeki parametrelerin S/N oranlarından maksimum ve minimum değerleri arasındaki farktan önem sırası anlaşılabilir. S/N oranlarından ısı verim maksimizasyonunda en önemli parametrenin soğutma suyu sıcaklığı olduğu görülmektedir. Fakat türbin gücü maksimizasyonunda ise diğer parametrelere kıyasla $\Delta T_{PP,e}$ ’nin çok önemli bir yerde olduğu belirtilmiştir. Ekserji verim maksimizasyonunda türbin izantropik verimi önemli olmasına rağmen toplam tersinmezlik minimizasyonunda ise en büyük S/N değişimi

$\Delta T_{PP,e}$ 'de gerçekleşmiştir. VFR ve EEF minimizasyonunda ise sırasıyla soğutma suyu sıcaklığı ve türbin izantropik veriminin önemli olduğu belirtilmiştir.

S/N oran tablosu ve parametrelerin hassasiyet seviyeleri Çizelge 5.7-5.12'de 6 amaç fonksiyonu için verilmiştir.

Çizelge 5.7. R141b'li ORÇ'de ısı verim maksimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi

$T_{h,i} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; R141b – Isıl Verim						
Seviye	$\Delta T_{PP,e}$ (A)	$\Delta T_{PP,k}$ (B)	$T_{c,i}$ (C)	T_{ak} (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	-19,92	-21,15	-19,35	-20,99	-22,28	-21,07
2	-20,40	-20,99	-20,08	-21,06	-21,56	-21,10
3	-20,92	-20,92	-20,89	-21,08	-21,05	-20,91
4	-21,52	-20,91	-21,80	-21,01	-20,31	-20,98
5	-22,20	-20,99	-22,83	-20,82	-19,77	-20,90
$\Delta_{\max-\min}$	2,28	0,25	3,48	0,26	2,51	0,20
Hassasiyet Seviyesi	3	5	1	4	2	6

Çizelge 5.8. R141b'li ORÇ'de türbin gücü maksimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi

$T_{h,i} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; R141b – Türbin Gücü						
Seviye	$\Delta T_{PP,e}$ (A)	$\Delta T_{PP,k}$ (B)	$T_{c,i}$ (C)	T_{ak} (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	-6,37349	0,30398	2,47378	0,55804	-0,80462	0,40095
2	-1,03864	0,46279	1,55560	0,43675	-0,09368	0,36617
3	1,74834	0,53667	0,55887	0,37271	0,40783	0,54440
4	3,45244	0,54368	-0,53218	0,39425	1,13935	0,45820
5	4,52204	0,46357	-1,74537	0,54894	1,66180	0,54098
$\Delta_{\max-\min}$	10,89553	0,23971	4,21915	0,18533	2,46642	0,17823
Hassasiyet Sırası	1	4	2	5	3	6

Çizelge 5.9. R141b’li ORÇ’de ekserji verimi maksimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi

$T_{h,i}= 90\text{ }^{\circ}\text{C}$; R141b – Ekserji Verimi						
Seviye	$\Delta T_{PP,e}$ (A)	$\Delta T_{PP,k}$ (B)	$T_{c,i}$ (C)	T_{ak} (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	-4,720	-5,330	-5,095	-5,398	-6,596	-5,426
2	-4,973	-5,281	-5,198	-5,411	-5,916	-5,431
3	-5,288	-5,298	-5,321	-5,430	-5,383	-5,293
4	-5,672	-5,372	-5,486	-5,368	-4,711	-5,346
5	-6,142	-5,513	-5,694	-5,219	-4,189	-5,298
$\Delta_{max-min}$	1,421	0,231	0,599	0,210	2,407	0,138
Hassasiyet Sırası	2	4	3	5	1	6

Çizelge 5.10. R141b’li ORÇ’de toplam tersinmezlik minimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi

$T_{h,i}= 90\text{ }^{\circ}\text{C}$; R141b – Toplam Tersinmezlik						
Seviye	$\Delta T_{PP,e}$ (A)	$\Delta T_{PP,k}$ (B)	$T_{c,i}$ (C)	T_{ak} (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	9,1936	1,1625	-0,5139	0,7321	-0,3714	0,9186
2	3,3384	1,1785	0,1864	0,8635	0,2586	0,8905
3	-0,2015	0,9416	1,0189	1,0541	0,8892	0,9665
4	-2,7282	0,9264	1,7002	1,0933	1,6697	1,0067
5	-4,7017	0,6916	2,5089	1,1575	2,4545	1,1183
$\Delta_{max-min}$	13,8953	0,4868	3,0227	0,4253	2,8259	0,2278
Hassasiyet Sırası	1	4	2	5	3	6

Çizelge 5.11. R141b’li ORÇ’de VFR değerinin minimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi

$T_{h,i}= 90\text{ }^{\circ}\text{C}$; R141b – VFR						
Seviye	$\Delta T_{PP,e}$ (A)	$\Delta T_{PP,k}$ (B)	$T_{c,i}$ (C)	T_{ak} (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	-14,045	-12,289	-15,298	-12,315	-12,393	-12,284
2	-13,161	-12,269	-13,731	-12,296	-12,335	-12,269
3	-12,290	-12,274	-12,215	-12,253	-12,276	-12,278
4	-11,396	-12,260	-10,764	-12,260	-12,213	-12,264
5	-10,475	-12,275	-9,358	-12,242	-12,148	-12,271
$\Delta_{max-min}$	3,570	0,028	5,940	0,073	0,245	0,021
Hassasiyet Sırası	2	5	1	4	3	6

Çizelge 5.12. R141b'li ORÇ'de EEF değerinin minimizasyonu için S/N oran tablosu ve hassasiyet seviyesi

T_{h,i}= 90 °C; R141b – EEF						
Seviye	ΔT_{PP,e} (A)	ΔT_{PP,k} (B)	T_{e,i} (C)	T_{ak} (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	2,9167	1,5548	2,0363	1,3817	-1,0788	1,4076
2	2,3921	1,7301	1,8230	1,3884	0,2587	1,3436
3	1,6339	1,5661	1,6660	1,5140	1,3843	1,5981
4	0,8078	1,5578	1,2603	1,5732	2,8911	1,5537
5	-0,1010	1,2407	0,8639	1,7922	4,1941	1,7466
Δ _{max-min}	3,0177	0,4894	1,1725	0,4104	5,2729	0,4030
Hassasiyet Sırası	2	4	3	5	1	6

Çizelge 5.7-5.12'de her bir parametre için en yüksek S/N oranı görülen yerler belirtilmiştir. Buna göre 6 farklı amaç fonksiyonu için aşağıda belirtilen ortogonal dizilimler kullanıldığında istenilen optimum değerler elde edilmektedir.

- **f₁(x): max (η_{ısı}); A₁ B₄ C₁ D₅ E₅ F₅**
- **f₂(x): max (W_T); A₅ B₄ C₁ D₁ E₅ F₃**
- **f₃(x): max (η_m); A₁ B₂ C₁ D₅ E₅ F₃**
- **f₄(x): min (I_T); A₁ B₂ C₅ D₅ E₅ F₅**
- **f₅(x): min (VFR); A₅ B₄ C₅ D₅ E₅ F₄**
- **f₆(x): min (EEF); A₁ B₂ C₁ D₅ E₅ F₅**

R141b kullanılarak tasarlanarak ORÇ'nin performans parametrelerinin 6 farklı amaç fonksiyonu üzerindeki hassasiyet seviyeleri ise aşağıda özetlenmiştir.

- **f₁(x): max (η_{ısı}); C>E>A>D>B>F**
- **f₂(x): max (W_T); A>C>E>B>D>F**
- **f₃(x): max (η_m); E>A>C>B>D>F**
- **f₄(x): min (I_T); A>C>E>B>D>F**
- **f₅(x): min (VFR); C>A>E>D>B>F**
- **f₆(x): min (EEF); E>A>C>B>D>F**

Diğer ısı kaynağı sıcaklıkları için yapılan Taguchi optimizasyon sonuçlarına göre istenilen amaç fonksiyonlarına göre optimum değerlerin elde edildiği ortogonal dizilimler ve performans parametrelerinin Taguchi hassasiyet seviyeleri Çizelge 5.13-5.21'de verilmiştir.

Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için Çizelge 5.13-5.16 incelendiğinde;

- 100 ve 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında R1234yf kullanılarak tasarlanan ORÇ için türbin gücü hariç tüm amaç fonksiyonlarında $\Delta T_{PP,e}$ 'nin en etkili parametre olduğu görülmektedir. Türbin gücü maksimizasyonunda ise en önemli parametrenin soğutma suyu sıcaklığı, ikinci olarak yine $\Delta T_{PP,e}$ 'nin geldiği belirtilmiştir.
- 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında R1234ze'nin kullanılmasıyla türbin izantropik veriminin performans parametreleri üzerindeki etkisinin arttığı görülmektedir. Ekserji verimini ve EEF değerini en fazla etkileyen parametrenin türbin izantropik verimi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, yine 3 farklı amaç fonksiyonun da $\Delta T_{PP,e}$ 'nin ilk sırada geldiği görülmektedir.
- ORÇ'nin 100, 110 ve 120 °C düşük sıcaklıklı uygulamalarında ısı verimi etkileyen en önemli parametre $\Delta T_{PP,e}$ iken, 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında R152a'nın kullanılmasıyla en etkili parametrenin türbin izantropik verimi olduğu belirlenmiştir. Tüm amaç fonksiyonları birlikte düşünüldüğünde 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında $\Delta T_{PP,e}$ 'nin etkisinin azalmaya başladığı görülmektedir.

Çizelge 5.13. 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi

	f(x)	Optimum Ortogonal Dizilim	Hassasiyet Analizi
R1234yf $T_{h,i}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{PP,e,opt}: 6,67\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\max(\eta_{u_{srl}})$	A ₁ B ₃ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	A>C>E>F>D>B
	$\max(W_T)$	A ₄ B ₄ C ₁ D ₁ E ₅ F ₁	C>A>E>D>F>B
	$\max(\eta_{II})$	A ₁ B ₃ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	A>E>C>D>B>F
	$\min(I_T)$	A ₁ B ₂ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>C>E>D>F>B
	$\min(VFR)$	A ₅ B ₃ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>C>D>E>B>F
	$\min(EEF)$	A ₅ B ₂ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	A>E>C>F>B>D

Çizelge 5.14. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi

	f(x)	Optimum Ortogonal Dizilim	Hassasiyet Analizi
R1234yf $T_{h,i}=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{PP,e,opt}: 4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	max (η_{ustl})	A ₁ B ₃ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	A>C>E>F>B>D
	max (W_T)	A ₂ B ₄ C ₁ D ₁ E ₅ F ₃	C>E>A>D>F>B
	max (η_{II})	A ₁ B ₃ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	A>E>C>D>F>B
	min (I_T)	A ₁ B ₂ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>C>E>D>F>B
	min (VFR)	A ₅ B ₃ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>C>D>E>B>F
	min (EEF)	A ₁ B ₂ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	A>E>C>F>B>D

Çizelge 5.15. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi

	f(x)	Optimum Ortogonal Dizilim	Hassasiyet Analizi
R1234ze $T_{h,i}=120\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{PP,e,opt}: 3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$	max (η_{ustl})	A ₁ B ₃ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	A>E>C>F>D>B
	max (W_T)	A ₄ B ₂ C ₁ D ₁ E ₅ F ₃	C>E>A>D>F>B
	max (η_{II})	A ₁ B ₂ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	E>A>C>B>F>D
	min (I_T)	A ₁ B ₂ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>C>E>D>F>B
	min (VFR)	A ₅ B ₃ C ₅ D ₅ E ₅ F ₄	A>C>D>E>B>F
	min (EEF)	A ₁ B ₂ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	E>A>C>B>F>D

Çizelge 5.16. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi

	f(x)	Optimum Ortogonal Dizilim	Hassasiyet Analizi
R152a $T_{h,i}=130\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{PP,e,opt}: 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	max (η_{ustl})	A ₁ B ₃ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	E>C>A>D>F>B
	max (W_T)	A ₄ B ₁ C ₁ D ₁ E ₅ F ₁	C>E>D>A>F>B
	max (η_{II})	A ₁ B ₂ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	E>A>C>D>B>F
	min (I_T)	A ₁ B ₂ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>E>C>D>F>B
	min (VFR)	A ₅ B ₃ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>C>D>E>B>F
	min (EEF)	A ₁ B ₂ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	E>A>C>D>F>B

Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için Çizelge 5.17-5.21 incelendiğinde;

- 250, 260, 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında benzen kullanılarak tasarlanan ORÇ için $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 4 farklı amaç fonksiyonu üzerinde en etkili parametre olduğu görülmektedir. Ekserji verimi ve EEF değerinde ise türbin izantropik veriminin daha etkili olduğu belirtilmiştir.
- Fakat 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında MM'nin kullanılmasıyla $\Delta T_{PP,e}$ 'nin sadece VFR üzerinde en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir.
- Aşırı kızdırma sıcaklığının amaç fonksiyonları üzerindeki etkisinin en fazla görüldüğü uygulamanın 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklığı uygulaması olduğu görülmektedir. 290 °C ısı kaynağında türbin gücünü en fazla etkileyen parametrenin aşırı kızdırma sıcaklığı olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 5.17. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi

	f(x)	Optimum Ortogonal Dizilim	Hassasiyet Analizi
Benzen $T_{h,i}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{PP,e,opt}: 25,17\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\max(\eta_{ustl})$	A ₁ B ₃ C ₁ D ₅ E ₅ F ₃	A>E>C>D>B>F
	$\max(W_T)$	A ₄ B ₂ C ₁ D ₁ E ₅ F ₃	A>E>C>D>F>B
	$\max(\eta_{II})$	A ₁ B ₂ C ₁ D ₅ E ₅ F ₃	E>A>C>B>D>F
	$\min(I_T)$	A ₁ B ₁ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>E>C>D>B>F
	$\min(VFR)$	A ₅ B ₄ C ₅ D ₅ E ₅ F ₄	A>C>E>D>B>F
	$\min(EEF)$	A ₁ B ₂ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	E>A>C>B>F>D

Çizelge 5.18. 260 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi

	f(x)	Optimum Ortogonal Dizilim	Hassasiyet Analizi
Benzen $T_{h,i}=260\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{PP,e,opt}: 26,38\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\max(\eta_{ustl})$	A ₁ B ₃ C ₁ D ₅ E ₅ F ₃	E>A>C>D>B>F
	$\max(W_T)$	A ₄ B ₂ C ₁ D ₁ E ₅ F ₃	A>E>C>D>F>B
	$\max(\eta_{II})$	A ₁ B ₂ C ₁ D ₅ E ₅ F ₃	E>A>C>B>F>D
	$\min(I_T)$	A ₁ B ₁ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>E>C>D>B>F
	$\min(VFR)$	A ₅ B ₃ C ₅ D ₅ E ₅ F ₄	A>C>E>D>B>F
	$\min(EEF)$	A ₁ B ₂ C ₁ D ₅ E ₅ F ₅	E>A>C>B>F>D

Çizelge 5.19. 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi

	f(x)	Optimum Ortogonal Dizilim	Hassasiyet Analizi
Benzen $T_{h,i}=270\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{PP,e,opt}: 27\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\max(\eta_{ustl})$	A ₁ B ₃ C ₁ D ₅ E ₅ F ₃	A>E>C>D>F>B
	$\max(W_T)$	A ₅ B ₂ C ₁ D ₁ E ₅ F ₃	A>E>C>D>F>B
	$\max(\eta_{II})$	A ₁ B ₂ C ₁ D ₁ E ₅ F ₃	E>A>C>B>F>D
	$\min(I_T)$	A ₁ B ₁ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>E>C>D>B>F
	$\min(VFR)$	A ₅ B ₃ C ₅ D ₅ E ₅ F ₄	A>C>E>D>F>B
	$\min(EEF)$	A ₁ B ₂ C ₁ D ₃ E ₅ F ₅	E>A>C>B>F>D

Çizelge 5.20. 280 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi

	f(x)	Optimum Ortogonal Dizilim	Hassasiyet Analizi
MM $T_{h,i}=280\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{PP,e,opt}: 12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\max(\eta_{ustl})$	A ₁ B ₃ C ₁ D ₁ E ₅ F ₅	E>A>C>D>F>B
	$\max(W_T)$	A ₃ B ₁ C ₁ D ₁ E ₅ F ₁	E>C>D>A>F>B
	$\max(\eta_{II})$	A ₂ B ₂ C ₁ D ₁ E ₅ F ₃	E>D>A>B>C>F
	$\min(I_T)$	A ₁ B ₁ C ₅ D ₁ E ₅ F ₅	E>C>A>B>D>F
	$\min(VFR)$	A ₅ B ₅ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>C>D>E>F>B
	$\min(EEF)$	A ₂ B ₁ C ₁ D ₁ E ₅ F ₃	E>D>A>B>C>F

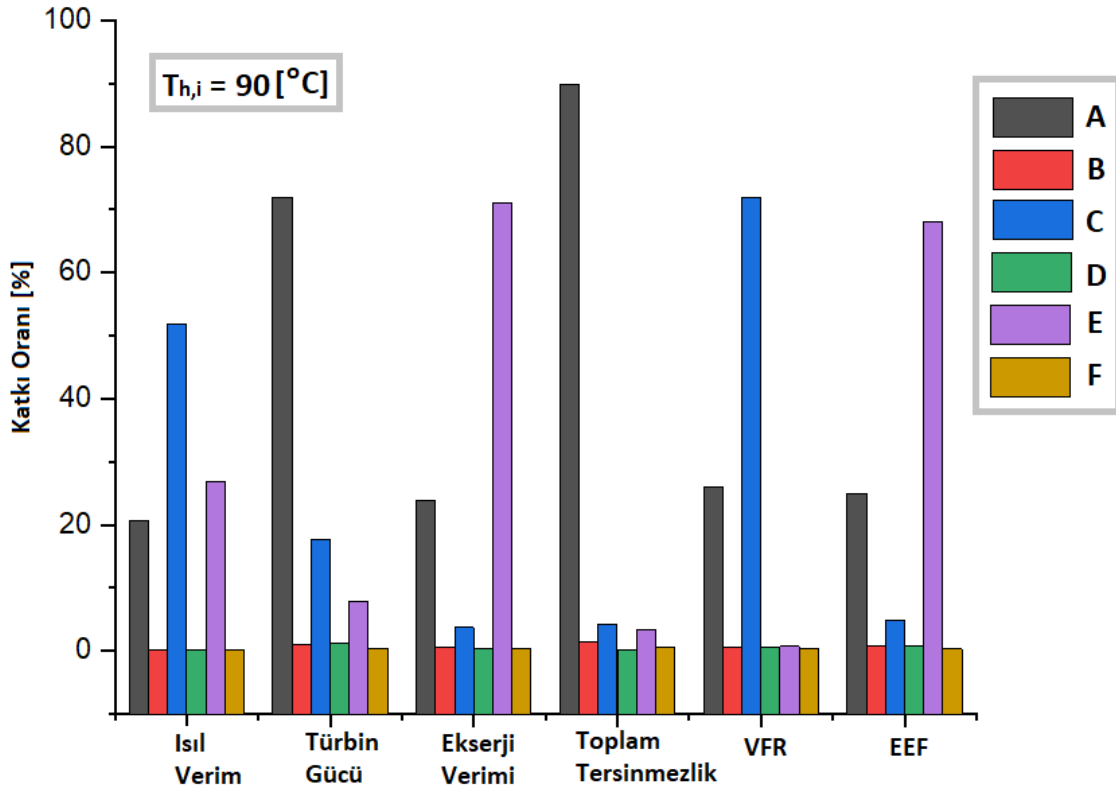
Çizelge 5.21. 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen optimum ortogonal dizilimler ve hassasiyet seviyesinin belirlenmesi

	f(x)	Optimum Ortogonal Dizilim	Hassasiyet Analizi
MM $T_{h,i}=290\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{PP,e,opt}: 18\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\max(\eta_{ustl})$	A ₁ B ₃ C ₁ D ₁ E ₅ F ₅	E>A>C>D>F>B
	$\max(W_T)$	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ E ₅ F ₁	D>C>E>A>B>F
	$\max(\eta_{II})$	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ E ₅ F ₁	E>D>A>B>C>F
	$\min(I_T)$	A ₁ B ₁ C ₅ D ₁ E ₅ F ₁	E>A>D>C>B>F
	$\min(VFR)$	A ₅ B ₅ C ₅ D ₅ E ₅ F ₅	A>C>D>E>F>B
	$\min(EEF)$	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ E ₅ F ₁	E>D>A>B>C>F

Taguchi metodu ile elde edilen S/N oranından amaç fonksiyonları optimum parametreler belirlenirken, ANOVA ile de performans parametreleri arasındaki ilişki tespit edilmiştir. Performans parametrelerinin amaç fonksiyonları üstündeki katkı oranı yüzdeleri tespit edilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre $p<0,01$ veya $p<0,05$ anlamlılık düzeyinde olması gerekir.

90 °C ısı kaynağı sıcaklığında kullanılan R141b için tüm amaç fonksiyonlarına dair sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 5.8’de verilmiştir. Şekil 5.8 incelendiğinde;

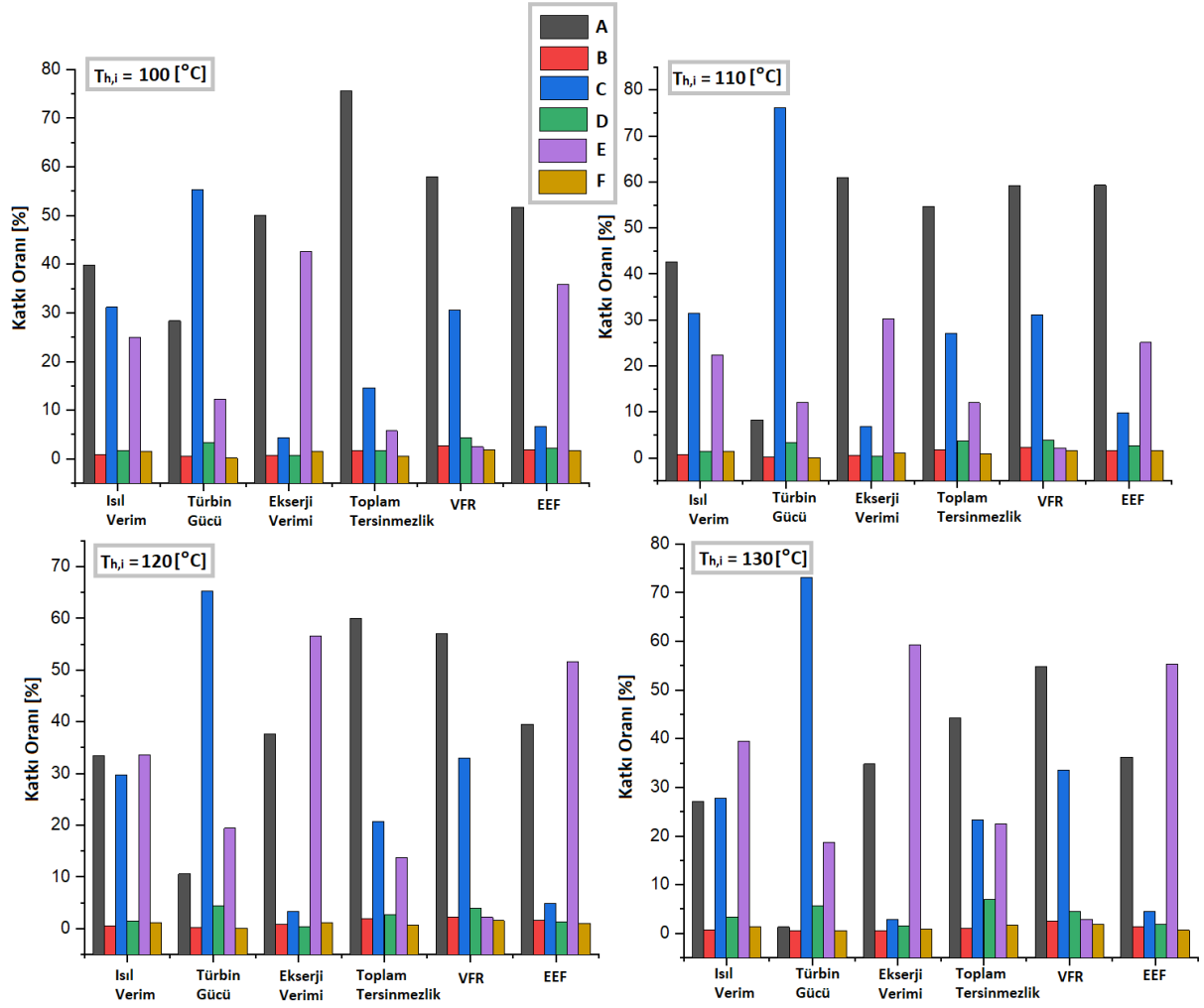
- $\Delta T_{PP,e}$ 'nin toplam tersinmezlik ve türbin gücündeki etkisinin sırasıyla %89,83 ve %71,9 olduğu ayrıca diğer parametreler üzerindeki etkisinin de en az %20 olduğu tespit edilmiştir.
- Soğutma suyu sıcaklığının ısı verim ve hacimsel debi oranını sırasıyla %51,83 ve %71,82 oranda etkilediği, diğer parametreler üzerindeki etkisinin az olduğu görülmektedir.
- Aşırı kızdırma sıcaklığı ve $\Delta T_{PP,k}$ 'nin sistem performans parametreleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Aşırı kızdırma sıcaklığı en fazla %1,13 oranında türbin gücünü, $\Delta T_{PP,k}$ 'de en fazla %1,56 ile toplam tersinmezlik değerini etkilemektedir.
- Türbin izantropik veriminin en yüksek %71,02 ile ekserji verimini etkilediği görülmektedir.
- Pompa izantropik veriminin performans parametreleri üzerindeki etkisinin %1'den az olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5.8. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ'nin faktör değerlerinin amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları

ORÇ'nin diğer düşük sıcaklıklı uygulamaları kapsamında tespit edilen ANOVA sonuçları da Şekil 5.9'da verilmiştir. Tüm sıcaklık değerleri için bulunan sonuçlar incelendiğinde tespit edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir. Şekil 5.9 incelendiğinde;

- 100 ve 110 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında ısıl verim üzerinde en fazla etkisi olan parametrenin $\Delta T_{PP,e}$ olduğu görülmektedir. 120 ve 130 °C de ise $\Delta T_{PP,e}$ ile birlikte soğutma suyu sıcaklığı ve türbin izantropik veriminin de etkili olduğu belirtilmiştir.
- Türbin gücü üzerinde en fazla etkisi olan parametre 4 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için de soğutma suyu sıcaklığı olduğu görülmektedir. Özellikle 130 °C ısı kaynağı sıcaklığı için türbin gücünü %73 oranında soğutma suyu sıcaklığının etkilediği tespit edilmiştir.
- 100 ve 110 °C ısı kaynağı sıcaklığı için ekserji verimini en fazla etkileyen parametre $\Delta T_{PP,e}$ iken, 120 ve 130 °C için ise türbin izantropik verimi olduğu belirtilmiştir.
- 4 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için de toplam tersinmezliği büyük oranda etkileyen parametrenin $\Delta T_{PP,e}$ olduğu tespit edilmiştir.
- VFR değeri incelendiğinde aynı şekilde 4 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için $\Delta T_{PP,e}$ 'nin önemli olduğu, ardından soğutma suyu sıcaklığının geldiği görülmektedir. Diğer parametrelerin VFR üzerindeki etkisinin çok az olduğu belirtilmiştir.
- EEF değerinde ise 4 değişik ısı kaynağı sıcaklığında $\Delta T_{PP,e}$ ve türbin izantropik veriminin etkili olduğu görülmektedir. 100 ve 110 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında $\Delta T_{PP,e}$ değeri daha önemli iken, 120 ve 130 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında ise türbin izantropik veriminin daha önemli olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5.9. ORC'nin düşük sıcaklıklı uygulamaları için faktör değerlerinin amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları

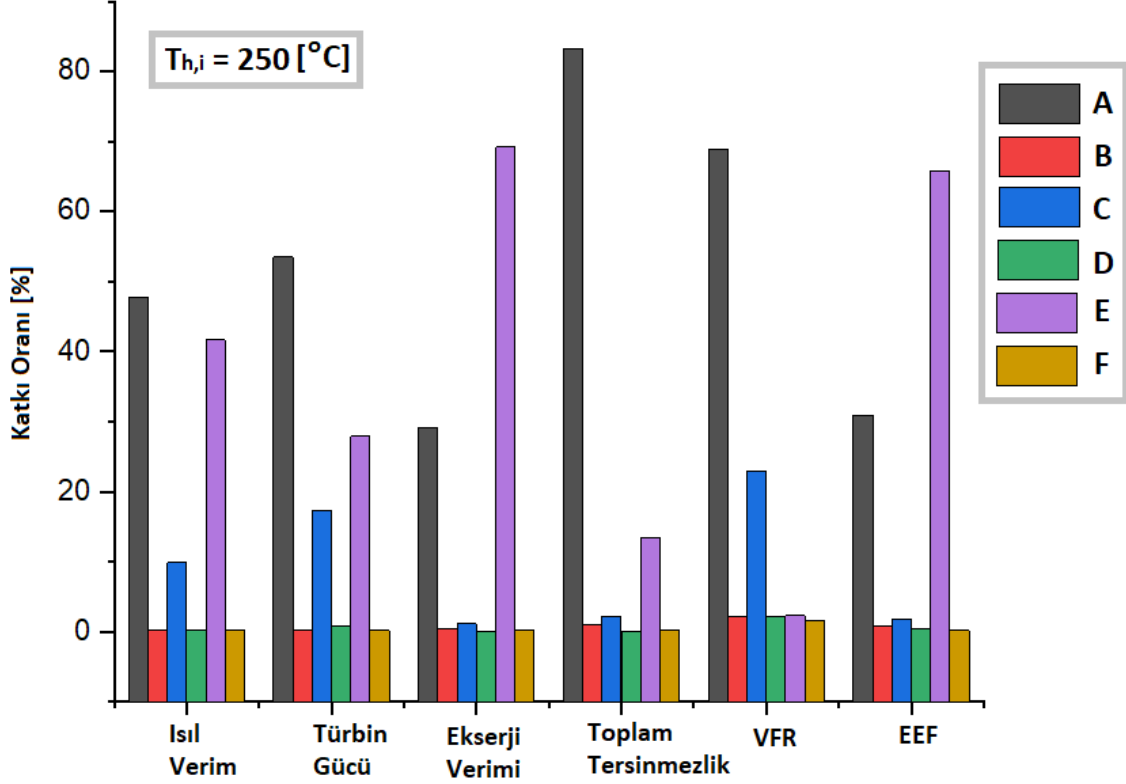
Çizelge 5.22'de düşük sıcaklıklı ORC'de belirlenen amaç fonksiyonlarına ulaşılmasında hassasiyet seviyesi en fazla olan iki parametre ve katkı oranları özetlenmiştir. Çizelge incelendiğinde tüm düşük sıcaklıklı uygulamalarda $\Delta T_{pp,e}$ değerinin önemi görülmektedir.

