



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KATI ATIK KAYNAKLI BİR ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNİN  
GELENEKSEL VE İLERİ EKSERJİ ANALİZİ**

**HAZIRLAYAN**

**HANDE TORLAKLI**

**DANIŞMAN**

**DR. ÖĞR. ÜYESİ ABİD USTAOĞLU**

**BARTIN-2020**



**T.C.**

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KATI ATIK KAYNAKLI BİR ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNİN  
GELENEKSEL VE İLERİ EKSERJİ ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZIRLAYAN**

**Hande TORLAKLI**

**JÜRİ ÜYELERİ**

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Abid USTAOĞLU - Bartın Üniversitesi  
Üye : Doç. Dr. Ertuğrul ERDOĞMUŞ - Bartın Üniversitesi  
Üye : Doç. Dr. Alper ERGÜN - Karabük Üniversitesi

**BARTIN-2020**

## KABUL VE ONAY



## BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Abid USTAOĞLU danışmanlığında hazırlamış olduğum “KATI ATIK KAYNAKLI BİR ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNİN GELENEKSEL VE İLERİ EKSERJİ ANALİZİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

09.12.2020

Hande TORLAKLI

## ÖNSÖZ

“Katı Atık Kaynaklı Bir Organik Rankine Çevriminin Geleneksel ve İleri Ekserji Analizi” isimli bu çalışmanın gerçekleşmesinde, danışmanlığımı üstlenen, araştırma konusunun seçiminden sonuçlandırılmasına kadar sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmalarımı yönlendiren, yardımlarını esirgemeyen değerli hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Abid USTAOĞLU’na saygıyla ve içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Katı atık karakterizasyon çalışmalarının sahada yürütülmesi işlerinde yardımlarını esirgemeyen değerli hocam sayın Doç. Dr. Ertuğrul ERDOĞMUŞ, Yüksek Makine Mühendisi değerli arkadaşım Umut ÖZBEY ve Bartın Belediyesi İtfaiye Müdürlüğü personeline teşekkür ederim. Ayrıca Doç. Dr. Alper ERGÜN’e yardımlarını esirgemediği için teşekkür ederim. Tez çalışmaları sırasında tüm bölüm olanaklarından yararlanmamı sağlayan Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı’na ve isimlerini burada zikredemediğim ama yardımlarını esirgemeyen hocalarıma ve arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma, Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından tam olarak finanse edilen 2018-FEN-A-014 numaralı bir araştırma projesi çerçevesinde geliştirilmiştir. Projeye verilen destek için ayrıca BAP'a teşekkür etmek istiyorum.

Hayatımın her safhasında olduğu gibi tez çalışmam süresince de verdikleri moral ve destek ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme ve dostlarıma sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Hande TORLAKLI

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **KATI ATIK KAYNAKLI BİR ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNİN GELENEKSEL VE İLERİ EKSERJİ ANALİZİ**

**Hande TORLAKLI**

**Bartın Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Abid USTAOĞLU**

**Bartın-2020, sayfa: 196**

Dünya genelinde sanayileşme ve teknolojik gelişmelerin etkisine bağlı olarak nüfusta ve kentleşme hızında yaşanan artış ve hammaddedeki azalma, fosil yakıtlara alternatif enerji kaynaklarına yönelmeyi kaçınılmaz kılmıştır. Bununla birlikte artan tüketim eğilimi ile paralel olarak oluşan atıklar da, miktar ve içerdikleri zararlı maddeler nedeniyle insan ve çevre sağlığını tehdit edecek boyutlara ulaşmıştır. Bu çalışmada, katı atıkların yakılmasıyla elde edilen enerjiyi, ısı ve elektrik üretmek amacıyla kullanan ve Organik Rankine Çevrimine (ORÇ) dayalı kojenerasyon (bileşik ısı-güç) sisteminin farklı çalışma akışkanları için enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle literatürde ORÇ teknolojilerinin özellikleri, çalışma prensibi ve kullanılan komponentlerle ilgili araştırma yapılmıştır. Aynı zamanda sistemin uygulama alanları, ısıl enerji kaynakları ve çalışma akışkanı seçim kriterleri incelenmiştir.

Bartın ili için farklı kalorifik değerlere sahip kentsel atıkların karakterizasyon yöntemiyle değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2018 yılı belediye atık istatistikleri Bartın ili için mevcut verilere entegre edilmiş ve atıkların yakılmasıyla sistem çalışma akışkanına aktarılacak ısıl enerji bulunmuştur. Engineering Equation Solver (EES) programında oluşturulan ORÇ/CHP sisteminin matematiksel modelinde, kentsel katı atığın (KKA) yakılması sonucunda elde edilen buharın sadece

elektrik üretiminde ya da elektrik ve ısıtma amaçlı kullanılması durumunda üretilen enerji miktarları hesaplanmıştır. Sistem için optimum çalışma akışkanını belirlemek amacıyla her bir bileşen için yakma sonucu oluşan kütle, enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Analizlerde, kuru, izentropik ve ıslak özellikteki farklı organik akışkanlardan (Izopentan, R141b, R123, Metanol, n-pentan, n-oktan, n-heptan, R718) elde edilen termodinamik değerler kullanılmıştır. Oluşturan matematiksel modelin enerji ve ekserji denge denklemlerinde, termodinamiğin birinci ve ikinci yasasından yararlanılmıştır. Termal ve ekserji verimleri, net iş çıktısı ve ekserji yok oluş oranları, buharlaştırıcı basıncının, ara basıncın ve yoğuşturucu basıncının fonksiyonu olarak her bir akışkan için belirlenen üç farklı enerji üretim projeksiyonu ve çalışma koşullarında analitik olarak incelenmiş olup Origin programı kullanılarak grafiksel karşılaştırma yapılmıştır. Sistemin gerçek geliştirilme potansiyeli ile komponentlerin birbirleriyle etkileşimlerini belirlemek amacıyla geleneksel ekserji analiziyle birlikte ileri ekserji analizi uygulanmıştır. İleri ekserji analizlerinin gerçekleştirilmesinde çalışma akışkanı olarak R141b akışkanı seçilmiş ve üç çalışma durumu için komponentlerde ve sistemde meydana gelen ekserji yıkımının önlenebilir ile kaçınılmaz ve içsel ile dışsal kısımları belirlenmiştir. Sistemin 1.durumda ORÇ termal ve ekserji verimi sırasıyla %15.12 ve %33.82 olarak hesaplanmıştır. Sistemin 2.durumda ORÇ, proses ve CHP termal verimleri sırasıyla %10.98, %59.92 ve %70.9 olarak hesaplanmıştır. ORÇ, proses ve CHP ekserji verimleri ise %24.56, %12.3 ve %36.86 değerini almıştır.3.durumda ise ORÇ, proses ve CHP termal verimleri sırasıyla %9.361, %70.89 ve %80.25 değerini almıştır. ORÇ, proses ve CHP ekserji verimleri, ise sırasıyla %20.94, %16.83 ve %37.77 değerindedir.

**Anahtar Kelimeler:** Organik rankine çevrimi; kojenerasyon; enerji analizi; ekserji analizi; ileri ekserji analizi; organik akışkan; biyokütle enerjisi; kentsel katı atık.

**Bilim Alanı Kodu:** 91436

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **CONVENTIONAL AND ADVANCED EXERGY ANALYSIS OF A SOLID WASTE POWERED ORGANIC RANKINE CYCLE**

**Hande TORLAKLI**

**Bartın University**

**Graduate School**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor: Assist. Prof. Abid USTAOĞLU**

**Bartın-2020, pp: 196**

The increase in population and urbanization rate and the decrease in raw-material due to the effects of industrialization and technological developments throughout the world made it inevitable to turn to alternative energy sources to fossil-fuels. However, wastes which are formed in parallel with the increasing propensity to consume, have reached a level threatening human and environmental health due to their quantity and harmful-substances. In this study, energy and exergy analysis was carried out for different working fluids of the cogeneration (Combined Heat and Power; CHP) system based on the Organic-Rankine-Cycle (ORC), which uses the energy obtained by burning solid wastes to generate heat and electricity. First of all, a research has been made on the characteristics, working principles and components of ORC-technologies in the literature. At the same time, application areas of the system, thermal energy sources and working fluid selection criteria were examined.

Municipal wastes with different calorific values for Bartın province were evaluated by characterization method. Results obtained TUIK 2018 municipal waste statistics have been integrated into existing data for Bartın province and thermal energy has been found to be transferred to the system working fluid by incineration of wastes. In the mathematical model of ORC/CHP system created in the Engineering-Equation-Solver (EES) program, the amount of energy produced when the steam obtained as a result of the incinerating of



municipal-solid-waste (MSW) is used only for electricity generation or for electricity and heating purposes is calculated. In order to determine the optimum working fluid for the system, mass, energy, and exergy analyzes resulting from combustion were performed for each component. Thermodynamic values obtained from different organic fluids(Isopentane, R141b, R123, Methanol, n-pentane, n-octane, n-heptane, R718) with dry, isentropic and wet properties were used in the analysis. In the energy and exergy balance equations of mathematical model, the first and second laws of thermodynamics are used. Thermal and exergy efficiencies, net work output and exergy-destruction-rates were analyzed analytically in three different energy production projections and operating conditions determined for each fluid as a function of evaporator pressure, interval pressure and condenser pressure, and graphical comparison was made using the Origin program. In order to determine the actual development potential of the system and the interactions of components with each other, advanced exergy analysis was applied together with conventional exergy analysis. In the performance of advanced exergy analysis, R141b was chosen as the working fluid and the exergy destruction occurring in the components and the system for three operating conditions was determined to be avoidable with unavoidable and the endogenous with exogenous parts. In the first case, ORC thermal and exergy efficiency were calculated as 15.12% and 33.82%, respectively. In the second case, ORC, process and CHP thermal efficiencies of the system were calculated as 10.98%, 59.92% and 70.9%, respectively. ORC, process and CHP exergy efficiencies were 24.56%, 12.3% and 36.86%. In the third case of the system, ORC, process and CHP thermal efficiencies were 9.361%, 70.89% and 80.25%, respectively. ORC, process and CHP exergy efficiencies were 20.94%, 16.83% and 37.77% respectively.

**Keywords:** Organic rankine cycle; cogeneration; energy analysis; exergy analysis; advanced exergy analysis; organic fluid; biomass energy; municipal solid waste.

**Scientific Field Code:** 91436

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

KABUL VE ONAY .....	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xviii
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 Çalışmanın Amacı .....	1
1.2 Enerji.....	2
1.2.1 Genel Enerji Problemleri.....	6
1.2.2 Enerjide Sürdürülebilirlik ve Verim.....	7
1.2.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları .....	10
1.3 Literatür Özeti.....	16
BÖLÜM 2 BİYOKÜTLE ENERJİSİ .....	24
2.1 Biyokütle Enerjisi Özellikleri ve Kullanımı .....	24
2.1.1 Biyokütle.....	25
2.1.2 Biyokütle Kaynakları .....	26
2.2 Atık .....	27
2.2.1 Katı Atık.....	28
2.2.2 Katı Atıkların Özellikleri .....	29
2.2.2.1 Fiziksel Özellikler .....	30
2.2.2.2 Kimyasal Özellikler.....	32
2.2.2.3 Biyolojik Özellikler.....	37

2.2.3 Katı Atık Üretimi .....	38
2.2.4 Katı Atık Karakterizasyonu Analiz Metodu (Madde Grupları Analizi) .....	41
2.2.5 Katı Atık Yönetimi.....	44
2.2.5.1 Atık Yönetimi Hiyerarşisi .....	45
2.2.5.2 Entegre Katı Atık Yönetimi .....	48
2.2.6 Katı Atık Bertaraf Etme Yöntemleri .....	49
2.2.6.1 Depolama.....	50
2.2.6.2 Geri Kazanım .....	50
2.2.6.3 Biyolojik Sistemler.....	51
2.2.6.4 Termal Sistemler .....	53
2.2.7 Yakma .....	55
<b>BÖLÜM 3 TERMODİNAMİK SİSTEMLER .....</b>	<b>59</b>
3.1 Rankine Çevrimi .....	59
3.2 Organik Rankine Çevrimi .....	61
3.2.1 Organik Rankine Çevrimi Uygulamaları .....	65
3.2.2 Organik Rankine Çevrimi Çalışma Akışkanları .....	67
3.2.2.1 Termodinamik ve Fiziksel Özellikler.....	68
3.2.2.2 Tehlike Seviyesi, Güvenirlilik ve Çevresel Etkiler .....	68
3.2.2.3 Korozyon Etkileri.....	70
3.2.2.4 Temin Edilebilirlik ve Fiyat .....	71
3.2.2.5 Akışkan Tipi.....	71
3.3 Kojenerasyon (Bileşik Isı-Güç Üretimi) Sistemleri.....	72
<b>BÖLÜM 4 MATERYAL VE METOT.....</b>	<b>76</b>
4.1 Kojeneratif Organik Rankine Çevrimi.....	76
4.2 Tasarım Parametreleri.....	77
4.2.1 Karakterizasyon.....	78
4.2.1.1 Atıkların Kuru Ağırlıklarının Hesaplanması.....	81
4.2.1.2 Atıkların Kalorifik Değerlerinin Hesaplanması .....	81
4.2.2 Organik Rankine Çevrimi Çalışma Akışkanı Seçimi .....	82
4.3 Termodinamik Formüller.....	83

4.3.1 Enerji ve Ekserji Analizleri .....	83
4.3.2 Denge Denklemleri .....	86
4.3.3 İleri Ekserji Analizi .....	91
<b>BÖLÜM 5 BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>94</b>
5.1 1. Durum Enerji ve Ekserji Analizleri .....	94
5.1.1 Buharlaştırıcı Basınç Değişiminin Etkisi .....	94
5.1.2 Yoğuşturucu Basınç Değişiminin Etkisi .....	100
5.2 2. Durum Enerji ve Ekserji Analizleri .....	104
5.2.1 Buharlaştırıcı Basınç Değişiminin Etkisi .....	104
5.2.2 Ara Basınç Değişiminin Etkisi .....	112
5.2.3 Yoğuşturucu Basınç Değişiminin Etkisi .....	120
5.3 3. Durum Enerji ve Ekserji Analizleri .....	126
5.3.1 Buharlaştırıcı Basınç Değişiminin Etkisi .....	126
5.3.2 Ara Basınç Değişiminin Etkisi .....	135
5.3.3 Yoğuşturucu Basınç Değişiminin Etkisi .....	143
<b>BÖLÜM 6 SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>166</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>180</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Enerji kaynaklarının özelliklerine göre gruplandırılması. ....	4
1.2: Enerji kaynaklarının kullanımı, çevresel sonuçları ve sürdürülebilirlik dönüşümleri.....	8
1.3: Yenilenebilir enerji kaynakları.....	11
1.4: 2015 yılı için sektörlere göre yenilenebilir enerjinin küresel toplam nihai enerji tüketimindeki payı.....	14
1.5: 2016 yılı için toplam nihai enerji tüketiminin tahmini yenilenebilir payı.....	15
1.6: 2016 -2017 sonu için küresel elektrik üretiminin tahmini yenilenebilir enerji payı.....	15
2.1: 2016 yılı için sektörlerdeki genel ve son kullanıma göre toplam nihai enerji tüketiminde biyoenerjinin payı. ....	25
2.2: Biyokütle kaynakları. ....	26
2.3: Katı atık türleri. ....	28
2.4: Dünya'nın farklı bölgeleri için küresel atık üretimi.....	39
2.5: Dünya genelinde oluşan KKA bileşenlerinin miktarları ve oranları.....	40
2.6: Ülkelerin düşük (a), alt orta (b), üst orta (c), yüksek (d) gelir seviyesine göre KKA kompozisyonu. ....	41
2.7: Katı atık yönetimi sisteminin bileşenleri.....	45
2.8: Atık yönetim hiyerarşisi.....	46
2.9: EKAY bileşenleri ve zamansal gelişimleri .....	49
2.10: Yakma prosesi akım şeması. ....	58
3.1: Basit ideal Rankine Çevrim şeması ve $T-s$ diyagramı .....	60
3.2: Gerçek buharlı güç çevrimi ile ideal Rankine çevrimi arasındaki fark (a), pompa ve türbinde oluşan tersinmezliklerin ideal Rankine çevrimine etkisi (b).....	61
3.3: Basit ORÇ sistemi ve $T-s$ diyagramı .....	62
3.4: Bir ORÇ makinesinin termodinamik sınırları .....	65
3.5: ORÇ sistemi uygulamaları. ....	66
3.6: Enerji kaynağının ortalama sıcaklığı ve sistemin güç kapasitesi açısından ORÇ'nin buharlı güç sistemlerine karşı mevcut ve gelecekteki uygulama alanları.....	67
3.7: $T-s$ diyagramının eğime göre akışkan tiplerinin gösterimi. ....	72

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
3.8: Buhar türbinli CHP sistemlerindeki enerji akışı. ....	75
4.1: Kojeneratif ORÇ sisteminin şematik gösterimi. ....	77
4.2: 1.durum için ORÇ/CHP sisteminin akış şeması.....	86
4.3: 2.durum için ORÇ/CHP sisteminin akış şeması. ....	88
4.4: 3.durum için ORÇ/CHP sisteminin akış şeması. ....	90
5.1: 1.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı. ....	95
5.2: 1.durumda farklı organik çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı. ....	96
5.3: 1.durumda R123 için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı. ....	97
5.4: 1.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP sisteminin termal verimliliği. ....	98
5.5: 1.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP sisteminin ekserji verimliliği.....	99
5.6: 1.durum için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.....	101
5.7: 1.durumda farklı organik çalışma akışkanları için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı. ....	102
5.8: 1.durumda R123 için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı. ....	102
5.9: 1.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP sisteminin termal verimliliği. ....	103
5.10: 1.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP sisteminin ekserji verimliliği.....	104
5.11: 2.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı. ....	105
5.12: 2.durumda farklı organik çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı. ....	106
5.13: 2.durumda R123 için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı. ....	106
5.14: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.....	107