Çizelge 5.22. Düşük Sıcaklıklı ORÇ’de Belirlenen Amaç Fonksiyonlarına Ulaşılmasında Hassasiyet Seviyesi En Fazla Olan İki Parametre ve Katkı Oranları

f(x)	T _{hi} =90 °C R141b	T _{hi} =100 °C R1234yf	T _{hi} =110 °C R1234yf	T _{hi} =120 °C R1234ze	T _{hi} =130 °C R152a
max (η_{LSIL})	%51,83; T _{c,i} %26,90; Π _t	%39,75; ΔT _{PP,e} %31,18; T _{c,i}	%42,60; ΔT _{PP,e} %31,53; T _{c,i}	%33,64; Π _t %33,39; ΔT _{PP,e}	%39,51; Π _t %27,82; T _{c,i}
max (W_T)	%71,9; ΔT _{PP,e} %17,68; T _{c,i}	%55,36; T _{c,i} %28,37; ΔT _{PP,e}	%76,11; T _{c,i} %12,03; Π _t	%65,21; T _{c,i} %19,40; Π _t	%73,18; T _{c,i} %18,71; Π _t
max (η_{II})	%71,02; Π _t %23,9; ΔT _{PP,e}	%50,03; ΔT _{PP,e} %42,55; Π _t	%60,93; ΔT _{PP,e} %30,19; Π _t	%56,60; Π _t %37,70; ΔT _{PP,e}	%59,3; Π _t %34,79; ΔT _{PP,e}
min (I_T)	%89,83; ΔT _{PP,e} %4,29; T _{c,i}	%75,63; ΔT _{PP,e} %14,61; T _{c,i}	%54,60; ΔT _{PP,e} %27,07; T _{c,i}	%60,05; ΔT _{PP,e} %20,77; T _{c,i}	%44,32; ΔT _{PP,e} %23,3; T _{c,i}
min (VFR)	%71,82; T _{c,i} %25,97; ΔT _{PP,e}	%57,91; ΔT _{PP,e} %30,65; T _{c,i}	%59,20; ΔT _{PP,e} %31,03; T _{c,i}	%57,05; ΔT _{PP,e} %32,95; T _{c,i}	%54,78; ΔT _{PP,e} %33,5; T _{c,i}
min (EEF)	%67,99; Π _t %24,95; ΔT _{PP,e}	%51,75; ΔT _{PP,e} %35,81; Π _t	%59,34; ΔT _{PP,e} %25,09; Π _t	%51,59; Π _t %39,51; ΔT _{PP,e}	%55,31; Π _t %36,24; ΔT _{PP,e}

250 °C ısı kaynağı sıcaklığında kullanılan benzene için tüm amaç fonksiyonlarına dair sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 5.10’da verilmiştir. Şekil 5.10 incelendiğinde;

- ΔT_{PP,e}’nin tüm parametreler için önemli bir katkı oranında olduğu belirtilmiştir. En yüksek etkisi %83,19 ile toplam tersinmezlikte görülmektedir.
- Soğutma suyu sıcaklığının hacimsel debi oranı ve türbin gücünde önemli bir etkiye sahip olmasına rağmen ekserji verimini fazla etkilemediği belirtilmiştir.
- Aşırı kızdırma sıcaklığının ve ΔT_{PP,k}’nin en fazla sırasıyla %2,14 ve %2,26 ile hacimsel debi oranını etkilediği görülmektedir.
- Türbin izantropik veriminin ekserji verimi ile birlikte EEF değerini de ciddi oranda etkilediği tespit edilmiştir.
- Pompa izantropik veriminin performans parametreleri üzerindeki etkisinin %1’den fazla olduğu tek parametre VFR değeri olduğu belirtilmiştir.

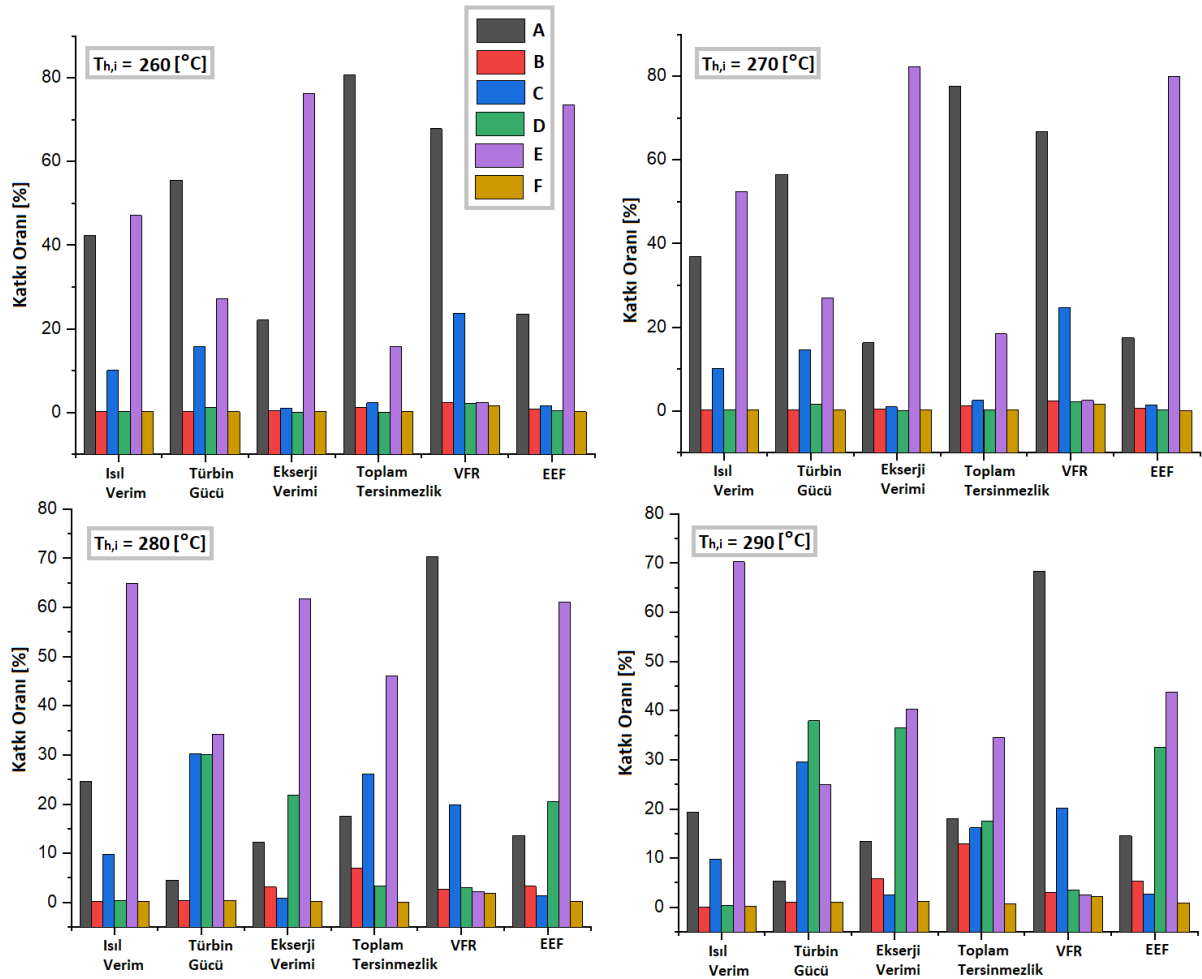


Şekil 5.10. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ'nin faktör değerlerinin amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları

ORÇ'nin diğer yüksek sıcaklıklı uygulamaları kapsamında tespit edilen ANOVA sonuçları da Şekil 5.11'de verilmiştir. Tüm sıcaklık değerleri için bulunan sonuçlar incelendiğinde tespit edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir. Şekil 5.11 incelendiğinde;

- Benzene kullanılarak tasarlanan 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında ısı verim üzerinde $\Delta T_{PP,e}$ ve türbin izantropik veriminin yakın bir oranda etkisinin olduğu, fakat MM kullanılarak tasarlanan 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında türbin izantropik verimi etkisinin diğer parametrelere göre çok önde olduğu görülmektedir.
- 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında türbin gücü üzerinde $\Delta T_{PP,e}$ 'nin etkili olduğu, fakat 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında ise $\Delta T_{PP,e}$ etkisinin çok olmadığı, türbin gücü üzerinde soğutma suyu sıcaklığı, aşırı kızdırma sıcaklığı ve türbin izantropik veriminin etkili olduğu belirtilmiştir. Özellikle 290 °C ısı kaynağı sıcaklığı için aşırı kızdırma sıcaklığının türbin gücü üzerinde diğerlerinden fazla bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerin çalışmanın genelinde aşırı kızdırma sıcaklığının en fazla etkisinin olduğu parametre olduğu görülmektedir.

- 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında ekserji verimi üzerinde türbin izantropik veriminin diğer parametrelere oranla etkisinin çok fazla olduğu belirtilmiştir. Isı kaynağı sıcaklığı arttıkça aşırı kızdırma sıcaklığının da etkisinin arttığı görülmektedir.
- Toplam tersinmezlik üzerindeki etkisi olan parametrelerin ısı kaynağı sıcaklığına bağlı olarak büyük ölçüde değiştiği görülmektedir. $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 260 °C ısı kaynağı sıcaklığı için %80,69 etkisi var iken 290 °C ısı kaynağı sıcaklığı için %17,52'lik bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.
- 4 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için VFR üzerinde $\Delta T_{PP,e}$ 'nin büyük oranda etkili olduğu görülmektedir.
- EEF üzerinde ise türbin izantropik veriminin en fazla etkiye sahip parametre olduğu görülmektedir. Özellikle 260, 270 ve 280 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında büyük bir oranda etkilerken, 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında ise aşırı kızdırma sıcaklığının da EEF üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.



Şekil 5.11. ORÇ'nin yüksek sıcaklıklı uygulamaları için faktör değerlerinin amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları

Çizelge 5.23'te yüksek sıcaklıklı ORÇ'de belirlenen amaç fonksiyonlarına ulaşılmasında hassasiyet seviyesi en fazla olan iki parametre ve katkı oranları özetlenmiştir. Çizelge incelendiğinde 250, 260 ve 270 °C'de benzen'li ORÇ'de $\Delta T_{PP,e}$ 'nin amaç fonksiyonları üzerindeki etkisinin fazla iken 280 ve 290 °C'de MM'li ORÇ'de ise etkisinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca aşırı kızdırma sıcaklığının diğer ısı kaynağı sıcaklıklarında katkı oranı çok düşük olmasına rağmen MM'li ORÇ sistemlerinde sistem performansını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

Çizelge 5.23. Yüksek Sıcaklıklı ORÇ'de Belirlenen Amaç Fonksiyonlarına Ulaşılmasında Hassasiyet Seviyesi En Fazla Olan İki Parametre ve Katkı Oranları

f(x)	T _{h,i} =250 °C benzen	T _{h,i} =260 °C benzen	T _{h,i} =270 °C benzen	T _{h,i} =280 °C MM	T _{h,i} =290 °C MM
max ($\eta_{sıl}$)	%47,81; $\Delta T_{PP,e}$ %41,66; η_t	%47,06; η_t %42,26; $\Delta T_{PP,e}$	%52,38; η_t %36,88; $\Delta T_{PP,e}$	%64,84; η_t %24,71; $\Delta T_{PP,e}$	%70,27; η_t %19,3; $\Delta T_{PP,e}$
max (W_T)	%53,52; $\Delta T_{PP,e}$ %27,89; η_t	%55,54; $\Delta T_{PP,e}$ %27,27; η_t	%56,49; $\Delta T_{PP,e}$ %27,04; η_t	%34,23; η_t %30,28; T _{ak}	%37,92; T _{ak} %29,61; T _{c,i}
max (η_{II})	%69,21; η_t %29,07; $\Delta T_{PP,e}$	%76,34; η_t %22,07; $\Delta T_{PP,e}$	%82,26; η_t %16,23; $\Delta T_{PP,e}$	%61,70; η_t %21,83; T _{ak}	%40,36; η_t %36,54; T _{ak}
min (I_T)	%83,19; $\Delta T_{PP,e}$ %13,43; η_t	%80,69; $\Delta T_{PP,e}$ %15,68; η_t	%77,73; $\Delta T_{PP,e}$ %18,37; η_t	%46,02; η_t %26,14; T _{c,i}	%34,58; η_t %18,06; $\Delta T_{PP,e}$
min (VFR)	%68,91; $\Delta T_{PP,e}$ %22,85; T _{c,i}	%67,83; $\Delta T_{PP,e}$ %23,8; T _{c,i}	%66,78; $\Delta T_{PP,e}$ %24,64; T _{c,i}	%70,35; $\Delta T_{PP,e}$ %19,82; T _{c,i}	%68,41; $\Delta T_{PP,e}$ %20,26; T _{c,i}
min (EEF)	%65,9; η_t %30,9; $\Delta T_{PP,e}$	%73,61; η_t %23,59; $\Delta T_{PP,e}$	%80,05; η_t %17,49; $\Delta T_{PP,e}$	%61,07; η_t %20,49; T _{ak}	%43,80; η_t %32,60; T _{ak}

Değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için Taguchi ve ANOVA kullanılarak yapılan termodinamik optimizasyon sonuçlarına göre faktör değerlerinin performans parametreleri üzerindeki hassasiyet seviyesi değerlendirilerek her bir parametre için regresyon analizi yapılarak lineer denklem türetilmiştir. Model doğrulanması bölümünde yapılan örnek Taguchi modelinde lineer ve ikinci derece denklem sonuçlarının yakın çıkması ve lineer denklemin basit ve kullanışlı olması nedeniyle lineer denklem tercih edilmiştir.

Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için 6 farklı performans parametresinin elde edileceği regresyon denklemleri Çizelge 5.24-5.27'de verilmiştir. 100 °C ve 110 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında optimum akışkan R1234yf olarak belirlendiği için iki ısı kaynağı

sıcaklığı için performans parametrelerine bağlı $T_{h,i}$ faktör değerini de içerecek şekilde tek denklem belirlenmiştir.

Çizelge 5.24. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ'nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri

$T_{h,i}$	Performans Parametreleri	Regresyon Denklemi – Optimum Akışkan: R141b
90 °C	$\eta_{üstl}$	$0,04087 - 0,005457 * \Delta T_{pp,e} + 0,000306 * \Delta T_{pp,k} - 0,001737 * T_{c,i} + 0,000079 * T_{ak} + 0,12513 * \eta_{+} + 0,00748 * \eta_{p}$
	WT (kW)	$-0,917 + 0,3129 * \Delta T_{pp,e} + 0,0131 * \Delta T_{pp,k} - 0,03124 * T_{c,i} + 0,0016 * T_{ak} + 2,059 * \eta_{+} + 0,244 * \eta_{p}$
	$\eta_{ül}$	$0,0468 - 0,021524 * \Delta T_{pp,e} - 0,00234 * \Delta T_{pp,k} - 0,001675 * T_{c,i} + 0,000531 * T_{ak} + 0,745 * \eta_{+} + 0,0501 * \eta_{p}$
	I_{toplam} (kW)	$0,827 + 0,3443 * \Delta T_{pp,e} + 0,04447 * \Delta T_{pp,k} - 0,01495 * T_{c,i} + 0,00301 * T_{ak} - 1,339 * \eta_{+} + 0,426 * \eta_{p}$
	VFR	$10,413 - 0,4399 * \Delta T_{pp,e} - 0,0386 * \Delta T_{pp,k} - 0,14544 * T_{c,i} - 0,01112 * T_{ak} - 1,416 * \eta_{+} - 0,827 * \eta_{p}$
	EEF	$2,508 + 0,07814 * \Delta T_{pp,e} + 0,01164 * \Delta T_{pp,k} + 0,00699 * T_{c,i} - 0,00113 * T_{ak} - 2,601 * \eta_{+} - 0,117 * \eta_{p}$

Çizelge 5.25. 100 ve 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ'nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri

$T_{h,i}$	Performans Parametreleri	Regresyon Denklemi – Optimum Akışkan: R1234yf	
100 °C	$\eta_{üstl}$	$-0,0731 - 0,003974 * \Delta T_{pp,e} + 0,00017 * \Delta T_{pp,k} - 0,001539 * T_{c,i} + 0,000287 * T_{ak} + 0,12435 * \eta_{+} + 0,00807 * \eta_{p} + 0,000995 * T_{h,i}$	
	WT (kW)	$-11,65 + 0,0187 * \Delta T_{pp,e} + 0,0398 * \Delta T_{pp,k} - 0,09832 * T_{c,i} - 0,02210 * T_{ak} + 4,544 * \eta_{+} + 0,084 * \eta_{p} + 0,13171 * T_{h,i}$	
	$\eta_{ül}$	$-0,1657 - 0,01761 * \Delta T_{pp,e} - 0,00183 * \Delta T_{pp,k} - 0,002239 * T_{c,i} + 0,000416 * T_{ak} + 0,6175 * \eta_{+} + 0,0667 * \eta_{p} + 0,002715 * T_{h,i}$	
	110 °C	I_{toplam} (kW)	$-3,683 + 0,3429 * \Delta T_{pp,e} + 0,0917 * \Delta T_{pp,k} - 0,07566 * T_{c,i} - 0,0283 * T_{ak} - 6,009 * \eta_{+} + 0,611 * \eta_{p} + 0,10454 * T_{h,i}$
		VFR	$0,47 - 0,4349 * \Delta T_{pp,e} - 0,0272 * \Delta T_{pp,k} - 0,11337 * T_{c,i} - 0,03132 * T_{ak} - 1,652 * \eta_{+} - 0,8 * \eta_{p} + 0,10322 * T_{h,i}$
		EEF	$4,474 + 0,08646 * \Delta T_{pp,e} + 0,0097 * \Delta T_{pp,k} + 0,01056 * T_{c,i} + 0,00054 * T_{ak} - 2,971 * \eta_{+} - 0,5444 * \eta_{p} - 0,01432 * T_{h,i}$

Çizelge 5.26. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ'nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri

$T_{h,i}$	Performans Parametreleri	Regresyon Denklemi – Optimum Akışkan: R1234ze
120 °C	$\eta_{ısıl}$	$0,01239 - 0,003608 * \Delta T_{pp,e} + 0,00039 * \Delta T_{pp,k} - 0,001372 * T_{c,i} + 0,000271 * T_{ak} + 0,14607 * \eta_{+} + 0,02716 * \eta_{p}$
	WT (kW)	$2,119 + 0,0941 * \Delta T_{pp,e} - 0,0021 * \Delta T_{pp,k} - 0,11723 * T_{c,i} - 0,02643 * T_{ak} + 6,4 * \eta_{+} - 0,214 * \eta_{p}$
	η_{ul}	$0,0446 - 0,013468 * \Delta T_{pp,e} - 0,00172 * \Delta T_{pp,k} - 0,001612 * T_{c,i} + 0,000417 * T_{ak} + 0,6727 * \eta_{+} + 0,0872 * \eta_{p}$
	I_{toplam} (kW)	$10,56 + 0,3794 * \Delta T_{pp,e} + 0,0667 * \Delta T_{pp,k} - 0,08891 * T_{c,i} - 0,03039 * T_{ak} - 7,265 * \eta_{+} - 1,074 * \eta_{p}$
	VFR	$19,9 - 0,561 * \Delta T_{pp,e} - 0,0834 * \Delta T_{pp,k} - 0,1701 * T_{c,i} - 0,06 * T_{ak} - 4,27 * \eta_{+} - 3,44 * \eta_{p}$
	EEF	$3,04 + 0,0672 * \Delta T_{pp,e} + 0,01113 * \Delta T_{pp,k} + 0,00979 * T_{c,i} - 0,00089 * T_{ak} - 3,182 * \eta_{+} - 0,353 * \eta_{p}$

Çizelge 5.27. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ'nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri

$T_{h,i}$	Performans Parametreleri	Regresyon Denklemi – Optimum Akışkan: R152a
130 °C	$\eta_{ısıl}$	$0,00541 - 0,003374 * \Delta T_{pp,e} + 0,000451 * \Delta T_{pp,k} - 0,001379 * T_{c,i} + 0,000465 * T_{ak} + 0,16465 * \eta_{+} + 0,03116 * \eta_{p}$
	WT (kW)	$4,713 + 0,0316 * \Delta T_{pp,e} - 0,025 * \Delta T_{pp,k} - 0,13681 * T_{c,i} - 0,03173 * T_{ak} + 6,937 * \eta_{+} - 1,123 * \eta_{p}$
	η_{ul}	$0,06 - 0,012927 * \Delta T_{pp,e} - 0,00146 * \Delta T_{pp,k} - 0,001496 * T_{c,i} + 0,001021 * T_{ak} + 0,6814 * \eta_{+} + 0,0786 * \eta_{p}$
	I_{toplam} (kW)	$14,76 + 0,3385 * \Delta T_{pp,e} + 0,0416 * \Delta T_{pp,k} - 0,09847 * T_{c,i} - 0,05214 * T_{ak} - 9,784 * \eta_{+} - 2,132 * \eta_{p}$
	VFR	$21,21 - 0,5473 * \Delta T_{pp,e} - 0,0884 * \Delta T_{pp,k} - 0,1705 * T_{c,i} - 0,063 * T_{ak} - 4,88 * \eta_{+} - 3,67 * \eta_{p}$
	EEF	$2,806 + 0,05896 * \Delta T_{pp,e} + 0,00979 * \Delta T_{pp,k} + 0,0085 * T_{c,i} - 0,00338 * T_{ak} - 2,983 * \eta_{+} - 0,257 * \eta_{p}$

Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için 6 amaç fonksiyonu altında elde edilen regresyon denklemleri Çizelge 5.28 ve 5.29'da verilmiştir. 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında optimum akışkan benzen; 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında ise optimum akışkan MM olarak belirlendiği için bu ısı kaynağı sıcaklığı için performans parametrelerine bağlı $T_{h,i}$ faktör değerini de içerecek şekilde tek denklem belirlenmiştir.

Çizelge 5.28. 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ'nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri

$T_{h,i}$	Performans Parametreleri	Regresyon Denklemi – Optimum Akışkan: Benzen
250 °C	$\eta_{sıl}$	$-0,0921 - 0,002311 * \Delta T_{pp,e} + 0,00024 * \Delta T_{pp,k} - 0,001288 * T_{c,i} + 0,00022 * T_{ak} + 0,2765 * \eta_{+} - 0,0030 * \eta_{p} + 0,000584 * T_{h,i}$
	WT (kW)	$-62,3 + 0,6309 * \Delta T_{pp,e} + 0,087 * \Delta T_{pp,k} - 0,2315 * T_{c,i} - 0,0847 * T_{ak} + 32,71 * \eta_{+} - 0,69 * \eta_{p} + 0,2178 * T_{h,i}$
	η_{li}	$-0,0346 - 0,002559 * \Delta T_{pp,e} - 0,000991 * \Delta T_{pp,k} - 0,000728 * T_{c,i} + 0,000105 * T_{ak} + 0,7049 * \eta_{+} + 0,0094 * \eta_{p} + 0,000361 * T_{h,i}$
260 °C	I_{toplam} (kW)	$-7,87 + 0,7806 * \Delta T_{pp,e} + 0,2465 * \Delta T_{pp,k} - 0,1337 * T_{c,i} - 0,015 * T_{ak} - 34,27 * \eta_{+} + 3,57 * \eta_{p} + 0,15638 * T_{h,i}$
270 °C	VFR	$-41 - 6,478 * \Delta T_{pp,e} - 2,55 * \Delta T_{pp,k} - 3,793 * T_{c,i} - 0,466 * T_{ak} - 55,1 * \eta_{+} - 58,7 * \eta_{p} + 1,59 * T_{h,i}$
	EEF	$2,943 + 0,00928 * \Delta T_{pp,e} + 0,00442 * \Delta T_{pp,k} + 0,00227 * T_{c,i} + 0,00063 * T_{ak} - 2,495 * \eta_{+} - 0,072 * \eta_{p} - 0,001386 * T_{h,i}$

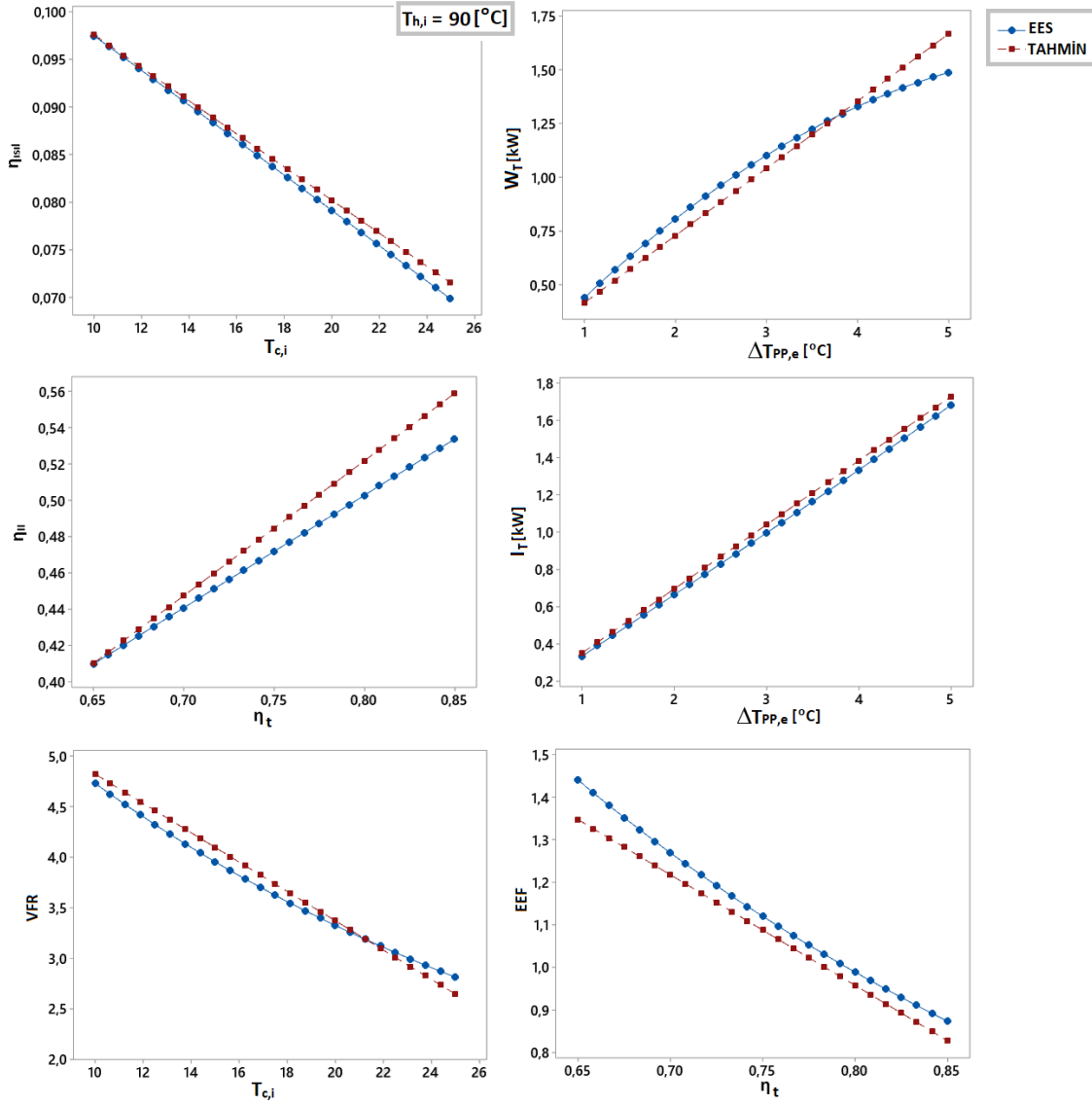
Çizelge 5.29. 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ'nin farklı performans parametrelerinin faktör değerlerine bağlı regresyon denklemleri

$T_{h,i}$	Performans Parametreleri	Regresyon Denklemi – Optimum Akışkan: MM
280 °C	$\eta_{sıl}$	$-0,0408 - 0,000949 * \Delta T_{pp,e} + 0,000133 * \Delta T_{pp,k} - 0,000759 * T_{c,i} - 0,000114 * T_{ak} + 0,20275 * \eta_{+} + 0,003 * \eta_{p} + 0,000245 * T_{h,i}$
	WT (kW)	$-115,4 - 0,0812 * \Delta T_{pp,e} + 0,004 * \Delta T_{pp,k} - 0,4055 * T_{c,i} - 0,5691 * T_{ak} + 39,67 * \eta_{+} - 3,27 * \eta_{p} + 0,5018 * T_{h,i}$
	η_{li}	$-0,421 - 0,001682 * \Delta T_{pp,e} - 0,00259 * \Delta T_{pp,k} - 0,000327 * T_{c,i} - 0,004873 * T_{ak} + 0,5237 * \eta_{+} + 0,0137 * \eta_{p} + 0,002087 * T_{h,i}$
290 °C	I_{toplam} (kW)	$30 + 0,2359 * \Delta T_{pp,e} + 0,435 * \Delta T_{pp,k} - 0,4009 * T_{c,i} + 0,2664 * T_{ak} - 52,25 * \eta_{+} + 1,70 * \eta_{p} + 0,1835 * T_{h,i}$
	VFR	$-64 - 14,63 * \Delta T_{pp,e} - 6,9 * \Delta T_{pp,k} - 7,47 * T_{c,i} - 2,13 * T_{ak} - 154 * \eta_{+} - 147 * \eta_{p} + 3,42 * T_{h,i}$
	EEF	$5,078 + 0,00905 * \Delta T_{pp,e} + 0,01354 * \Delta T_{pp,k} + 0,00118 * T_{c,i} + 0,02140 * T_{ak} - 2,347 * \eta_{+} - 0,155 * \eta_{p} - 0,00903 * T_{h,i}$