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
5.15: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri. ....	109
5.16: 2.durum için ara basıncın bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.....	112
5.17: 2.durumda farklı organik çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı. ....	113
5.18: 2.durumda R123 için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı. ....	114
5.19: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.....	115
5.20: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri. ....	117
5.21: 2.durum için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.....	120
5.22: 2.durumda farklı organik çalışma akışkanları için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı. ....	121
5.23: 2.durumda R123 için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı. ....	121
5.24: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğunlaştırıcı basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.....	122
5.25: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri. ....	124
5.26: 3.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı. ....	127
5.27: 3.durumda farklı organik çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı. ....	128
5.28: 3.durumda R123 için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı. ....	129
5.29: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.....	129
5.30: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri. ....	132
5.31: 3.durum için ara basıncın bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.....	135

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
5.32: 3.durumda farklı organik çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı. ....	136
5.33: 3.durumda R123 için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı. ....	137
5.34: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.....	138
5.35: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri. ....	141
5.36: 3.durum için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.....	144
5.37: 3.durumda farklı organik çalışma akışkanları için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı. ....	144
5.38: 3.durumda R123 için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı. ....	145
5.39: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.....	146
5.40: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri. ....	148
5.41: 1.durumda önlenebilir ve kaçınılmaz ekserji yıkımlarının bileşenlerdeki ve sistemdeki yüzdesi (R141b). ....	154
5.42: 1.durumda bileşenlerin toplam (a), kaçınılmaz (b), önlenebilir (c) ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b). ....	155
5.43: 1.durumda bileşenlerin içsel ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b). ....	156
5.44: 2.durumda bileşenlerin toplam (a), kaçınılmaz (b) ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b). ....	159
5.45: 2.durumda bileşenlerin içsel ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b). ....	160
5.46: 3.durumda bileşenlerin toplam (a), kaçınılmaz (b) ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b). ....	164
5.47: 3.durumda bileşenlerin içsel ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b). ....	165



## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
1.1: Enerji formlarının birbirine dönüşümü. ....	3
1.2: Enerji sistemi bileşenleri ve enerji taşıyıcıları. ....	5
1.3: Dünyadaki birincil enerji kaynaklarının tüketim oranları (Mtep). ....	5
1.4: Elektrik üretiminde kullanılan kaynakların verim ve etkinlikleri. ....	9
1.5: 2020 yılı için yenilebilir enerji kaynakları tahmini oranları. ....	16
2.1: Biyokütle kaynakları için kullanılan çevrim yöntemleri ve bu yöntemler ile üretilecek yakıtlar ve uygulama alanları. ....	27
2.2: KKA bileşenlerinin nem içeriğine dair tipik veriler. ....	31
2.3: Katı atık bileşenleri ve karışımları için özgül ağırlıklarına ait tipik değerler. ....	31
2.4: Katı atıkların tipik tahmini analiz değerleri. ....	34
2.5: Katı atık içerisinde bulunan yanıcı bileşenlerin elementel analiziyle ilgili tipik veriler. ....	35
2.6: KKA inert artıklarına ve enerji içeriklerine üzerine tipik veriler. ....	37
2.7: Ülkelerin gelir seviyesine göre 2025 için KKA üretim tahminleri. ....	38
2.8: Katı atık bileşenleri (Madde Grupları). ....	43
2.9: Atık bileşenleri ile yanma ürünleri. ....	56
3.1: Çevrimler ve istenen akışkan özellikleri. ....	67
3.2: Soğutucu akışkanların güvenlik sınıflandırılması. ....	69
3.3: CHP sistemlerinde kullanılan yakıt türleri. ....	73
4.1: ORÇ sisteminin çalışma şartları. ....	78
4.2: Katı atık karakterizasyonun gerçekleştirildiği yerleşimlerin analiz sonuçları. ....	80
4.3: Atık bileşenlerinin kuru ağırlık miktarı (yıllık). ....	81
4.4: Atık bileşenlerinin yıllık miktarlarının ısı değerleri. ....	82
4.5: Seçilen çalışma akışkanlarının özellikleri. ....	83
4.6: Kojeneratif ORÇ sistemi 1. çalışma durumu için kütle ve enerji denge denklemleri. ....	87
4.7: Kojeneratif ORÇ sistemi 1. çalışma durumu için ekserji ve entropi denge denklemleri. ....	87
4.8: Kojeneratif ORÇ sistemi 2. çalışma durumu için kütle ve enerji denge denklemleri. ....	88

## TABLolar DİZİNİ (devam ediyor)

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
<b>4.9:</b> Kojeneratif ORÇ sistemi 2.çalışma durumu için ekserji ve entropi denge denklemleri.....	89
<b>4.10:</b> Kojeneratif ORÇ sistemi 3.çalışma durumu için kütle ve enerji denge denklemleri.....	90
<b>4.11:</b> Kojeneratif ORÇ sistemi 3.çalışma durumu için ekserji ve entropi denge denklemleri.....	91
<b>5.1:</b> Gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşullarda ORÇ/CHP için çevrim değerleri. ....	150
<b>5.2:</b> 1.durum için gerçek koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikler ve kütle akış hızları.....	151
<b>5.3:</b> 1.durum için kaçınılmaz koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikleri ve kütle akış hızları.....	151
<b>5.4:</b> 1.durum için ORÇ/CHP sisteminin gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşullardaki güç ve verimleri.....	152
<b>5.5:</b> 1.durum için ORÇ/CHP sisteminin ileri ekserji analizi sonuçları (kW).....	153
<b>5.6:</b> 2.durum için gerçek koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikler ve kütle akış hızları.....	157
<b>5.7:</b> 2.durum için kaçınılmaz koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikler ve kütle akış hızları.....	157
<b>5.8:</b> 2.durum için ORÇ/CHP sisteminin gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşullardaki güç ve verimleri.....	158
<b>5.9:</b> 2.durum için ORÇ/CHP sisteminin ileri ekserji analizi sonuçları (kW).....	158
<b>5.10:</b> 3.durum için gerçek koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikler ve kütle akış hızları.....	161
<b>5.11:</b> 3.durum için kaçınılmaz koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikler ve kütle akış hızları.....	162
<b>5.12:</b> 3.durum için ORÇ/CHP sisteminin gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşullardaki güç ve verimleri.....	163
<b>5.13:</b> 3.durum için ORÇ/CHP sisteminin ileri ekserji analizi sonuçları (kW).....	163

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$C$	: Karbon
$CO_2$	: Karbondioksit
$c_p$	: Sabit Basıncıta Özgül Isı (kJ/kg.K)
$d$	: Atığın 105°C en az 24 saat Kurutulduktan Sonraki Ağırlığı (g)
$e_x$	: Akış Ekserjisi (kJ/kg)
$\dot{E}_x$	: Ekserji (kW)
$\dot{E}_{x,Q}$	: Isı ile Ekserji Geçişi (kW)
$\dot{E}_{x,W}$	: İş ile Ekserji Geçişi (kW)
$\dot{E}_{x,yokolş}$	: Birim Zamanda Toplam Ekserji Yok Oluşu (kW)
$\dot{E}_D$	: Birim Zamanda Toplam Ekserji Yıkımı (kW)
$\dot{E}_F$	: Yakıt Ekserjisinin (kW)
$\dot{E}_P$	: Ürün Ekserjisi (kW)
$\dot{E}_D^{\text{ÖN}}$	: Önlenebilir Ekserji Yıkımı (kW)
$\dot{E}_D^{\text{KAÇ}}$	: Kaçınılamaz Ekserji Yıkımı (kW)
$\dot{E}_D^{\text{İÇ}}$	: İçsel Ekserji Yıkımı (kW)
$\dot{E}_D^{\text{DIŞ}}$	: Dışsal Ekserji Yıkım (kW)
$F$	: Yakıt
$h$	: Özgül Entalpi (kJ/kg)
$H$	: Toplam Entalpi (kJ)
$H$	: Hidrojen
$H$	: Atığın Isıl Değeri (kJ/kg)
$HCl$	: Hidrojen Klorür
$HF$	: Hidrojen Florür
$H_2O$	: Su
$I$	: İnorganik
$k$	: Çevrim Komponent Numarası
$ke$	: Özgül Kinetik Enerji (kJ/kg)
$\dot{m}$	: Kütleli Debi (kg/s)
$M$	: Nem İçeriği (%)
$M$	: Moleküler Kütle (kg/kmol)
$N$	: Azot

$\text{NO}_2$	: Azot Dioksit
$O$	: Oksijen
$P$	: Basınç (kPa)
$P_{\text{cr}}$	: Kritik Basınç (kPa)
$p_e$	: Özgül Potansiyel Enerji (kJ/kg)
$q$	: Birim Kütle İçin Isı Geçişi (kJ/kg)
$Q$	: Toplam Isı Geçişi (kJ)
$\dot{Q}$	: Birim Zamanda Isı Geçişi (kW)
$s$	: Özgül Entropi (kJ/kg.K)
$S$	: Toplam Entropi (kJ/K)
$S_{\text{üretim}}$	: Toplam Entropi Üretimi (kJ/K)
$S$	: Kükürt
$\text{SO}_2$	: Kükürt Dioksit
$T$	: Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ , K)
$T_{\text{cr}}$	: Kritik Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_0$	: Ortam (Ölü Nokta) Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ , K)
$w$	: Atığın İlk Ağırlığı (g)
$w$	: Birim Kütle İçin İş (kJ/kg)
$W$	: Toplam İş (kJ)
$\dot{W}$	: Güç (kW)
$\eta$	: Verim
$O$	: Ölü Nokta
$I$	: Birinci Yasa
$II$	: İkinci Yasa
$\varepsilon$	: Ekserji Verimliliği
$\zeta$	: Doymuş Buhar Eğrisinin Eğimi
$\rho$	: Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )
$\Delta$	: Değişim Miktarı
1, 2, 3...	: Durum Noktaları

## KISALTMALAR

ANSI	: Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
ASHRAE	: Amerikan Isıtma Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği
A34GG	: ANSI/ASHRAE 34 Güvenlik Sınıflandırması
ASTM	: Amerikan Malzeme ve Test Derneği
ALT	: Atmosferik Ömür(yıl)
buh	: Buharlaştırıcı
B-ORÇ	: Basit Organik Rankine Çevrimi
CHP	: Bileşik Isı-Güç
cr	: Kritik Nokta
ç	: Çıkış Durum Endeksi
DIŞ	: Dışsal
EES	: Engineering Equation Solver
EKAY	: Entegre Katı Atık Yönetimi
egz	: Egzoz
F	: Yakıt
g	: Giriş Durum Endeksi
GCV	: Brüt Kalorifik Değer (kJ/kg)
GSYİH	: Gayrisafi Yurtiçi Hasıla
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli (yıl)
HFC	: Hidroflorokarbon
HCFC	: Hidrokloroflorokarbon
HHV	: Üst Kalorifik Değer (kJ/kg)
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
İÇ	: İçsel
KAÇ	: Kaçınılamaz
KAY	: Katı Atık Yönetimi
KO	: Karışma Odası
KV	: Kısılma Vanası
LCA	: Hayat Boyu Değerlendirme
LFL	: Alt Yanma Limiti (kg/m <sup>3</sup> )
LHV	: Alt Kalorifik Değer (kJ/kg)

LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
Mtep	: Milyon Ton Eşdeğeri Petrol
MSW	: Kentsel Katı Atık
NBP	: Normal Kaynama Noktası (°C)
NCV	: Net Kalorifik Değer (kJ/kg)
oa	: Organik Akışkan
OECD	: Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
OEL	: Mesleki Maruziyet Limiti (PPMv)
ODP	: Ozon Tüketme Potansiyeli
OTEC	: Okyanus Termal Enerji Dönüşümü
ORÇ	: Organik Rankine Çevrimi
ÖN	: Önlenebilir
P	: Ürün
pomp	: Pompa
PV	: Fotovoltaik
R-ORÇ	: Rejeneratif Organik Rankine Çevrimi
SASA	: Sürekli Akışlı Açık Sistem
S-ORÇ	: Standart ORÇ
SMR	: Buharlı Rankine
SS	: Soğutma Suyu
TFEC	: Toplam Nihai Enerji Tüketimi
türb	: Türbin
TEWI	: Toplam Eşdeğer Isınma Etkisi
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı
yoğ	: yoğuşturucu

# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

### 1.1 Çalışmanın Amacı

Günümüzde, Dünya nüfusundaki hızla artışın ve teknolojideki yaşanan gelişmelerin beraberinde gerçekleşen enerji tüketimindeki artış, enerjiyi karşımıza çıkan önemli bir problem haline getirmiştir. Birincil enerji kaynaklarının bilinen rezervleri, sürekli artış gösteren hammadde ve enerjiye gereksinimin ancak belli bir miktarını karşılamaktadır. Var olan yakıtların çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri, sera etkisinin neden olduğu küresel ısınma sorunu, yakıt fiyatlarındaki artış, endüstrileşmeye bağlı olarak ulusal kaynakların değerlendirilme isteği gibi nedenler alternatif enerji kaynakları bulmayı gerekli kılmaktadır. Bu problemlerin çözülmesine yönelik güneş, rüzgâr ve biyokütle enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili çalışmalar son yıllarda büyük önem kazanmaya başlamıştır.

Biyokütle enerjisi, artan enerji tüketiminin, çevreye verilen olumsuz etkilerin azaltılarak, sürdürülebilir şekilde karşılanmasında kullanılacak kaynaklardan birisidir. Sahip olduğu yüksek potansiyel, farklı ekonomik, çevresel ve sosyal avantajlar dikkate alındığında, biyokütle enerjisinin geleceğin önemli yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer aldığı düşünülmektedir (Karayılmazlar vd., 2011). Biyokütle enerji teknolojisi kapsamında uygulanan ısıl işlemler arasında yanma, kullanılan en yaygın yöntem olarak bilinmektedir. Yanma işlemiyle biyokütlenin içerdiği kimyasal enerjinin ısı, mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürülmesi sağlanmaktadır/mümkündür (Taşar, 2011). Biyokütleden elektrik enerjisi üretimi organik maddelerin doğrudan yakılması ile açığa çıkan ısıdan elde edilen buharın türbini döndürerek jeneratörlerden elektrik üretilmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir (Torunoğlu Gedik, 2015). CHP, bileşik ısı ve güç üretimi olup, biyokütle, biyogaz ve doğalgaz gibi tek bir yakıt kaynağı kullanarak, elektrik ve ısı enerjisinin eş zamanlı üretimini sağlayan sistemlerdir (Pravadalıoğlu, 2012). CHP sistemlerinin, yüksek verimlilik elde edilmesi ve yanma sonrasında oluşan atık emisyonlarının minimum düzeye indirilmesi gibi klasik sistemlere göre birçok avantajları vardır (Yüksel ve Goza, 2014). Çalışmada biyokütlenin kullanılabilirliğinin

değerlendirilmesi açısından Bartın ilinde oluşan kentsel atığın enerji üretim potansiyeli teorik olarak hesaplanmış ve katı atıkların yakılmasıyla enerji üretimi sağlayan bir ORÇ/CHP tesisinin, enerji üretim projeksiyonları üzerinden ekonomik değerlendirmesi yapılmıştır. Termodinamik sistemler, kurulum maliyeti oldukça yüksek olan teknolojilerdir. Bu nedenle termodinamik sistemlerde yapılacak performans optimizasyonu büyük önem taşımaktadır. Basınç ve sıcaklık gibi parametrelerin net çıkış gücüne etkisinin hesaplanması, sistem verimi hakkında değerlendirme yapılmasını sağlar.

Tezin amacı, çalışma parametreleri olan buharlaştırıcı basıncının, ara basıncın ve yoğuşturucu basıncının farklı akışkanlar kullanan ORÇ sistemlerinde, net çıkış gücüne, ekserji yok oluş oranlarına, termal ve ekserji verimlerine etkisinin incelenmesidir. Böylece sistem veriminde oluşabilecek kayıpların minimuma indirilmesine ve buna bağlı olarak da performans iyileştirmesine katkı sağlanacaktır. Sistemin gerçek geliştirilme potansiyeli ile komponentlerin birbirleriyle etkileşimlerini belirlemek amacıyla geleneksel ekserji analiziyle birlikte ileri ekserji analizi uygulanmıştır. Bu sayede yapılacak optimizasyon çalışmaları için temel oluşturulacaktır. Bunun yanı sıra, ısı kaynağı olarak katı atıkları kullanan ORÇ sisteminin temel alınması hem çevre kirliliğinin azaltılması, hem de temiz enerji üretiminin gerçekleştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

## **1.2 Enerji**

Eski çağlardan beri, insanlar yaşamlarını devam ettirmek ve kolaylaştırmak amacıyla, enerjinin farklı türlerinden yararlanmışlardır. Enerji tanımı bilim dallarına göre değişiklik gösterse de, herhangi bir eyleme neden olma ya da eylemi yapabilme yeteneği olarak genel bir şekilde tanımlanabilir (Yürümezoğlu vd., 2009). Teknolojik gelişmelerin beraberinde getirdiği yaşam standartlarındaki değişimler, insanların enerjiye olan ihtiyacını her geçen gün arttırmaktadır (Yılmaz, 2012). İnsanların günlük yaşantıdaki faaliyetlerinde önemli bir gereksinim haline gelen ve ülkelerin sosyo-ekonomik gelişmişliğinin bir ölçütü olan enerjinin, ekolojiye zarar vermeden yeterli miktarda üretiminin sağlanmasının yanı sıra üretilen enerjinin verimli bir şekilde kullanılması toplumların üzerinde durması gereken bir konu haline gelmiştir (Bozkurt, 2008). Günlük yaşamın her aşamasında kullanım alanına sahip olan enerji; mekanik (kinetik ve potansiyel), termal (ısı), kimyasal, nükleer, güneş, rüzgar, hidrolik, jeotermal ve elektrik enerjisi gibi farklı formlarda karşımıza çıkmaktadır (Koç ve Şenel, 2013).