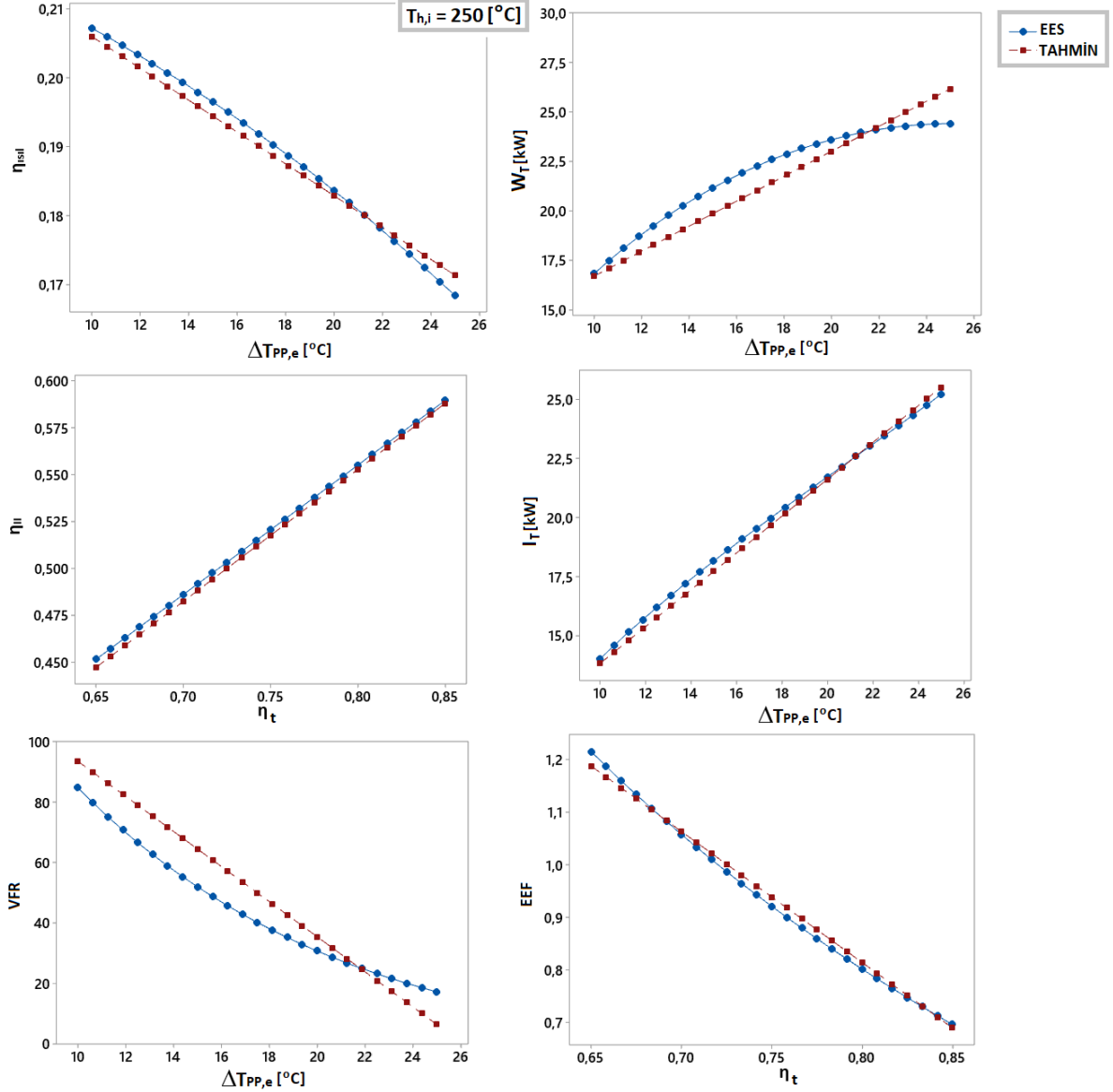
Regresyon analizi ile tespit edilen denklemlerin güvenilirliğinin tespit edilmesi amacıyla elde edilen tüm sonuçlar farklı simülasyon verileri üzerinde test edilmiştir.

Düşük ve yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamalarından iki değişik ısı kaynağı için regresyon tahmin değerleri ve EES termodinamik analiz sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği Şekil 5.12 ve 5.13'te verilmiştir. Şekil 5.12'de 90 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında R141b akışkanı kullanılarak tasarlanan; Şekil 5.13'te 250 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında benzene akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ sistemi incelenmiştir. Oluşabilecek hataların daha net görülmesi amacıyla incelenen performans parametresi üzerinde hangi faktör değerinin etkisi fazla ise o değer değişim aralığında sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna rağmen her iki grafikte de tahmin değerlerin nümerik sonuçlara yakın olduğu görülmektedir.

Şekil 5.12’de görüldüğü gibi, 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında R141b’li sistemin ısıl verimini en fazla etkileyen parametre %51,83 ile soğutma suyu sıcaklığı olduğu için soğutma suyunun değişim aralığında denklemin güvenilirliği test edilmiştir. Bu şekilde türbin gücünde ve toplam tersinmezlikte $\Delta T_{PP,e}$, ekserji verimi ve EEF değerinde türbin izantropik verimi ve VFR değerinde soğutma suyu sıcaklığı en fazla katkı oranına sahip faktör değerleri olduğu için bu parametrelerin değişim aralığında hata analizi yapılmıştır.



Şekil 5.12. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığı için regresyon ile elde edilen tahmin değerlerinin EES sonuçları ile karşılaştırılması



Şekil 5.13. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığı için regresyon ile elde edilen tahmin değerlerinin EES sonuçları ile karşılaştırılması

Çizelge 5.30'da 10 değişik ısı kaynağı için 6 farklı performans parametresinin değişim aralığında tespit edilen tahmin verileri ile EES analiz verileri farklı istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bunlar, MAPE, RRMSE ve R^2 'dir. Hata sonuçları incelendiğinde regresyon ile tahmin edilen değerlerin EES sonuçlarına çok yakın çıktığı görülmektedir. Tüm ısı kaynağı sıcaklıkları birlikte düşünüldüğünde ortalama MAPE, RRMSE ve R^2 değerleri sırasıyla %3,41, %3,66 ve %96,2 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.30. Değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında farklı amaç fonksiyonları bakımından tahmin edilen değerlerin EES sonuçları ile farklı istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırılması

$T_{h,i}$	MAPE (%)	RRMSE (%)	R^2 (%)
90 °C	3,51	3,82	95,6
100 °C	3,47	3,75	96,2
110 °C	3,2	3,48	97,4
120 °C	4,1	4,29	94,1
130 °C	3,6	3,9	95,9
250 °C	2,88	3,02	97,9
260 °C	2,90	3,06	97,7
270 °C	2,98	3,15	97,2
280 °C	3,74	4,08	95,1
290 °C	3,71	4,04	95,3
ORTALAMA	3,41	3,66	96,2

6. FARKLI KONFIGÜRASYONLU ORÇ'LERİN DEĞİŞİK ISI KAYNAĞI SICAKLIKLARI ALTINDA TERMODİNAMİK OPTİMİZASYON İLE PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Tezin dördüncü bölümünde ORÇ'de değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için farklı amaç fonksiyonları altında optimum akışkanlar belirlenmişti. Bu bölümde ise aynı tasarım parametreleri ve organik akışkan kullanılması ile farklı konfigürasyonlarda ORÇ performansı tespit edilmiştir.

Farklı konfigürasyonlu ORÇ tasarımları inceleneceğinden daha önceki bölümlerde ORÇ olarak anlatılan sistem tezin bu bölümünden itibaren basit ORÇ (B-ORÇ) olarak adlandırılmıştır.

Konfigürasyonlu ORÇ'de düşük ve yüksek sıcaklık uygulamaları kapsamında 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı kullanıldığında elde edilen sonuçlar B-ORÇ sonuçları ile karşılaştırılmıştır. B-ORÇ'de tespit edilen optimum akışkanlar kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Performans karşılaştırılması yine 6 farklı amaç fonksiyonu üzerinden yapılmıştır. Bunlar; ısıl verim, türbin gücü ve ekserji verimi maksimizasyonu ile toplam tersinmezlik, VFR ve EEF değeri minimizasyonudur.

Bu bölümde, kaynak araştırması kapsamında tespit edilen 5 farklı ORÇ konfigürasyonu incelenmiştir. ORÇ konfigürasyonları:

- Rejeneratif ORÇ (R-ORÇ)
- Ara Isıtmalı ORÇ (A-ORÇ)
- Rejeneratif Ara Isıtmalı ORÇ (RA-ORÇ)
- Reküperatörlü ORÇ (r-ORÇ)
- Rejeneratif Reküperatörlü ORÇ (Rr-ORÇ)

6.1. Kaynak Araştırması

Tezin bu bölümünde yapılan kaynak araştırmasında ORÇ konfigürasyonları araştırılmıştır. B-ORÇ'nin diğer ORÇ konfigürasyonları ile karşılaştırılmasında belirlenen performans parametreleri ve varsa kullanılan optimizasyon yöntemi incelenmiştir. Yazarların çalışmaları sonunda ulaştıkları sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Velez vd. (2013) maksimum 150°C düşük sıcaklık ısı kaynağı kullanılarak R134a akışkanı ile ORÇ sisteminin performansının araştırmışlardır. Aşırı kızdırma sıcaklığının sistem verimi üzerinde çok fazla değişiklik meydana getirmediği, türbin içinde gerçekleşen basınç oranının artması ve bununla birlikte türbin giriş sıcaklığının artmasının sistem verimini

etkilediğini sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca B-ORÇ ile r-ORÇ karşılaştırmasını yapmışlardır. B-ORÇ ile %11 sistem verimini elde ederken, r-ORÇ sisteminde bu değer %14'e yükseldiğini belirtmişlerdir.

Le vd.(2014); düşük küresel ısınma potansiyeline sahip akışkanların kullanılmasıyla düşük sıcaklıklı güç üretimi yapan süperkritik B-ORÇ ve R-ORÇ sistemi üzerinde optimizasyon çalışması yapmışlardır. Yaygın olarak kullanılan R134a akışkanı karşılaştırma yapılması için ele alınmıştır. Isı kaynağı sıcaklığı 150 °C olarak alınmıştır. Performans optimizasyonunda Ranking metodu ve ekserji analiz metodu kullanılmıştır. En yüksek verim değerlerine R152a akışkanı ile B-ORÇ için %11,6, R-ORÇ için ise %13,1 ile ulaşmışlardır. En yüksek elektrik güç çıkış değeri ise R1234ze için 4,1 kW olarak bulunmuştur. Ranking metodu ile B-ORÇ için ideal akışkanın R32, R-ORÇ için ise R152a olduğu sonucuna ulaşmışlardır. CO₂'nin ODP ve GWP değerleri bakımından istenilen değerlerde olmasına rağmen termodinamik performans bakımından çok kötü olduğunu da belirtmişlerdir.

Shu vd.(2014) yüksek sıcaklıktaki ORÇ'nin atık ısı geri kazanımı uygulamaları için akışkan belirlenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Üç tane saf hidrokarbon olan siklopentan, siklohegzan ve benzen ile R11 ve R123'ün farklı oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen karışımlar incelenmiştir. Çalışmada B-ORÇ ve r-ORÇ birbiriyle karşılaştırılmıştır. Zeotropik akışkanların saf akışkanlara kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda, en iyi sonuca benzene/R11 (0,7/0,3) ve r-ORÇ durumunda ulaşmışlardır. Isı değiştiricisinin eklenmesiyle verimin %7,12 ile %9,72 arasında arttığını belirtmişlerdir. Çalışmada maksimum ısı verim değeri olarak %16,7 değerine ulaşmışlardır.

Safarian ve Aramoun (2015), dört farklı prensipte çalışan ORÇ'nin enerji ve ekserji analizi üzerinde çalışma yapmışlardır. Bunlar, B-ORÇ, r-ORÇ, R-ORÇ ve her ikisine sahip birleşik sistem olan Rr-ORÇ'dir. Çalışmalarında organik akışkan olarak R113 kullanılmış, evaporatör basıncı 2,5 MPa ve yoğuşma sıcaklığı 298 K olarak alınmıştır. Evaporatöre giren sıcak gazın sıcaklığının ise 300 °C ve basıncının 100 kPa olduğunu, ısı kaynağından alınan ısı girdisinin ise 252 kW değerinde sabit olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, %31,2 ile en düşük ekserji verimine ve 50,9 kW ile en fazla ekserji kaybının B-ORÇ sisteminde olduğunu tespit etmişlerdir. En iyi sonuca Rr-ORÇ konfigürasyonunda %22,8 ısı verim ve %35,5 ekserji verimi ile ulaştıklarını belirtmişlerdir.

Deethayat vd. (2015), 50 kW r-ORÇ sistemi için R245fa/R152a zeotropik akışkanının farklı karışım bileşimlerinde performansa etkisini incelemişlerdir. Zeotropik akışkan kullanıldığında çalışma akışkanının sıcaklığının ısı kaynağı sıcaklığına yaklaştığı için evaporatörde meydana gelen tersinmezlik değerinin azaldığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında,

R245fa'nın farklı karışım bileşimleri ve ısı değiştiricinin etkenliği incelenmiştir. Yüksek buharlaşma sıcaklığı ve ısı değiştirici etkenliğinin enerji ve ekserji verimini arttırdığını belirtmişlerdir. Yaptıkları alışma sonucunda, en iyi duruma karışım bileşiminin R152a/R245fa (0,2/0,8) olduğunda ulaşmışlardır. Bu durumda buharlaşma sıcaklığı 100 °C, ısı değiştirici etkenliği %80 olarak ele alınmıştır. Elde edilen enerji ve ekserji verimlerinin sırasıyla %11,94 ve %54,39 olduğunu belirtmişlerdir.

Imran vd.(2016), düşük sıcaklıkta jeotermal uygulamalar için üç farklı ORÇ konfigürasyonuna sahip sistemin performansını genetik algoritma optimizasyon yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bunlar, B-ORÇ, r-ORÇ ve R-ORÇ'dir. MATLAB yazılımı ile üç farklı sistemin de modelleri oluşturulmuştur. R-ORÇ ve r-ORÇ sistemlerinin ısıl veriminin B-ORÇ sisteminden daha fazla olduğunu fakat o sistemlerin yatırım maliyetlerinin de fazla olduğunu vurgulamışlardır. Yaptıkları alışma sonucunda, B-ORÇ için %51,3 ekserji verimi ile maliyetin 2423 \$/kW olduğunu, r-ORÇ sisteminde ekserji veriminin %53,74'yükseldiğini, maliyetinde 2475 \$/kW değerine yükseldiğini son olarak da R-ORÇ sisteminde ise ekserji veriminin %55,93'yükseldiğini aynı zamanda maliyetinde 2567 \$/kW değerine yükseldiğini belirtmişlerdir. alışmalarında ayrıca optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerinin belirlenmesinin sistemin eksergo-ekonomik performansının yükselmesine önemli oranda katkı yapabileceğini belirtmişlerdir.

Javanshir vd.(2017), kuru akışkan ile alışan R-ORÇ sisteminin termodinamik analizini ve tasarımı Epsilon-Professional yazılımını kullanarak yapmışlardır. Farklı alışma koşulları altında ideal akışkanın belirlenmesi amaçlanmıştır. Yaptıkları çalışmada kuru akışkan olan sistemde minimum sıcaklığın sabit olması durumunda maksimum sıcaklığın artması ile ısıl verimin arttığı görölmüştür. R-ORÇ'de birim kütle başına yapılan net iş değerinin değişmediği belirtilmiştir. R-ORÇ sisteminde en iyi ve en kötü ısıl verim değerlerinin sırasıyla R113 ve R227ea akışkanlarında olduğu tespit edilmiştir.

Moloney vd. (2017), jeotermal uygulamaları kapsamında süperkritik R-ORÇ sistemleri için enerji ve ekserji analizi üzerinde çalışmışlardır. Yazarlar, çoğu çalışmanın türbin giriş sıcaklığını 80 °C-130 °C arasında seçtiğini bundan dolayı türbin giriş sıcaklığını 170-240 °C olarak belirleyip bu sıcaklık aralığında sistemin performansını incelediklerini belirtmişlerdir. Enerji verimi, net güç ve ekserji verimi bakımından farklı organik akışkanların karşılaştırılması yapılmıştır. En kötü termodinamik performansın CO₂'de göröldüğü belirtilmiştir. Izopentan, pentan ve bütan akışkanlarına sahip sistemlerin ise birbirine yakın ölçüde iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Braimakis vd. (2018), B-ORÇ ve R-ORÇ prensibine göre çalışan sistemlerin enerji optimizasyonu üzerinde çalışma yapmışlardır. R-ORÇ, açık ve kapalı besleme sıvı ısıtıcılarına sahip sistemler olarak ayrı ayrı tasarlanmıştır. İkinci olarak tüm hazırlanan modellere reküperatör eklenmiştir. Bu sayede B-ORÇ ve R-ORÇ ile r-ORÇ ve Rr-ORÇ'nin karşılaştırması yapılmıştır. Modelleme ve akışkanların termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi için Coolprop yazılımından yararlanılmıştır. Çalışma sonunda kuru akışkanlar için Rr-ORÇ sisteminin en iyi sonucu verdiği görülmüştür. R-ORÇ sisteminin ise r-ORÇ sisteminden daha kötü performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Su vd. (2018), zeotropik ve saf akışkanların kullanılmasıyla tasarlanan B-ORÇ ve r-ORÇ'nin termodinamik performansını karşılaştırmışlardır. Isı kaynağında jeotermal su sıcaklığı 200 °C, soğutma suyunun kütleli debisi ise 4-12 kg/s arasında kabul edilmiştir. Organik akışkanlar, R600a, R601a ve R227ea ile farklı oranlarda karışım bileşenlerine sahip R600a/R601a ve R600a/R227ea olarak belirlenmiştir. Yaptıkları çalışma sonunda zeotropik karışımların elde edilen net güç bakımından daha iyi olmasına rağmen ısı verimlerinin saf akışkanlara göre daha kötü olduğu belirtilmiştir. R600a/R601a (0,1/0,9) için ısı verim %8,18 iken R601a olan sistemde ısı verim %8,24 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, evaporatör ve kondenserde meydana gelen tersinmezliğin ise r-ORÇ'li konfigürasyon ile azaldığını tespit etmişlerdir.

Zhang vd. (2018), B-ORÇ sistemi ve r-ORÇ sistemini ısı kaynağı ve akışkan tipi parametreleri altında değerlendirerek termo-ekonomik performansı üzerinde çalışmışlardır. Net güç çıkışı, ekserji verimi, elektrik üretim maliyet değerleri açısından karşılaştırmışlardır. Düşük ısı kaynağı sıcaklık uygulamaları için r-ORÇ'nin daha kötü bir ekonomik performansa sahip olduğunu fakat ısı kaynağı sıcaklığının artmasıyla r-ORÇ ve B-ORÇ için elektrik üretim maliyet değerlerinin yakınlığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ısı kaynağı sıcaklığının artmasıyla kuru akışkanların ıslak akışkanlardan daha iyi ekonomik performans gösterdiği belirlenmiştir. r-ORÇ sisteminin ısı veriminin B-ORÇ'ye göre %10 ile %17 arasında; ekserji veriminin ise %5 ile %10 arasında daha iyi olduğu belirtilmiştir. Net güç değeri bakımından en iyi sonucun Bütan ve R123 akışkanlarında olduğu görülmüştür.

Saleh (2018), ORÇ ve buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin entegre olduğu sistemin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Performans katsayısı (Coefficient of Performance-COP), ekserji verimi, tersinmezlik değerleri, türbin basınç oranı ve kütleli debi performans parametreleri olarak belirlenmiştir. Sistem için mevcut bilinen akışkanlar ile yeni akışkanlar çalışma akışkanları olarak belirlenmiştir. Bu akışkanlardan bazıları, R602, RE245cb2, C5F12 ve R1234ze(E)'dir. Yapılan çalışma sonunda en iyi ısı ve ekserji verimlerinin en yüksek

kritik sıcaklık değerine (234,67 °C) sahip R602 akışkanı olan sistemde görüldüğü belirtilmiştir. En yüksek tersinmezlik değerinin ise %37,4 oranında kondenserde meydana geldiği, kondenser sıcaklığının 25 °C'den 50 °C'ye artması durumunda COP değerinin %70, ısı veriminin ise %73 azalacağı tespit edilmiştir.

Küçük ve Kılıç (2018), R114, R600, R600a ve R245fa organik akışkanları kullanarak tasarladıkları Rr-ORÇ'nin termodinamik simülasyonu ve analizi üzerinde çalışmışlardır. Buharlaşma sıcaklığı ve düşük basınç türbininin giriş basıncını performans parametresi olarak belirlemişlerdir. ORÇ konfigürasyonu için en uygun tasarımın R600'lü sistemde elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. En yüksek ısı verim R245fa'lı sistemde görülmesine rağmen en yüksek net güç R600'da tespit edilmiştir.

Abam vd. (2018a, 2018b, 2018c), farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin ekserji performansı ve termodinamik sürdürülebilirlik göstergeleri üzerinde çalışmışlardır. ORÇ konfigürasyonları; B-ORÇ, r-ORÇ, R-ORÇ ve Rr-ORÇ olarak belirlenmiştir. Performans parametreleri ise ekserji verimi, WER, EEF ve ESI olarak belirlenmiştir.

Abam vd. (2018a), farklı konfigürasyonlu ORÇ için buharlaşma basıncı, türbin giriş sıcaklığı ve ısı girdi miktarı değişiminin sistem performansına etkisini belirlemişlerdir. Organik akışkan olarak R245fa, R1234ze ve R1234yf kullanılmıştır. En yüksek ESI 1,23 değeri ile R245fa kullanılarak tasarlanmış Rr-ORÇ'de elde edildiği belirtilmiştir.

Abam vd. (2018b), çalışmasında yine organik akışkan olarak R245fa, R1234ze ve R1234yf kullanılmışlardır. Sisteme sıcak gazdan olan ısı girişinin 252 kW, sıcak gazın sıcaklığı ise 300 °C olarak kabul edilmiştir. Çalışma sonucunda, ESI değerinin en iyi R245fa akışkanında görüldüğü belirtilmiştir. Buharlaşma basıncının artmasıyla ESI değerinin arttığı görülmüştür. Ekserji veriminin Rr-ORÇ sisteminde %38,82 iken B-ORÇ için ise bu değer %30,26 olduğu belirtilmiştir. Tüm parametreler değerlendirildiğinde en iyi performansa sahip sistemler; Rr-ORÇ, R-ORÇ, r-ORÇ ve A-ORÇ olarak sıralanmıştır.

Abam vd. (2018c), farklı konfigürasyonlu ORÇ için buharlaşma basıncı ve ısı kaynağı sıcaklığı değişiminin sistem performansına etkisini belirlemişlerdir. Organik akışkan olarak R113 ve R141b kullanılmıştır. En yüksek ESI değerinin r-ORÇ'de elde edildiğini belirtmişlerdir. EEF değerinin buharlaşma basıncının artması ile azaldığı, fakat ısı kaynağı sıcaklığının artması ile arttığını tespit etmişlerdir.

Bu bölüm için yapılan kaynak araştırması incelendiğinde özellikle son yıllarda ORÇ konfigürasyonu üzerinde yapılan çalışmaların arttığı görülmüştür. Fakat incelenen çalışmalarda ORÇ konfigürasyonlarının buharlaşma sıcaklığı, buharlaşma basıncı gibi sistem parametre değerlerinin değişiminde karşılaştırıldığı görülmüştür. Bu tez çalışmasında ise 6

farklı amaç fonksiyonu parametresi üzerinde çok amaçlı GA optimizasyon tekniği kullanılarak performans karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca kaynak araştırmasında ORÇ konfigürasyonlarının genellikle sabit ısı kaynağı sıcaklığı altında karşılaştırıldığı görülmüştür. Bu tez çalışmasında ise 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığında ORÇ konfigürasyonlarının karşılaştırılmasıyla ısı kaynağı sıcaklığına bağlı olarak optimum konfigürasyon modeli tespit edilmiştir.

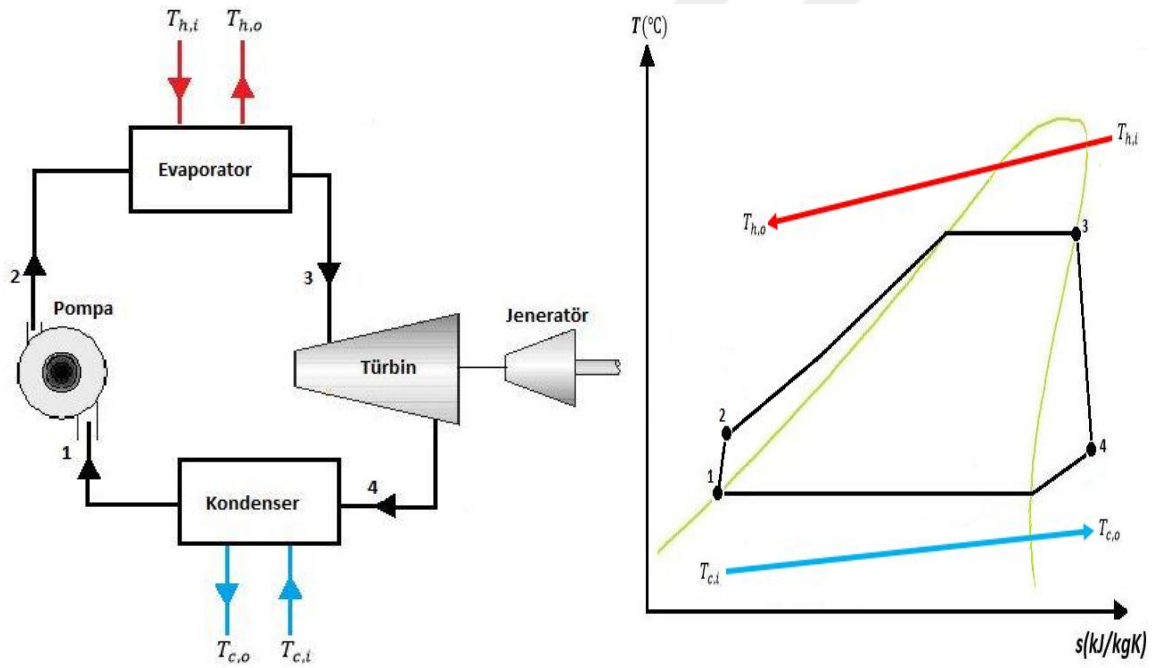
Kaynak araştırmasında ORÇ konfigürasyonları karşılaştırılırken konfigürasyonlu ORÇ'ye ait açık besleme sıvı ısıtıcı (A-BSI) basıncı, ara ısıtma basınç oranı (k) gibi spesifik değerlerin sabit olarak ve herhangi bir kritere bağlı olmadan alındığı görülmüştür. Fakat yapılan tez çalışmasında bu spesifik değerlerin konfigürasyon modelinin performansını önemli bir oranda değiştirdiği belirlenmiştir. Bundan dolayı ORÇ konfigürasyonlarının daha doğru bir şekilde karşılaştırılması için spesifik değerlerin optimum noktasında olması gerekmektedir. Bundan dolayı ilk olarak ORÇ konfigürasyonları için sınır şartları çerçevesinde GA optimizasyon tekniği ile optimum spesifik değerler tespit edilmiştir. Bu değerlerin kullanılmasıyla tasarlanan ORÇ konfigürasyonları B-ORÇ modeli ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için ayrı ayrı optimum spesifik değerlerin tasarım parametrelerine bağlı olarak belirlenebileceği ampirik denklemler türetilmiştir.

6.2. Materyal ve Yöntem

Şekil 6.1-6.6'da sırasıyla B-ORÇ, R-ORÇ, A-ORÇ, RA-ORÇ, r-ORÇ, Rr-ORÇ'nin çalışma prensibi ve temel özellikleri verilmiştir.

- **B-ORÇ;**

Çevrimde kullanılan organik akışkan pompa aracılığıyla basınçlandırılarak evaporatöre gönderilir. Evaporatör olarak kullanılan eleman bir ısı değiştiricidir, yenilenebilir bir kaynaktan alınan ısıyı organik akışkana aktarır. Bu işlem sonrasında organik akışkan yüksek sıcaklık ve basınca geçmiş olur. Ardından organik türbine gönderilerek mekanik işe dönüştürülür. Daha sonra kondensere dönerek tekrar sıvı hale gelir. Çevrim bu döngüde devam eder.