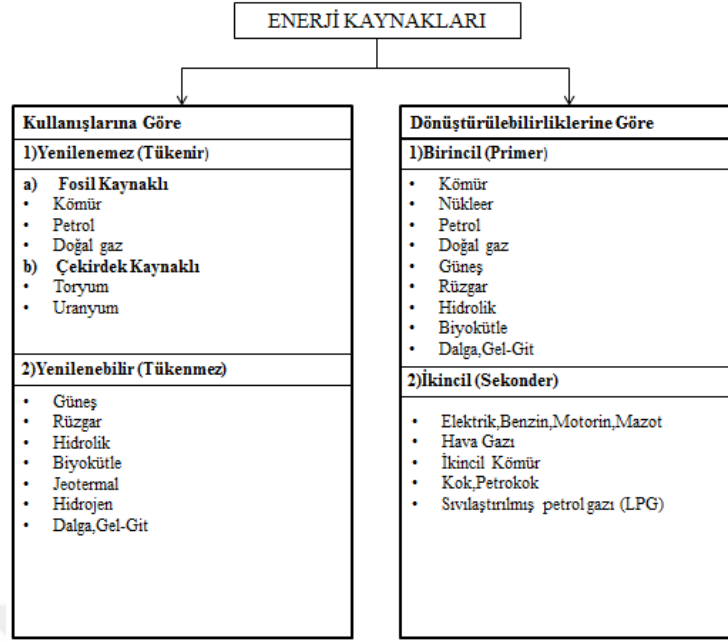


Doğrudan ölçümleyebilmek mümkün olmasa da enerji, bir sistemin fiziksel olarak değiştirilebilmesi için gerekli iş miktarının ölçülmesi yoluyla veya kullanılan enerji türüne göre farklı hesapların yapılması ile belirlenebilir (Yılmaz, 2012). Enerjinin bir formdan başka bir forma dönüşümü olabileceği gibi farklı işlemler ile bir enerji türünün birden fazla enerji formuna dönüşümü gerçekleştirilebilmektedir (Şahin, 2016). Çeşitli enerji formlarının birbirine dönüşümü Tablo 1.1’ de gösterilmektedir.

Tablo 1.1: Enerji formlarının birbirine dönüşümü (Şahin, 2016).

Başlangıçtaki Enerji Formu	Dönüştüğü Enerji Formu				
	Termal Enerji	Elektrik Enerjisi	Mekanik Enerji	Kimyasal Enerji	Radyant Enerji
Elektrik Enerjisi	Rezistans, ısı Pompası		Elektrik Motoru	Elektroliz, pil şarjı	Lamba, lazer
Termal Enerji	Konvektör, radyatör, ısı borusu	Termoelektrik jeneratörler	Termodinamik motorlar		
Nükleer Enerji	Reaktörler				
Mekanik Enerji	Sürtünme, karıştırma	Elektrik Jeneratörü	Türbinler		
Kimyasal Enerji	Kazanlar, boylerler	Yakıt Pilleri			
Radyant Enerji	Absorbe Yüzeyler	Güneş pilleri		Fotoliz	

Doğrudan veya bazı dönüştürme işlemleri ile enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılacak enerji kaynakları Şekil 1.1’de gösterildiği gibi kullanışlarına göre yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak dönüştürülebilirliklerine göre ise birincil (primer) ve ikincil (sekonder) enerji kaynakları şeklinde sınıflandırılmaktadır.



Şekil 1.1: Enerji kaynaklarının özelliklerine göre gruplandırılması (Koç ve Şenel,2013).

Birincil enerji, dönüşüme uğramadan doğrudan kullanılabilen enerji olarak tanımlanmaktadır. Birincil enerji kaynakları, kömür, petrol, doğal gaz, nükleer, güneş biyokütle, hidrolik, dalga-gelgit ve rüzgârdır. Birincil enerjinin çeşitli yöntemler ile dönüştürülmesi sonucunda elde edilen enerji ikincil enerji olarak ifade edilmektedir. Benzin, elektrik, motorin, mazot, kok kömürü, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) gibi kaynaklar bu tip enerji kaynaklarını oluşturmaktadır. (Koç ve Şenel, 2013).

Enerji kaynaklarının yenilenebilirlik veya tükenebilirlik özellikleri göz önünde bulundurularak yapılan sınıflandırmaya göre, doğal çevrim süreci içerisinde kullanılmasına rağmen azalmayan ve aynı şekilde kalan, enerji kaynakları yenilenebilir enerji kaynakları; kullanıldığı zaman kendini yenileyemeyen, tükenir belirli rezerve sahip enerji kaynakları ise yenilenemez enerji kaynakları olarak tanımlanmaktadır. Yenilenemeyen enerji kaynakları kendi arasında fosil kaynaklı (kömür, doğal gaz ve petrol) çekirdek kaynaklı (uranyum ve toryum) olarak ikiye ayrılmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidrolik, biyokütle, jeotermal, dalga gelgit, hidrojen (H<sub>2</sub>) birer yenilenebilir enerji kaynaklarını oluşturmaktadır (Koç vd., 2018). Enerji sistemi bileşenleri ve enerji taşıyıcıları Tablo 1.2 'de görülmektedir.

Tablo 1.2: Enerji sistemi bileşenleri ve enerji taşıyıcıları (Emer, 2018).

Birincil Enerji Kaynağı		Enerji Sistemi Bileşeni	Enerji taşıyıcıları	
Yenilenemez kaynaklar	Fosil	Petrol (ya da ham petrol)	Petrol rafinerisi	Fuel oil
		Kömür (ya da doğal gaz)	Fosil yakıt elektrik santrali	Entalpi, mekanik iş veya elektrik
	Çekirdek	Doğal uranyum	Nükleer elektrik santrali	Elektrik
		Doğal toryum	Toryum üretme reaktörü	Entalpi veya elektrik
Yenilebilir kaynaklar	Güneş enerjisi	Fotovoltaik elektrik santrali	Elektrik	
		Güneş enerjisi kulesi, güneş ocağı	Entalpi	
	Rüzgar enerjisi	Rüzgar türbini	Mekanik iş veya elektrik	
	Hidrolik ve dalga enerjisi	Hidroelektrik santrali, dalga türbini, gelgit elektrik santrali	Mekanik iş veya elektrik	
	Biyokütle kaynakları	Biyokütle elektrik santrali	Entalpi veya elektrik	
	Jeotermal enerji	Jeotermal elektrik santrali	Entalpi veya elektrik	

Bir ülkenin toplam enerji talebini ölçmek için birincil enerji tüketimi hesaplanır. Bu tüketim hesabı; enerji sektöründeki tüketimi, dönüşüm kayıplarını, enerji dağıtımını ek olarak son kullanıcının nihai tüketimi içermektedir (Emer, 2018). Tablo 1.3'te bazı yıllar için birincil enerji kaynaklarının dünyadaki tüketim oranları gösterilmektedir.

Tablo 1.3: Dünyadaki birincil enerji kaynaklarının tüketim oranları (Mtep) (Yılmaz, 2012).

Kaynak	1980		1990		2000		2011		2035	
	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%
Kömür	1,788	24.8	2,331	25	2,295	22.9	3,776	28.8	5,523	30
Petrol	3,107	43	3,230	37	3,649	36.4	4,130	31.5	5,053	27
Nükleer	186	2.6	526	6	675	6.7	669	5.1	1,019	5
Doğal gaz	1,235	17	1,668	19	2,088	20.8	2,793	21.3	4,380	23
Biyokütle	748	10.4	903	10	1,045	10.4	1,313	10	1,741	9
Hidroik	148	2.1	184	2	225	2.3	301	2.3	460	2
Diğer yenilenebilir	12	0.1	36	0.4	55	0.5	131	1	501	3
Toplam	7,224	100	8,779	100	10,034	100	13,113	100	18,676	100

Araştırmalara göre dünyanın 2010-2040 yılları için birincil enerji tüketiminde %56 oranında artış olması beklenmektedir. 1990'lardan sonra gelişmiş ülkelerin enerji olan ihtiyaçta azalma görülürken gelişmekte olan ülkelerde talep artmaya devam etmiştir. 1980

yılında 7,224 Mtep olan dünya birincil enerji kaynakların tüketimi, 2000 yılında 10,034 Mtep'e ulaşmış 2011'de ise önceki yıla kıyasla %3.1 artmış ve 13,113 Mtep değerini almıştır. 2011 yılındaki tüketimin ilk sırasını %31.5 oranla petrol oluşturmaktadır. Ardından sıralamayı kömür (%28.8),doğal gaz (%21.3),biyokütle (%10),nükleer enerji (%5.1),hidrolik enerji (%2.3) ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları (%1) izlemektedir. Toplamda bakıldığı zaman tüketimin %86.7'sinin fosil yakıtlar, %13.3'ünün yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığı görülmektedir. 2035 yılında birincil kaynaklarının tüketiminin 18,676 Mtep'e ulaşacağı ve kömür tüketiminin %30 oranla petrolü geçerek birinci sıraya yükseleceği tahmin edilmektedir (Yılmaz, 2012). Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency; IEA) tahminlerine göre, fosil yakıtların mevcut payları herhangi bir karbon sekestrasyonu (ayrılımı) olmadan 2030'a kadar muhafaza edilirse, atmosfere yaklaşık 1000 gigatonluk karbon salınımı gerçekleşecektir. Elektrik üretimi için fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, atmosferdeki karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarını azaltma ve küresel iklim değişikliğine yönelik yapılan çalışmaların önemli bir parçası olmalıdır (Yüksel ve Kaygusuz, 2011).

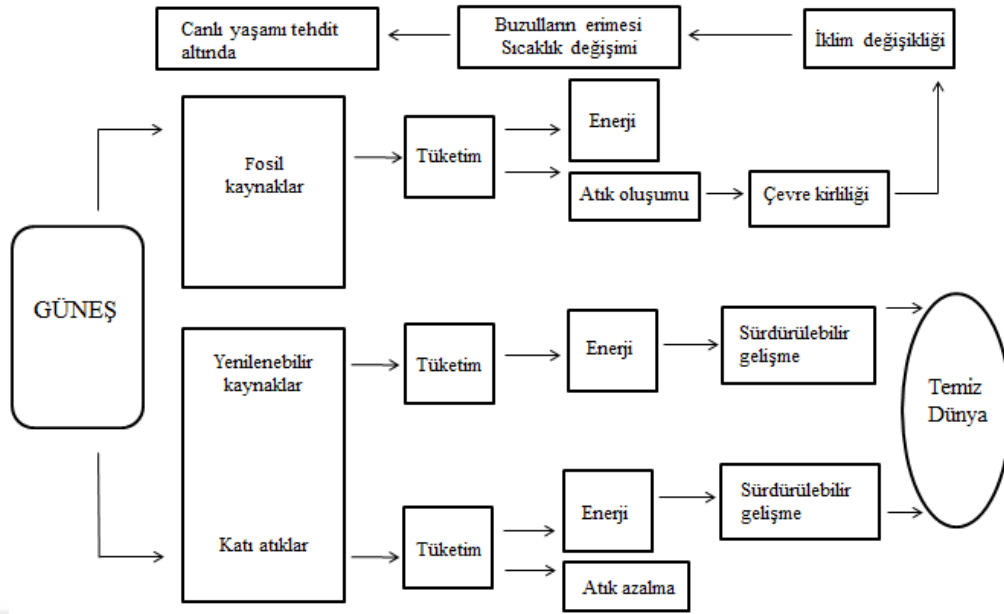
### **1.2.1 Genel Enerji Problemleri**

Enerji, ülkelerin sosyal kalkınma ve ekonomik potansiyelinin en önemli göstergelerinden biri olup, üretimde etkili faktör haline gelmiştir. Enerji tüketimi, sosyal kalkınma ile doğrusal ilişkili olup, ekonomik gelişme ve refah seviyesindeki artışa bağlı artmaktadır (Koç ve Şenel, 2013). Günümüzde giderek artan ve gelecekte de artmaya devam edecek olan dünyadaki enerji ihtiyacının büyük bölümü, kömür petrol, doğal gaz gibi fosil kaynaklardan karşılanmaktadır (Kadioğlu ve Tellioglu, 1996). Enerji kaynaklarının bilinçsiz kullanılması ve hızla tüketilmesi, var olan kaynaklardan verimli bir şekilde faydalanma ve yeni kaynak arayışları gibi çeşitli çözüm yollarının değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Küleççi, 2009). Fosil yakıtları esas alan geleneksel enerji üretim yöntemlerinin; ozon tabakası delinmesi, asit yağmurları, atmosferdeki başta CO<sub>2</sub> olmak üzere sera gazı birikimini artırmasına bağlı olarak meydana getirdiği iklim değişiklikleri gibi etkileri geriye dönüşü zor olabilecek bir çevre kirliliğine yol açmaktadır. Küresel ölçekte fosil yakıt kullanımı; yakıtta dışa bağımlılık, yüksek ithalat giderleri bununla birlikte insan ve canlıların sağlığı için tehlikeli durumlara neden olan çevre problemleri alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmaya başlanmasını sağlamıştır (Kumbur vd., 2005).

Tükenmeyen yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir, temiz ve güvenilir bir enerji üretimi için önemi bir rol oynar. Enerji üretim sistemleri ekolojik dengeyi ulusal olduğu kadar uluslararası boyutlarda da etkilemektedir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, yeni çıkan politikalar ile birlikte farkındalık yaratılarak enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji ile ilgili yapılan çalışmalar teşvik edilmeye çalışılmaktadır (Yılmaz, 2015). Bu sayede var olan enerji potansiyelleri kullanılarak hem ekonomiye katkı sağlamak hem de ekolojik ve politik problemlere çözüm yolu bulmak amaçlanmaktadır.

### **1.2.2 Enerjide Sürdürülebilirlik ve Verim**

Sürdürülebilirlik kavramı geniş bir kullanım alanına sahip olmakla birlikte, toplumun içerisindeki doğal, sosyal, bilimsel ve kültürel kaynakların ilerisi düşünülerek ölçülü bir şekilde kullanılması temeline dayanan bir süreci belirtmektedir (Tıraş, 2012). Sürdürülebilirliğin amacı, tüketici bir toplum olmanın önüne geçmeye yönelik ekolojik, sosyal ve ekonomik evrensel çözümleri değerlendirmektir (Ergün ve Çobanoğlu, 2017). Enerji üretim uygulamalarındaki gelişmelerle birlikte sürdürülebilirlik kavramı enerji kaynaklarının yenilenebilirliği ile birlikte ele alınmaya başlamıştır (Seydioğulları, 2013). Sürdürülebilir enerji; birincil enerji kaynakları esas alınarak sağlanan enerji üretiminin yüksek verimle ve temiz teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilmesini, fosil yakıtların değerlendirilmesinde çevre dostu yeni teknolojilerden yararlanılmasını, fosil kaynaklara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, bir çevrimde atık şeklinde çıkan enerjinin girdi olarak bir başka çevrimde kullanılmasını kapsayan aynı zamanda bunu ekonomik büyüme ile bütünleştiren bir kavram olarak karşımıza çıkmaktadır (Selici vd., 2005). Şekil 1.2’de enerji kaynakları, kullanımı, çevresel sonuçları ve sürdürülebilirlik dönüşümleri gösterilmektedir.



Şekil 1.2: Enerji kaynaklarının kullanımı, çevresel sonuçları ve sürdürülebilirlik dönüşümleri (Selici vd., 2005).

Sürdürülebilir kalkınmanın hedeflerinin gerçekleşmesi; yaşam koşullarının iyileştirilmesi bununla birlikte ekonomide veya üretimde etkinliğin sağlanabilmesi için, nüfus artışına ve ekonomik büyümeye bağlı olarak artan enerji tüketiminin karşılanması gerekli kılınmaktadır. Enerji, sürdürülebilir kalkınma yaklaşımının çevresel, sosyal ve ekonomik olmak üzere tüm boyutları ile yakından ilişkili bir unsurdur. Enerji arz güvenliğinin sağlanması sürdürülebilir kalkınma için önemli koşullardan birini oluşturmaktadır. Bu sebeple çevre problemlerinin optimizasyonunun yapılması, küresel etkenler dikkate alınarak enerji kaynaklarının yeniden değerlendirilmesi ve alternatif çözüm yollarının üretilmesi zorunlu bir durum haline gelmiştir (Seydioğulları, 2013). Enerji sorunlarının yaşandığı günümüzde sürdürülebilirliğin gerçekleştirilmesi kapsamında, yeni ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi ve kullanımının artırılması sağlamak önemli ve gerekli bir çözüm yolu olarak görülmektedir (Dağlıoğlu Şanlı vd., 2017).

Enerji dönüşümlerinin sürdürülebilirliği ele alınırken, bir üretime giren ve bu süreç sonucunda ortaya çıkan enerji, madde salımı, malzeme, katı atık ve maliyet ile çevrenin etkileşiminin değerlendirilmesini sağlayan Hayat Boyu Değerlendirme (Life Cycle Analysis; LCA) yöntemi ile ekserji (kullanılabilirlik) analizlerinden yararlanılmaktadır (Uygur Onbaşıoğlu, 2011). Tablo 1.4'te verilen çeşitli enerji dönüşümlerinin verim ve etkinlik kavramları dikkate alındığında, dönüşüm sistemlerinde kullanılan kaynağın

sürdürülebilirliğine etkisi değerlendirilirken ölçütün verim yerine etkinlik olduğu görülmektedir. Fakat sadece etkinlik kavramını oluşturan kullanılabilirliğe bakarak sürdürülebilirlik niteliğine karar verilememektedir.

Tablo 1.4: Elektrik üretiminde kullanılan kaynakların verim ve etkinlikleri (Uygun, Onbaşoğlu, 2011).

Dönüşüm sistemi	Enerji kaynağı	İdeal verim tanımı	Gerçek verim	Etkinlik
Güneş panelleri	Foton	Kısa devre akımı $\times$ açık devre voltajı/Gelen ışınım $\times$ panel alanı	~%20	Elde edilen elektriksel güç/birim alana gelen güneş ışınımı $\times$ panel alanı
Buhar ve gaz çevrimleri	Fosil Jeotermal	Carnot	Fosil yakıtlar için ~%40 Jeotermal kaynak için ~%10	Elde edilen elektriksel güç/kaynağın kullanılabilirliğinde birim zamanda azalma
Rüzgar türbinleri	Kinetik	Betz	~%40	Elde edilen elektriksel güç/rüzgarın kinetik enerjisinden elde edilebilecek güç
Yakıt pilleri	Kimyasal	Gibbs serbest enerjisi/Çalışma akışkanının oluşum entalpisi	~%40-80 (çalışma sıcaklığına göre)	Elde edilen elektriksel güç/çalışma akışkanının kullanılabilirliğinde birim zamandaki azalma

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım alanları gittikçe artsa da ekonomik, sosyo-kültürel, teknik ve politik bazı engellerden dolayı henüz ekonomik açıdan yeterli miktarlarda ve istenilen maliyetlerde üretim gerçekleştirilememektedir. Bu bağlamda enerjiden daha verimli bir şekilde yararlanmanın yolları araştırılmaktadır (Dağlıoğlu Şanlı vd., 2017).

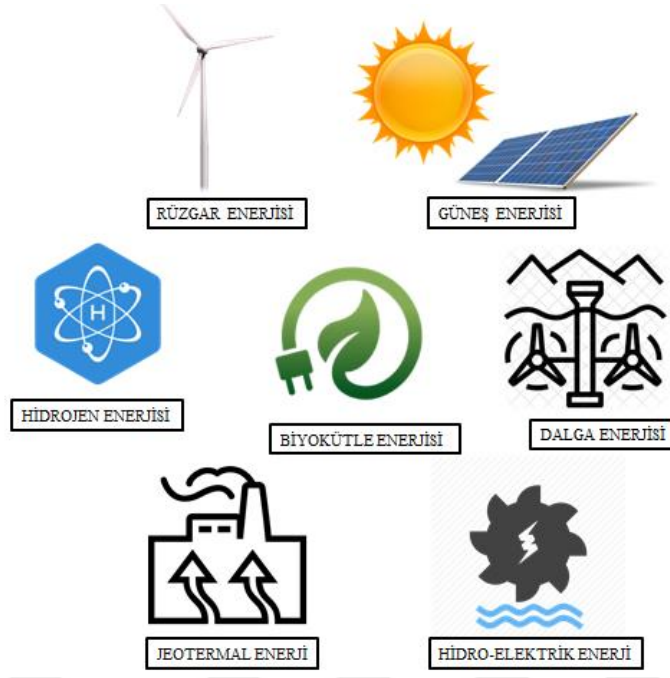
Ekonomideki enerji tüketim düzeyini belirleyen faktörlerden Gayrisafi Yurtiçi Hasıla (GSYİH) başına tüketilen birincil enerji miktarı, enerji yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır. Enerji yoğunluğu, enerji verimliliğinin hesaplanmasında ve karşılaştırılmasında tüm dünyada yaygın olarak kullanılan bir ölçüttür. Ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin değerlendirilmesinde enerji yoğunluğu göz önünde bulundurulmaktadır (Karakaya, 2017). Enerji verimliliği ile enerji yoğunluğu arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Yani bir ülke ya da herhangi bir iş dalı için bulunan enerji yoğunluğu ne kadar düşükse, birim hasıla üretimi için tüketilen enerji miktarı da o kadar

düşük demektir bu enerjinin verimli kullanıldığının bir işaretidir (Yaşar, 2011). 2005 yılı için enerji yoğunluğunun sayısal verileri ile dünya ortalaması değeri 0.32 olarak belirlenmiştir. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (Organisation for Economic Co-operation and Development; OECD) ülkelerinde bu oran dünya ortalamasının oldukça altında ve 0.20 değerinde bulunmuş olup Türkiye’de ise ortalamanın biraz üstünde 0.35 olarak hesaplanmıştır (Adaçay, 2014). Bu sonuç Türkiye’de enerji kaynaklarının ve üretilen enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasına yönelik çalışmaların ekonomik kalkınma için oldukça önemli bir faktör olduğunu göstermektedir.

### **1.2.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları**

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçler sonucu ortaya çıkan ve sürekli şekilde yenilenen güneş ,rüzgar, hidroelektrik, biyokütle ,jeotermal, ,dalga, gel-git ve hidrojen gibi enerji kaynaklarını ifade etmektedir (Şekil 1.3). Herhangi bir üretim süreci gerekmeden doğada kullanıma hazır, geleneksel enerji kaynaklarına göre çevreye zararı ve etkisi çok daha düşük olan bu kaynakların enerji üretimi için kullanılması durumunda az bir seviyede CO<sub>2</sub> emisyonu gerçekleşmektedir. Bu sayede ekolojik dengenin korunmasını sağlayan yenilenebilir enerji kaynakları, enerji arz güvenliği, enerjide dışa bağımlılığın azaltılması gibi konularda da avantajlara sahiplerdir (Aksoğan Korkmaz ve Bulut Deniz, 2019). Yenilenebilir enerji kaynaklarının oluşumu temelinde dünyanın kendi eksenini güneşin etrafında dönmesi ve yerçekimine dayanmaktadır. Sürdürülebilir, her yerde bulunup kullanılabilen ve süreklilik arz eden yenilenebilir enerji kaynakları; teknik ve ekonomik engellerin çözülmesi ile geleceğin en önemli enerji kaynakları olarak kabul edilmektedir (Kaya, 2018).





Şekil 1.3: Yenilenebilir enerji kaynakları.

**Güneş:** Güneş enerjisi, güneş çekirdeğinde hidrojen gazının helyuma dönüşmesi sırasında meydana gelen füzyon olayı sonucu açığa çıkan ışınım enerjisidir (Çanka Kılıç, 2015). Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmesinde güneş pili veya fotovoltaik (Photovoltaic; PV) hücreler olarak adlandırılan yarı iletken malzemeler kullanılmaktadır. PV hücrenin üzerine gelen güneş ışınımının bir kısmı hücre tarafından soğurulur, bir kısmı yansıtılır ve geri kalan kısmı da hücre içerisinden geçer. Güneşten gelen ışınım, farklı miktarlarda enerji içeren fotonların birleşiminden oluşmaktadır. PV hücresi tarafından soğurulan fotonların sahip olduğu enerji yarı iletken malzemenin atomundaki elektrona transfer edilmesiyle elektrik üretimi gerçekleşir. Çok sayıda PV hücresinin birbirine seri veya paralel bağlanarak oluşturulan PV modülleri ile birkaç Watt'tan Mega Watt'lara kadar güç çıktıları elde edilebilir (Öztürk, 2017).

**Rüzgar:** Rüzgar enerjisinin temel kaynağı güneştir. Güneşin yeryüzündeki karaları, denizleri bunun yanı sıra atmosferi her yerde aynı şekilde ısıtamamasına bağlı olarak meydana gelen basınç ve sıcaklık farkları neticesinde rüzgarlar oluşmaktadır (Behçet vd., 2014a). Rüzgar enerjisi kullanılarak elektrik üretilirken rüzgar türbinleri ile ilk önce hareketli durumdaki havanın kinetik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür. Daha sonrasında elektrik üretimi için bu mekanik enerjiden yararlanılır. Rüzgar gücüyle türbin pervaneleri bağlı oldukları şaftı hareket ettirir. Elde edilen mekanik enerji şaft vasıtasıyla

dişli kutusuna ve buradan jeneratöre gönderilerek elektrik enerjisine çevrilir (Özden vd., 2015). Uzun yıllardan itibaren, ilk olarak tahılların öğütülmesi ve yelkenli gemilerle deniz ulaştırmasında kullanılan rüzgar enerjisinden günümüzde, elektrik üretimi için faydalanılmaktadır (Hayli, 2001).

**Hidrolik (Hidroelektrik):** Hidroelektrik enerji çoğu enerji kaynağı gibi güneş esaslı olup, belirli yükseklikteki suyun sahip olduğu potansiyel ve kinetik enerjiyi türbin aracılığıyla öncelikle mekanik enerjiye dönüştürüp daha sonra türbin miline bağlı jeneratör ile elektrik enerjisine çevrilmesiyle elde edilmektedir (Şekkeli ve Keçecioglu, 2011). Hidrolik enerji, diğer yenilebilir enerjiler gibi ekolojiye zarar vermeden var olan kaynaklardan yararlanması yönüyle avantaj sağlar (Oral vd., 2014). Hidroelektrik santralleri elektrik enerjisi üretimi sağlamanın yanı sıra kuruldukları bölgelerde yerleşim yerlerine içme, kullanma veya sanayi suyu temini, gibi çeşitli amaçlar için de kullanılmaktadır (Özbay ve Gençoglu, 2009).

**Hidrojen:** Hidrojen gazı, evrende bulunan en basit, en hafif ve en fazla miktardaki elementtir. Yüksek kimyasal reaktivite özelliğine sahip olması nedeniyle, yeryüzünde serbest halde nadir olarak bulunmaktadır (Aslan ve Özcan, 2008). Doğal bir yakıt olmayan hidrojen gazı, birincil enerji kaynakları kullanılarak değişik hammaddelerden (fosil yakıtlar, su, biyokütle gibi) elde edilebilen sentetik bir yakıttır. Hidrojen üretiminde elektroliz, termokimyasal süreçler, atık gazların saflaştırılması, radyoliz, foto süreçler ve buhar iyileştirme gibi alternatif birçok teknolojiye dayanmaktadır (Tutar ve Eren, 2011). Hidrojen; ısıtma ve elektrik üretimi amacıyla kullanılabilir olup bunun yanı sıra hidrojenden hammadde ve motor yakıtı olarak da yararlanılabilmektedir (Haşimoğlu vd., 2000).

**Jeotermal:** Jeotermal kaynak, yer ısısı olarak tanımlanmakta olup yer kabuğunun farklı derinliklerinde biriken ısının meydana getirdiği, içerisinde kimyasalların bulunduğu sıcak su, buhar ve gazlardır. Genellikle jeotermal kaynaklar, volkanik ve magmatik birimleri ile aktif kırık sistemlerin yakınında oluşmaktadır. Jeotermal enerji, yerkürenin derinliklerinde bulunan magmanın ve kayalardaki radyoaktifliğin oluşturduğu sıcaklıktan elde edilen yenilenebilir bir enerji türüdür. Isı, yer kabuğundaki kırık ya da çatlaklardaki akışkanlar vasıtasıyla yeryüzüne aktarılır (Çanka Kılıç ve Keskin Kılıç, 2013). Jeotermal enerji kaynak sıcaklığına bağlı olarak ısıtma, elektrik üretimi, içme suyu ve sıcak su temini,

endüstride kurutma ile sterilize işlemleri ve sağlık turizmi gibi çok yönlü bir kullanım alanına sahiptir (Erkul, 2012).

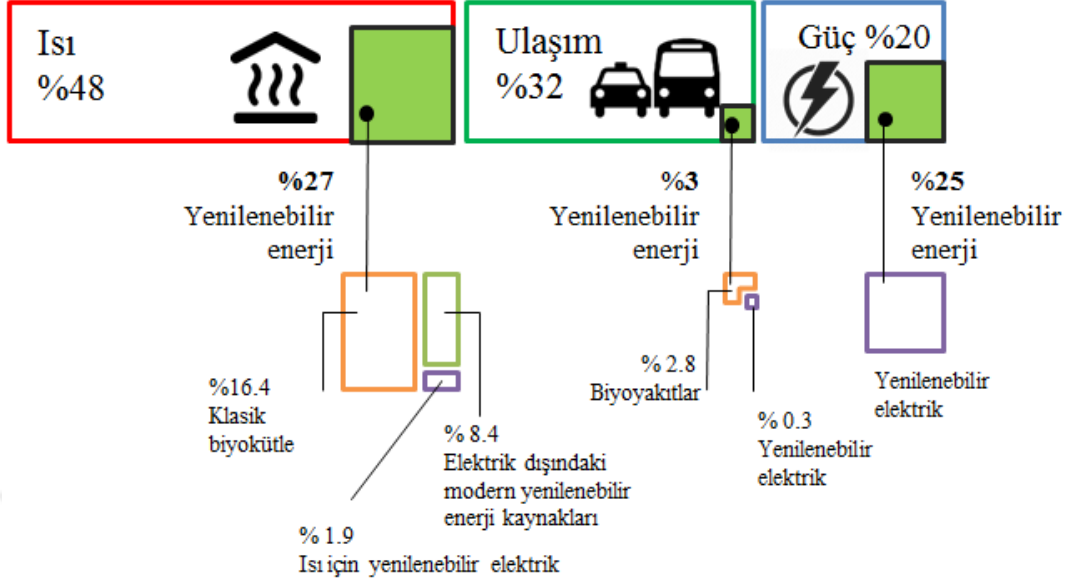
**Okyanus:** Okyanuslar hem termal enerji, hem de mekanik enerji kaynağıdır. Okyanus Termal Enerji Dönüşümü (Ocean Thermal Energy Conversion; OTEC), okyanuslardaki sıcak yüzey suları ile derinlerdeki soğuk suları arasındaki sıcaklık farkından faydalanılarak elektrik üretiminin gerçekleştirildiği bir yöntemdir (Üçgül ve Elibüyük, 2016).

**Dalga Enerjisi:** Kara ve suların farklı ısınmasına bağlı olarak oluşan rüzgârların, sahip olduğu kinetik enerjiyi deniz yüzeyinde eserek meydana getirdikleri dalgalara aktarmasıyla elde edilen enerjidir. Aktarılan bu kinetik enerji çok fazla yük kaybı olmadan kilometrelerce uzaktaki mesafelere iletilebilmektedir. Dalgaların kazandıkları bu enerjinin bir kısmı, önüne yerleştirilen enerji dönüşüm sistemleriyle, önce mekanik, sonrasında da elektrik enerjisine dönüştürülebilir (Mert, 2012). Dalgalardan enerji üretimi sağlayan sistemlerin tümü, deniz yüzeyinde veya deniz yüzeyine yakın yere kurulur. Dalganın geliş yönüne paralel ya da dik kurulmaları ve enerjiyi dönüştürme biçimleri açısından bu sistemler farklılık gösterebilmektedir (Kaplukan, 2014b). Dalga enerjisi; güç kaynağının sonsuz ve bol olması, çevre kirliliğinin azaltılması, şebekenin olmadığı alanlara elektrik sağlanması ve ihtiyaç bulunan bölgelere su temininin gerçekleştirilmesi gibi çeşitli avantajlara sahiptir (Sağlam ve Uyar, 2005)

**Gelgit Enerjisi:** Gelgit akıntıları, Ay'ın ve Güneş'in Dünya'ya uyguladığı kütle çekim kuvveti sonucunda denizlerde meydana gelen yükselme ve alçalmalardır. Gelgit enerjisinden elektrik üretimi temelinde, gelgit hareketleri sırasında yer değiştiren su kütlelerinin yükselme ve alçalma farkından yararlanılarak türbinler aracılığıyla elektrik enerjisi elde edilmesine dayanmaktadır (Honça, 2018). Gelgit yoğunluğu fazla olan kıyı kesimlerinde ırmak ağzlarına veya deniz girişlerine yapılan barajlara suların yükselme ve alçalma zamanlarında sırasıyla içeri ve dışarı çıkabilmeleri amacıyla açılan tüneller sayesinde türbinler harekete geçerek jeneratörlerden elektrik üretimi sağlanır (Bozdoğan, 2018).

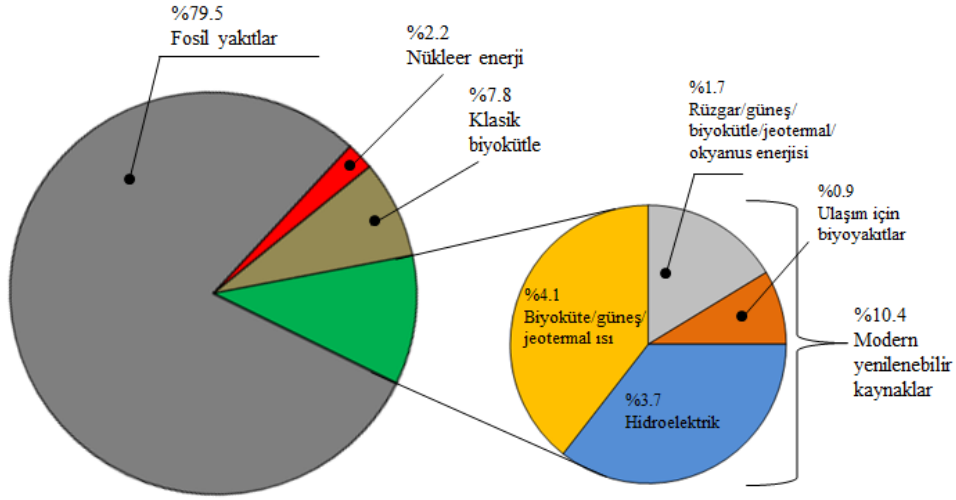
Şimdiye kadar, ekonomik sorunlar nedeniyle göz ardı edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimdeki payları giderek artmaktadır ve bu kaynakların kullanımlarında var olan teknik ve ekonomik problemlere çözüm bulunması durumunda 21.yüzyılın en

önemli enerji kaynakları olacağı kabul edilmektedir.



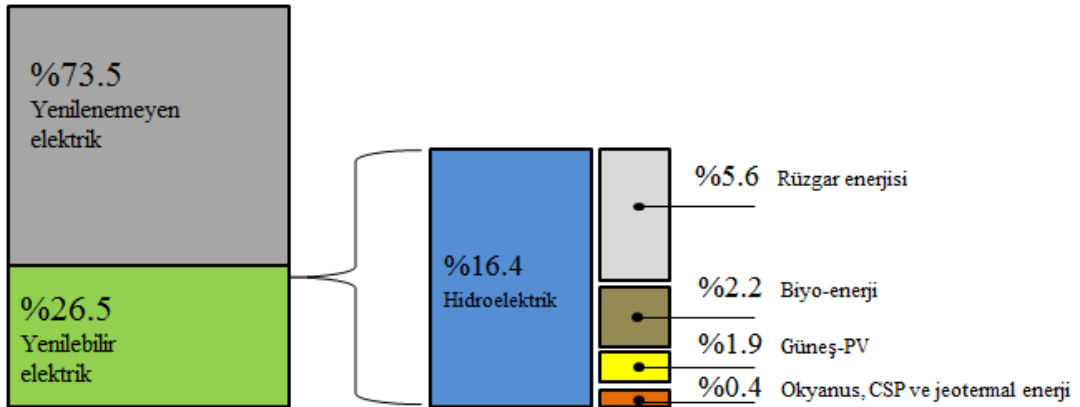
Şekil 1.4: 2015 yılı için sektörler göre yenilenebilir enerjinin küresel toplam nihai enerji tüketimindeki payı (REN21, 2018).