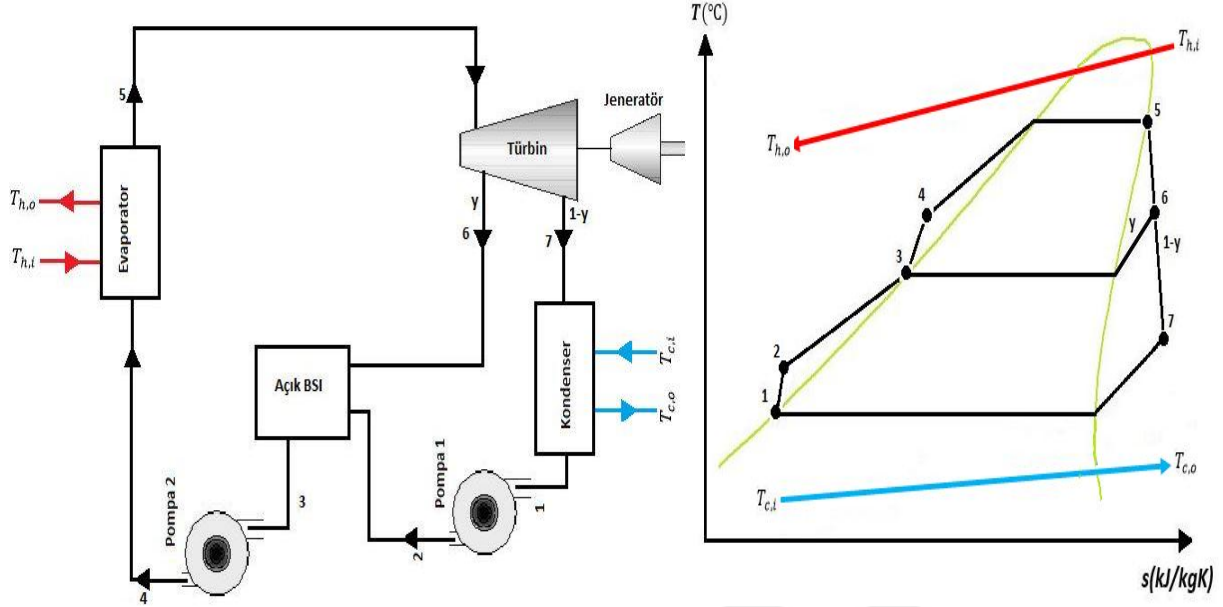


Şekil 6.1. B-ORÇ Çalışma prensibi ve T-s diyagramı

- **R-ORÇ;**

Evaporatör giriş sıcaklığının artırılmasının daha uygulanabilir bir yolu, türbinde genişleyen buharın bir bölümünün belirli noktalarda türbinden dışarı alınarak açık besleme sıvısının ısıtılmasında kullanılmasıdır. Böylece, türbinde genişlemeye devam etmesi durumunda daha çok iş üretebilecek olan buhar, açık besleme sıvısının ısıtılmasında kullanılmış olur.

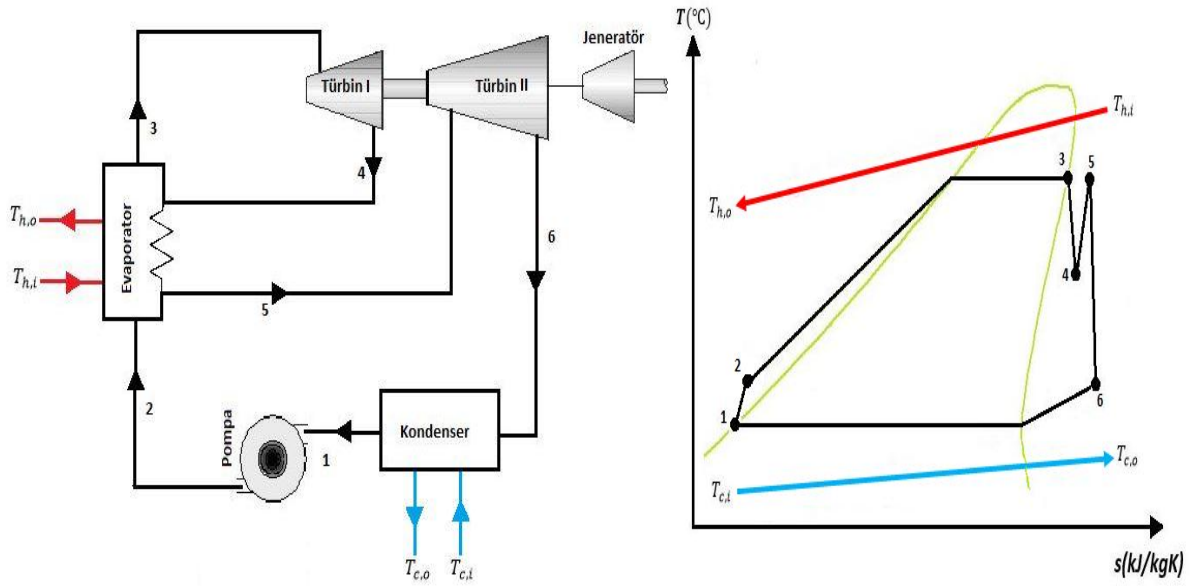
B-ORÇ'de pompadan çıkan akışkan direk evaporatöre giderken, R-ORÇ'de ise açık besleme sıvı yardımı ile evaporatöre daha yüksek sıcaklıkla girmektedir. Böylelikle evaporatöre giren akışkan daha sıcak olup daha az enerji harcanması amaçlanmıştır.



Şekil 6.2. R-ORÇ Çalışma prensibi ve T-s diyagramı

- **A-ORÇ;**

A-ORÇ, genişleme işleminin iki kademe yapılmasıyla B-ORÇ'den ayrılır. Ara ısıtma işleminin tek amacı genişleme işleminin son kademesindeki kuruluk derecesini yüksek tutmaktır. A-ORÇ genişlemeyi iki kademe yaparak çevrimin ısı verimini artırır. Kademe sayısı arttıkça, genişleme ve ara ısıtma işlemleri en yüksek sıcaklıkta izotermal ısı geçişine yaklaşmaktadır. Fakat iki kademeden daha fazla ara ısıtmanın yapılması ekonomik değildir. Ara ısıtma uygulanması, buhara ısı verilen ortalama sıcaklığı yükselttiği için çevrimin ısı verimini arttırmaktadır.

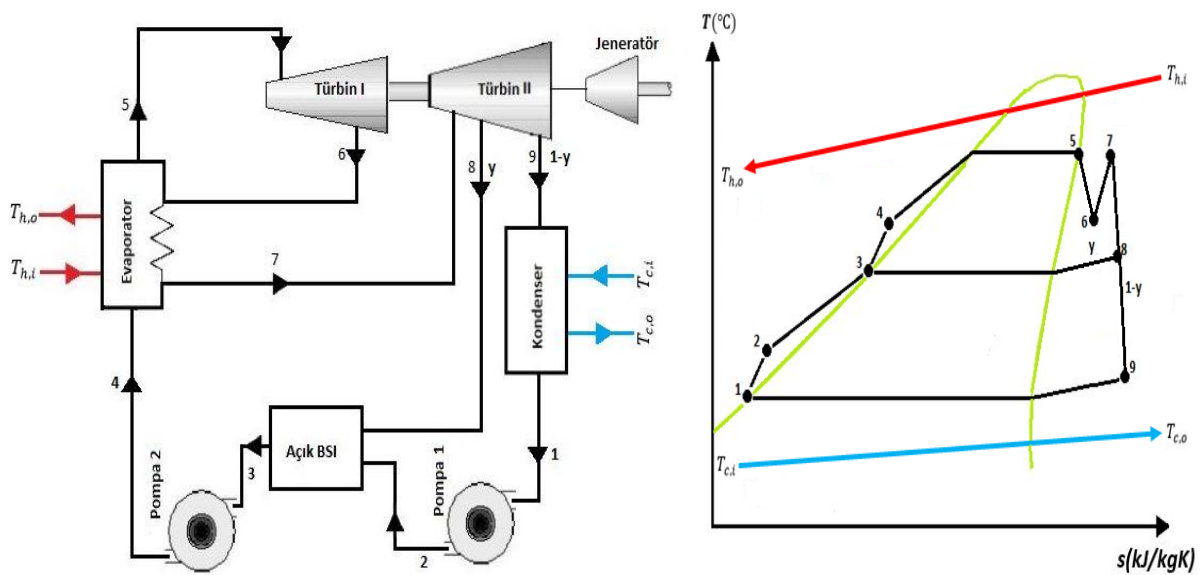


Şekil 6.3. A-ORÇ Çalışma prensibi ve T-s diyagramı

- **RA-ORÇ;**

RA-ORÇ; türbinde iki kademeli genişleme ve türbinden gelen bir kısım buharın tekrar ısıtılma işlemi ile B-ORÇ'den ayrılır. Besleme sıvı ısıtıcısı esas olarak, iki akışın doğrudan karışarak (açık besleme sıvı ısıtıcısı) veya birbirine karışmadan (kapalı besleme sıvı ısıtıcısı) ısı alışverişinde buldukları bir ısı değiştiricisidir.

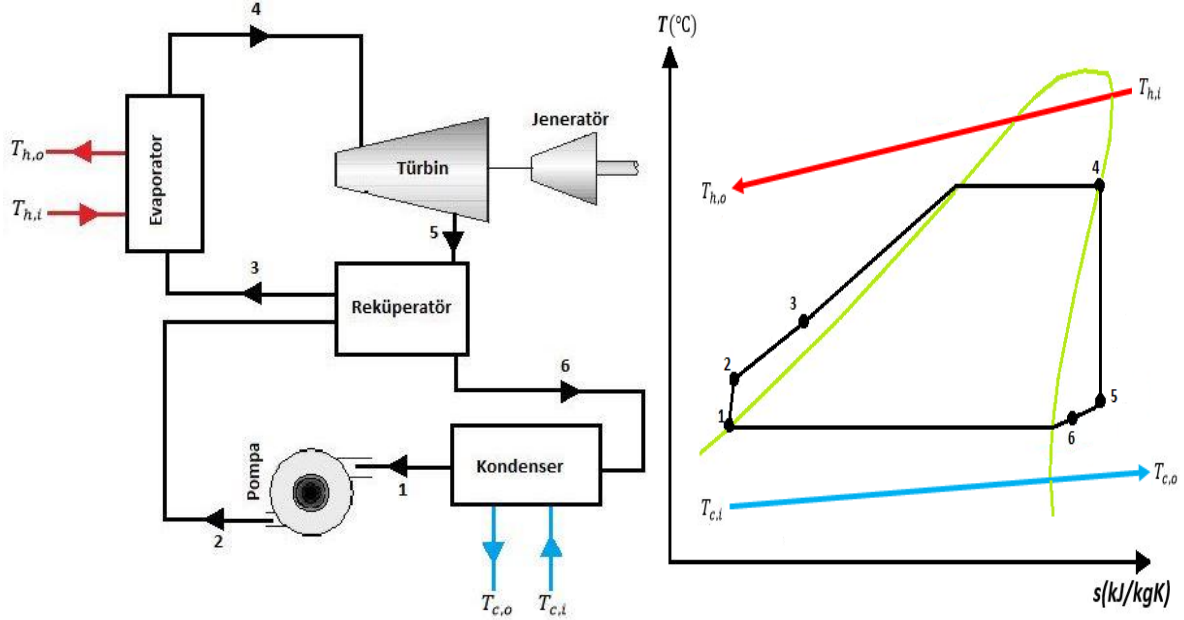
RA-ORÇ'de türbinden direk olarak açık besleme sıvısına gitmeden ilkönce ara ısıtma işlemi ile ikinci türbine daha sonra açık besleme sıvısına gönderilmesiyle ısıl verimin artırılması amaçlanmıştır.



Şekil 6.4. RA-ORÇ Çalışma prensibi ve T-s diyagramı

- **r-ORÇ;**

Bu sistemde amaç ORÇ’de reküperatör olarak isimlendirilen bir ısı eşanjörü ile ısı geri kazanımı yapmaktır. Reküperatör sistemdeki organik akışkanın kondensere girmeden önce ısısını atmasını aynı zamanda da evaporatöre girmeden ek bir ön ısıtma işlemine tabi tutulmasını sağlar ve sistem performansını artırır.



Şekil 6.5. r-ORÇ Çalışma prensibi ve T-s diyagramı

- **Rr-ORÇ;**

Rr-ORÇ’de hem açık besleme sıvısının hem de reküperatörün sistem üzerinde oluşturduğu avantajdan yararlanılmıştır. Rr-ORÇ’de türbin çıkışındaki ısı bir reküperatör yardımıyla kondenser çıkışındaki akışkanın ısıtılmasında kullanılmaktadır. Ayrıca sistemde bulunan açık besleme suyu sayesinde akışkanın evaporatör giriş sıcaklığı artırılmaktadır.

Çizelge 6.1. ORÇ konfigürasyonları için enerji ve ekserji denge bağıntıları

B-ORÇ		
Bileşenler	Enerji Dengesi	Ekserji Dengesi
Pompa	$W_p = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}(h_{2s} - h_1)/\eta_p$	$I_p = T_0 \dot{m}(s_2 - s_1)$
Evaporatör	$Q_e = \dot{m}(h_3 - h_2)$	$I_e = T_0 \dot{m}[(s_3 - s_2) - (h_3 - h_2)/T_h]$
Türbin	$W_t = \dot{m}(h_3 - h_4) = \dot{m}(h_3 - h_{4s})\eta_t$	$I_t = T_0 \dot{m}(s_4 - s_3)$
Kondenser	$Q_c = \dot{m}(h_4 - h_1)$	$I_c = T_0 \dot{m}[(s_1 - s_4) + (h_4 - h_1)/T_c]$
Sistem	$W_{net} = Q_e - Q_c$	$I_{Toptam} = I_p + I_e + I_t + I_c$
	$\eta_{Isıl} = W_{net}/Q_e$	$E_{harcanan} = [1 - T_0/T_H]Q_e + W_p$
		$\eta_{II} = 1 - I_{Toptam}/E_{harcanan}$
R-ORÇ		
Bileşenler	Enerji Dengesi	Ekserji Dengesi
Pompa 1	$W_{p1} = \dot{m}(1 - y)(h_2 - h_1) = (1 - y)(h_{2s} - h_1)/\eta_p$	$I_{p1} = T_0 \dot{m}(1 - y)(s_2 - s_1)$
A-BSI	$h_3 = yh_6 + (1 - y)h_2$	$I_{abs} = T_0 \dot{m}[y(s_3 - s_6) + (1 - y)(s_3 - s_2)]$
Pompa 2	$W_{p2} = \dot{m}(h_4 - h_3) = \dot{m}(h_{4s} - h_3)/\eta_p$	$I_{p2} = T_0 \dot{m}(s_4 - s_3)$
Evaporatör	$Q_e = \dot{m}(h_5 - h_4)$	$I_e = T_0 \dot{m}[(s_5 - s_4) - (h_5 - h_4)/T_h]$
Türbin	$W_t = \dot{m}y(h_5 - h_{6s})\eta_t + \dot{m}(1 - y)(h_5 - h_{7s})\eta_t$	$I_t = T_0 \dot{m}[y(s_6 - s_5) + (1 - y)(s_7 - s_5)]$
Kondenser	$Q_c = \dot{m}(1 - y)(h_7 - h_1)$	$I_c = T_0 \dot{m}(1 - y)[(s_1 - s_7) + (h_7 - h_1)/T_c]$
Sistem	$W_{net} = Q_e - Q_c$	$I_{Toptam} = I_{p1} + I_{abs} + I_{p2} + I_e + I_t + I_c$
	$\eta_{Isıl} = W_{net}/Q_e$	$E_{harcanan} = [1 - T_0/T_H]Q_e + W_{p1} + W_{p2}$
		$\eta_{II} = 1 - I_{Toptam}/E_{harcanan}$

Sınır Şartları	Optimum A-BSI basıncı için; $P_{6,\min} = 1,1 P_1$; $P_{6,\max} = \min (0,9P_{\max}, P_{\text{doy}}(T_{\text{kritik}}-10))$ $0,05 < y < 0,95$	
A-ORÇ		
Bileşenler	Enerji Dengesi	Ekserji Dengesi
Pompa	$W_p = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}(h_{2s} - h_1)/\eta_p$	$I_p = T_0 \dot{m}(s_2 - s_1)$
Evaporatör 1	$Q_{e1} = \dot{m}(h_3 - h_2)$	$I_{e1} = T_0 \dot{m}[(s_3 - s_2) - Q_{e1}/T_h]$
Evaporatör 2 (Ara Isıtma)	$Q_{e2} = \dot{m}(h_5 - h_4)$	$I_{e2} = T_0 \dot{m}[(s_5 - s_4) - Q_{e2}/T_h]$
Türbin 1	$W_{t1} = \dot{m}(h_3 - h_4) = \dot{m}(h_3 - h_{4s})\eta_t$	$I_{t1} = T_0 \dot{m}(s_4 - s_3)$
Türbin 2	$W_{t2} = \dot{m}(h_5 - h_6) = \dot{m}(h_5 - h_{6s})\eta_t$	$I_{t2} = T_0 \dot{m}(s_6 - s_5)$
Kondenser	$Q_c = \dot{m}(h_6 - h_1)$	$I_c = T_0 \dot{m}[(s_1 - s_6) + Q_c/T_c]$
Sistem	$W_{\text{net}} = Q_e - Q_c$	$I_{\text{Toptlam}} = I_p + I_{e1} + I_{e2} + I_{t1} + I_{t2} + I_c$
	$\eta_{\text{Isıl}} = W_{\text{net}}/Q_e$	$E_{\text{harcanan}} = [1 - T_0/T_H][Q_{e1} + Q_{e2}] + W_p$
		$\eta_{II} = 1 - I_{\text{Toptlam}}/E_{\text{harcanan}}$
Sınır Şartları	Optimum ara ısıtma basınç oranı (k) için; $P_4/P_3 = k$ $0,3 < k < 0,9$	

Çizelge 6.1. ORÇ konfigürasyonları için enerji ve ekserji denge bağıntıları (devam)

RA-ORÇ		
Bileşenler	Enerji Dengesi	Ekserji Dengesi
Pompa 1	$W_{p1} = \dot{m}(1 - y)(h_2 - h_1) = \dot{m}(h_{2s} - h_1)/\eta_p$	$I_{p1} = T_0 \dot{m}(1 - y)(s_2 - s_1)$
Pompa 2	$W_{p2} = \dot{m}(h_4 - h_3) = \dot{m}(h_{4s} - h_3)/\eta_p$	$I_{p2} = T_0 \dot{m}(s_4 - s_3)$
Evaporatör 1	$Q_{e1} = \dot{m}(h_5 - h_4)$	$I_{e1} = T_0 \dot{m}[(s_5 - s_4) - Q_{e1}/T_h]$
Evaporatör 2 (Ara Isıtma)	$Q_{e2} = \dot{m}(h_7 - h_6)$	$I_{e2} = T_0 \dot{m}[(s_7 - s_6) - Q_{e2}/T_h]$
Türbin 1	$W_{t1} = \dot{m}(h_5 - h_6) = \dot{m}(h_5 - h_{6s})\eta_t$	$I_{t1} = T_0 \dot{m}(s_6 - s_5)$
Türbin 2	$W_{t2} = \dot{m}y(h_7 - h_{8s})\eta_t + \dot{m}(1 - y)(h_7 - h_{9s})\eta_t$	$I_{t2} = T_0 \dot{m}[y(s_8 - s_7) + (1 - y)(s_9 - s_7)]$
Kondenser	$Q_c = \dot{m}(h_9 - h_1)$	$I_c = T_0 \dot{m}[(s_1 - s_9) + Q_c/T_c]$
A-BSI	$h_3 = yh_8 + (1 - y)h_2$	$I_{\text{abs}} = T_0 \dot{m}[y(s_3 - s_8) + (1 - y)(s_3 - s_2)]$
Sistem	$W_{\text{net}} = Q_e - Q_c$	$I_{\text{Toptlam}} = I_{p1} + I_{p2} + I_{e1} + I_{e2} + I_{t1} + I_{t2} + I_c + I_{\text{abs}}$
	$\eta_{\text{Isıl}} = W_{\text{net}}/Q_e$	$E_{\text{harcanan}} = [1 - T_0/T_H][Q_{e1} + Q_{e2}] + W_{p1} + W_{p2}$
		$\eta_{II} = 1 - I_{\text{Toptlam}}/E_{\text{harcanan}}$
Sınır Şartları	Optimum A-BSI basıncı için; $P_{8,\min} = 1,1 P_1$; $P_{8,\max} = \min (0,9P_{\max}, P_{\text{doy}}(T_{\text{kritik}}-10))$; $0,05 < y < 0,95$ Optimum ara ısıtma basınç oranı (k) için; $P_6/P_5 = k$; $0,3 < k < 0,9$	
r-ORÇ		
Bileşenler	Enerji Dengesi	Ekserji Dengesi
Pompa	$W_p = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}(h_{2s} - h_1)/\eta_p$	$I_p = T_0 \dot{m}(s_2 - s_1)$
Rekuperatör	$\varepsilon = (h_5 - h_6)/(h_5 - h_2)$	$I_{\text{IHE}} = T_0 \dot{m}(s_3 - s_2 + s_6 - s_5)$
Evaporatör	$Q_e = \dot{m}(h_4 - h_3)$	$I_e = T_0 \dot{m}[(s_4 - s_3) - (h_4 - h_3)/T_h]$

Türbin	$W_p = \dot{m}(h_4 - h_5) = \dot{m}(h_4 - h_{5s})\eta_t$	$I_t = T_0\dot{m}(s_5 - s_4)$
Kondenser	$Q_c = \dot{m}(h_6 - h_1)$	$I_c = T_0\dot{m}[(s_1 - s_6) + (h_6 - h_1)/T_c]$
Sistem	$W_{net} = Q_e - Q_c$	$I_{Toptlam} = I_p + I_{IHE} + I_e + I_t + I_c$
	$\eta_{Isil} = W_{net}/Q_e$	$E_{harcanan} = [1 - T_0/T_H]Q_e + W_p$
		$\eta_{II} = 1 - I_{Toptlam}/E_{harcanan}$
Rr-ORÇ		
Bileşenler	Enerji Dengesi	Ekserji Dengesi
Pompa 1	$W_{p1} = \dot{m}(1 - y)(h_2 - h_1) = \dot{m}(h_{2s} - h_1)/\eta_p$	$I_{p1} = T_0\dot{m}(1 - y)(s_2 - s_1)$
A-BSI	$h_4 = yh_7 + (1 - y)h_3$	$I_{abs} = T_0\dot{m}[y(s_4 - s_7) + (1 - y)(s_4 - s_3)]$
Pompa 2	$W_{p2} = \dot{m}(h_5 - h_4) = \dot{m}(h_{5s} - h_4)/\eta_p$	$I_{p2} = T_0\dot{m}(s_5 - s_4)$
Türbin	$W_t = \dot{m}y(h_6 - h_{7s})\eta_t + \dot{m}(1 - y)(h_6 - h_{8s})\eta_t$	$I_t = T_0\dot{m}[y(s_7 - s_6) + (1 - y)(s_8 - s_6)]$
Evaporatör	$Q_e = \dot{m}(h_6 - h_5)$	$I_e = T_0\dot{m}[(s_6 - s_5) - (h_6 - h_5)/T_h]$
Kondenser	$Q_c = \dot{m}(1 - y)(h_9 - h_1)$	$I_c = T_0\dot{m}(1 - y)[(s_1 - s_9) + (h_9 - h_1)/T_c]$
Rekuperatör	$\varepsilon = (h_8 - h_9)/(h_8 - h_2)$	$I_{IHE} = T_0\dot{m}(1 - y)[(s_9 - s_8) + (s_3 - s_2)]$
Sistem	$W_{net} = Q_e - Q_c$	$I_{Toptlam} = I_{p1} + I_{p2} + I_t + I_e + I_c + I_{IHE}$
	$\eta_{Isil} = W_{net}/Q_e$	$E_{harcanan} = [1 - T_0/T_H]Q_e + W_{p1} + W_{p2}$
		$\eta_{II} = 1 - I_{Toptlam}/E_{harcanan}$
Sınır Şartları	Optimum A-BSI basıncı için; $P_{7,min} = 1,1 P_1$; $P_{7,max} = \min(0,9P_{max}, P_{doy}(T_{kritik}-10))$; $0,05 < y < 0,95$ Maksimum ε değerinin belirlenmesi: $0,01 < \varepsilon < 1$	

6.3. Model Doğrulanması

Farklı konfigürasyonlu ORÇ sistemlerinin doğruluğunu belirlemek için kaynak araştırması kapsamında belirlenen bir çalışmadan yararlanılmıştır. Çizelge 6.2’de aynı tasarım parametreleri altında üç farklı organik akışkan kullanılarak belirlenen ısı verim ve ekserji verim değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.2 incelendiğinde farklı konfigürasyonlar için hazırlanan termodinamik modelin başarılı bir şekilde kullanılabilceği görülmektedir.

Çizelge 6.2. ORÇ’nin farklı konfigürasyonları için hazırlanan termodinamik modelin aynı tasarım parametreleri kullanılarak başka bir çalışma ile karşılaştırılması

Tasarım Parametreleri	Net Güç: 30 kW; Rekuperatör etkenliği: 0,9; Buharlaşma basıncı: 1000 kPa; Yoğuşma Sıcaklığı: 20 °C; Türbin ve pompa izantropik verimi: %80					
Organik Akışkanlar	RC318		R227ea		R245fa	
Performans Parametreleri	Mevcut Çalışma	Li (2016)	Mevcut Çalışma	Li (2016)	Mevcut Çalışma	Li (2016)
R-ORÇ Isıl Verim (%)	9,48	9,5	7,31	7,35	13,4	13,7
A-ORÇ Isıl Verim (%)	8,32	8,38	6,76	6,68	12,4	12,3

r-ORÇ Isıl Verim (%)	9,81	9,76	7,41	7,38	13,6	13,3
-----------------------------	------	------	------	------	------	------

6.4. Araştırma Bulguları ve Tartışma

- **Rejeneratif ORÇ (R-ORÇ)**

R-ORÇ için türbinden ayrılarak besleme sıvı ısıtıcısına giren akışkan basıncının optimum olduğu nokta belirlenmiştir ($P_{6,opt}$). Bu basıncın belirlenmesine yönelik yapılan literatür araştırmasında iki farklı bağıntının kullanıldığı görülmüştür. Li (2016) ve Tchanche (2010), R-ORÇ çalışmasında $P_{6,opt}$ basıncının sırasıyla denklem 6.1 ve denklem 6.2’de verilen bağıntı ile bulunmasını belirtmişlerdir.

$$P_{6,opt} = \left(\frac{P_5 - P_7}{3} \right) + P_7$$

(6.1)

$$P_{6,opt} = P_5 - (0,5(P_5 - P_7))$$

(6.2)

Bu çalışmada ise, 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için dördüncü bölümde belirlenen akışkanların kullanılmasıyla tasarlanan R-ORÇ için $P_{6,opt}$ basınç değerleri çok amaçlı GA optimizasyon tekniği ile tespit edilmiştir. $P_{6,opt}$ basıncı ile ilgili sınır şartlar Çizelge 6.3’de tanıtılmıştır. $P_{6,opt}$ basıncının buharlaşma ve yoğuşma basıncına bağlı olarak belirlenmesi için ampirik denklemler türetilmiştir. Her bir ısı kaynağı sıcaklığı için türetilen denklemler Çizelge 6.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 6.3. R-ORÇ’de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında $P_{6,opt}$ basıncı için türetilen denklemler

T_{hi}	Optimum A-BSI (P_6) basıncı	T_{hi}	Optimum A-BSI (P_6) basıncı
90 °C	$P_{6,opt} = \left(\frac{P_5 - P_7}{1,186} \right) + P_7$	250 °C	$P_{6,opt} = \left(\frac{P_5 - P_7}{1,783} \right) + P_7$
100 °C	$P_{6,opt} = \left(\frac{P_5 - P_7}{1,251} \right) + P_7$	260 °C	$P_{6,opt} = \left(\frac{P_5 - P_7}{2,055} \right) + P_7$
110 °C	$P_{6,opt} = \left(\frac{P_5 - P_7}{1,398} \right) + P_7$	270 °C	$P_{6,opt} = \left(\frac{P_5 - P_7}{2,053} \right) + P_7$
120 °C	$P_{6,opt} = \left(\frac{P_5 - P_7}{1,596} \right) + P_7$	280 °C	$P_{6,opt} = \left(\frac{P_5 - P_7}{2,961} \right) + P_7$
130 °C	$P_{6,opt} = \left(\frac{P_5 - P_7}{1,638} \right) + P_7$	290 °C	$P_{6,opt} = \left(\frac{P_5 - P_7}{2,96} \right) + P_7$

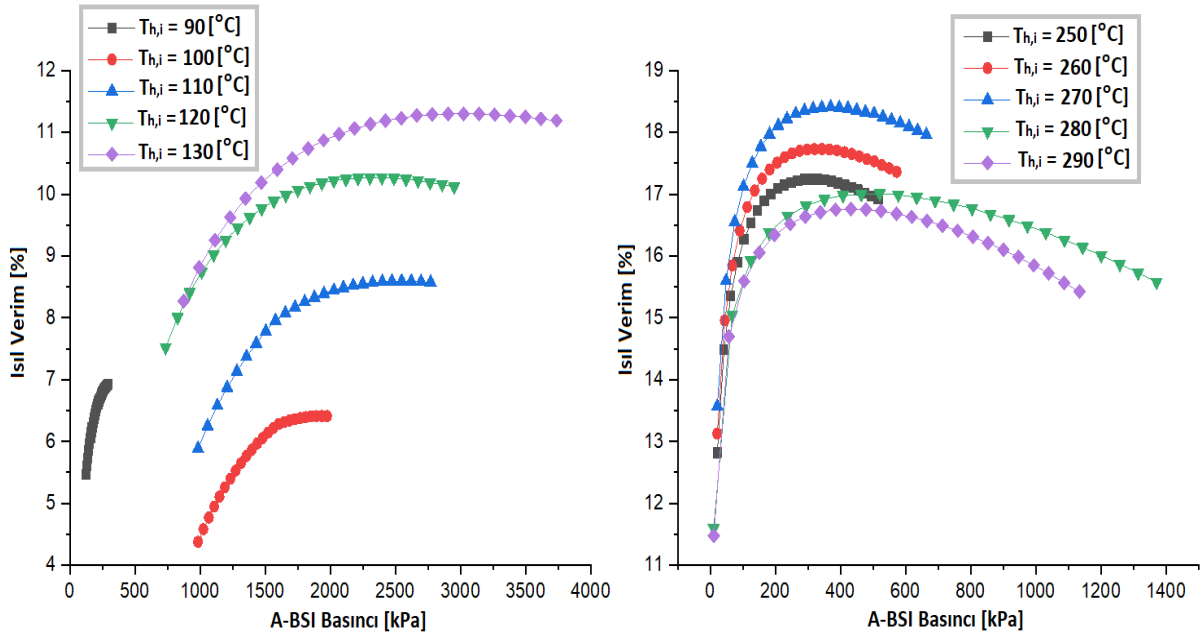
Şekil 6.7’de R-ORÇ’de düşük ve yüksek sıcaklıklı ısı kaynağına sahip sistemler için P_6 değerinin minimum ve maksimum olması gereken değerler arasındaki değişiminin ısı verime etkisi görülmektedir. Şekil 6.7 incelendiğinde;

- Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

90 °C ısı kaynağı sıcaklığı için optimum P_6 basıncının maksimum P_6 basıncına eşit olduğu görülmektedir. Isı kaynağı sıcaklığı arttıkça optimum P_6 basıncının maksimum P_6 basıncından uzaklaştığı tespit edilmiştir. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığı için maksimum P_6 basıncı 3738 kPa iken optimum P_6 basıncı 2903 kPa olarak belirlenmiştir.

- Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

Yüksek sıcaklıklı ORÇ için minimum P_6 basıncının çok düşük değerlerde olduğu görülmektedir. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığı için 22 kPa ile 516 kPa arasında optimum nokta aranmıştır. Özellikle 180 kPa basınca kadar ısı veriminin hızlı bir şekilde yükseldiği, daha sonra bu artışın yavaşladığı ve 330 kPa değerinde ise optimum P_6 basıncına ulaşıldığı tespit edilmiştir. 280 ve 290 °C’li MM akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ için ise optimum P_6 basıncının maksimum P_6 basıncından daha uzakta olduğu görülmektedir.



Şekil 6.7. R-ORÇ’de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında A-BSI basınç değişiminin ısı verime etkisi

- **Ara Isıtımlı ORÇ (A-ORÇ)**

Ara ısıtım ORÇ için ara ısıtma basıncının (P_4) dolayısı ile ara ısıtma basınç oranının (k) optimum olduğu nokta belirlenmiştir. k değeri ara ısıtma basıncının yüksek basınç

türbinindeki basınca oranı (P_4/P_3) olarak tanımlanmaktadır. Li (2016) ara ısıtmalı ORÇ çalışmasında ara ısıtma basıncının denklem 6.3'te verilen bağıntı ile bulunmasını belirtmişlerdir.

$$P_{4,opt} = \left(\frac{P_6 + P_3}{2} \right) \quad (6.3)$$

Bu çalışmada, 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için belirlenen akışkanların kullanılmasıyla tasarlanan A-ORÇ için optimum P_4 basınç değerleri genetik algoritma optimizasyon tekniği ile tespit edilmiştir. P_4 basıncı ile ilgili sınır şartlar Çizelge 6.4'de tanıtılmıştır. $P_{4,opt}$ basıncının buharlaşma ve yoğuşma basıncına bağlı olarak belirlenmesi için ampirik denklemler türetilmiştir. Her bir ısı kaynağı sıcaklığı için türetilen denklemler Çizelge 6.4'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.4. A-ORÇ'de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında $P_{4,opt}$ için türetilen denklemler

T_{hi}	Optimum ara ısıtma (P_4) basıncı	T_{hi}	Optimum ara ısıtma (P_4) basıncı
90 °C	$P_{4,opt} = \left(\frac{P_6 + P_3}{1,537} \right)$	250 °C	$P_{4,opt} = \left(\frac{P_6 + P_3}{1,478} \right)$
100 °C	$P_{4,opt} = \left(\frac{P_6 + P_3}{1,564} \right)$	260 °C	$P_{4,opt} = \left(\frac{P_6 + P_3}{1,527} \right)$
110 °C	$P_{4,opt} = \left(\frac{P_6 + P_3}{1,421} \right)$	270 °C	$P_{4,opt} = \left(\frac{P_6 + P_3}{1,58} \right)$
120 °C	$P_{4,opt} = \left(\frac{P_6 + P_3}{1,338} \right)$	280 °C	$P_{4,opt} = \left(\frac{P_6 + P_3}{1,118} \right)$
130 °C	$P_{4,opt} = \left(\frac{P_6 + P_3}{1,484} \right)$	290 °C	$P_{4,opt} = \left(\frac{P_6 + P_3}{1,119} \right)$

Şekil 6.8'de A-ORÇ'de düşük ve yüksek sıcaklıklı ısı kaynağına sahip sistemler için k değişiminin ısı verime etkisi görülmektedir. Şekil 6.8 incelendiğinde;

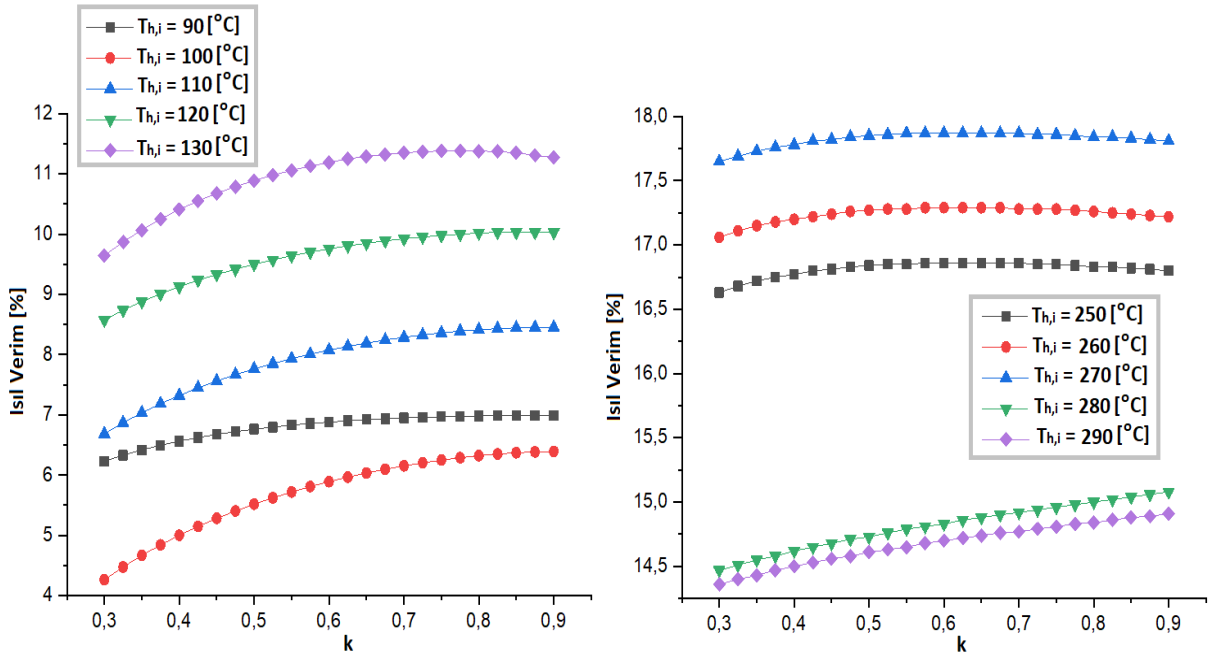
- Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

Genel olarak ara ısıtma basınç oranı arttıkça ısı verimin arttığı görülmektedir. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında maksimum ısı verim $k=0,875$ olan noktada ($P_4=284,7$ kPa); 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında ise $k=0,8$ olan noktada ($P_4=3399$ kPa) tespit edilmiştir. Bu

değerlerden sonra ısıl verimde azalma meydana gelmiştir. Diğer ısı kaynağı sıcaklıklarında ise k 'nın 0,9 olduğu noktada maksimum ısıl verim elde edilmiştir. Ayrıca şekilden ara ısıtma basınç oranının en fazla 100 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında çalışan R1234yf'yi etkilediği görülmektedir.

- Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında kullanılan benzen akışkanı için k değerinin ısıl verimi fazla etkilemediği görülmektedir. 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıkları için maksimum ısıl verim sırasıyla k 'nın 0,7, 0,675 ve 0,65 olduğu noktalarda tespit edilmiştir. Bu değerlerden sonra az da olsa ısıl verimde bir azalma meydana gelmiştir. 280 °C ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında kullanılan MM akışkanının k 'dan daha fazla etkilendiği görülmektedir. Her ikisi için de maksimum ısıl verim k 'nın 0,9 olduğu noktada tespit edilmiştir.



Şekil 6.8. A-ORÇ'de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında ara ısıtma basınç oranının (k) ısıl verime etkisi

- **Rejeneratif Ara Isıtmalı ORÇ (RA-ORÇ)**

RA-ORÇ için hem besleme suyu ısıtıcısına giren akışkan basıncının (P_8) hem de ara ısıtma basınç oranının (k) optimum olduğu nokta belirlenmiştir. Kaynak araştırmasında RA-ORÇ için iki farklı parametrenin optimum değerlerini içeren bir bağıntıya rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada, 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için belirlenen akışkanların kullanılmasıyla tasarlanan RA-ORÇ için $P_{8,opt}$ basıncı ve k değeri çok amaçlı GA

optimizasyon tekniği ile tespit edilmiştir. İki farklı parametrenin birlikte değişimi sonucunda maksimum ısıl verimin elde edildiği nokta belirlenmiştir. Tüm ısıl kaynağı sıcaklıklarında RA-ORÇ için $P_{8,opt}$ değerinin k değerini, buharlaşma ve yoğuşma basıncına bağlı elde edildiği ampirik denklemler türetilmiştir. Bu türetilen denklemler Çizelge 6.5’de özetlenmiştir.

Çizelge 6.5. RA-ORÇ’de değişik ısıl kaynağı sıcaklıklarında $P_{8,opt}$ basıncı için türetilen denklemler

T_{hi}	Optimum A-BSI (P_8) basıncı	T_{hi}	Optimum A-BSI (P_8) basıncı
90 °C	$P_{8,opt} = \left(\frac{0,9 * P_5 - P_9}{2,092} \right) + P_9$	250 °C	$P_{8,opt} = \left(\frac{0,7415 * P_5 - P_9}{3,171} \right) + P_9$
100 °C	$P_{8,opt} = \left(\frac{0,9 * P_5 - P_9}{1,536} \right) + P_9$	260 °C	$P_{8,opt} = \left(\frac{0,7475 * P_5 - P_9}{3,279} \right) + P_9$
110 °C	$P_{8,opt} = \left(\frac{0,9 * P_5 - P_9}{2,309} \right) + P_9$	270 °C	$P_{8,opt} = \left(\frac{0,7629 * P_5 - P_9}{3,45} \right) + P_9$
120 °C	$P_{8,opt} = \left(\frac{0,9 * P_5 - P_9}{2,45} \right) + P_9$	280 °C	$P_{8,opt} = \left(\frac{0,9 * P_5 - P_9}{5,096} \right) + P_9$
130 °C	$P_{8,opt} = \left(\frac{0,822 * P_5 - P_9}{2,331} \right) + P_9$	290 °C	$P_{8,opt} = \left(\frac{0,9 * P_5 - P_9}{4,845} \right) + P_9$

şekil 6.9’da RA-ORÇ’de düşük ve yüksek sıcaklıklı ısıl kaynağına sahip sistemler için $P_{8,opt}$ ve k değerleri ele alınarak ulaşılan ısıl verim değerleri görülmektedir. şekil 6.9 incelendiğinde;

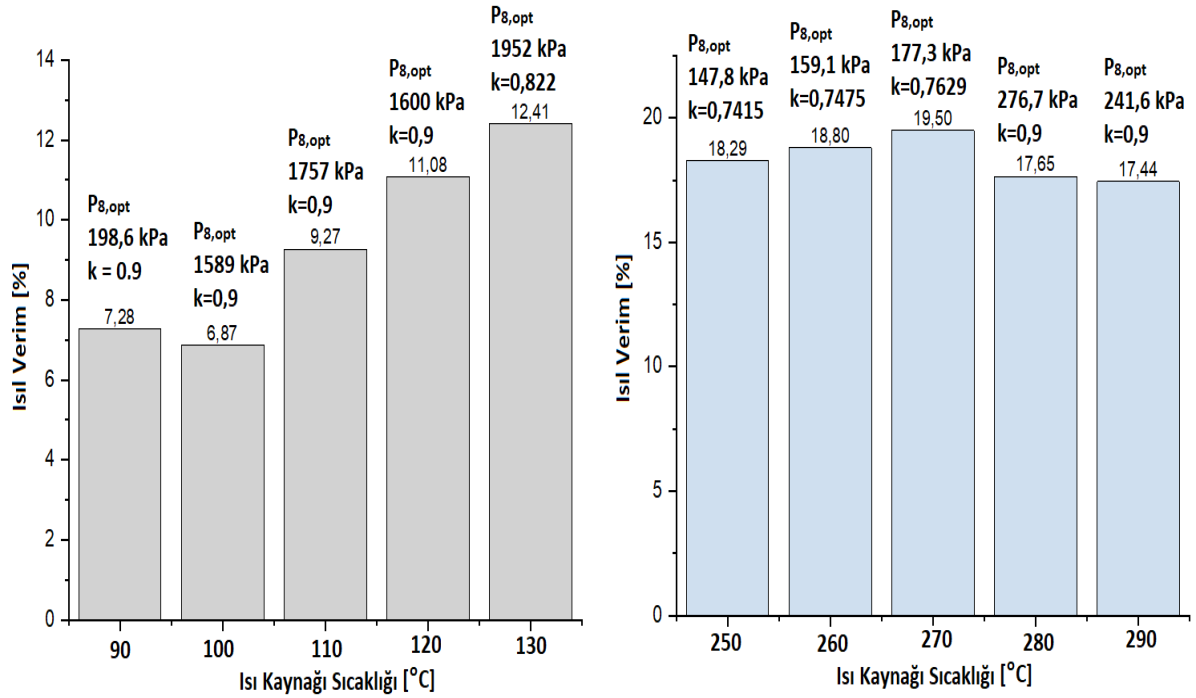
- Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

En yüksek ısıl verimin %12,41 ile 130 °C ısıl kaynağı sıcaklığı için R152a’da olduğu görülmektedir. k değerleri incelendiğinde sadece R152a’nın 0,9’dan daha düşük bir değerde maksimum ısıl verim değerine ulaştığı görülmektedir.

- Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

En yüksek ısıl verimin %19,50 ile 270 °C ısıl kaynağı sıcaklığı için benzen’de olduğu görülmektedir. Benzen kullanılarak tasarlanan ORÇ’nin üç farklı ısıl kaynağı sıcaklığında da k’nın yaklaşık 0,75 olduğu noktada maksimum performansa ulaşmıştır.

RA-ORÇ ve R-ORÇ için belirlenen A-BSI basıncıları incelendiğinde RA-ORÇ sisteminde daha düşük basınç değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Örneğin, R-ORÇ’de 90 °C ısıl kaynağı sıcaklığı için $P_{6,opt}$ 292 kPa olarak belirlenmesine rağmen RA-ORÇ’de ise $P_{8,opt}$ 198 kPa olarak belirlenmiştir. RA-ORÇ’de tüm ısıl kaynağı sıcaklıklarında sisteme ara ısıtma eklenmesi sonucunda A-BSI basıncının azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.9. RA-ORÇ’de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında optimum A-BSI basıncı ve k değerinin belirlenmesiyle elde edilen ısı verim değerleri

- **Rekuperatörlü ORÇ (r-ORÇ)**

r-ORÇ için kullanılan ısı değiştiricisinin etkenlik değerinin (ϵ) ısı verime etkisi belirlenmiştir. 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için belirlenen akışkanların kullanılmasıyla tasarlanan r-ORÇ’nin ϵ değerinin 0,5 ile 0,85 arasında değişmesinin ısı verime etkisi tespit edilmiştir. Şekil 6.10’da düşük ve yüksek sıcaklıklı ORÇ sistemlerinde ϵ değişim etkisi görülmektedir. Şekil 6.10 incelendiğinde;

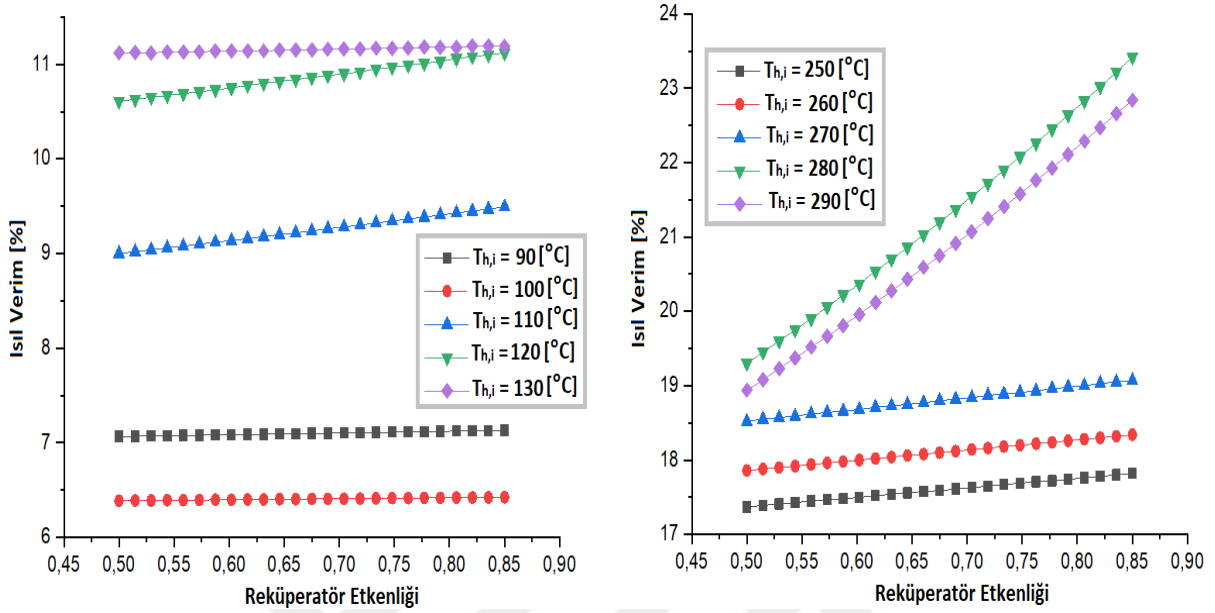
- Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

90, 100 ve 130 °C ısı kaynağına sahip sistemlerde ϵ_r ’nin ısı verim üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Fakat 110 °C ve 120 °C ısı kaynağına sahip sistemlerde ϵ değerinin etkisinin daha fazla olduğu gözükmemektedir. 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında kullanılan R1234yf akışkanı için ϵ değerinin 0,5’ten 0,85’e yükselmesi ile ısı verim %0,5 artmasına rağmen, aynı organik akışkanın 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında kullanılması ile ısı verim %5,4 artmıştır.

- Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında benzene akışkanı kullanılarak tasarlanan r-ORÇ’nin ϵ değişiminden çok etkilenmediği görülmektedir. Fakat 280 ve 290 °C

ısı kaynağı sıcaklıklarında ϵ 'deki artışın ısı verimi önemli bir oranda arttırdığı belirtilmiştir. 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında kullanılan MM akışkanı için ϵ 'nin 0,5'ten 0,85'e yükselmesi ile ısı verimin sırasıyla %21,3 ve %20,5 arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.10. r-ORÇ'de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında rekuperatör etkenliğinin (ϵ) ısı verime etkisi

Tüm ısı kaynağı sıcaklıkları için ısı verimde meydana gelen artış yüzdeleri baz alındığında r-ORÇ konfigürasyonunun 280 °C ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

Rejeneratif Rekuperatörlü ORÇ (Rr-ORÇ)

Rr-ORÇ için hem besleme suyu ısıtıcısına giren akışkan basıncının (P_7) optimum olduğu hem de rekuperatör etkenlik değerinin (ϵ) ulaşabileceği maksimum nokta belirlenmiştir. Kaynak araştırmasında Rr-ORÇ için iki farklı parametrenin optimum değerlerini içeren bir bağıntıya rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada, 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için belirlenen akışkanların kullanılmasıyla tasarlanan Rr-ORÇ için $P_{7,opt}$ basıncı ve ϵ değeri çok amaçlı GA optimizasyon tekniği ile tespit edilmiştir. İki farklı parametrenin birlikte değişimi sonucunda maksimum ısı verimin elde edildiği nokta belirlenmiştir. $P_{7,opt}$ basıncının sistemin ulaşabildiği maksimum ϵ değeri altında buharlaşma ve yoğuşma basıncına bağlı olarak belirlenmesi için ampirik denklemler türetilmiştir. Bu türetilen bağıntılar Çizelge 6.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 6.6. Rr-ORÇ'de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında $P_{7,opt}$ basıncı ve ϵ_{max} belirlenmesi için türetilen denklemler

$T_{h,i}$	Optimum A-BSI (P_7) basıncı ve maksimum ϵ	$T_{h,i}$	Optimum A-BSI (P_7) basıncı ve maksimum ϵ
90 °C	$P_{7,opt} = \left(\frac{P_6 - P_9}{2,225}\right) + P_9$ $\epsilon_{max} = 0,02$	250 °C	$P_{7,opt} = \left(\frac{P_6 - P_9}{3,322}\right) + P_9$ $\epsilon_{max} = 0,08$
100 °C	$P_{7,opt} = \left(\frac{P_6 - P_9}{2,587}\right) + P_9$ $\epsilon_{max} = 0,1$	260 °C	$P_{7,opt} = \left(\frac{P_6 - P_9}{3,324}\right) + P_9$ $\epsilon_{max} = 0,09$
110 °C	$P_{7,opt} = \left(\frac{P_6 - P_9}{1,915}\right) + P_9$ $\epsilon_{max} = 0,15$	270 °C	$P_{7,opt} = \left(\frac{P_6 - P_9}{3,323}\right) + P_9$ $\epsilon_{max} = 0,1$
120 °C	$P_{7,opt} = \left(\frac{P_6 - P_9}{2,06}\right) + P_9$ $\epsilon_{max} = 0,14$	280 °C	$P_{7,opt} = \left(\frac{P_6 - P_9}{2,052}\right) + P_9$ $\epsilon_{max} = 0,5$
130 °C	$P_{7,opt} = \left(\frac{P_6 - P_9}{2,713}\right) + P_9$ $\epsilon_{max} = 0,03$	290 °C	$P_{7,opt} = \left(\frac{P_6 - P_9}{1,905}\right) + P_9$ $\epsilon_{max} = 0,5$

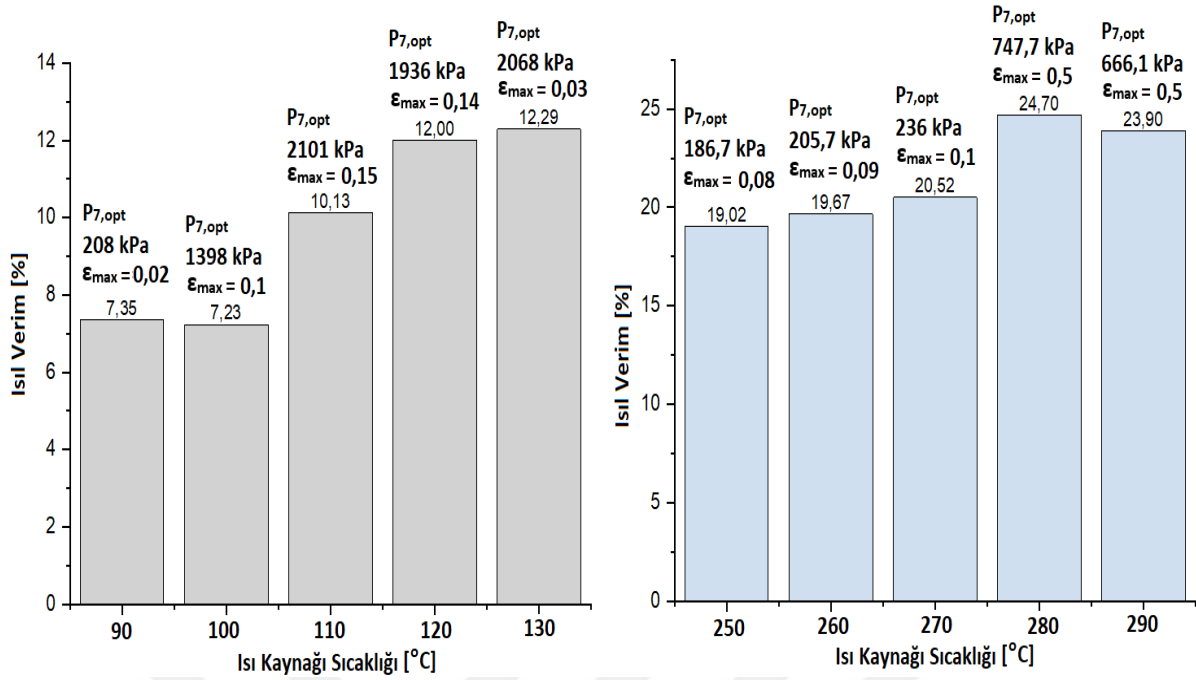
Şekil 6.11’de Rr-ORÇ’de düşük ve yüksek sıcaklıklı ısı kaynağına sahip sistemler için $P_{7,opt}$ ve ϵ_{max} değerleri ele alınarak ulaşılan ısı verim değerleri görülmektedir. Şekil 6.11 incelendiğinde;

- Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

En yüksek ısı veriminin %12,29 ile 130 °C ısı kaynağı sıcaklığı için R152a’da olduğu görülmektedir. 90 °C ve 130 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında ϵ değerlerinin çok düşük bir değerde olduğu görülmektedir. ORÇ sisteminde ϵ değeri arttıkça ısı değiştiricisinde ve/veya açık besleme sıvısındaki tersinmezliklerde (-) değeri görülmeye başlanmıştır. Termodinamik optimizasyon ile tersinmezliklerde (-) değerinin başladığı ilk nokta itibarıyla ϵ değerleri belirlenmiştir. Özellikle 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında tersinmezlik değerlerinin pozitif olma koşulundan dolayı ϵ değeri maksimum %2 olarak tespit edilmiştir.

- Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için;

En yüksek ısı veriminin %24,7 ile 280 °C ısı kaynağı sıcaklığı için MM’de olduğu görülmektedir. 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında ϵ değerinin %50 değerine kadar çıkabildiği görülmektedir. Benzen’li ORÇ sistemlerinde %10’un üzerindeki ϵ değerlerinde besleme sıvısı ısıtıcısının ve/veya ısı değiştiricisinin tersinmezlik değerlerinin negatif olduğu görülmektedir. Bundan dolayı Rr-ORÇ tasarımının 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarındaki MM akışkanına daha uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 6.11. Rr-ORÇ'de değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında $P_{7,opt}$ ve ϵ_{max} değerlerinin belirlenmesiyle elde edilen ısı verim değerleri

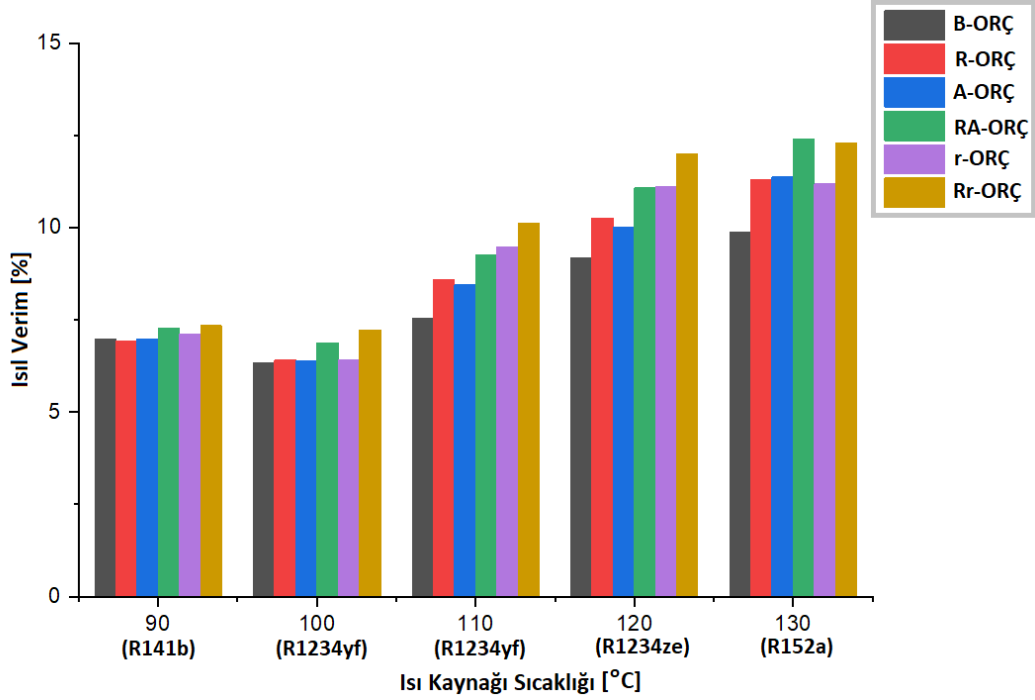
Farklı Konfigürasyondaki ORÇ'lerin Performanslarının Karşılaştırılması

Bir önceki bölümde tüm ORÇ konfigürasyonları ayrı ayrı incelenmiş ve her bir konfigürasyonda sisteme eklenen spesifik parametrelerin optimum değerleri belirlenmişti. Bu bölümde ise her bir ORÇ konfigürasyonu için elde edilen optimum değerlerin kullanılmasıyla performans karşılaştırılması yapılacaktır. B-ORÇ sistemi ile birlikte 6 farklı ORÇ konfigürasyonu 6 farklı amaç fonksiyonu bakımından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için ayrı ayrı yapılmıştır. ORÇ'nin düşük ve yüksek sıcaklık uygulamaları kapsamında toplam 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için optimum konfigürasyon modeli farklı amaç fonksiyonları altında tespit edilmiştir. B-ORÇ'de tespit edilen optimum akışkanlar kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.