2007 ve 2015 yılları arasında modern yenilenebilir ısı talebinde, %20.5 oranında artış yaşanmış olmakla beraber, aynı dönem için yenilenebilir elektrik üretimi %56.6 değerinde artmıştır. Şekil 1.4'te gösterilen 2015 yılı için küresel toplam nihai enerji tüketiminin (Total Final Energy Consumption; TFEC) sektörler göre dağılımı incelendiğinde en yüksek payı ısıtma ve soğutmanın (%48) oluşturduğu ardından diğer yüksek payların sırasıyla ulaşım (%32) ve elektrik tüketimine (%20) ait olduğu görülmektedir. Küresel toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık yarısını oluşturan ısıtma ve soğutma, çoğunlukla fosil yakıt bazlı olsa da, giderek artan yenilenebilir enerjinin ısınmadaki payının %16.4 ile en büyük kısmını geliştirmekte olan ülkelerde ısıtma ve yemek pişirmeye için kullanılan geleneksel biyokütle kaynakları oluşturmaktadır. Isının sadece %10.3'lük kısmı yenilenebilir elektrik de dahil olmak üzere modern yenilenebilir kaynaklardan elde edilmiştir. %90'dan fazlasının fosil yakıtlardan karşılandığı ulaşım sektöründe düşük bir paya sahip yenilenebilir enerjinin (%3) çoğunluğu biyoyakıtlardan (%2.8) sağlanmaktadır. Kurulu güç kapasitesinde yenilenebilir elektrige geçiş devam etmektedir (REN21, 2018).



Şekil 1.5: 2016 yılı için toplam nihai enerji tüketiminin tahmini yenilenebilir payı (REN21, 2018).

2016 yılı itibarıyla, yenilenebilir enerjinin, toplam nihai enerji tüketimindeki payı yaklaşık %18.2 olurken bunun %10.4'lük kısmını modern yenilenebilir enerji oluşturmaktadır (Şekil 1.5). Yenilenebilir enerji, küresel güç kapasitesine net ilavelerin 2016'da %63'ünü, 2017'de ise %70'ini oluşturmuştur. Şekil 1.6'da 2017 sonu için küresel elektrik üretiminin tahmini yenilenebilir enerji payı gösterilmektedir. Yenilenebilir enerji kapasitesi, 2007-2017 yılları arasında iki katından fazla artış göstermiştir (REN21, 2018). 2017 yılında, yenilenebilir güç kapasitesinde en büyük artışın yaşanması, maliyetlerin düşmesi, teknolojideki gelişmeler ve destekleyici politikalar yenilenebilir enerji kullanımında büyük bir artış sağlamıştır (Kavcıoğlu, 2019).



Şekil 1.6: 2016 -2017 sonu için küresel elektrik üretiminin tahmini yenilenebilir enerji payı (REN21, 2018).

Kullanımı gün geçtikçe artan ve yakın zamanın en önemli enerji kaynakları olan yenilenebilir enerji kaynaklarının 2020 yılı için tahmini oranları Tablo 1.5'te gösterilmektedir. Maksimum ve minimum değerler incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynakları arasında %40'ın üstünde bir değerle en büyük payı modern biyokütlenin oluşturduğu görülmektedir. Bu bize yenilenebilir enerji kaynağı olarak, biyokütlenin sürdürülebilir enerji konusunda önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 1.5: 2020 yılı için yenilenebilir enerji kaynakları tahmini oranları (Kumbur vd., 2005).

Enerji Kaynağı	2020 Yılında Minimum		2020 Yılında Maksimum	
	Mtep	%	Mtep	Toplamın %
Güneş	109	20	355	26
Modern Biyokütle	243	45	561	42
Rüzgar	85	15	215	16
Deniz Enerjileri	14	4	55	4
Küçük Hidrolik	48	9	69	5
Jeotermal	40	7	91	7
<b>TOPLAM</b>	<b>539</b>	<b>100</b>	<b>1345</b>	<b>100</b>

### 1.3 Literatür Özeti

Önal vd., (2017), düşük sıcaklıklardaki endüstriyel atık akışkanlardan ısı geri kazanımı yoluyla elektrik üretimi için ORÇ'ye dayalı iki farklı çevrim incelemesi gerçekleştirmişlerdir. İncelemesi yapılan Basit Organik Rankine Çevrimi (B-ORÇ) ve Rejeneratif Organik Rankine Çevrimlerinin (R-ORÇ) her ikisinde de atık akışkan giriş sıcaklığı ve debisi sabit kabul edilmiştir. Çalışma akışkanı olarak R134a, R123, R245fa, R22, R13, R600, izopentan, izobütan ve propan akışkanları seçilmiş olup farklı çevrim türlerine ve basınç aralıklarına göre optimum akışkanı belirlemek amacıyla akışkanların her biri için EES programı kullanılarak termodinamiğin birinci ve ikinci kanun analizleri yapılmıştır. Türbin çıkış basıncının etkisine bakıldığında, türbindeki ve yoğuşturucudaki tersinmezlik değerlerinin diğerlerine göre daha büyük olduğu buna karşılık türbin giriş basıncının etkisi incelendiğinde ise, en büyük tersinmezlik değerine buharlaştırıcıda ulaşıldığı görülmüştür. İncelenen tüm akışkanlarda, tersinmezlik değerlerinin düşmesine bağlı olarak birinci ve ikinci kanun verimleri ile elde edilebilen net iş değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte akışkanlar arasında izopentanın her iki çevrimde de, ikinci kanun ilkeleri kapsamında belirlenen çalışma aralığında en yüksek verim değeri sağladığı

tespit edilmiştir.

Dai vd., (2009), atık ısı kaynaklı ORÇ sisteminin, farklı çalışma akışkanları kullanarak termodinamik parametrelerin performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Aynı koşullar altında her bir çalışma akışkanı için ORÇ'nin termodinamik parametreleri, algoritma kullanılarak ekserji verimliliği ile optimize edilmiştir. Karşılaştırmalı analiz sonuçlarında, organik akışkanların atık ısıyı geri dönüştürmede sudan daha iyi olduğu, en yüksek ekserji verimliliği akışkanlardan R236EA'nın sağladığı görülmüştür. Buna ek olarak negatif doyma buhar eğrisine sahip olan ıslak akışkanların türbin girişinde doymuş buharla sistemde en iyi performansı sağladıkları belirlenmiştir.

Liu vd., (2004), farklı özellikteki çalışma akışkanlarının kullanılmasının ORÇ sistemine etkisini inceleyip sistemin ısı geri kazanım verimliliğini değerlendirmişlerdir. İncelemeler çalışma akışkanının kritik sıcaklığının termal verimliliği etkilediği görülmüştür. Atık ısı giriş sıcaklığı ile yoğuşma sıcaklığı arasındaki uygun bir buharlaşma sıcaklığında ısı geri kazanım verimliliğinin maksimum değere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Ustaoglu vd., (2017), bir çimento fabrikasındaki döner fırının ve soğutma bölümünün enerji ve ekserji analizini, işlevsel verileri temel alarak farklı koşullarda izentropik ve kuru tip sıvılar için gerçekleştirmişlerdir. Geri kazanım kapasitesini değerlendirmek amacıyla sistemde ORÇ sistemi kullanılmıştır. Islak tip döner fırının enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla yaklaşık %46 ve %35 bulunmuş olup yapılan değerlendirme sonucunda izentropik R245fa akışkanı en iyi performansı gösterirken ıslak özellikteki R600a akışkanı en düşük performansı göstermiştir. Yüksek buharlaştırıcı basınçlarında izentropik sıvıların kullanılabileceği, ıslak özellikteki akışkanların ise düşük yoğuşturucu sıcaklıklarının, belli bir basınçtan sonra sistem performansı üzerinde etkilerinin az olması nedeniyle uygun olmadıkları belirlenmiştir. Sistemdeki toplam ekserji tahribatının yaklaşık %80'ini ısı eşanjörü ve buharlaştırıcıdaki ekserji tahribatlarından kaynaklandığı hesaplamalar sonucunda görülmüştür.

Maizza V. ve Maizza A., (2001), farklı termodinamik ve fiziksel özellikteki akışkanların, gerçek çalışma koşullarında atık ısı kaynaklı ORÇ sistem performansı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Hesaplamalar değişik referans sıcaklıklarında ve 35°C'lik yoğuşma sıcaklığına kadar yapılmış olup, sistem için optimum akışkan buharlaşma yoğuşma

sıcaklıkları gibi termodinamik özelliklere göre seçilmiştir. Çalışmada, incelenen R600, R123, R142b, R401A,R401B, R290, R124a, R401C akışkanlardan R123 ve R124a akışkanlarının iyi bir sistem performansı sağladığı ve belirlenen koşullar altında R401C'nin ORÇ geri kazanım sistemi için optimum çalışma akışkanı olabileceğini belirlenmiştir.

Wei vd., (2007), çalışma akışkanı olarak Hidroflorokarbon (Hydrofluorocarbon; HFC)-245fa kullanarak egzoz ısısının ısı kaynağı olduğu ORÇ sisteminin termodinamik performans analizini ve optimizasyonunu yapmışlardır. Sonuçlar, egzoz ısısının kullanımının artırılmasının, akış hızı veya sıcaklık artışına bağlı olarak sistemin net gücü ile verimini olumlu yönde etkilerken hava akış hızındaki artışın net güç çıkışında ve sistem verimini belirli bir noktada maksimuma ulaştırdıktan sonra azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Ekserji analizlerine bakıldığında egzozun kütle akış hızı veya sıcaklığı arttıkça buharlaştırıcıdaki ve yoğunlaştırıcıdaki ekserji yıkım oranının arttığı, hava akış hızı artışında ise, çalışma akışkanı ve ortam arasındaki ortalama sıcaklık farkı azalması dolayısıyla yoğunlaştırıcıdaki ekserji yıkım oranının azaldığı görülmüştür. Buna ek olarak buharlaştırıcının genel ekserji yıkım oranına en büyük katkıyı yaptığı ve türbindeki çalışma akışkanının giriş sıcaklığı ile basıncı düştüğünde, izentropik ile gerçek durum arasındaki farkın arttığı ve bu durumun türbindeki ekserji yıkım oranını artırdığı belirlenmiştir.

Roy vd., (2010), 140°C sıcaklık ve 312 kg/s debide baca gazı atık ısısından yararlanan ORÇ'nin, R12, R123 ve R134a soğutucu akışkanlarını kullanarak parametrik optimizasyonunu ve performans analizini yapmışlardır. Analiz sonuçları incelenen tüm akışkanlar arasında maksimum çalışma verimi sağladığından ve Carnot verimliliği gerçek verime yakın olmasından dolayı R123'ün enerji üretimi için düşük sıcaklıktaki kaynaklardan yararlanan ORÇ sistemleri için çalışma akışkanı olarak kullanılabilenliğini göstermiştir.

Yılmaz vd., (2015), çalışmalarında güneş çanak sistemli ORÇ'nin Isparta şartlarına uygulanabilirliğinin inceleyip sistemin ekserji ve enerji analizlerini yapmışlardır. Sistemde çalışma akışkanı olarak R410a kullanılmış olup güneşten gelen enerjinin değeri 950 W/m<sup>2</sup> kabul edildiğinde kazan çıkışındaki sıcaklığın yaklaşık 68°C olduğu görülmüştür. Türbin giriş basıncı 45 bar, çıkış basıncı 10 bar ve çevre sıcaklığı 21°C'de sistemin enerji ile ekserji verimleri sırasıyla %10 ve %70 olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak yapılan analizde en yüksek tersinmezlik oranı kazanda, en düşük ise pompa kısmında



gözlemlenmiştir ve kazan sıcaklığında ters orantılı şekilde değişen ekserji verimi %55-75 değerleri arasında bulunmuştur

Hettiarachchi vd., (2007), düşük sıcaklık değerlerindeki jeotermal ısı kaynaklarından yararlanan ORÇ döngüleri için sistemde dört farklı çalışma akışkanı (amonyak, HCFC123, n-Pentan ve PF5050) kullanarak uygun maliyetli optimum tasarım kriterini sunmuşlardır. Optimizasyon, ısı transfer alanının üretilen net güce oranının bir fonksiyonu olacak şekilde yapılmıştır. Araştırmada sistemde kullanılacak akışkan seçiminin amaç fonksiyonunu etkileyen önemli faktörlerden biri olduğunu ve bu etkinin santral maliyetini iki kat arttırabileceği belirlenmiştir. Sonuçlar, Hidrokloroflorokarbon (Hydrochlorofluorocarbon; HCFC)123 ile n-Pentan akışkanlarının diğer akışkanlarla karşılaştırıldığında en çok tercih edilen kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olan PF5050'ye kıyasla daha iyi bir performans sağladığını göstermiştir. Ekserji analizlerine bakıldığında verimliliğin jeotermal su sıcaklığı ile azaldığı görülmüş olup, bu durumun buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı boyunca sıcaklık farklarının artmasıyla tersinmezliğin artmasından kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Buna ek olarak amonyağın düşük ısı verimine rağmen, diğer çalışma akışkanlarından çok daha büyük bir ekserji verimliliğine sahip olduğu gözlemlenmiş ve amonyak döngüsünün verimliliğinin, optimizasyon sürecinde diğer çalışma akışkanlarından daha büyük ölçüde ödün verdiği vurgulanmıştır.

Sun ve Li, (2011), çalışma akışkanı R134a olan ve ısı geri kazanım enerji santralinde kullanılan ORÇ'nin ayrıntılı bir analizini gerçekleştirmişlerdir. Santral performansının değerlendirilip optimize edilmesi amacıyla sistemde bulunan türbin, buharlaştırıcı, hava soğutmalı yoğunlaştırıcı ve pompa için matematiksel modeller ile algoritma geliştirilmiştir. Araştırmada kontrollü (çalışma akışkanının optimum kütle akış hızı, optimum göreceli yoğunlaştırıcı kütle akış hızı) ve kontrolsüz değişkenler (ısı kaynağı sıcaklığı ve ortam kuru termometre sıcaklığı) arasındaki bağlantıyı veren ifadenin net güç için lineer ısı verim için ikinci dereceden bir fonksiyon olduğu belirtilmiştir. Analiz sonuçları türbin giriş basıncının yükseltilmesinin, daha fazla net güç üretimi ile daha yüksek termal verimlilik sağladığını aynı zamanda çalışma akışkanının kütle akış hızının, yoğunlaştırıcı fan hava kütle akış oranına kıyasla sistem ısı verimi ve net güç üretimi üzerinde, daha fazla etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte sistem net güç üretimini maksimuma çıkarmak için, hem optimal bağıl çalışma akışkanının kütle akış hızının hem de optimum yoğunlaştırıcı fan hava kütle akış hızının, ısı kaynağı sıcaklığı arttıkça arttığı belirtilmiştir.

Braimakis ve Karellas, (2018), rejeneratif ORÇ konfigürasyonlarının değerlendirmesini sunmuşlardır. Üç rejeneratif ORÇ sistemi farklı çalışma akışkanları (Toluen, Sikloheksan, Siklopentan, İzohexzan, n-pentan, Bütan, R1234yf) kullanılarak optimize edilmiş ve verimlilikleri, standart ORÇ (S-ORÇ) ile karşılaştırılmıştır. Araştırmada her durum için bir reküperatörün sisteme eklenmesi de incelenmiştir. Analizlerde, başlangıçta buharlaşma basıncının artırılmasının, türbindeki entalpi düşüşünü arttırmasına bağlı olarak enerji verimliliğinde bir artış gerçekleştirdiği ancak basıncın, çalışma akışkanlarının kritik basıncına yaklaştığında ya da bu basınçları aştığında, enerji verimliliğinin yatay seyre geçtiği belirlenmiştir. Sonuçlar reküperatif ve rejeneratif ORÇ sistemleri için kuru tip akışkanların daha uygun olduğunu buna ek olarak performans iyileştirme üzerinde kritik sıcaklığın olumlu etkisi olabileceğini göstermiştir.

Najjar ve Radhwan, (1988), gaz türbini motorunu optimize ederek enerji tasarrufu sağlamak ve işletme maliyetini azaltmak amacıyla gaz türbini döngüsü ile kapalı ORÇ sistemi birleşiminden oluşan CHP sisteminin analitik incelemesini yapmışlardır. Çalışmada, gaz türbini basınç oranı; maksimum çevrim sıcaklığı; sıvı - hava kütle oranı ve çalışma akışkanının türü gibi parametreler göz önünde bulundurularak her bir sistemin ve kombine çevrimin performansını analiz etmek amacıyla bilgisayar programı yazılmıştır. Analitik sonuçlar R113 soğutucu akışkanının küçük turbo-genleştirici boyutu ve buna bağlı olarak maliyette azalma sağladığı için sistem için optimum çalışma akışkanı olduğunu ayrıca CHP sisteminin iyi bir ısı geri kazanım ve yatırım geri dönüş oranına sahip olduğunu göstermiştir.

Verschoor ve Brouwer, (1995), ORÇ bileşenlerini bir buhar çevrimi ile birleştiren bir Rankine çevrimini başka bir tanımla buharlı Rankine (SMR) döngüsünü incelemişlerdir. Toplamda beş sistem incelenmiş olup termodinamik kayıpların büyüklüğü ve yeri hakkında değerlendirilmelerin yapılabilmesi amacıyla her bir değişken için ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. İncelenen SMR döngüsü ile benzer buhar çevrimlerine göre %5-10'a varan verimlilik artışı elde edildiği belirtilmiştir. Analizlerde en büyük ekserji kayıplarını ısı kaynağı ile çalışma akışkanı arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle buharlaştırıcıdaki kazan içerisinde meydana gelen ısı transferindeki ekserji kayıplarının oluşturduğu görülmüştür. Araştırma, SMR çevrim uygulamasının belediye atık yakma tesislerinde ve endüstriyel işletmelerde uygulanabilirlik oranının yüksek olduğunu göstermiştir.