Şekil 6.12-6.17'de farklı konfigürasyonlardaki ORÇ'lerin farklı amaç fonksiyonları altında ulaştıkları değerler düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında 5 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için karşılaştırılmıştır.

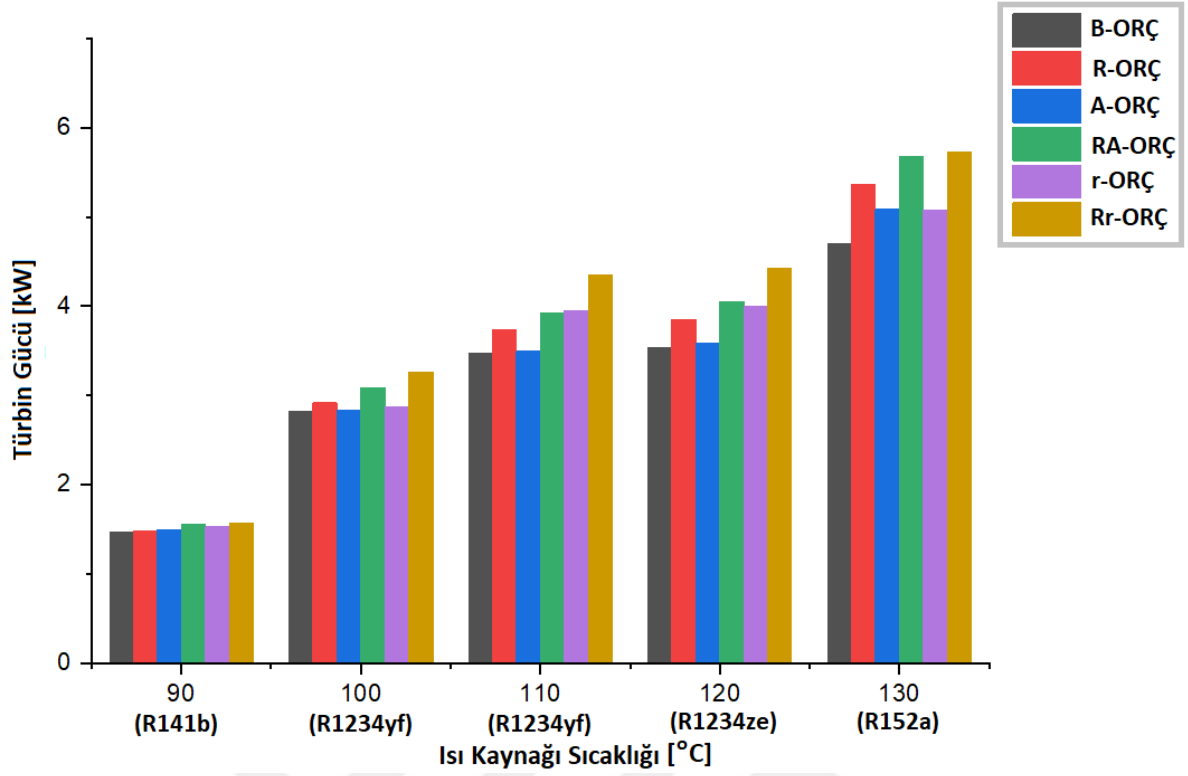
Şekil 6.12'de ORÇ konfigürasyonlarının ısı verim üzerindeki etkisi incelenmiştir. ORÇ konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdeleri değerlendirildiğinde en yüksek ısı verim artışının 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında R1234yf'nin kullanılmasıyla

tasarlanan Rr-ORÇ'li sistemde elde edildiği görülmektedir. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığı için B-ORÇ'de elde edilen ısı verim değeri %7,53 iken Rr-ORÇ kullanılmasıyla %34 oranında artarak %10,13 değerine yükselmiştir.



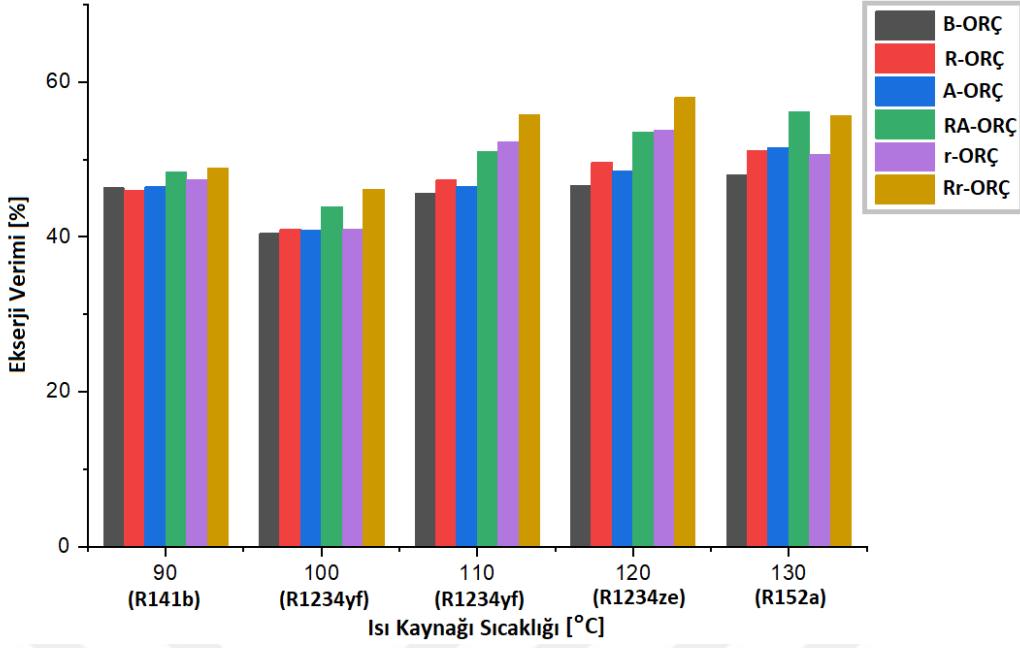
Şekil 6.12. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında ısı verimlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.13'de ORÇ konfigürasyonlarının türbin gücü üzerindeki etkisi incelenmiştir. ORÇ konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdeleri değerlendirildiğinde en yüksek türbin gücü artışının 110 °C ısı kaynağı sıcaklığında R1234yf'nin kullanılmasıyla tasarlanan Rr-ORÇ'li sistemde elde edildiği görülmektedir. 110 °C ısı kaynağı sıcaklığı için B-ORÇ'de elde edilen türbin gücü 3,47 kW iken Rr-ORÇ kullanılmasıyla %25 oranında artarak 4,34 kW değerine yükselmiştir.



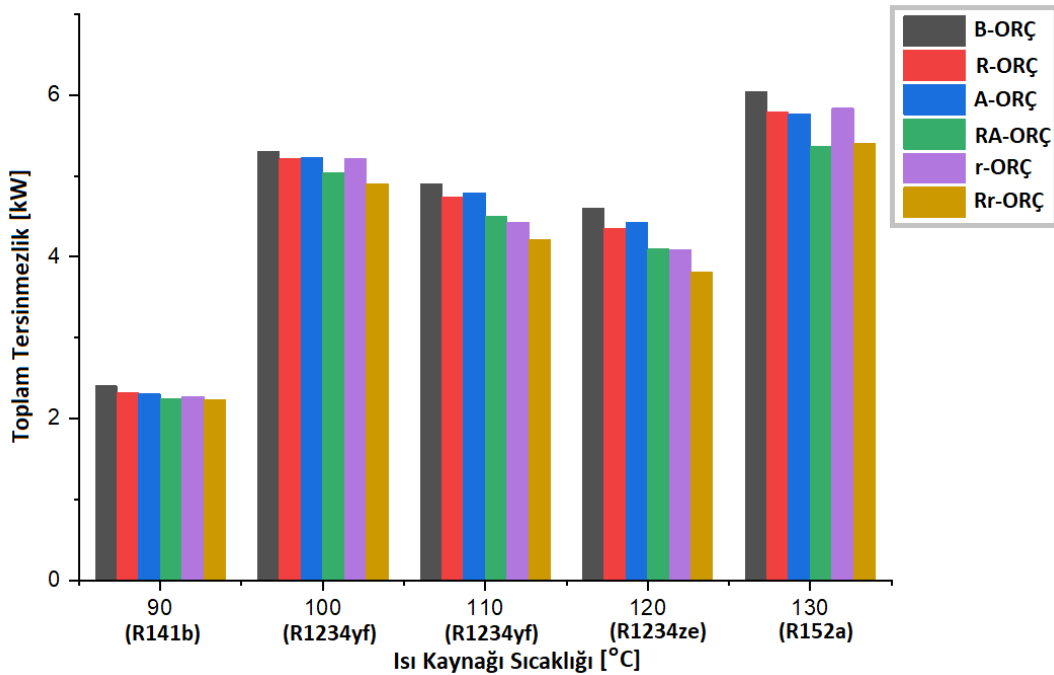
Şekil 6.13. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında türbin güçlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.14'de ORÇ konfigürasyonlarının ekserji verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. ORÇ konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdeleri değerlendirildiğinde en yüksek ekserji verim artışının 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında R1234ze'nin kullanılmasıyla tasarlanan Rr-ORÇ'li sistemde elde edildiği görülmektedir. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığı için B-ORÇ'de elde edilen ekserji verimi %46,65 iken Rr-ORÇ kullanılmasıyla %24 oranında artarak %58 değerine yükselmiştir.



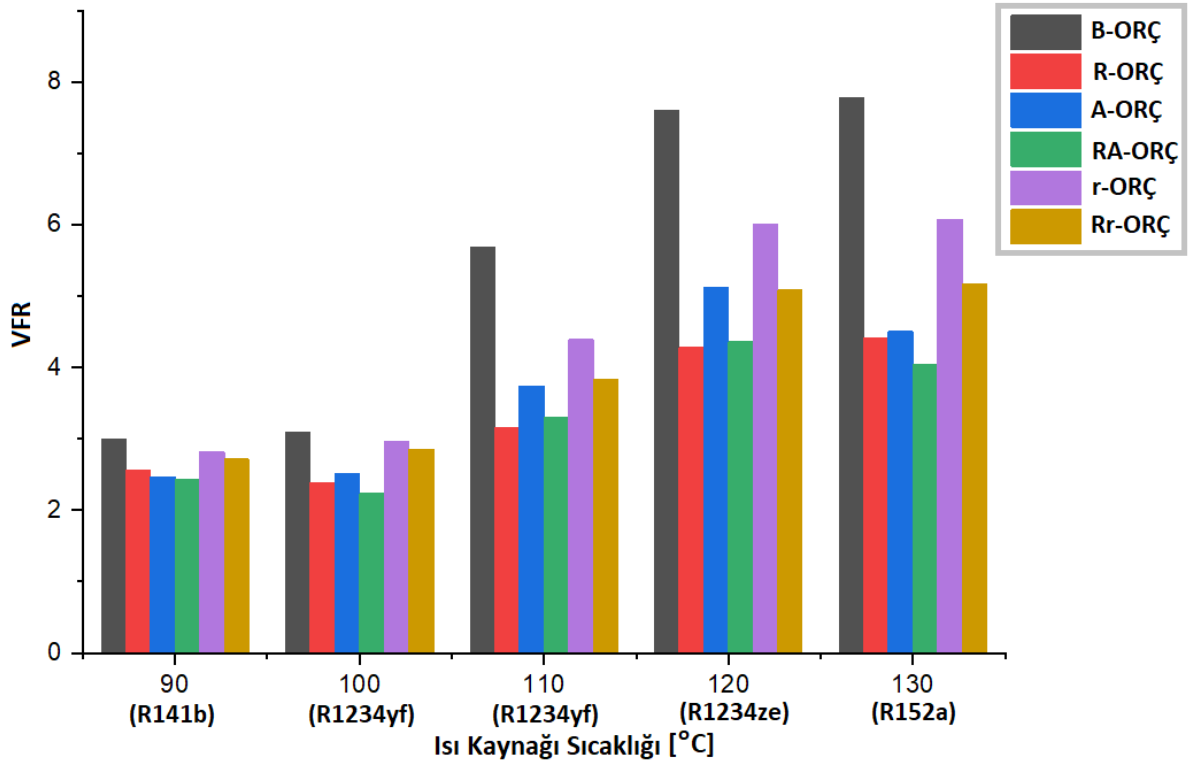
Şekil 6.14. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında ekserji verimlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.15'de ORÇ konfigürasyonlarının toplam tersinmezlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. ORÇ konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdeleri değerlendirildiğinde en yüksek toplam tersinmezlik değeri azalışının 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında R1234ze'nin kullanılmasıyla tasarlanan Rr-ORÇ'li sistemde elde edildiği görülmektedir. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığı için B-ORÇ'de elde edilen toplam tersinmezlik değeri 4,6 kW iken Rr-ORÇ kullanılmasıyla %17 oranında azalarak 3,8 kW değerine azalmıştır.



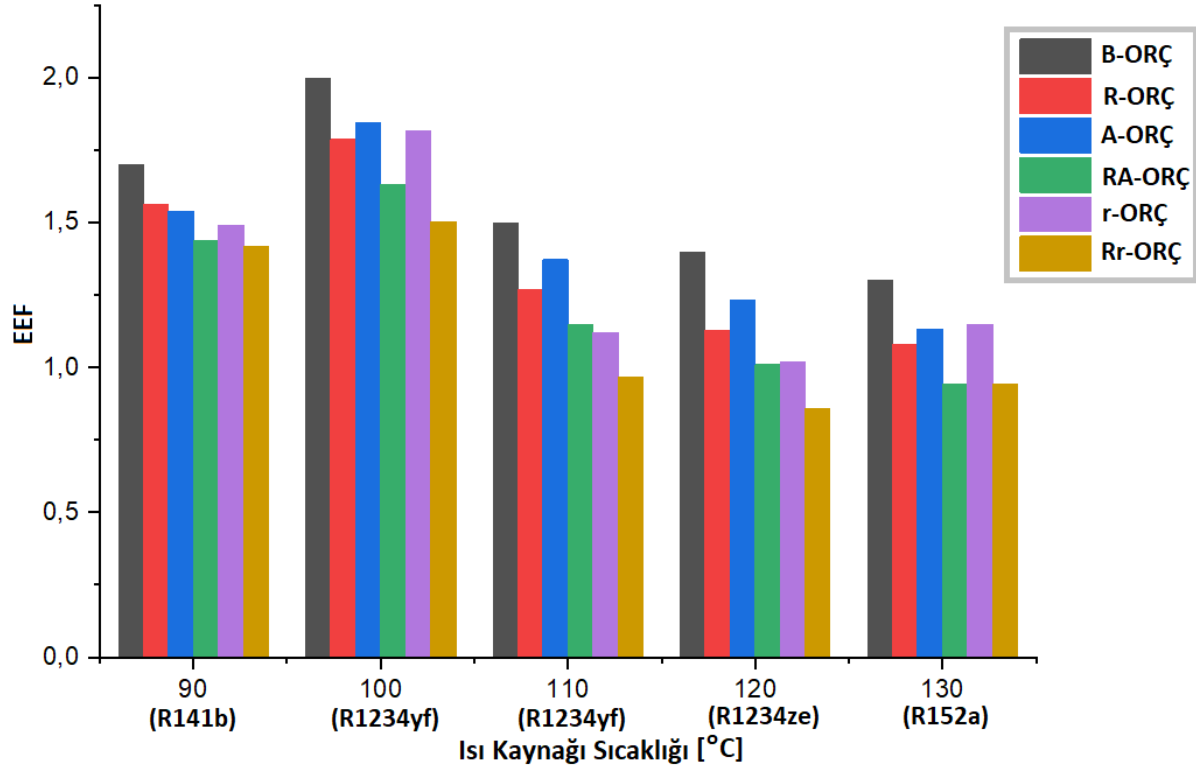
Şekil 6.15. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında toplam tersinmezlik değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.16'da ORÇ konfigürasyonlarının VFR değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. ORÇ konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdeleri değerlendirildiğinde en yüksek VFR değeri azalışının 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında R152a'nın kullanılmasıyla tasarlanan RA-ORÇ'li sistemde elde edildiği görülmektedir. 130 °C ısı kaynağı sıcaklığı için B-ORÇ'de elde edilen VFR değeri 7,78 iken RA-ORÇ kullanılmasıyla %48 oranında azalarak 4,03 değerine azalmıştır. Ayrıca, 110 ve 120 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında minimum VFR değerinin R-ORÇ'de elde edildiği dikkat çekmektedir.



Şekil 6.16. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında VFR değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.17'de ORÇ konfigürasyonlarının EEF değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. ORÇ konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdeleri değerlendirildiğinde en yüksek EEF değeri azalışının 120 °C ısı kaynağı sıcaklığında R1234ze'nın kullanılmasıyla tasarlanan Rr-ORÇ'li sistemde elde edildiği görülmektedir. 120 °C ısı kaynağı sıcaklığı için B-ORÇ'de elde edilen EEF değeri 1,4 iken Rr-ORÇ kullanılmasıyla %38 oranında azalarak 0,85 değerine azalmıştır.



Şekil 6.17. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında EEF değerlerinin karşılaştırılması

Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklıkları altında performansı Çizelge 6.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.7. Düşük Sıcaklıklı ORÇ Uygulamaları İçin Değişik Isı Kaynağı Sıcaklıklarında ORÇ Konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdesi (%)

ORÇ Uyg. Alanı	$T_{h,i}$ (°C)	Optimum Akışkan	R-ORÇ	A-ORÇ	RA-ORÇ	r-ORÇ	Rr-ORÇ
Jeotermal	90	R141b	4,845462	6,387325	10,428	5,717777	9,294398
	100	R1234yf	8,19301	5,958295	15,49119	3,489674	15,6023
	110	R1234yf	21,10944	12,99806	26,67228	21,3459	33,51604
Düşük Sıcaklıklı Güneş	120	R1234ze	22,40585	13,36563	29,21468	20,94747	35,57438
	130	R152a	22,64234	20,4692	34,40914	11,87226	27,04091

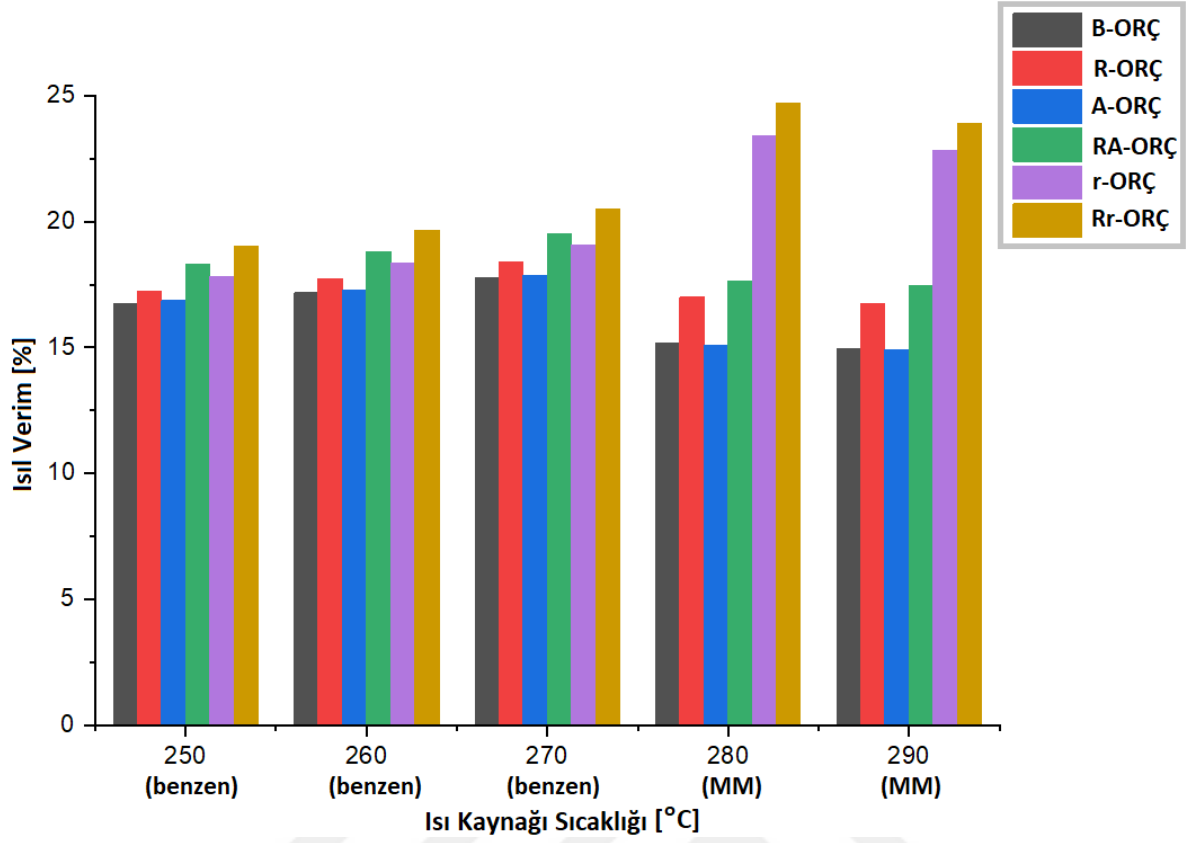
Çizelge 6.7 değerlendirildiğinde;

- 130 °C ısı kaynağı sıcaklığı hariç diğerlerinde en iyi performans Rr-ORÇ'de; 130 °C'de ise RA-ORÇ'de elde edilmiştir.
- ORÇ konfigürasyonlarında B-ORÇ'ye göre performans artışı en az 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında görülmüştür.
- 90 ve 100 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında Rr-ORÇ ve RA-ORÇ'de birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.
- r-ORÇ'nin performansı 110 ve 120 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında önemli oranda yükselmiştir.
- A-ORÇ konfigürasyonunun etkisi ise en fazla 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında tespit edilmiştir.

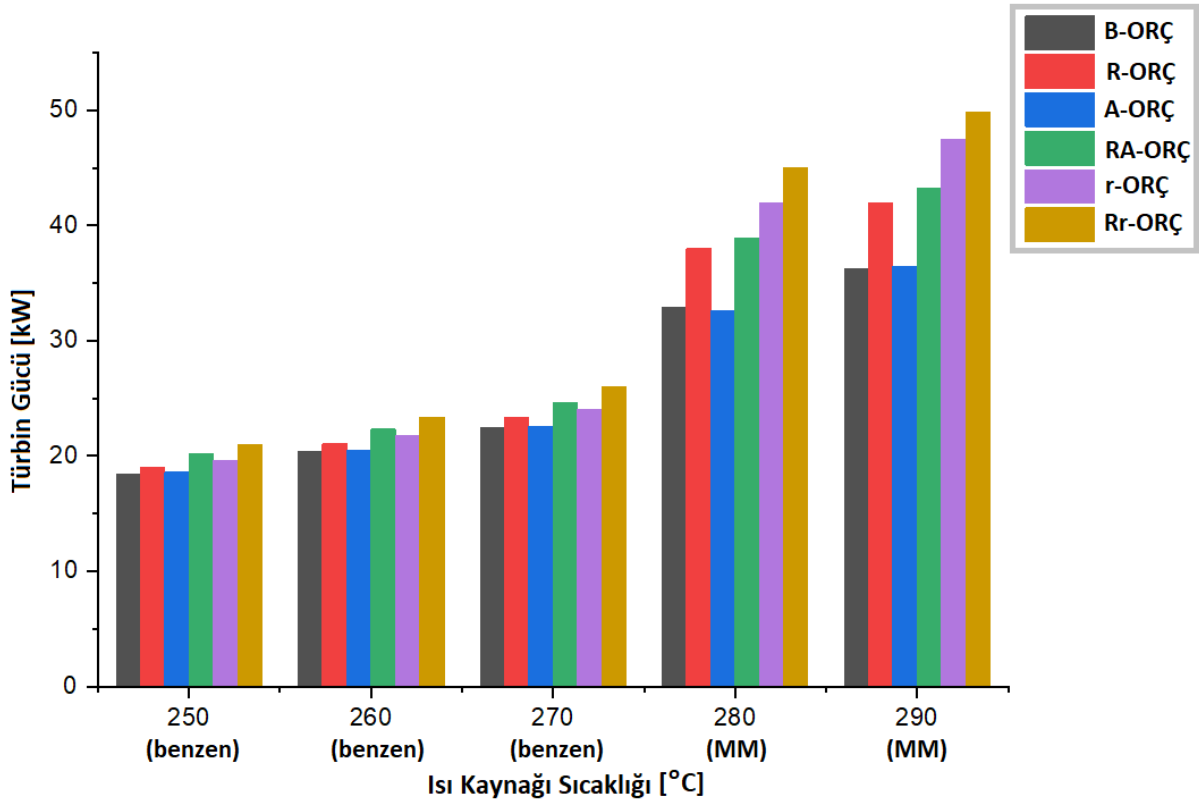
Şekil 6.18-6.23'de farklı konfigürasyonlardaki ORÇ'lerin farklı amaç fonksiyonları altında ulaştıkları değerler yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında 5 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için karşılaştırılmıştır.

ORÇ konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdeleri değerlendirildiğinde en yüksek artışın ısı verim, toplam tersinmezlik ve EEF değerinde 280 °C; türbin gücünde ve ekserji veriminde ise 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında MM'nin kullanılmasıyla tasarlanan Rr-ORÇ'li sistemlerde elde edildiği görülmektedir. Her iki ısı kaynağı sıcaklığı için tespit edilen sonuçlar birbirine yakın olup, 280 °C ısı kaynağı sıcaklığında Rr-ORÇ kullanılmasıyla ısı veriminin %62 oranında arttığı, toplam tersinmezlik değerinin %42 ve EEF değerinin ise %68 oranında azaldığı tespit edilmiştir. 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında Rr-ORÇ kullanılmasıyla türbin gücünün %37, ekserji veriminin ise %23 oranında arttığı tespit edilmiştir.

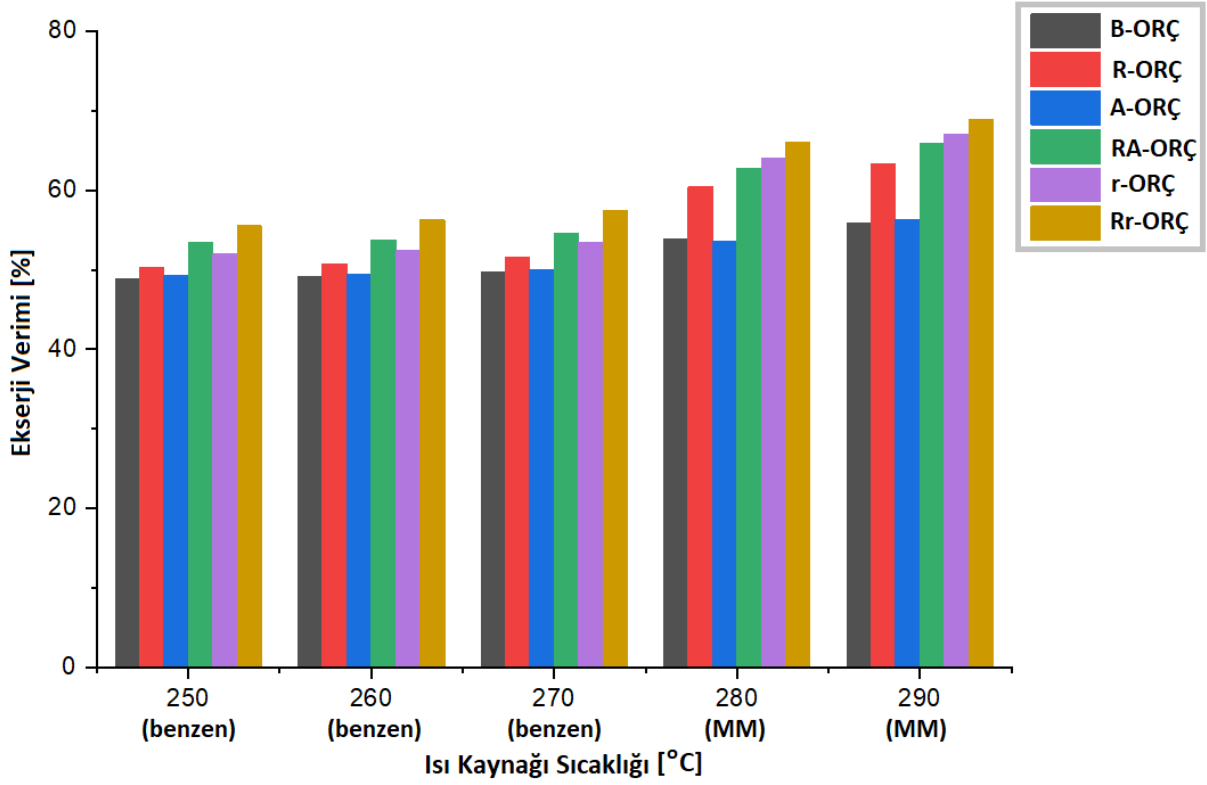
Diğer performans parametrelerinden farklı olarak VFR değerinin analizinde ise ORÇ konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdeleri değerlendirildiğinde en yüksek VFR değeri azalışının 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında benzen'in kullanılmasıyla tasarlanan R-ORÇ'li sistemde elde edildiği görülmektedir.



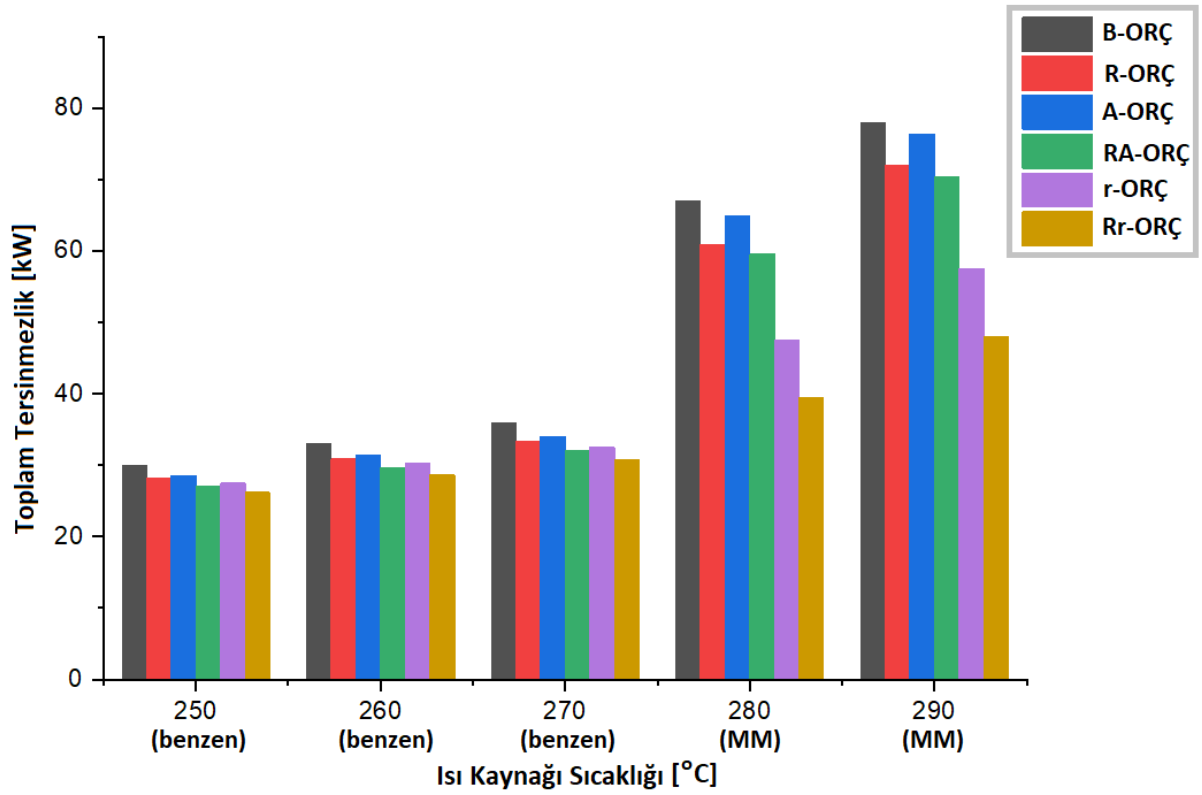
Şekil 6.18. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında ısı verimlerinin karşılaştırılması



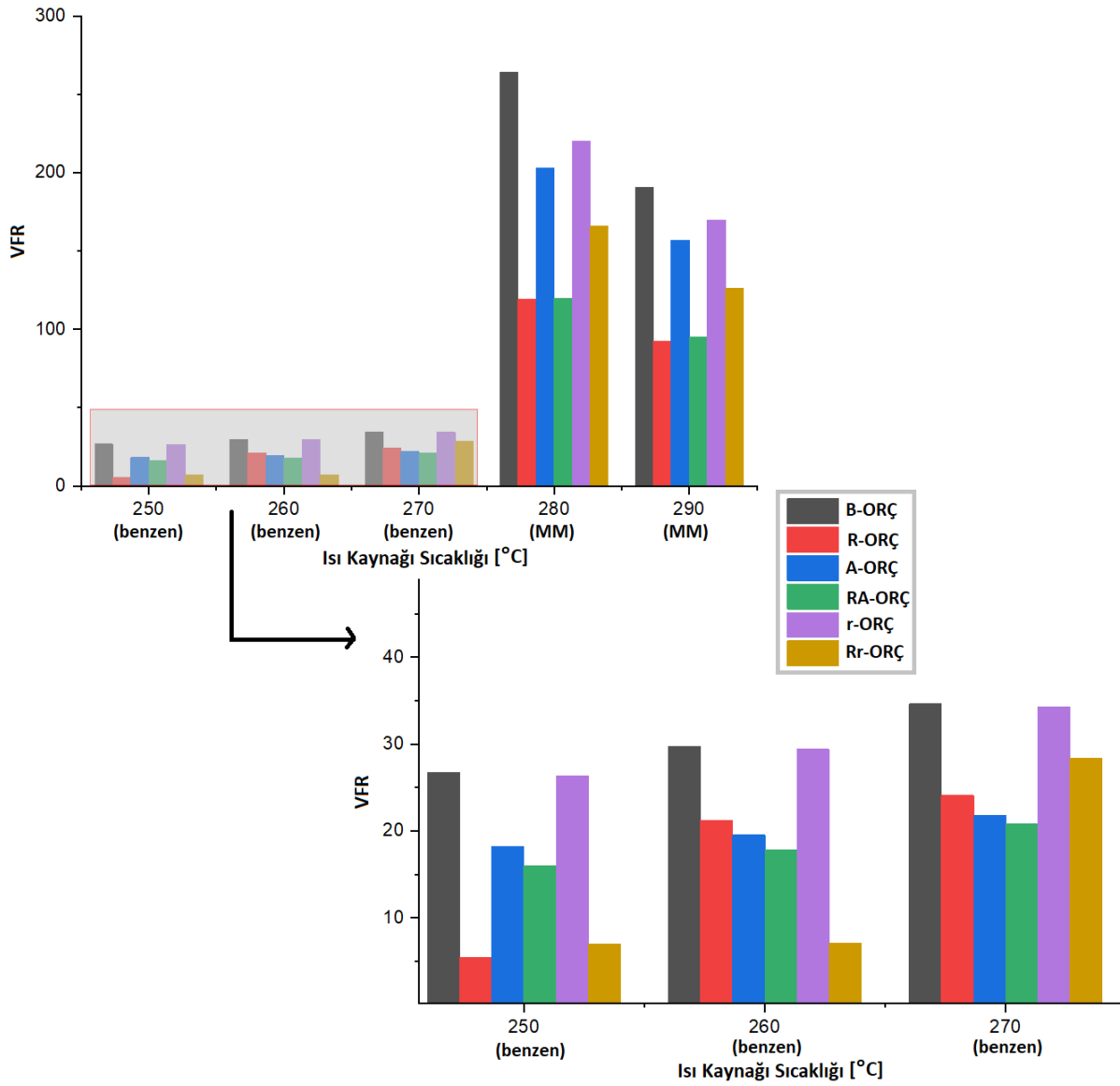
Şekil 6.19. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında türbin güçlerinin karşılaştırılması



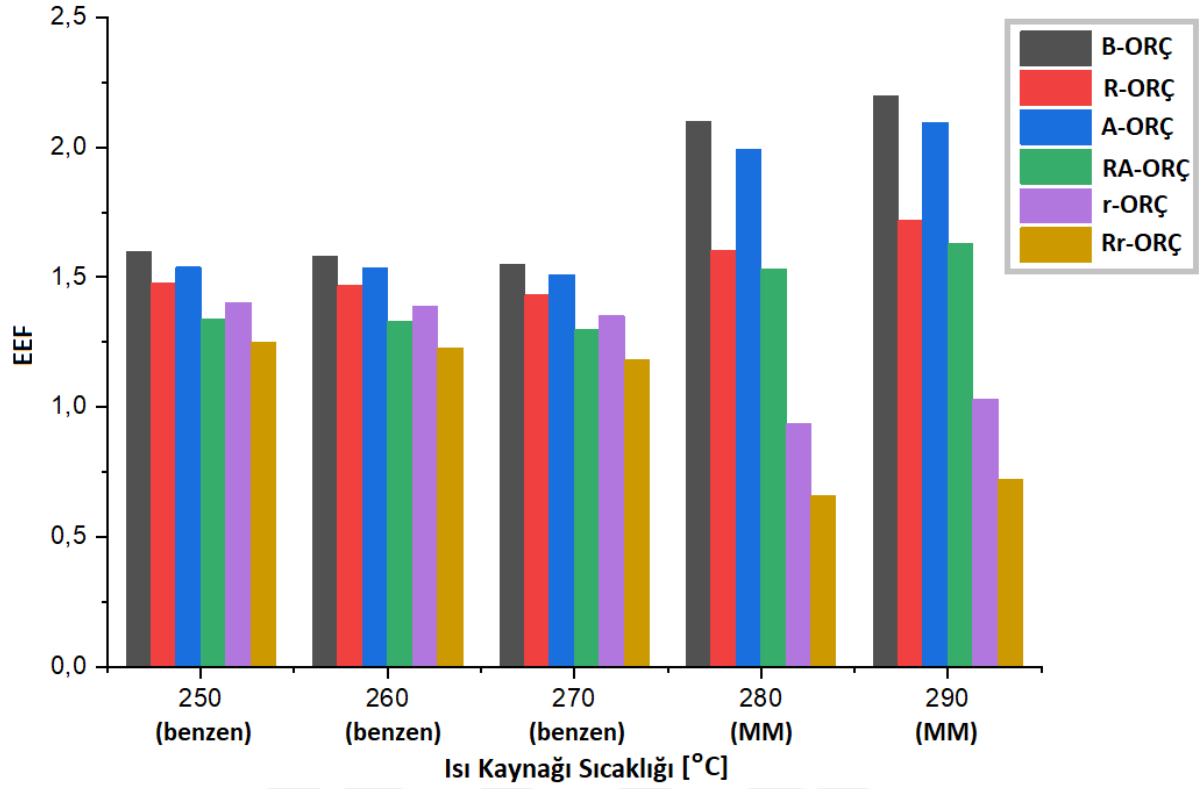
Şekil 6.20. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında ekserji verimlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.21. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında toplam tersinmezlik değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.22. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında VFR değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.23. Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklığı altında EEF değerlerinin karşılaştırılması

Yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları kapsamında farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklıkları altında performansı Çizelge 6.8'de özetlenmiştir.

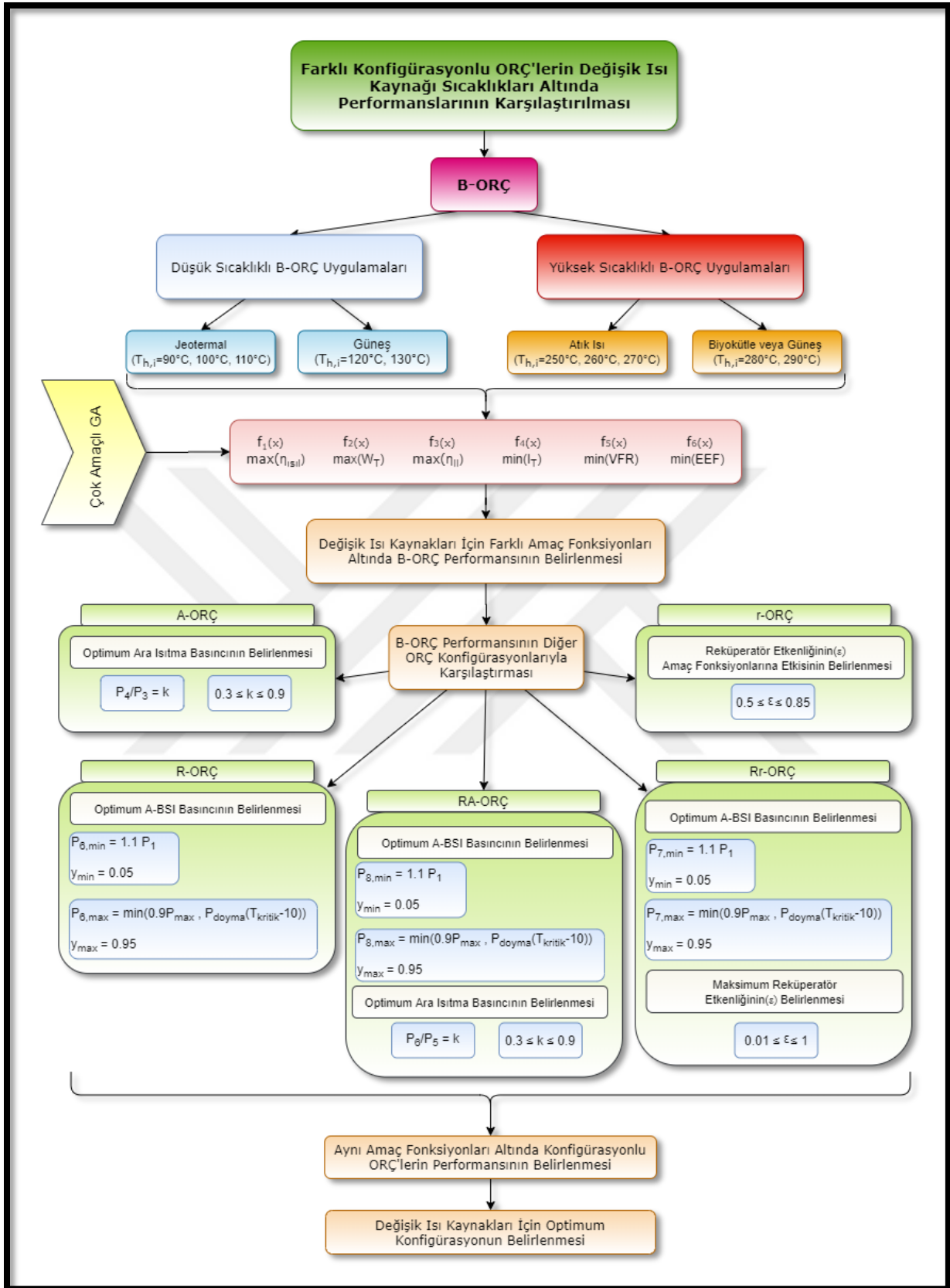
Çizelge 6.8. Yüksek Sıcaklıklı ORÇ Uygulamaları İçin Değişik Isı Kaynağı Sıcaklıklarında ORÇ Konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre performans artış yüzdesi (%)

ORÇ Uyg. Alanı	$T_{h,i}$ (°C)	Optimum Akışkan	R-ORÇ	A-ORÇ	RA-ORÇ	r-ORÇ	Rr-ORÇ
Atık Isı	250	Benzen	21,52869	9,544314	20,83618	7,255672	26,90159
	260	Benzen	10,71301	10,27176	20,91091	7,375832	30,28898
	270	Benzen	11,88127	11,5065	21,34633	8,086587	19,50382
Biyokütle ve Yüksek Sıcaklıklı Güneş	280	MM	34,22265	6,572394	37,30392	48,2866	78,92402
	290	MM	30,62023	4,918814	33,47565	44,15324	73,26643

Çizelge 6.8 değerlendirildiğinde;

- 270 °C ısı kaynağı sıcaklığı hariç diğerlerinde en iyi performans Rr-ORÇ'de; 270 °C'de ise minimum VFR optimizasyonu performansından dolayı RA-ORÇ'de elde edilmiştir.
- 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında Rr-ORÇ ve RA-ORÇ; 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında ise Rr-ORÇ ve r-ORÇ iyi bir performans göstermiştir.
- Benzen kullanılarak tasarlanan sistemde 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında R-ORÇ'nin performansı dikkat çekmektedir. Isı kaynağı sıcaklığının artmasıyla R-ORÇ'nin etkisi azalmıştır.
- MM akışkanının r-ORÇ sistemine daha uygun olduğu Şekil 6.10'da verilen reküperatörün etkenlik değerinin değişimine göstermiş olduğu etkiden görülmüştü. Bundan dolayı 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında MM'nin kullanılmasıyla tasarlanan sistemlerde r-ORÇ'nin iyi bir performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Bu bölümde yapılan konfigürasyonlu ORÇ termodinamik optimizasyon çalışması Şekil 6.24'de verilen akış diyagramında özetlenmiştir.



Şekil 6.24. Konfigürasyonlu ORÇ'nin Termodinamik Optimizasyonunu içeren akış diyagramı

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı, akışkanlı ve konfigürasyonlu ORÇ'lerin tasarımı ve termodinamik optimizasyonu yapılmıştır.

Tezin birinci bölümünde ORÇ sisteminin önemi anlatılmış ve tezin diğer bölümlerinde ele alınan başlıklar kısaca açıklanmıştır. **Tezin ikinci bölümünde** ise ORÇ'nin klasik Rankine çevriminden farklı, ORÇ'nin çalışma prensibi ve ORÇ'de akışkan seçiminin önemi anlatılmıştır. Diğer bölümlerde ise doktora tez çalışmasında incelenen başlıklar ayrı ayrı ele alınarak her bir bölüm için kaynak araştırması, materyal ve yöntem ile araştırma bulguları ayrıca verilmiştir. Her bir bölüm için model doğrulanması yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır.

Tezin üçüncü bölümü, farklı tür akışkan kullanılarak tasarlanan ORÇ'nin termodinamik analizini içermektedir. Bunun için düşük sıcaklıklı ve yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları olmak üzere iki farklı alanda akışkan performansı belirlenmiştir.

Termodinamik analiz EES ile yapılmıştır. ORÇ tasarımında 6 farklı akışkan sınıflandırmasından toplam 40 farklı organik akışkan kullanılmıştır. Performans parametreleri, ısıl verim, türbin gücü, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik olarak belirlenmiştir.

ORÇ'nin düşük sıcaklıklı uygulamaları kapsamında Şekil 3.1-3.8 incelendiğinde;

- Kuru ve izantropik akışkanların yoğuşma ve buharlaşma basınçlarının ve özgül hacimlerinin diğer akışkanlara göre çok düşük olduğu dikkat çekmektedir. Buna istinaden pompa işi de bu akışkanlar da düşük bulunmuştur. En düşük pompa işi 0,62 kJ/kg ile R123 akışkanında görülürken, en yüksek pompa işi ise 4,243 kJ/kg ile R152a'lı sistemde görülmüştür.
- Yeni-nesil organik akışkanlar termofiziksel özellik olarak ıslak akışkanlara yakın özellikler gösterse de bazı performans parametreleri yönünden ayrılmıştır. İki grupta da yüksek yoğuşma ve buharlaşma basıncı görülmesine rağmen yeni-nesil organik akışkanlarda daha düşük pompa işi gereksinimi olduğu tespit edilmiştir. Aynı tasarım şartlarında R1234ze'li ORÇ sistemi R152a'lı sistemden %32,8 daha az pompa işine gereksinim duymaktadır. Bunun nedeni R1234ze'li sistemin yüksek buharlaşma ve yoğuşma basıncına sahip olsa da R152a'lı sistemden %13 daha az basınç farkı içermesi ve %22 daha az özgül hacim değerine sahip olmasıdır.

- Özellikle kuru akışkanların çok yüksek ısı gereksinimine ihtiyaç duydukları görülmüştür. En düşük ısı gereksinimi ise R1234yf ve R134a'lı sistemde elde edilmiştir.

ORÇ'nin yüksek sıcaklıklı uygulamaları kapsamında Şekil 3.9-3.16 incelendiğinde;

- Özellikle D4 akışkanının yoğuşma ve buharlaşma basınçlarının diğer akışkanlara göre çok düşük olduğu görülmüştür. Buna istinaden en düşük pompa işi de D4 akışkanında elde edilmiştir. En yüksek yoğuşma ve buharlaşma basınç değerleri sikloheksan'lı sistemde görülmüştür. Sikloheksan'lı sistemde gereksinim duyulan pompa işinin D4'lü sistemden yaklaşık 9 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- En yüksek ısı gereksinimi alkan grubu akışkanlarda görülürken en düşük ısı gereksinimi ise siloksan grubu akışkanlarda elde edilmiştir.
- En düşük ısı gereksinimi siloksan grubu akışkanlarda görülmesine rağmen siloksanlı sistemde düşük türbin işi eldesinden dolayı en yüksek ısıl verim aromatik hidrokarbon grubu akışkanlarda tespit edilmiştir.

Termodinamik analiz sonucunda her bir grupta en iyi performans gösteren akışkanlar düşük ve yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamaları için Çizelge 7.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 7.1. ORÇ'nin Farklı Uygulama Alanları İçin Belirlenen Akışkan Sınıflandırmaları Altında En İyi Performans Gösteren Akışkanlar

ORÇ Uyg. Alanı	Akışkan Sınıflandırmaları	En iyi performans gösteren akışkanlar	
		1.	2.
Düşük Sıcaklıklı ORÇ Uyg. $T_{h,i} = 110\text{ °C}$	Kuru	R601	R601a
	İzantropik	R141b	R123
	Islak	R152a	R134a
Yüksek Sıcaklıklı ORÇ Uyg. $T_{h,i} = 240\text{ °C}$	Alkanlar	sikloheksan	n-oktan
	Aromatik Hidrokarbon	benzen	toluen
	Siloksan	MM	D4

Tezin dördüncü bölümünde; ORÇ tasarımında bir önceki bölümde en iyi performans gösteren akışkanlar kullanılmıştır. Düşük ve yüksek sıcaklıklı ORÇ'nin 4 farklı uygulama alanı üzerinde çalışılmıştır. Bunlar, jeotermal ($T_{h,i} = 90, 100$ ve 110 °C), düşük sıcaklıklı güneş enerjisi ($T_{h,i} = 120, 130\text{ °C}$), atık ısı ($T_{h,i}=250, 260$ ve 270 °C) ve biyokütle-yüksek sıcaklıklı güneş enerjisidir ($T_{h,i} = 280$ ve 290 °C). Burada belirtilen 10 değişik ısı kaynağı

sıcaklığı altında optimum koşullarda çalışabilen uygun bir akışkan belirlenmiştir. Çok amaçlı GA optimizasyon tekniğinden yararlanılmıştır. Organik akışkanların değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında çalışabileceği optimum $\Delta T_{pp,e}$ değeri belirlenmiştir. Ardından belirlenen 6 farklı amaç fonksiyonu ile her ısı kaynağı sıcaklığı için uygun bir akışkan önerilmiştir. Amaç fonksiyonları $f(x)$; ısı verim, türbin gücü ve ekserji verimi maksimizasyonu ile toplam tersinmezlik, VFR ve EEF değeri minimizasyonudur. Ağırlık fonksiyonu $G(x)$; amaç fonksiyonları altında akışkanların performansındaki artış oranları dikkate alınarak düzenlenmiştir. Düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamalarında ısı kaynağı sıcaklığında 10 °C'lik artışın amaç fonksiyonu sonuçlarını değiştirdiği görülürken yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamalarında ise ısı kaynağı sıcaklık artışının optimum akışkanı daha az etkilediği belirlenmiştir.

Tüm düşük sıcaklıklı ısı kaynakları birlikte değerlendirildiğinde türbin gücü maksimizasyonunda R1234yf'nin, toplam tersinmezlik minimizasyonunda R141b'nin, VFR minimizasyonunda ise R152a'nın diğer akışkanlara göre çok iyi bir performans sergilediği tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklı ısı kaynakları birlikte değerlendirildiğinde ise ısı verim maksimizasyonunda, toplam tersinmezlik ve VFR minimizasyonunda benzen'in, ekserji verim maksimizasyonunda ise MM'nin diğer akışkanlara göre daha iyi bir performans sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, türbin gücü maksimizasyonu ve EEF minimizasyonunda atık ısı uygulamalarında sikloheksan'ın performansı dikkat çekmektedir.

Uygulanan termodinamik optimizasyon ile değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için belirlenen optimum akışkanlar ve ağırlık fonksiyonu sonucu optimum akışkan olarak kullanılabilme oranları Çizelge 7.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 7.2. Termodinamik optimizasyonda ağırlık fonksiyonu sonucu değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için optimum akışkanların belirlenmesi ve kullanılabilme oranı

ORÇ Uyg. Alanı	$T_{h,i}$ (°C)	Optimum Akışkan	Optimum Akışkan Olarak Kullanılabilme Oranı
Jeotermal	90	R141b	%51
	100	R1234yf	%65
	110	R1234yf	%83
Düşük Sıcaklıklı Güneş	120	R1234ze	%32
	130	R152a	%36
Atık Isı	250	Benzen	%72
	260	Benzen	%70
	270	Benzen	%70

Biyokütle ve Yüksek Sıcaklıklı Güneş	280	MM	%52
	290	MM	%53

Bu bölümde ayrıca evaporatör ve kondenserde meydana gelen basınç kayıplarının sistem performansına etkisi incelenmiştir. %15'e varan bir basınç kayıp oranının amaç fonksiyonları altındaki etkisi belirlenmiştir. Isıl verim ve türbin gücündeki azalıştan dolayı düşük sıcaklıklı ORÇ uygulamalarını daha fazla etkilediği belirtilmiştir.

- 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında R141b kullanılarak tasarlanan sistemde %15'lik basınç kaybı ısı veriminin %15,42 oranında azalmasına neden olurken; 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında benzer kullanılarak tasarlanmış sistemin ısı veriminde %5'lik bir azalışa neden olabileceği tespit edilmiştir.
- Düşük sıcaklıklı ORÇ sistemlerinde basınç kaybı oranı en fazla EEF değerini etkilerken; yüksek sıcaklıklı ORÇ sistemlerinde ise VFR değerini etkilediği belirtilmiştir.
- 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında %15'lik basınç kaybı EEF değerinin %32,2 oranında artmasına neden olmaktadır. 250 °C ısı kaynağı sıcaklığında %15'lik basınç kaybı ise VFR değerinin %14,25 oranında artmasına neden olmaktadır.

Tezin beşinci bölümünde düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı ORÇ performans parametrelerinin parametrik optimizasyonu ve hassasiyet analizi yapılmıştır. Taguchi-ANOVA optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Değişik ısı kaynakları için bir önceki bölümde belirlenen optimum akışkanlar kullanılarak ORÇ performans parametrelerinin amaç fonksiyonlarına etkisi belirlenmiştir. Taguchi yönteminde 6 faktör değeri belirlenip 5 seviye değerinde çalışılarak L25 (5^6) ortogonal dizilimi kullanılmıştır. Bu faktör değerleri, $\Delta T_{PP,e}$, $\Delta T_{PP,k}$, $T_{c,i}$, T_{ak} , η_t ve η_p olarak belirlenmiştir. Performans parametrelerinin 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığında 6 farklı amaç fonksiyonuna etkisi belirlenerek hassasiyet analizi yapılmıştır.

ORÇ'nin 100, 110 ve 120 °C düşük sıcaklıklı uygulamalarında ısı verimi etkileyen en önemli parametre $\Delta T_{PP,e}$ iken, 130 °C ısı kaynağı sıcaklığında $\Delta T_{PP,e}$ 'nin etkisinin azalmaya başladığı görülmektedir. ORÇ'nin yüksek sıcaklıklı uygulamaları için 250, 260, 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında benzer kullanılarak tasarlanan ORÇ için $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 4 farklı amaç fonksiyonu üzerinde en etkili parametre olduğu görülmektedir. Fakat 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklığında MM'nin kullanılmasıyla $\Delta T_{PP,e}$ 'nin sadece VFR üzerinde en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 7.3'te ORÇ'de değişik ısı kaynakları için tüm amaç fonksiyonları sonucu elde edilen ağırlık fonksiyonuna göre hassasiyet seviyesi en fazla olan iki parametre katkı oranları ile birlikte verilmiştir. 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için de $\Delta T_{PP,e}$ değerinin en önemli iki parametreden biri olduğu dikkat çekmektedir. Düşük sıcaklık uygulamalarında ortalama olarak $\Delta T_{PP,e}$ 'nin, yüksek sıcaklık uygulamalarında ise türbin izantropik veriminin daha önde olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.3. Değişik Isı Kaynaklı ORÇ'de Belirlenen Amaç Fonksiyonlarına Ulaşılmasında Hassasiyet Seviyesi En Fazla Olan İki Parametre ve Katkı Oranları

ORÇ Uyg. Alanı	T_{hi} (°C)	Optimum Akışkan	Düşük Sıcaklıklı ORÇ'de Belirlenen Amaç Fonksiyonlarına Ulaşılmasında Hassasiyet Seviyesi En Fazla Olan İki Parametre ve Katkı Oranları
Jeotermal	90	R141b	%42,85; $\Delta T_{PP,e}$ %25,71; $T_{c,i}$
	100	R1234yf	%50,57; $\Delta T_{PP,e}$ %23,79; $T_{c,i}$
	110	R1234yf	%47,49; $\Delta T_{PP,e}$ %30,4; $T_{c,i}$
Düşük Sıcaklıklı Güneş	120	R1234ze	%39,72; $\Delta T_{PP,e}$ %29,52; η_t
	130	R152a	%33,09; $\Delta T_{PP,e}$ %33,03; η_t
ORTALAMA			%42,74; $\Delta T_{PP,e}$ %26,72; $T_{c,i}$ %26,03; η_t
Atık Isı	250	Benzen	%52,23; $\Delta T_{PP,e}$ %36,73; η_t
	260	Benzen	%48,6; $\Delta T_{PP,e}$ %40,39; η_t
	270	Benzen	%45,6; $\Delta T_{PP,e}$ %43,76; η_t
Biyokütle ve Yüksek Sıcaklıklı Güneş	280	MM	%45,01; η_t %23,83; $\Delta T_{PP,e}$
	290	MM	%36,09; η_t %23,19; $\Delta T_{PP,e}$
ORTALAMA			%40,39; η_t %38,63; $\Delta T_{PP,e}$ %11,1; $T_{c,i}$

Ayrıca, tezin bu bölümünde Taguchi-ANOVA sonuçlarına göre her bir amaç fonksiyonu için performans parametrelerine bağlı regresyon denklemi türetilmiştir. Türetilen denklemler ile EES analiz sonuçları farklı istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırılmıştır.

10 değişik ısı kaynağı için 6 farklı amaç fonksiyonunun değişim aralığında tespit edilen EES verileri ile tahmin verileri MAPE, RRMSE ve R^2 istatistiksel yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Veriler incelendiğinde türetilen denklemlerin ORÇ performansının belirlenmesinde kullanılabileceği görülmektedir. Tüm ısı kaynağı sıcaklıkları birlikte düşünüldüğünde ortalama MAPE, RRMSE ve R^2 değerleri sırasıyla %3,41, %3,66 ve %96,2 olarak tespit edilmiştir.