Vijayaraghavan ve Goswami, (2005), düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarından yararlanarak eş zamanlı şekilde güç üretimi ve soğutma yapmak amacıyla Rankine ve absorpsiyonlu soğutma çevrimlerini birleştirerek yeni bir termodinamik döngü geliştirmişlerdir. Sistem çalışma akışkanı olarak amonyak-su karışımı farklı organik akışkan karışımları kullanılmıştır. Optimizasyon sonuçları, daha yüksek kazan çıkış sıcaklıklarının ve moleküler ağırlığı yüksek bileşenlerin kullanılmasının kazan içinde daha iyi sıcaklık eşleşmesi sağladığını göstermiştir. Araştırmada ek olarak, ısı kaynağı akış hızının büyük olmasının genellikle akışkan için daha küçük bir belirli ekserji düşüşü ile sonuçlandığı ve ekserji verimliliği optimizasyonu için ısı kaynağı olarak kullanılan akışkanda orta dereceli bir sıcaklık düşüşüyle birlikte küçük bir akış hızının istendiği bir denge olduğu vurgulanmıştır.

Kaşka, (2014), enerji üretimi için çelik endüstrisinden elde edilen atık ısıdan yararlanan ORÇ sisteminin iki farklı durum için enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Çalışma akışkanı olarak R245fa'yı kullanılmıştır. Bileşenlerdeki ekserji yıkımlarının belirlenmesi amacıyla yapılan hesaplamalarda yıkımın çoktan aza doğru sırasıyla buharlaştırıcı, türbin, yoğurturucu ve pompada gerçekleştiği görülmüştür. İki durum için sistemin enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %10.2, %48.5 ile %8.8, %42.2 olarak bulunmuştur. Araştırmada buharlaştırıcı basıncının enerji ve ekserji verimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve buharlaştırıcı basıncının artırılmasıyla daha yüksek enerji ve ekserji verimliliği elde edilebileceği tespit edilmiştir.

Obernberger vd., (2002), bir AB tanıtım projesi kapsamında Lienzde bulunan biyokütle kaynaklı CHP tesisi için 1,000 kW nominal elektrik kapasitesine sahip yeni geliştirilen bir ORÇ teknolojisinin uygulanmasını değerlendirmişlerdir. Termal yağ ekonomizeri ve bir hava ön ısıtıcısı ile yeni ve geliştirilmiş birleşimiyle, sistemin termal verimi büyük oranda iyileştirilerek yaklaşık %82'e çıkarılmıştır. Hesaplamalarda artan ısı veriminin, CHP tesisinin toplam elektrik verimliliğini yaklaşık %15'e yükselttiği belirlenmiştir.

Pirotta vd., (2013), Malta'nın evsel atık verilerini kullanılarak bir güç (PG) tesisi ile CHP tesisini element analizi ile birlikte buhar çevriminin termodinamiğini uygulayarak incelemiştir. Araştırma sonuçları atıkların yanması ile bölgenin 10 MW elektrik gücü ek olarak bileşik ısı-güç çevriminden 7.5 MW enerji elde edilebileceğini göstermiştir. Yakma ve CHP'nin, en iyi ısı ve elektrik üretimi birleşimi olması nedeniyle gelirleri en üst düzeye

çıkarma potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmış olup KKA yakma uygulamasının arazi kullanımındaki tasarrufların sağlanması açısından belirleyici bir fayda olarak görülebileceği belirtilmiştir.

Liu vd., (2011), ORÇ'ye dayalı biyokütle çalışan 2 kW'lık bir CHP sisteminin termodinamik modelleme çalışmalarının sonuçlarını değerlendirmişlerdir. ORÇ sisteminde çalışma akışkanı olarak kullanılmak üzere çevre dostu olan HFE7000, HFE7100 ve n-pentan seçilmiş olup bu akışkanların EES programı tarafından öngörülen termodinamik özellikleri, ORÇ sisteminin termal verimliliğini tahmin edilebilmesi için kullanılmıştır. Araştırmada çalışma akışkanının ORÇ verimliliğini etkileyen parametrelerden biri olduğu vurgulanmıştır. Analizler neticesinde tahmin edilen en yüksek ORÇ verimliliği %16.6 olarak belirlenmiş ve hesaplamalar, tahmini ORÇ verimliliğinin büyükten küçüğe sırasıyla n-pentan, HFE7000, HFE7100 kullanılan sistemlerden sağlandığını göstermiştir. CHP sisteminin seçilen ORÇ akışkanı ile elde edilen elektriksel verimliliğinin, temel olarak biyokütle kazanının sıcak su sıcaklığına ve ORÇ yoğunlaştırıcı soğutma suyu sıcaklığına bağlı olarak %7.5-13.5 değer aralığında olduğu öngörülmüştür. Bununla birlikte CHP sisteminin toplam veriminin, her üç ORÇ akışkanı için %80 düzeyinde olmasına rağmen, CHP sistemi ile sağlanan ısının miktarının ve kalitesinin, seçilen ORÇ akışkanına ve modelleme koşullarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Prando vd., (2015), kojeneratif bölgesel ısıtma tesislerindeki gerçek performans ile öngörülen arasındaki farklılıkları incelemek amacıyla gerçek çalışma koşulları altında bir ORÇ jeneratörü ile birleştirilmiş bir biyokütle kazanının enerji performansının değerlendirmişler ve potansiyel iyileştirmelerini belirlemişlerdir. Bölgesel ısıtma tesisindeki sıcaklık düşüşünün, kazanın ana kayıplarını, başka bir deyişle egzoz gizli ısı kaybının ve kazan giriş gücünün sırasıyla %9 ve %16'sını oluşturan egzoz duyarlı ısı kaybını azaltılabileceği vurgulanmıştır. Analizlerde verimlilik eğrilerinin buharlaşma basıncının artmasıyla sürekli olarak artmadığı, ancak aşamalı olarak yassılaştığı görülmüş olup sonuçlar ORÇ pompasının, termik yağ pompasının, yoğunlaşma bölümü fanının ve baca gazı emicisinin, elektrik tüketiminden sorumlu olan ana sistem olduğunu göstermiştir.

Dong vd., (2009), küçük ve mikro ölçekli biyokütle yakıtlı CHP sistemlerinin geliştirilmesi üzerine bir inceleme gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, ORÇ ile biyokütle gazlaştırma ve mikro türbine dayanan biyokütle kaynaklı CHP sistemleri gibi diğer teknolojiler arasında

karşılaştırmalar yapılmış ve her bir teknolojinin avantajları ile dezavantajları tartışılmıştır. Analizler, 400 kWe - 1.5 MWe işlem aralığındaki biyokütle kaynaklı ORÇ sistemlerinin %20 elektrik verimliliği ile iyi sonuçlar verdiğini ve ısıl verimliliği ise %80 seviyelerinde olduğunu göstermiştir.

Jang ve Lee, (2018), 2 kW elektrik, 25 kW termal güç üretimi ve 60°C ılık su temini için ORÇ'ye dayalı ve biyokütle kaynaklı CHP tasarımı için optimum çalışma koşulları ile performansın belirlemek amacıyla analizler yapmışlardır. Termo-fiziksel özelliklere ve ilgili çevresel düzenlemelere dayanarak seçilen sekiz organik çalışma akışkanları, gizli ısı ve kaynama noktası dikkate alınarak A grubu, (siklopentan, izopentan, n-pentan ve dietil eter), B grubu (HFO-1233zd ve HFC-245fa) ve C grubu (HFE-7000 ve HFE-7100) akışkanları şeklinde üç gruba ayrılmıştır. Termodinamik analizler ve optimizasyonlar sonucunda A grubu akışkanları kullanan sistemlerin en düşük kütle akış hızına (0.053 kg/s'den 0.081 kg/s'ye), gerekli en düşük ısı kaynağına (31.64 kW'tan 34.61 kW'a), en yüksek ORÇ verimine (%5.95'ten %7.29'a) ve en iyi CHP verimine (%71.83'ten %72.32'ye) sahip olduğu görülmüştür.

Galindo vd., (2016), içten yanmalı motora bağlanmış bir ORÇ sisteminin deneysel verilerini kullanarak geleneksel ve ileri ekserji analizi yoluyla değerlendirilmesini yapmışlardır. Çalışmalarında, ileri ekserji analizindeki kaçınılmaz ve önlenemez kısımların, bileşenlerin verimliliğini artırma potansiyelinin belirlenmesi açısından önemli bir ölçü olduğu belirtmişlerdir. Buna ek olarak ekserjinin içsel ve dışsal olarak bölünmesinin, bileşenlerin birbirleriyle etkileşimlerinin bilinmesini sağladığını ifade etmişlerdir. Sonuçlar, bu tür sistemlerin yüksek bir gelişme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Geleneksel ekserji analizinde kazanın ekserji yok etme oranının, türbin, yoğuşurucu ve pompadan daha büyük olduğu görülürken ileri ekserji analizi, iyileştirmede önceliğinin verilmesi gereken bileşenin türbin, ardından sırasıyla pompa, yoğuşurucu ve kazan olması gerektiğini göstermiştir. Ekserji yok etme oranının sadece önlenemez kısmının azaltılabileceği dikkate alınarak, toplam 3.75 kW (%36.5)'lık kısmının azaltılabileceği belirlenmiştir. Yapılan analizlerde, sistemdeki tüm bileşenler için içsel ekserjinin değerinin dışsal kısımdan değerinden daha büyük olduğu görülmüş olup buna bağlı olarak bileşenlerdeki ekserji yıkım oranına en büyük etkinin bileşenin kendi içsel tersinmezliği olduğu belirtilmiştir.

## BÖLÜM 2

### BİYOKÜTLE ENERJİSİ

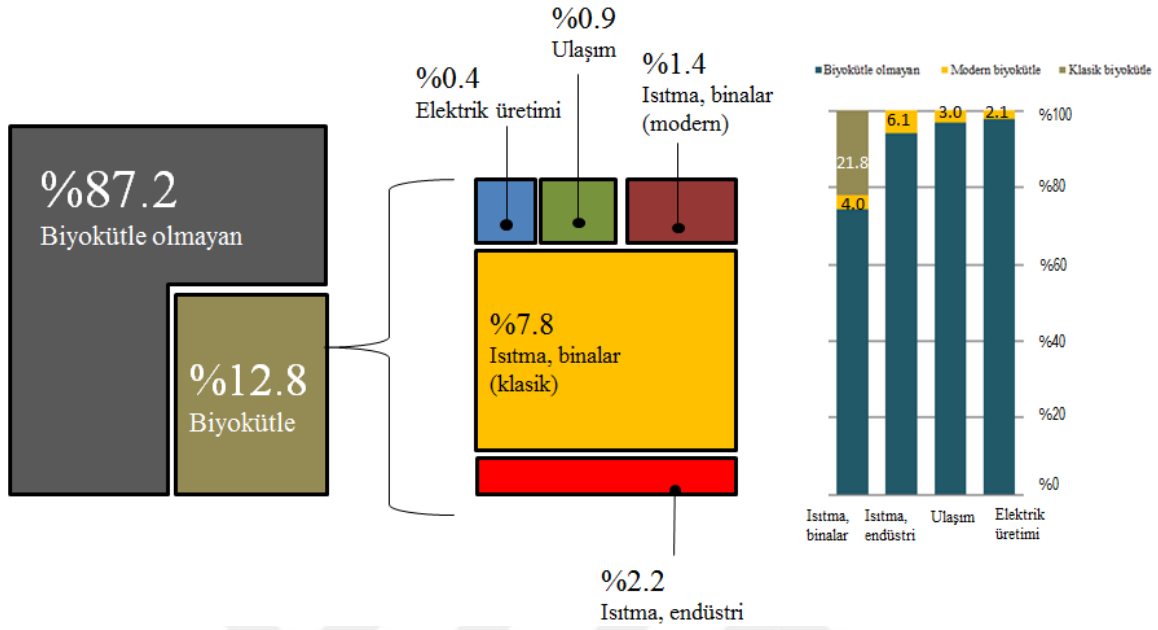
#### 2.1 Biyokütle Enerjisi Özellikleri ve Kullanımı

Artan nüfus ve sanayileşmenin beraberinde getirdiği enerji ihtiyacını, çevresel kirliliğe yol açmadan sürdürülebilir bir şekilde karşılamak için kullanılacak kaynakların en önemlilerinden biri biyokütle enerjisidir (Topal ve Arslan, 2008). Ana bileşen olarak karbonhidrat bileşiklerinden oluşan, bitkisel ve hayvansal temelli doğal maddelerden üretilen enerjiye “Biyokütle Enerjisi” denilmektedir. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları arasında büyük bir paya sahip biyokütle enerjisi ısı, elektrik ve ulaşım için yakıt ihtiyacını karşılama gibi geniş bir üretim potansiyeline sahiptir (Kaplukan, 2014a). Biyokütle enerjisi;

- Enerji arzı için büyük sağlayıcı olma,
- Sera gazı emisyonunda önemli azalma ile birlikte çevresel yararlar,
- Enerji güvenliğinde iyileşme,
- Her yerde kolayca yetiştirilebilme ve depolanabilme,
- Kırsal bölgelerde ekonomik ve sosyal kalkınma,
- Atıkların düzensiz depolanma problemini azaltma ve kaynakları daha verimli kullanma gibi birtakım avantajlar sağlamaktadır (Bayramoğlu, 2013).

Biyoenerji, sıvı biyoyakıt (biyodizel, etanol vb.), atık (sanayi atıkları, kentsek atıklar, evsel atıklar gibi), katı biyokütle (odun, odun kömürü ve diğer biyokütle maddeleri) veya gaz (biyokütle çürümelerinden elde edilen) formlarındaki biyokütleden elde edilir (Üçgül ve Akgül, 2010). Gelişmiş ülkelerin birçoğu biyoenerjiyi geleceğin temel enerji kaynaklarından biri olarak görmektedir (Akyol vd., 2016). Biyoenerji, küresel nihai enerji talebinin yaklaşık %13'ünü karşılayan en önemli yenilenebilir katkıdır. Bu oranın yaklaşık %8'ini geliştirmekte olan ülkelerde biyokütlenin geleneksel kullanımını kalan %5'lik kısmını ise diğer modern kullanım oluşturmaktadır. Binalardaki ve endüstrideki ısı talebinin sırasıyla yaklaşık %4'ü ile %6'sı ek olarak elektrik üretiminin %2'lik ve ulaşım ihtiyaçlarının %3'ü modern biyoenerji tarafından sağlanmaktadır (REN21, 2018). Şekil

2.1'de 2016 yılı için sektörlerdeki genel ve son kullanıma göre toplam nihai enerji tüketiminde biyoenerjinin payı verilmiştir.



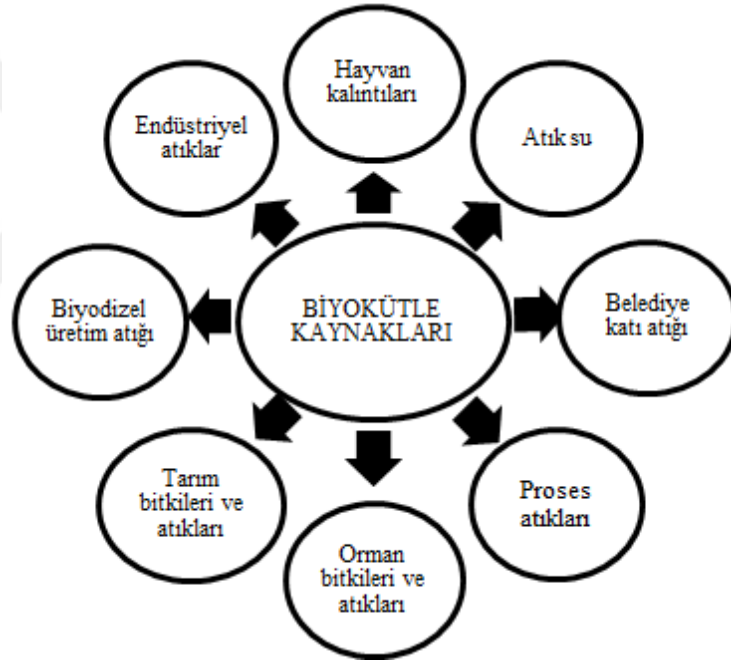
Şekil 2.7: 2016 yılı için sektörlerdeki genel ve son kullanıma göre toplam nihai enerji tüketiminde biyoenerjinin payı (REN21, 2018).

### 2.1.1 Biyokütle

Biyokütle, aynı ya da farklı türlerin bir araya gelmesiyle oluşan toplumdaki canlı organizmaların belirli bir zaman diliminde sahip oldukları toplam kütle olarak ifade edilebilir (Tiftik, 2006). Biyokütle, her toplumda bulunabilen, çevreye verebileceği zarar fosil yakıtlara göre son derece az, elektrik ve ısı üretilmesinde kullanılabilen stratejik bir enerji kaynağıdır (Topal ve Arslan Topal, 2012). Biyokütle doğrudan yakılmakta ya da çeşitli prosesler sonucunda alternatif biyo-yakıtlar elde edilerek enerji teknolojisinde değerlendirilmektedir. Buna ek olarak biyokütle; mobilya, kağıt, yalıtım malzemesi yapımı alanlarında da kullanılmaktadır (Özyurtkan, 2006). Böylelikle ulusal kaynaklar değerlendirilerek, enerji ithalatında azalma sağlanabilir. Türkiye’de bulunan 695 MW değerinde toplam kurulu güce sahip biyokütleye dayalı elektrik santrallerinden, 2018 Haziran ayı sonu itibarıyla 1,610 GWh elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir (Şendoğan, 2019).

## 2.1.2 Biyokütle Kaynakları

Enerji üretiminde yararlanılan biyokütle kaynakları, kullanım yeri ve amacı açısından, klasik ve modern biyokütle kaynakları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Klasik biyokütle kaynakları, yakacak olarak kullanılan odun, bitki ve hayvan atıklarından oluşmaktadır. Klasik biyokütle enerjisi, biyokütleyle doğrudan yakma işlemi uygulanmasıyla elde edilir. Sanayileşmemiş kırsal toplumlar açısından bu kullanım yaygındır. Tarım kesimindeki bitki ve hayvan atıkları, tarıma dayalı endüstri atıkları, enerji ormancılığı ürünleri, orman ve ağaç endüstrisi atıkları, enerji tarım ürünleri, kentsel atıklar ise modern biyokütle kaynaklarını oluşturmaktadır (Akkaya, 2007). Biyokütle kaynakları Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Biyokütle kaynakları (Uddin vd., 2018).