Tezin altıncı bölümü, farklı konfigürasyonlu ORÇ'lerin değişik ısı kaynağı sıcaklıklarında farklı amaç fonksiyonları altında çok amaçlı GA optimizasyon tekniği ile performanslarının karşılaştırılmasını içermektedir. Tezin önceki bölümlerinde 10 değişik ısı kaynağı sıcaklığı için belirlenen tasarım parametreleri ve optimum organik akışkanın kullanılması ile 5 farklı konfigürasyonda ORÇ performansı tespit edilmiştir. Bu konfigürasyonlar, R-ORÇ, A-ORÇ, RA-ORÇ, r-ORÇ ve Rr-ORÇ olarak belirlenmiştir. Farklı ORÇ konfigürasyonları için tespit edilen veriler B-ORÇ ile karşılaştırılmıştır. B-ORÇ'de tespit edilen optimum akışkanlar kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Performans karşılaştırılması yine 6 farklı amaç fonksiyonu üzerinden yapılmıştır. Değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için farklı amaç fonksiyonları altında optimum konfigürasyon modeli belirlenmiştir.

Konfigürasyon modellerinin karşılaştırılmasından önce her bir konfigürasyon için A-BSI basıncı, ara ısıtma basıncı gibi spesifik performans değerlerinin optimum noktada olması için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu değerlerin belirlenmesinin ardından performans karşılaştırılması yapılmıştır.

ORÇ'nin 4 farklı uygulama alanı için farklı ısı kaynağı sıcaklıklarında optimum akışkanların kullanılmasıyla tasarlanan sistemlere ait konfigürasyon performans artış yüzdesi tespit edilmiştir. Performans artış yüzdesi 6 farklı amaç fonksiyonu baz alınarak belirlenmiştir. ORÇ'nin düşük sıcaklık uygulamaları kapsamında Çizelge 6.7 incelendiğinde;

- Jeotermal uygulamalarda, R141b ile 90 °C ısı kaynağı sıcaklığı için optimum ORÇ konfigürasyonlarının performans sıralaması RA-ORÇ>Rr-ORÇ>A-ORÇ>r-ORÇ>R-ORÇ şeklinde belirlenmiştir.
- Jeotermal uygulamalarda, R1234yf ile 100 °C ısı kaynağı sıcaklığı için optimum ORÇ konfigürasyonlarının performans sıralaması Rr-ORÇ>RA-ORÇ>R-ORÇ>A-ORÇ>r-

ORÇ; aynı akışkan ile 110 °C'de ise Rr-ORÇ>RA-ORÇ>r-ORÇ>R-ORÇ>A-ORÇ şeklinde belirlenmiştir. Isı kaynağı sıcaklığındaki 10 °C'lik artış ile r-ORÇ'nin B-ORÇ'ye kıyasla performans artışı %3,48'den %21,3'e yükselmiştir.

- Düşük sıcaklıklı güneş uygulamalarda, R1234ze ile 120 °C ısı kaynağı sıcaklığı için optimum ORÇ konfigürasyonlarının performans sıralaması Rr-ORÇ>RA-ORÇ>R-ORÇ>r-ORÇ>A-ORÇ; R152a ile 130 °C ısı kaynağı sıcaklığı için ise RA-ORÇ>Rr-ORÇ>R-ORÇ>A-ORÇ>r-ORÇ şeklinde belirlenmiştir.
- ORÇ konfigürasyonlarının B-ORÇ'ye göre en az performans artışı 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında görülmüştür.
- En yüksek performans artış yüzdesi 120 °C'de R1234ze ile Rr-ORÇ'de (%35,5); 130 °C'de R152a ile RA-ORÇ'de (%34,4) tespit edilmiştir.
- 90 ve 100 °C'de Rr-ORÇ ve RA-ORÇ'de birbirine yakın performans artışı görülüyor iken 110 ve 120 °C'de Rr-ORÇ daha iyi bir performans sergilemiştir. Fakat 130 °C için RA-ORÇ'de Rr-ORÇ'den daha yüksek performans artışı sağlanmıştır.
- r-ORÇ konfigürasyonu sadece 110 ve 120 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında iyi bir performans artışı göstermiştir.

ORÇ'nin yüksek sıcaklık uygulamaları kapsamında Çizelge 6.8 incelendiğinde;

- Atık ısı uygulamalarında, benzen ile 250 °C ısı kaynağı sıcaklığı için optimum ORÇ konfigürasyonlarının performans sıralaması Rr-ORÇ>R-ORÇ>RA-ORÇ>A-ORÇ>r-ORÇ; 260 °C için Rr-ORÇ>RA-ORÇ>R-ORÇ>A-ORÇ>r-ORÇ; 270 °C için ise RA-ORÇ>Rr-ORÇ>R-ORÇ>A-ORÇ>r-ORÇ şeklinde belirlenmiştir.
- Atık ısı uygulamalarında üç farklı ısı kaynağı sıcaklığı için de en düşük performans artışı r-ORÇ ve A-ORÇ'de görülmüştür.
- 250 °C'de R-ORÇ'nin performans artışı %21,1 iken 260 ve 270 °C sıcaklıklarında sırasıyla %10,7 ve %11,8 olarak tespit edilmiştir.
- Biyokütle ve yüksek sıcaklıklı güneş uygulamalarında, MM ile 280 ve 290 °C ısı kaynağı sıcaklıkları için optimum ORÇ konfigürasyonlarının performans sıralaması Rr-ORÇ>r-ORÇ>RA-ORÇ>R-ORÇ>A-ORÇ şeklinde belirlenmiştir.
- En yüksek performans artış yüzdesi 280 °C'de MM ile Rr-ORÇ'de (%78,9) tespit edilmiştir.
- r-ORÇ konfigürasyonu biyokütle ve yüksek sıcaklıklı güneş uygulamalarında iyi bir performans göstermesine rağmen atık ısı uygulamalarında çok düşük bir performans ortaya koymuştur. 250, 260 ve 270 °C ısı kaynağı sıcaklıklarında r-ORÇ'de B-ORÇ'ye

kıyasla yaklaşık %7,5 bir performans artışı elde edilirken 280 ve 290 °C’de ise bu değer yaklaşık %45 oranındadır.

Değişik ısı kaynağı sıcaklıkları için optimum konfigürasyon modelleri Çizelge 7.4’te verilmiştir. Optimum ORÇ konfigürasyonu kullanımında B-ORÇ’ye göre performans artış yüzdesi verilmiştir.

Çizelge 7.4. Değişik Isı Kaynaklı ORÇ’de Optimum Konfigürasyon kullanımında Oluşan Performans Artış Yüzdesi (%)

ORÇ Uyg. Alanı	$T_{h,i}$ (°C)	Optimum Akışkan	Optimum ORÇ Konfigürasyonu	Optimum ORÇ konfigürasyonu kullanımında B-ORÇ’ye göre performans artış yüzdesi (%)
Jeotermal	90	R141b	RA-ORÇ	% 10,42
	100	R1234yf	Rr-ORÇ	% 15,6
	110	R1234yf	Rr-ORÇ	% 33,5
Düşük Sıcaklıklı Güneş	120	R1234ze	Rr-ORÇ	% 35,5
	130	R152a	RA-ORÇ	% 34,4
Atık Isı	250	Benzen	Rr-ORÇ	% 26,9
	260	Benzen	Rr-ORÇ	% 30,2
	270	Benzen	RA-ORÇ	% 21,3
Biyokütle ve Yüksek Sıcaklıklı Güneş	280	MM	Rr-ORÇ	% 78,9
	290	MM	Rr-ORÇ	% 73,2

Çizelgede özetle; jeotermal 90 °C için RA-ORÇ, 100 ve 110 °C için Rr-ORÇ; düşük sıcaklıklı güneş 120 °C için Rr-ORÇ; 130 °C için RA-ORÇ olarak belirlenmiştir. Atık ısı 270 °C için RA-ORÇ, diğer tüm yüksek sıcaklıklı ORÇ uygulamalarında ise Rr-ORÇ optimum olarak belirlenmiştir.

Son olarak bu tez çalışmasına ilave olarak aşağıda belirtilen konuların araştırılması önerilmektedir.

- Termodinamik analiz ve optimizasyon sonuçları baz alınarak termoeconomik analizin yapılması

- Bu çalışmada değişik ısı kaynaklarına özgü belirlenen $\Delta T_{PP,e}$ değerlerinin yanı sıra net güç başına ısı değiştirici alanı, birim yatırım maliyeti gibi ekonomik performans belirleyici amaç fonksiyonlarının da incelenerek ısı değiştirici tasarımının yapılması
- Zeotropik akışkanların ORÇ'nin düşük ve yüksek sıcaklıklı uygulamalar üzerindeki etkisinin tespit edilmesi ve bu çalışmada değişik ısı kaynakları için ağırlık fonksiyonu sonucu önerilen akışkanlar ile performanslarının karşılaştırılması
- ORÇ'nin gaz türbin çevrimi veya soğutma çevrimine entegre edildiği sistemlerin termodinamik analizinin yapılarak bu çalışmada incelenen 5 farklı konfigürasyon modelinin sonuçları ile karşılaştırılması

8. KAYNAKLAR

- Abam, F-I., et al., 2018a, Optimum exergetic performance parameters and thermo-sustainability indicators of low-temperature modified organic Rankine cycles (ORCs), *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 30, 91-104.
- Abam, F-I., et al., 2018b, A comparative performance analysis and thermo-sustainability indicators of modified low-heat organic Rankine cycles (ORCs): An exergy-based procedure, *Energy Reports*, 4, 110-118.
- Abam, F-I., et al., 2018c, Thermodynamic performance and environmental sustainability of adapted organic Rankine cycles at varying evaporator pressure, *International Journal of Ambient Energy*, 4, 332-342.
- Ağırkaya, O., 2015, Jeotermal Enerji Kaynaklı Organik Rankine Çevriminin Modellenmesi ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı*, İstanbul.
- Ata, S., Kahraman, A., Sahin, R., 2019, Thermal Efficiency Evaluation of an Organic Rankine Cycle With n-Pentane as Working Fluid, *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 6(2), 31-38.
- Ayodele T.R., et al., 2019, Prediction of global solar irradiation using hybridized k-means and support vector regression algorithms, *Renewable Energy Focus*, 29, 78-93.
- Bademlioglu, A-H., Canbolat, A-S., Kaynakli, O., 2020, Multi-objective optimization of parameters affecting Organic Rankine Cycle performance characteristics with Taguchi-Grey Relational Analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117.
- Bademlioglu, A-H., et al., 2018, Investigation of parameters affecting Organic Rankine Cycle efficiency by using Taguchi and ANOVA methods, *Applied Thermal Engineering*, 145, 221-228.
- Bademlioglu, A-H., Yamankaradeniz, R., Kaynakli, O., 2019, Exergy Analysis Of The Organic Rankine Cycle Based On The Pinch Point Temperature Difference, *Journal of Thermal Engineering*, 5, 157-165.

- Bao, J., Zhao, L., 2013, A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 325-342.
- Behzadi, A., et al., 2018, Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of waste heat recovery from Tehran's waste-to-energy plant integrated with an ORC unit, *Energy*, 160, 1055-1068.
- Braimakis, K., Karellas, S., 2018, Energetic optimization of regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) configurations, *Energy Conversion and Management*, 159, 353-370.
- Cataldo, F., Mastrullo, R., Mauro, Alfonso W., Vanoli, Giuseppe Peter., 2014, Fluid selection of Organic Rankine Cycle for low-temperature waste heat recovery based on thermal optimization, *Energy*, 72, 159-167.
- Çengel Y. A., Boles M. A., 2015, Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla, Palme Yayınları, Ankara.
- Deethayat, T. et al., 2015, Performance analysis of an Organic Rankine cycle with internal heat exchanger having zeotropic working fluid, *Case Studies in Thermal Engineering*, 6, 155-161.
- Ergün, A., 2014, Organik Rankine Çevrimi Prensibine Göre Çalışan Bir Jeotermal Elektrik Santralinin Termoekonomik Analizi, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
- Eyidoğan, M., 2014, Organik Rankine Çevrimli Güç Üretim Sisteminin Enerji Ve Ekserji Analizi, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
- Galloni, E. et al., 2015, Design and experimental analysis of a mini ORC (organic Rankine cycle) power plant based on R245fa working fluid, *Energy*, 90, 768-775.
- Giuffrida, A., 2018, A theoretical study on the performance of a scroll expander in an organic Rankine cycle with hydrofluoroolefins (HFOs) in place of R245fa, *Energy*, 161, 1172-1180.
- Günaydın, İ., 2016, 1,5 kW Gücünde Organik Rankine Çevriminin Parametrik Tasarımı Termodinamik Analizi Prototip İmalatı ve Testi, Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale.
- Han, Z. et al., 2017, Thermo-Economic Performance Analysis of a Regenerative Superheating Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery, *Energies*, 10, 1593, 1-23.
- Imran, M. et al., 2016, Comparative assessment of Organic Rankine Cycle integration for low temperature geothermal heat source applications, *Energy*, 102, 473-490.
- Jankowski, M., et al., 2019, Determination of an optimal pinch point temperature difference interval in ORC power plant using multi-objective approach, *Journal of Cleaner Production*, 217, 798-807.
- Javanshir, A. et al., 2017, Thermodynamic analysis of a regenerative organic Rankine cycle using dry fluids, *Applied Thermal Engineering*, 123, 852-864.
- Javanshir, A., Sarunac, N., 2017, Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle, *Energy*, 118, 85-96.

- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2018a, The Effect of Source and Turbine Input Temperature on ORC Performance Using Different Dry Fluids, *7th International Conference on Advanced Technologies, ICAT 2018*, Antalya, 880-885.
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2018b, Energy and exergy analysis of an organic Rankine cycle under different heat source and turbine inlet temperature conditions, *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 5(3), 140-146.
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2018c, Determination of the Effect of Evaporation Pressure and Degree of Superheat on the Organic Rankine Cycle Using n-Pentane Fluid, *7th International Conference on Advanced Technologies, ICAT 2018*, Antalya, 886-891.
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2018d, Analysis of Exergy Destruction Rates in the Components of the ORC System Using N-Pentane Fluid, *International Conference on Engineering Technologies ICENTE'18*, Konya, 513-518.
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2018e, Çevresel Özellik Yönünden Farklı Özelliklere Sahip R134a ve R152a Akışkanı Kullanılarak Tasarlanan Organik Rankine Çevriminin Performanslarının Karşılaştırılması, *VI. KOP Uluslararası Bölgesel Kalkınma Sempozyumu*, Konya, 554-562.
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2019a, Organik Rankine Çevriminde Kullanılan Saf Akışkanlar ile Zeotropik Akışkanların Termodinamik Performanslarının Karşılaştırılması, *2nd International Conference on Energy Research*, Marmaris.
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2019b, Saf Akışkan ve Zeotropik Akışkan Kullanılarak Tasarlanan Organik Rankine Çevrimlerinin Ekserji Analizi, *2nd International Conference on Energy Research*, Marmaris.
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2019c, Organik Rankine Çevriminde Kullanılan Mevcut Akışkanlar ile Yeni Nesil Organik Akışkan Olarak Adlandırılan R1234ze ve R1234yf'nin Performanslarının Karşılaştırılması, *ULIBTK'19 22th Congress of Thermal Sciences and Technology*, Kocaeli.
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2019d, Comparison Of The Performance Of Organic Fluids Of Different Structure In Organic Rankine Cycle For Waste Heat Recovery From Aluminum Production Plants, *The International Aluminium-Themed Engineering And Natural Sciences Conference, IATENS-2019*, Konya, 201-210.
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2019e, Investigation of Exergy Performance of Fluids Used in ORC for Waste Heat Recovery from Aluminum Production Plants, *International Conference on Engineering Technologies ICENTE'19*, Konya, 389-394.
- Karaman, R., 2016, Kombine Organik Rankine Ve Kompresörlü Soğutma Çevriminin Termodinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Kaşka, Ö., 2014, Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry, *Energy Conversion and Management*, 77, 108-117.
- Kaşka, Ö., Bor, O., Tokgöz, N., 2018, Energy and exergy analysis of an organic Rankine-Brayton combined cycle, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33:4, 1201-1213.

- Kılıç, B., Arabacı, E., 2019, Alternative Approach in Performance Analysis of Organic Rankine Cycle (ORC), *Enviromental Progress & Sustainable Energy*, 38, 54-259.
- Kumar, U., Karimi, M-N., Asjad, M., 2016, Parametric optimisation of the organic Rankine cycle for power generation from low-grade waste heat, *International Journal of Sustainable Energy*, 35, 774-792.
- Kutlu, L., 2009, AI 2024-T4 Alüminyum Elmas Benzeri Karbon (DLC) Kaplanmış Matkaplarla Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi ve Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Küçük, E-O., Kılıç, M., 2018, Simulation and thermodynamic analysis of a regenerative and recuperative organic Rankine cycle, *Bulgarian Chemical Communications*, 50, 86-95.
- Le, V.L. et al., 2014, Performance optimization of low-temperature power generation by supercritical ORCs (organic Rankine cycles) using low GWP (global warming potential) working fluids, *Energy*, 67, 513-526.
- Li, G., 2016, Organic Rankine cycle performance evaluation and thermoeconomic assessment with various applications part I: Energy and exergy performance evaluation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 477-499.
- Li, J. et al., 2017, Thermodynamic performance analyses and optimization of subcritical and transcritical organic Rankine cycles using R1234ze(E) for 100–200°C heat sources, *Energy Conversion and Management*, 149, 140-154.
- Liu, X., Wang, X., Zhang, C., 2014, Sensitivity analysis of system parameters on the performance of the Organic Rankine Cycle system for binary-cycle geothermal power plants, *Applied Thermal Engineering*, 71, 175-183.
- Liu, X., Zhang, Y., Shen, J., 2017, System performance optimization of ORC-based geo-plant with R245fa under different geothermal water inlet temperatures, *Geothermics*, 66, 134-142.
- Moloney, F. et al., 2017, Working fluid parametric analysis for regenerative supercritical organic rankine cycles for medium geothermal reservoir temperatures, *Energy Procedia*, 129, 599-606.
- Muhammad, U. et al., 2015, Design and experimental investigation of a 1 kW organic Rankine cycle system using R245fa as working fluid for low-grade waste heat recovery from steam, *Energy Conversion and Management*, 103, 1089-1100.
- Özdemir, A., 2012, Parabolik Kollektörlü Organik Rankine Çevriminin Isparta Şartlarında İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Özdemir, E., ve Kılıç, M., 2017, Energy and Exergy Analysis of an Organic Rankine Cycle Using Different Working Fluids from Waste Heat Recovery, *International Journal of Environmental Trends (IJENT)*, 1, 1, 32-45.
- Pelit, M., 2015, Biyokütle Kaynaklı Organik Rankine Çevrimli Güç Ünitesinin Termoekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.

- Rahbar, K. et al., 2015, Parametric analysis and optimization of a small-scale radial turbine for Organic Rankine Cycle, *Energy*, 83, 696-711.
- Roy, J.P., Mishra, M.K., Misra, A., 2011, Performance analysis of an Organic Rankine Cycle with superheating under different heat source temperature conditions, *Applied Energy*, 88, 2995-3004.
- Safarian, S., Aramoun, F., 2015, Energy and exergy assessments of modified Organic Rankine Cycles (ORCs), *Energy Reports*, 1, 1-7.
- Saleh, B., 2018, Energy and exergy analysis of an integrated organic Rankine cycle-vapor compression refrigeration system, *Applied Thermal Engineering*, 141, 697-710.
- Sarkar, J., 2018, Generalized pinch point design method of subcritical-supercritical organic Rankine cycle for maximum heat recovery, *Energy*, 143, 141-150.
- Shu, G. et al., 2014, Study of mixtures based on hydrocarbons used in ORC (Organic Rankine Cycle) for engine waste heat recovery, *Energy*, 74, 428-438.
- Su, W. et al., 2018, Thermodynamic performance comparison of Organic Rankine Cycle between zeotropic mixtures and pure fluids under open heat source, *Energy Conversion and Management*, 165, 720-737.
- Sun, J. et al., 2018, Effects of evaporator pinch point temperature difference on thermoeconomic performance of geothermal organic Rankine cycle systems, *Geothermics*, 75, 249-258.
- Şahin, R., Ata, S., Kahraman, A., 2018, Organik Rankine Çevriminde Farklı Tip Akışkanlarda Türbin Giriş Sıcaklığı ve Basıncının Sistem Bileşenlerindeki Tersinmezlik Değerlerine Etkisinin Belirlenmesi, *Ç.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 33(2), 225-236.
- Tchanche, B.F., 2010, Low-Grade Heat Conversion into Power Using Small Scale Organic Rankine Cycles, Doctoral Thesis, Agricultural University Of Athens, Athens
- Topaloğlu, F., 2018, Bulanık Mantık ve Genetik Algoritma Yöntemleri Kullanılarak Parametre Belirleme ve Ölçeklendirme: Rüzgâr Türbini Kurulum Uygulaması, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Tuğral, N., 2019, Cnc Makinesinde Gerçek Mermerlerin Kesme Genişliğinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Taguchi Yöntemiyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon.
- Tumen Ozdil, N.F. et al., 2015, Thermodynamic analysis of an Organic Rankine Cycle (ORC) based on industrial data, *Applied Thermal Engineering*, 91, 43-52.
- Uusitalo, A. et al., 2018, Thermodynamic evaluation on the effect of working fluid type and fluids critical properties on design and performance of Organic Rankine Cycles, *Journal of Cleaner Production*, 188, 253-263.
- Vélez, F. et al., 2012, Comparative study of working fluids for a Rankine cycle operating at low temperature, *Fuel Processing Technology*, 103, 71-77.
- Vélez, F. et al., 2013, Thermodynamic analysis of R134a in an Organic Rankine Cycle for power generation from low temperature sources, *DYNA*, 81 (185), 153-159.

- Wang, H. et al., 2017, Thermodynamic Analysis of Organic Rankine Cycle with Hydrofluoroethers as working fluids, *Energy Procedia*, 105, 1889-1894.
- Wang, J., Diao, M., Yue, K., 2017, Optimization on pinch point temperature difference of ORC system based on AHP-Entropy method, *Energy*, 141, 97-107.
- Wang, X., Liu, X., Zhang, C., 2014, Parametric optimization and range analysis of Organic Rankine Cycle for binary-cycle geothermal plant, *Energy Conversion and Management*, 80, 256-265.
- Woodland B.J., et al., 2020, Considerations on alternative organic Rankine Cycle Configurations for low-grade waste heat recovery, *Energy*.
- Wu, Y-T., et al., 2014, Study on the Characteristics of Expander Power Output Used for Offsetting Pumping Work Consumption in Organic Rankine Cycles, *energies*, 7, 4957-4971.
- Xi, H., et al., 2013, Parametric optimization of regenerative organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm, *Energy*, 473-482.
- Yağlı H., 2014, Baca Gazı Atık Isısı için Organik Rankine Çevrimi Tasarımı ve Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay.
- Yang, J. et al., 2018, Experimental comparison and optimization guidance of R1233zd(E) as a drop-in replacement to R245fa for organic Rankine cycle application, *Applied Thermal Engineering*, 141, 10-19.
- Yıldırım, S., 2011, Ürün Tasarımı Geliştirilmesi: Taguchi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Yılmaz, F., 2013, Güneş Çanaklı Organik Rankine Çevriminin Isparta Şartlarında İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Yılmaz, F., Selbaş, R., Şahin, A-Ş., 2016, Efficiency analysis of organic Rankine cycle with internal heat exchanger using neural network, *Heat Mass Transfer*, 52, 351-359.
- Yu, H., Feng, X., Wang, Y., 2015, A new pinch based method for simultaneous selection of working fluid and operating conditions in an ORC (Organic Rankine Cycle) recovering waste heat, *Energy*, 90, 36-46.
- Zhang, C. et al., 2018, Effects of superheat and internal heat exchanger on thermo-economic performance of organic Rankine cycle based on fluid type and heat sources, *Energy*, 159, 482-495.
- Zhao, J., et al., 2019, How to rapidly predict the performance of ORC: Optimal empirical correlation based on cycle separation, *Energy Conversion and Management*, 188, 86-93.
- Zhi, L-H., et al., 2019, Multiple parametric analysis, optimization and efficiency prediction of transcritical organic Rankine cycle using trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)) for low grade waste heat recovery, *Energy Conversion and Management*, 180, 44-59.

Zhu, Q., et al., 2015, Performance Analysis of Organic Rankine Cycles Using Different Working Fluids, *Thermal Science*, 19, 1, 179-191.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sadık ATA
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Tokat- 17.03.1989
Telefon : +905072930387
e-mail : atasadik@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lisans	: Mersin Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Yenişehir, Mersin	2013
Lisans	: Anadolu Üniversitesi, İşletme, Eskişehir	2014
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Selçuklu, Konya	2015
Doktora	: Necmettin Erbakan Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Meram, Konya	2020

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013-2019	KTO Karatay Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2019-	KTO Karatay Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Termodinamik Analiz, Termodinamik Optimizasyon

YABANCI DİLLER

İngilizce YDS:75

YAYINLAR

- Ata, S., Kahraman, A., Sahin, R., 2019, Thermal Efficiency Evaluation of an Organic Rankine Cycle With n-Pentane as Working Fluid, *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 6(2), 31-38 (Doktora tezinden yapılmıştır).
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2019a, Organik Rankine Çevriminde Kullanılan Saf Akışkanlar ile Zeotropik Akışkanların Termodinamik Performanslarının Karşılaştırılması, 2nd International Conference on Energy Research, Marmaris
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2019b, Saf Akışkan ve Zeotropik Akışkan Kullanılarak Tasarlanan Organik Rankine Çevrimlerinin Ekserji Analizi, 2nd International Conference on Energy Research, Marmaris.
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2019c, Organik Rankine Çevriminde Kullanılan Mevcut Akışkanlar ile Yeni Nesil Organik Akışkan Olarak Adlandırılan R1234ze ve R1234yf'nin Performanslarının Karşılaştırılması, ULIBTK'19 22th Congress of Thermal Sciences and Technology, Kocaeli (Doktora tezinden yapılmıştır).
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2019d, Comparison Of The Performance Of Organic Fluids Of Different Structure In Organic Rankine Cycle For Waste Heat Recovery From Aluminum Production Plants, The International Aluminium-Themed Engineering And Natural Sciences Conference, IATENS-2019, Konya, 201-210 (Doktora tezinden yapılmıştır).
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2019e, Investigation of Exergy Performance of Fluids Used in ORC for Waste Heat Recovery from Aluminum Production Plants, International Conference on Engineering Technologies ICENTE'19, Konya, 389-394 (Doktora tezinden yapılmıştır).
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2018a, The Effect of Source and Turbine Input Temperature on ORC Performance Using Different Dry Fluids, 7th International Conference on Advanced Technologies, ICAT 2018, Antalya, 880-885 (Doktora tezinden yapılmıştır).
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2018b, Energy and exergy analysis of an organic Rankine cycle under different heat source and turbine inlet temperature conditions, *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 5(3), 140-146 (Doktora tezinden yapılmıştır).
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2018c, Determination of the Effect of Evaporation Pressure and Degree of Superheat on the Organic Rankine Cycle Using n-Pentane Fluid, 7th International Conference on Advanced Technologies, ICAT 2018, Antalya, 886-891 (Doktora tezinden yapılmıştır).
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2018d, Analysis of Exergy Destruction Rates in the Components of the ORC System Using N-Pentane Fluid, International Conference on Engineering Technologies ICENTE'18, Konya, 513-518 (Doktora tezinden yapılmıştır).
- Kahraman, A., Sahin, R., Ata, S., 2018e, Çevresel Özellik Yönünden Farklı Özelliklere Sahip R134a ve R152a Akışkanı Kullanılarak Tasarlanan Organik Rankine Çevriminin

Performanslarının Karşılaştırılması, VI. KOP Uluslararası Bölgesel Kalkınma Sempozyumu, Konya, 554-562 (Doktora tezinden yapılmıştır).

Şahin, R., Ata, S., Kahraman, A., 2018, Organik Rankine Çevriminde Farklı Tip Akışkanlarda Türbin Giriş Sıcaklığı ve Basıncının Sistem Bileşenlerindeki Tersinmezlik Değerlerine Etkisinin Belirlenmesi, *Ç.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 33(2), 225-236 (Doktora tezinden yapılmıştır).

Ata, S., Dincer, K., 2017, Fuzzy Logic Modeling of Performance Proton Exchange Membrane Fuel Cell With Spin Method Coated With Carbon Nanotube, *International of Journal of Hydrogen Energy*, 42, 2626-2635 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).

Ata, S., Dincer, K. Rule-Based Mamdani Type Fuzzy Modeling of Performance Proton Exchange Membrane Fuel Cell With Carbon Nano Tube, 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015, Bulgaria, 487-494 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).

Ata, S., Dincer, K., 2015, Experimental Investigation of Performance Anode Side of PEM Fuel Cell With Electrospin Method Coated With Carbon Nanotube, *International Energy Conferences (ICES'15) Proceedings Book*, İstanbul, 389-393 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).

Sahin, R., Ata, S., Dincer, K., 2016, Experimental Investigation of the Effect of Temperature on A PEM Fuel Cell Performance, 18th International Conference on Energy and Sustainable Development, *Conference Proceedings*, Paris, 18 (5), 1881-1885 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).

Ata, S., Dincer, K. "Improving the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Fuzzy Logic", 18th International Conference on Energy and Sustainable Development, *Conference Proceedings*, Paris, 18 (5), 1886-1890 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).

Ata, S., Önal, G., Dincer, K., 2017, HHO Hücre Performansının Bulanık Mantık Yöntemi ile Belirlenmesi, *Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech.*, 5(2), 112-123 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).

Ata, S., Dincer, K., 2015, Anot Tarafı Karbon Nanotüp ile Kaplanmış PEM Yakıt Hücresi Performansının Bulanık Mantık Yöntemiyle Modellenmesi, *Ulusal Hidrojen Teknolojileri Kongresi UHTEK 2015*, İstanbul, 24-31 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).

Ata, S., Dincer, K., Sahin, R., 2016, Spin Yöntemiyle Karbon Nanotüp ile Kaplanmış PEM Yakıt Hücresi Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi, 8. Otomotiv Teknolojileri Kongresi OTEKON 2016, Bursa, 89-94 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).