Biyokütle kaynakları farklı prosesler ile katı, sıvı ve gaz yakıtlara çevrilebilir. Çevrim sonunda biyogaz, biyodizel, biyoetanol, gibi ana yakıt ürünlerine ek olarak gübre, H<sub>2</sub> ve bazı toprak katkıları olmak üzere çeşitli yan ürünler elde edilebilmektedir (Torunoğlu Gedik, 2015). Tablo 2.1'de biyokütle kaynakları için kullanılan çevrim yöntemleri ve bu yöntemler ile üretilen yakıtlar ve uygulama alanları gösterilmektedir.



Tablo 2.6: Biyokütle kaynakları için kullanılan çevrim yöntemleri ve bu yöntemler ile üretilen yakıtlar ve uygulama alanları (Ar vd., 2003).

Biyokütle kaynağı	Çevrim Yönt.	Yakıtlar	Uygulama alanları
Enerji ormanları	Biyofotoliz	Motorin	Ürün kurutma
Enerji bitkileri	Doğrudan Yakma	Hidrojen	Isınma
Algler	Hidroliz		Sentetik yağ, Roketler
Bitkisel ve hayvansal yağlar	Esterleşme reaksiyonu	Motorin	Ulaşım araçları, ısınma, seracılık
Hayvansal atıklar	Fermantasyon, havasız çürütme	Metan	Ulaşım araçları, ısınma
Tarım atıkları	Piroliz	Etanol	Isınma, ulaşım araçları
Orman atıkları	Havasız Çürütme	Biyogaz	Elektrik üretimi, ısınma
Çöpler (organik kısmı)	Gazlaştırma	Metanol	Uçaklar

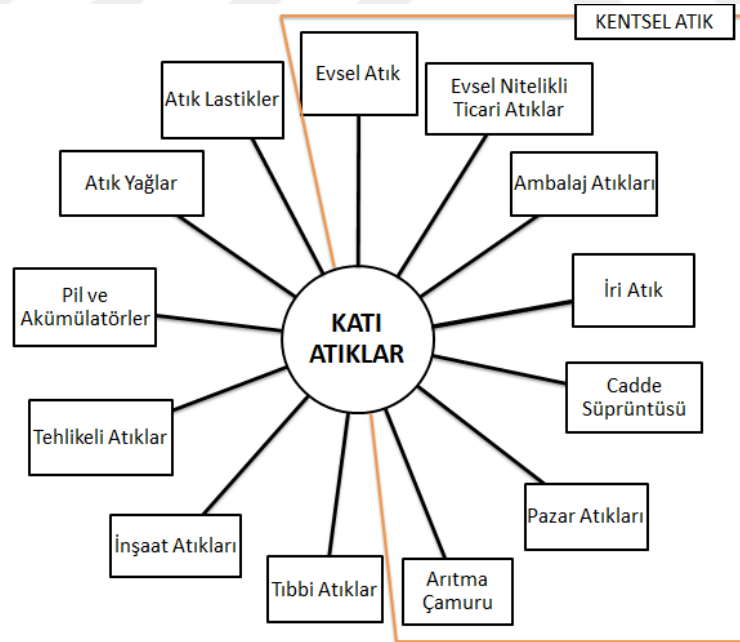
## 2.2 Atık

Globalleşen dünyada, teknolojik gelişmelerin ve sanayileşmenin beraberinde getirdiği, nüfus artışı ve kentleşmeyle birlikte, insan faaliyetlerinin ekoloji üzerindeki olumsuz etkileri giderek artmaktadır. Tüketim eğilimindeki sürekli artışa bağlı olarak, kaynakların daha yoğun ve bilinçsiz kullanımını sonucu oluşan atıklar, hem miktar hem de içerdikleri zararlı maddeler sebebiyle insan sağlığını ve ekolojiyi tehdit edecek duruma gelmiştir (Akdoğan ve Güleç, 2007). Atık kelimesi, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (The United Nations Environment Programme; UNEP)'nda, *“sahibinin istemediği, ihtiyacı olmadığı, kullanmadığı, arıtılması ve uzaklaştırılması gereken maddeler”* olarak tanımlanmaktadır (Gökpur vd., 2019). Atıklar; fiziksel, kimyasal özellikler gibi çeşitli faktörlere göre; katı atıklar, sıvı ve gaz atıklar, ambalaj atıkları, şeklinde sınıflandırılabilir. Sıvı atıklar; hastane kaynaklı diş yıkama suları, kan, diyaliz makineleri suları ile evsel kaynaklı temizlik suları, kanalizasyon suları, gibi atıkları belirtmektedir. Gaz atıklar; Nükleer enerji santralleri, sanayi tesisleri, fosil yakıt kullanımı, yakma teknolojileri, çöp depolama ve kompostlaştırma alanları gibi gaz atıkların kaynaklarını ifade etmektedir. Ambalaj, Avrupa Birliği Ambalaj ve Ambalaj atıkları direktifinde; *“hammaddeden işlenmiş ürüne kadar, bir ürünün üreticiden kullanıcıya veya tüketiciye ulaştırılması aşamasında, taşınması,*

korunması, saklanması ve satışa sunumu için kullanılan herhangi bir malzemeden yapılmış geri dönüşümlü ve geri dönüşsüz ürünlerin tümü” olarak tanımlanmıştır (Gündüzalp ve Güven, 2016). Çevre ve Şehircilik Bakanlığının 30283 sayılı ve 27.12.2017 tarihli Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği’ne göre ambalaj atığı; “*üretim artıkları hariç, Atık Yönetimi Yönetmeliğindeki atık tanımına uyan her tür ambalajı ve ambalaj malzemesini*” içermektedir (RG: 27.12.2007 – 3028).

## 2.2.1 Katı Atık

Katı atıklar, yaşamsal faaliyetler sonucunda oluşan ve herhangi bir amaç için kullanılamayan, bununla birlikte üreticisi tarafından istenmeyen katı maddelerdir (Kaya, 2013). 14.03.1991 tarihli Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği’nde katı atık; “*Üreticisi tarafından atılmak istenen ve toplumun huzuru ile özellikle çevrenin korunması bakımından, düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı maddeler ve arıtma çamuru*” olarak tanımlanmıştır (RG: 14.3.1991 – 20814). Şekil 2.3’te katı atık türleri gösterilmektedir.



Şekil 2.9: Katı atık türleri (Behçet vd.,2014b).

Katı atıklar oluştukları yere göre;

- Evsel Katı Atıklar

- Tehlikeli Atıklar
- Endüstriyel Atıklar
- Tarımsal ve Bahçe Atıkları
- Özel Atıklar
- Tıbbi Atıklar
- İnşaat Artığı ve Moloz Atıklar şeklinde sınıflandırılabilir (Sayar, 2012).

Bileşimlerine göre ise;

- Organik I: Kompostlanabilir ve yanabilir organikler (hayvansal, bitkisel, tekstil atıkları, kağıt)
- Organik II: Biyokimyasal ayrıştırılması mümkün olmayan veya çok yavaş olan organikler (kağıt, plastik atıklar, odun, lastik, deri, kemik).
- İnert Maddeler: Yanmayan maddelerdir (cam, taş, porselen, kil atıkları)

şeklinde üç grupta sınıflandırılabilir (Kayalak, 2007).

Katı atıklar, üretilmelerinden uzaklaştırmalarına kadar geçen süre boyunca, içerisinde buldukları hastalık yapıcı maddelerle doğrudan ya da canlıların beslenme ve üreme kaynağı olması açısından dolaylı olarak insanlarla ve çevre ile sürekli etkileşim halindedir. Katı atıkların çevreye ve insan sağlığına etkileri fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak gruplandırılabilir. Kolera, dizanteri, kuduz, sıtma gibi doğrudan ya da taşıyıcı hayvanlarla bulaşabilen hastalıklar biyolojik etkiler içerisinde ele alınırken; atık depolama alanlarındaki sızıntı suları ve gazlar, hem kimyasal hem biyolojik; çevreye düzensiz bir şekilde bırakılan atıkların insanlara verdiği zararlar ise fiziksel etki olarak kabul edilmektedir (Palabıyık, 2001). Dünyada her gün meydana gelen binlerce ton atığın büyük bir kısmını katı atıklar oluşturmaktadır. Bu katı atıkların düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi ve olumsuz etkilerinin minimuma indirilmesi, küresel açıdan büyük bir öneme sahiptir (Behçet vd.,2014b).

### **2.2.2 Katı Atıkların Özellikleri**

Katı atıkların özelliklerinin bilinmesi, toplama ve taşıma, depolama, değerlendirme ve geri

kazanma yöntemlerinin iyi bir şekilde planlanması amacıyla büyük önem taşımaktadır (Tabasaran, 2016).

### 2.2.2.1 Fiziksel Özellikler

Katı atıkların fiziksel özellikleri, nem içeriği, özgül ağırlık (yoğunluk), arazi kapasitesi, permeabilite partikül boyutu ve boyut dağılımı özelliklerinden oluşmaktadır (Erses Yay, 2011).

#### Nem İçeriği

Nem içeriği atığın fiziksel, kimyasal, yanma süreci ve emisyon özelliklerini etkileyen bir parametredir (Khan vd., 2009). Katı atıkların sahip olduğu nem içeriğinin bilinmesi, bertaraf yöntemleri için özellikle yakma sistemlerinin tasarımı ve işletilmesi açısından büyük bir önem taşımaktadır (Çakır, 2018). Yakıtların yanmasıyla ortaya çıkan ısı miktarı, yakıtın nem içeriği ile doğrudan ilişkilidir. Yakma işlemlerinde atığın nem içeriğinin buharlaştırma ile uzaklaştırılmasından sonra kalan kuru maddenin organik kısmının yanması sonucunda enerji açığa çıkmaktadır (Aynur, 2011). Yüksek nem içeriği, bazı ateşleme sorunlarına neden olmakla birlikte yanma sıcaklığını düşürür, bu durum reaksiyon ürünlerinin yanma kalitesini etkileyerek yakıtın ısıtma değerini düşürmektedir (Khan vd., 2009). Katı atıkların nem içeriği temel olarak ıslak ya da kuru maddenin ağırlığı bazında ifade edilir (Tabasaran, 2016).

$$M = \left( \frac{w - d}{w} \right) \times 100 \quad (1)$$

Formülü ile hesaplanabilmektedir. Burada;  $M$  nem içeriğini (%),  $w$  atığın ilk ağırlığını (kg),  $d$  105°C'de atığın kurutulduktan sonraki ağırlığını (kg) ifade etmektedir (Özcan, 2009). Tablo 2.2'de KKA bileşenlerinin nem içeriğine dair tipik veriler verilmektedir.

Tablo 2.7: KKA bileşenlerinin nem içeriğine dair tipik veriler (MEB, 2009).

Bileşenler	Nem içeriği, %	
	Değer Aralığı	Ortalama değer
Yemek atıkları	50-80	70
Kağıt	4-10	6
Karton	4-8	5
Plastik	1-4	2
Tekstil	6-15	10
Lastik	1-4	2
Deri	8-12	10
Bahçe atıkları	30-80	60
Odun/Ahşap	15-40	20
Çeşitli organikler	10-60	25
Cam	1-4	2
Teneke kutu	2-4	3
Demir içermeyen metaller	2-4	2
Demir içeren metaller	2-6	3
Toz, kül, tuğla vb.	6-12	8
Evsel katı atık	15-40	20

### Özgül Ağırlık (Yoğunluk)

Atığın birim hacminin ağırlığını belirtmektedir. Yoğunluk, jeolojik yapı ve mevsimsel özelliklere aynı zamanda depolama süresinin uzunluğuna bağlı olarak değişim göstermektedir (Özcan, 2009). Katı atıkların yoğunluğu toplama ve taşıma işlemleri açısından büyük önem taşımaktadır (Çakır, 2018). Tablo 2.3'te katı atık bileşenleri ve karışımları için özgül ağırlıklarına ait tipik değerler verilmektedir.

Tablo 2.8: Katı atık bileşenleri ve karışımları için özgül ağırlıklarına ait tipik değerler (Çallı, 2018).

Bileşenler	Özgül ağırlık, kg/m <sup>3</sup>	
	Değer Aralığı	Tipik değer
Yemek atıkları	130-480	290
Kağıt	40-130	89
Plastikler	40-130	64
Bahçe atıkları	65-225	100
Cam	160-480	194
Teneke kutular	50-160	89
Alüminyum	65-240	160

## **Partikül Boyutu**

Katı atık içerisinde bulunan materyallerin boyutu ve büyüklüğü, elek ve manyetik ayırıcılar kullanılarak atıklara uygulanan ayırma yöntemleri için önemlidir. Ayırma işlemlerinde yararlanılacak elek ve diğer materyallerin seçimi yapılırken geri kazanılabilen atıkların tane büyüklükleri dikkate alınması gereken bir parametredir (MEB, 2009).

## **Arazi Kapasitesi**

Arazi kapasitesi, yerçekimi etkisiyle aşağı doğru çekilmeye maruz kalan bir atık numunesinde tutulabilecek toplam nem miktarı olarak tanımlanmaktadır. Depolama sahalarında sızıntı suyunun belirlenmesinde kullanılan önemli bir faktördür. Uygulanan basınç derecesi ve atıkların ayrışma durumuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir, fakat evsel ve ticari kaynaklardan sıkıştırılmamış karışık atıkların arazi kapasitesinin tipik değerleri %50 - 60 aralığındadır (Çallı, 2018).

## **Permeabilite (Hidrolik Geçirgenlik)**

Sıkışabilir katı atığın geçirgenliği (hidrolik iletkenlik), depolama alanlarındaki gaz ve sıvıların hareket yönetiminin sağlanması açısından önemli bir fiziksel özelliktir. Geçirgenliği etkileyen faktörler;

- Gözeneklilik
- Gözenek boyutu dağılımı
- Yüzey alanı (Çallı, 2018).

### **2.2.2.2 Kimyasal Özellikler**

Katı atıkların kimyasal özellikleri, atıkların enerji üretiminde kullanılmasında, geri dönüşümünde, yakılmasında ve bertaraf yöntemlerinin değerlendirilmesinde önemli bir parametredir (MEB, 2009). Kısmi analizler, külün ergime noktası, elementel analizler ve enerji içeriği katı atıkların kimyasal özelliklerini oluşturmaktadır (Erses Yay, 2011).

## Tahmini Analizler (Proximate Analysis)

Atıkların ısı değeri belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri tahmini analizdir. Literatürde endüstriyel analiz olarak da tanımlanmaktadır. Analizde yakıtın uçucu madde (volatiles) ve sabit karbon (fixed carbon) bileşenlerinden oluştuğu varsayılır (Mohamed, 2017). Katı atıkların yanabilen içeriğine uygulanan kısmi analizler;

- Nem içeriği (105°C’de 1 saat kurutma sonucundaki nem kaybı)
- Uçucu maddeler (950°C’de yanma sonrasındaki ağırlık kaybı)
- Sabit karbon (uçucu maddeler giderildikten sonra geriye kalan artık)
- Kül (yanma sonrası geriye kalan artık)

kapsamaktadır (Çallı, 2018). Atığın ısı değeri hesaplanmasında genellikle kullanılan denklem (Öztürk, 2015a);

$$H(kj / kg) = 18560A + 33640B \quad (2)$$

Burada, *A*; uçucu hidrokarbonu, atıktan 600°C’de uçan toplam kuru madde oranını (%) ve *B*; sabit karbonu, atıktan 600–950°C’de uçan toplam kuru madde oranını (%) göstermektedir. Yukarıdaki formül haricinde tahmini analizde kullanılan alternatif bir diğer denklem (Öztürk vd., 2015b);

$$H(kj / kg) = 5800D + 765.6W \quad (3)$$

Denklemdaki *D* ile *W* sırasıyla uçucu madde oranını (kuru bazda, 800°C’deki ağırlık kaybı olarak) ve orijinal bazdaki su oranını (%) göstermektedir. Tablo 2.4’te katı atıkların tipik tahmini analiz değerleri verilmiştir.

Tablo 2.9: Katı atıkların tipik tahmini analiz değerleri (Çallı, 2018).

Atık Türü	Nem	Uçucu Madde	Sabit Karbon	Kül
Yemek atıkları (karışık)	70.0	21.4	3.6	5.0
Kağıt (karışık)	10.2	75.9	8.4	5.4
Plastik (karışık)	0.2	95.8	2.0	2.0
Bahçe atıkları	60.0	42.3	7.3	0.4
Cam	2.0	-	-	96-99
Evsel katı atık	21.0	52.0	7.0	20.0

### Külün Ergime Noktası

Katı atıkların yanması ile oluşan külün ergime ve topaklanma sonucu katılaşmaya (cüruf) başladığı sıcaklık olarak ifade edilmektedir. Katı atıklardan klinker elde edilirken ergime noktası genellikle 1100-1200°C arasındadır (Erses Yay, 2011).

### Elementel analiz (Ultimate Analysis)

Atıkların ısı değeri hesaplanması amacıyla uygulanan yöntemlerden bir diğeri de elementel analizdir (ultimate analysis) (Mohamed, 2017). Elementel analiz, katı atık içerisindeki karbon (% C), hidrojen (% H), oksijen (% O), azot (% N) ve kükürt (% S) ve kül miktarının belirlenmesini sağlar. Elde edilen sonuçlar KKA içerisindeki organik maddelerin kimyasal bileşiminin karakterize edilmesinde kullanılarak atığın yakıt değerinin hesaplanabilmesi sağlanır. Aynı zamanda biyolojik dönüşüm prosesleri için uygun C/N oranlarını elde etmek için uygun atık madde karışımını tanımlamasında kullanılırlar (Erses Yay, 2011). Elementel analizde, atığın ısı değerinin hesaplanması için kullanılan metotlardan birisi, kömürün ısı değerinin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş olan DuLong denklemini esas almaktadır (Öztürk vd., 2015b).

$$H(kj/kg) = 336.4C + 1438.4(H - \frac{1}{8}O) + 92.8S \quad (4)$$

Denklemdaki  $C, H, O$  ve  $S$  sırasıyla karbon, hidrojen, oksijen ve kükürtün kuru bazdaki ağırlık yüzdelerini ifade etmektedir. Dulong denklemi kömür dışındaki maddelerin ısı değerlerinin hesaplanması için uygulandığında kabul edilebilecek sonuçlar vermediğinden pratikte kullanımı bulunmamaktadır. Elementel analizde ısı değerinin hesaplanması için



kullanılan diğerk bir denklem aşağıda gsterilmiştir (Öztürk, 2015a).

$$H(kj/kg) = 334.1C + 1559H + 14.4O + 96S - 25.1N \quad (5)$$

Burada *C,H,O,S* ve *N* sırasıyla karbon, hidrojen oksijen, kükürtün ve azotun yakılabilir atık içerisindeki ağırlık yüzdeleridir.

Elementel Analiz, Amerikan Malzeme ve Test Derneği (American Society for Testing and Materials; ASTM) tarafından yayımlanan standart yöntemlere göre gerçekleştirilmektedir. Karbon ve hidrojen miktarı, yakıt numunelerinin özel bir yakma hücresinde yakılması sonucu oluşan su buharı (H<sub>2</sub>O) ile karbondioksit (CO<sub>2</sub>) analizi ile belirlenmektedir (Öztürk vd., 2015b). Tablo 2.5'te katı atık içerisinde bulunan yanıcı bileşenlerin elementel analiziyle ilgili standart veriler sunulmaktadır.

Tablo 2.10: Katı atık içerisinde bulunan yanıcı bileşenlerin elementel analiziyle ilgili tipik veriler (Erses Yay, 2011).

Bileşen	Ağırlıkça yüzde (kuru bazda)					
	C	H	O	N	S	Kül
<b>Organik</b>						
Yemek atıkları	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Kağıt	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
Karton	44.0	5.9	44.6	0.3	0.2	5.0
Plastik	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
Tekstil	55.0	6.6	31.2	4.6	0.15	2.5
Lastik	78.0	10.0	-	2.0	-	10.0
Deri	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
Bahçe atıkları	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
Ahşap/Odun	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
<b>İnorganik</b>						
Cam	0.5	0.1	0.4	< 0.1	-	98.9
Metal	4.5	0.6	4.3	< 0.1	-	90.5
Kül, vd.	26.3	3.0	2.0	0.5	0.2	68.0

### Atığın Enerji İeriği ve Yanabilirliği

Atık yakma sistemlerinin kurulum ve işletilmesi aşamalarında göz önünde bulundurulması gereken en önemli husus atığın yanabilirliğidir. Yanma özelliklerinin tespit edilmesinde dikkate alınan temel parametre atığın yakılması sonucu açığa çıkan enerji miktarını belirten kalorifik (ısı) değerdir (Saltabaş vd., 2009). Atığın ısı değeri ve yanabilirliği

bileşime bağlı olarak değişmektedir. Isıl değer yanı sıra nem ve kül oranı da yanabilirliği etkileyen diğer faktörlerdir. Bu kapsamda atıkta bulunan organik maddelerin, nem içeriği ve kül oranı yanabilirliğin belirlenmesindeki önemli ölçütlerdir (Mohamed, 2017). Bir yakıtın kalorifik değeri, tamamen yakıldığı durumda üretilen enerjinin ya da ısının miktarını belirtmektedir. Bir yakıtın ısıl değeri, birim hacimdeki ya da ağırlıktaki yakıtın tamamen yanması ile açığa çıkan ısı biriminin sayısı olarak tanımlanmaktadır. Katı yakıtlar için genellikle ısıl değer birimleri olarak MJ/kg, kJ/kg ve kcal/kg kullanılmaktadır (Kopuz, 2011). Bu değer yakıtların enerji değerlerinin karşılaştırmalı analizlerinde kullanılmaktadır. Katı atık sistemlerinde, organik kısmın enerji içeriğinin tespiti yanma uygulamalarında yakıt olarak kullanım potansiyelinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır (Saltabaş vd., 2009).

Yanma tepkimelerinde dikkate alınması gereken alt kalorifik değer (Lower Heating Value, LHV) ya da net kalorifik değer (Net Calorific Value, NCV) ve üst kalorifik değer (Higher Heating Value, HHV) ya da brüt kalorifik değeri (Gross Calorific Value, GCV) olarak tanımlanan iki farklı ısıl değer vardır (Mohammed, 2018; Günay, 2019). Yakıt seçiminde ya da yakıtların yanma verimleri karşılaştırılması yapılırken hangi kalorifik değerlerin kullanıldığı göz önünde bulundurulmalıdır (Durukan, 1997). Laboratuvarlarda bomba kalorimetre kullanılarak yapılan ölçümlerde, yanma esnasında oluşan su buharı ölçüm sonunda yoğunlaşır ve yoğunlaşmayla birlikte ortaya çıkan gizli ısı, ısıl değeri artırır. Bu şekilde ölçülen değer, GCV'yi verir. Teorik olarak yakıttan elde edilebilecek maksimum enerjiyi belirtir. Uygulamada yanma gazları yüksek sıcaklıkta olduklarından dolayı gazın gizli ısıyı açığa çıkarmaz. Bu durumda elde edilen enerji NCV olarak ifade edilir. NCV ve GCV arasındaki fark, yakıt içerisindeki hidrojen miktarının fonksiyonuna bağlı olarak değişmektedir (Günay, 2019). Kalorifik değer hesaplanmalarında NCV'nin kullanılması daha temsili sonuçlara ulaşılmasını sağlamaktadır. Analizlerde kolaylık sağlaması açısından GCV bulunduktan sonra atığın nem içeriği kullanılarak NCV hesaplanır (Mohammed, 2018).

Atıkların kalorifik değerinin hesaplanabilmesi için farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler temelinde atığın elementel, endüstriyel ve fiziksel analizlerini (compositional analysis) dikkate alır. Fiziksel analiz, elementel analizde kullanılan formüllerin yeniden düzenlenerek türetilmesiyle oluşturulan formüllere dayanmaktadır. Atığın bileşiminin (madde grupları dağılımı) bilindiği durumlarda, daha kesin analiz yapmak mümkündür.

Kompleks bir yakıtın ısı değeri, her bir bileşenin tipik ısı değeri kullanılarak hesaplanabilir (Mohamed, 2017). Tablo 2.6'da KKA inert artıklarına ve enerji içeriklerine üzerine tipik veriler görülmektedir.

Tablo 2.11: KKA inert artıklarına ve enerji içeriklerine üzerine tipik veriler (Çallı, 2018).

Bileşen	İnert Artık, %		Enerji, kJ/kg	
	Aralık	Tipik değer	Aralık	Tipik değer
<b>Organik</b>				
Yemek atıkları	2-8	5	3,489-6,978	4,652
Kağıt	4-8	6	11,630-18,608	16,747
Karton	3-6	5	13,956-17,445	16,282
Plastik	6-20	10	27,912-37,216	32,564
Tekstil	2-4	2.5	15,119-18,608	17,445
Lastik	8-20	10	20,934-27,912	23,260
Deri	8-20	10	15,119-19,771	17,445
Bahçe atıkları	2-6	4.5	2,326-18,608	6,513
Ahşap/Odun	0.6-2	1.5	17,445-19,771	18,608
Çeşitli organikler	-	-	-	-
<b>İnorganik</b>				
Cam	96-99+	98	116-233	140
Teneke kutular	96-99+	98	233-1,163	698
Alüminyum	90-99+	96	-	-
Diğer metaller	94-99+	98	233-1,163	698
Toz,kül, vb.	60-80	70	2,326-11,630	6,978
KKA	-	-	9,304-13,956	11,630

Atıkların yakılmasında dikkate alınması gereken diğer önemli bir konu kullanılacak enerji geri kazanım sisteminin toplam maliyet üzerindeki etkisidir. Sadece sıcak su ya da buhar üretiminin yapıldığı yakma sistemlerinde, elektrik üretiminin gerçekleştiği sistemlere oranla maliyette yaklaşık %30 oranında azalma görülmektedir. Eğer sistemde buhar ve elektriğin birlikte üretimi sağlanırsa, maliyet açısından toplam kazanç daha fazla olmaktadır (Aynur, 2011).

### 2.2.2.3 Biyolojik Özellikler

Katı atıkların biyolojik özellikleri, içerisinde bulunan organik bileşenlerin inert organiklere, gazlara ve inorganik maddelere dönüşümlerini içermektedir. Depolama alanlarında atık stabilizasyonun gerçekleşmesinde aerobik (oksijenli) ve anaerobik (oksijensiz) prosesler önem taşımaktadır. Katı atıktaki organik maddeler, aerobik koşullarda reaksiyonlar gösterirler ve mikroorganizmalar aracılığıyla biyolojik ayrışmaya uğrayarak daha az zararlı maddelere dönüştürülürler. Depolama sahalarında atık stabilizasyonu, aerobik ve anaerobik prosesler sonucunda gerçekleşmektedir (Demirtaş,

2009).

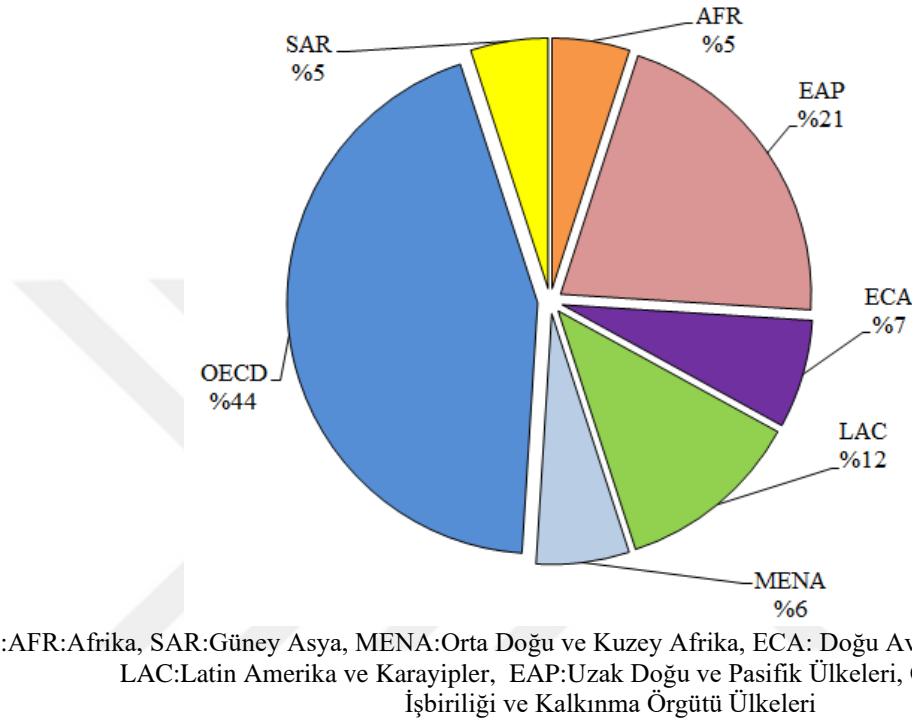
### 2.2.3 Katı Atık Üretimi

Üretilen ve toplanan katı atık miktarının belirlenmesi, doğru bir atık yönetim planının hazırlanabilmesi bununla birlikte atıkların bertarafı için en uygun yönteminin seçilmesi, geri kazanım sistemlerinin tasarlanması açısından büyük önem taşımaktadır (Öztürk vd., 2015a). Nüfus artışı, endüstriyel ve teknolojik alandaki gelişmeler atık oluşum miktarını ve atığın niteliğini etkilemektedir (Şahinkaya, 2014). Kentleşme oranı ve gelir seviyesi arttıkça, ekonomik refah seviyesi yükselmekte olup buna bağlı olarak harcanabilir gelirler, mal ve hizmet tüketimleri artmaktadır. Bu durum üretilen atık miktarında da artışa neden olmaktadır. Dünyadaki tüketim kültürü gelir seviyesine bağlı olarak şekillenmektedir (Kolukısa, 2013). Tablo 2.7’de Hoornweg ve Bhada-Tata’nın (2012), Dünya Bankası için hazırlamış oldukları rapordaki ülkelerin gelir seviyelerine bağlı olarak üretilen atık miktarı ve nüfus artışındaki mevcut eğilimlere göre 2025 yılı için atık üretim tahminleri gösterilmektedir. Araştırma kapsamında; 2025 yılına kadar kentsel nüfus artışı ile birlikte gelir seviyelerine göre atık üretim miktarının da artması beklenmektedir. Kentsel yaşam tarzının en önemli yan ürünlerinden biri olan KKA miktarı kentleşme oranından daha hızlı bir şekilde artmaktadır. 2012 yılı itibariyle yılda yaklaşık 1.3 milyar ton olan küresel katı atık üretiminin, 2025 yılına kadar yılda 2.2 milyar tona yükselmesi öngörülmektedir. Bu, kişi başına atık üretim oranlarında kişi başına günlük 1.2 ila 1.42 kg arasında önemli bir artışı ifade etmektedir. Küresel atık üretiminin, gelir grupları tarafından üretilme oranları incelendiğinde; yüksek gelirli ülkelerdeki atık oluşumunun, küresel boyuttaki atık üretiminin yaklaşık %46’sını meydana getirdiği görülmektedir.

Tablo 2.12: Ülkelerin gelir seviyesine göre 2025 için KKA üretim tahminleri (Hoornweg ve Bhada-Tata, 2012).

Ülke	Mevcut Veriler			2025 için Tahmini Veriler			
	Toplam Kentsel Nüfus (milyon)	Kentsel Atık Üretimi		Tahmini Nüfus		Tahmini Kentsel Atık	
		Kişi Başı (kg / kişi / gün)	Toplam (ton/gün)	Toplam Nüfus (milyon)	Kentsel Nüfus (milyon)	Kişi Başı (kg / kişi / gün)	Toplam (ton/gün)
Düşük Gelirli	343	0.60	204,802	1,637	676	0.86	584,272
Alt Orta Gelirli	1,293	0.78	1,012,321	4,010	2,080	1.3	2,618,804
Üst Orta Gelirli	572	1.16	665,586	888	619	1.6	987,039
Yüksek Gelirli	774	2.13	1,649,547	1,112	912	2.1	1,879,590
<b>TOPLAM</b>	<b>2,982</b>	<b>1.19</b>	<b>3,532,256</b>	<b>7,647</b>	<b>4,287</b>	<b>1.4</b>	<b>6,069,705</b>

Şekil 2.4'teki Dünya'nın farklı bölgeleri için küresel atık üretimi incelendiğinde, 2012 yılı itibariyle aralarında birçok gelişmiş ülkenin olduğu OECD ülkelerinin ortalama 2.2 kg/kişi/gün atık oluşum hızı ile dünyadaki atık üretiminin yaklaşık yarısını (%44) oluşturmaktadır. En az atık üreten bölgelerin ise Afrika ve Güney Asya olduğu (%5) görülmektedir (Hoornweg ve Bhada-Tata, 2012).

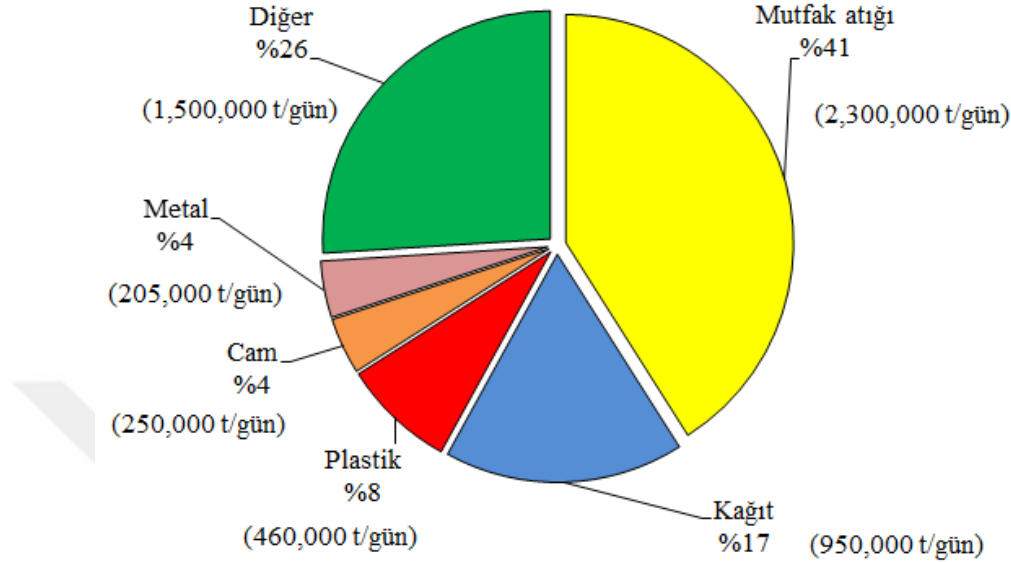


Şekil 2.10: Dünya'nın farklı bölgeleri için küresel atık üretimi (Hoornweg ve Bhada-Tata, 2012).

Atık üretim miktarının giderek hızlı bir şekilde artması, sistemli bir şekilde atık yönetiminin uygulanarak, atık oluşumu ve bertarafı gibi temel unsurlarla birlikte enerji, verimlilik, ekolojik kaynakların ve insan sağlığının korunması konularının da bir bütünlük içinde değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Günümüzde atık sorunu, sadece çevresel ve insansal bir sorun olmaktan çıkmış, artık ülke yönetimleri ve politika uygulayıcıları açısından da önem verilmesi gereken bir konu haline gelmiştir (Gündüzalp ve Güven, 2016). Tehlikeli boyutlara ulaşan katı atıkların miktarları artarken aynı zamanda çeşitleri de artmaktadır. Katı Atık Yönetimi açısından katı atıkların kompozisyonundaki bu çeşitlilik oldukça önem taşımaktadır (Kolukisa, 2013).

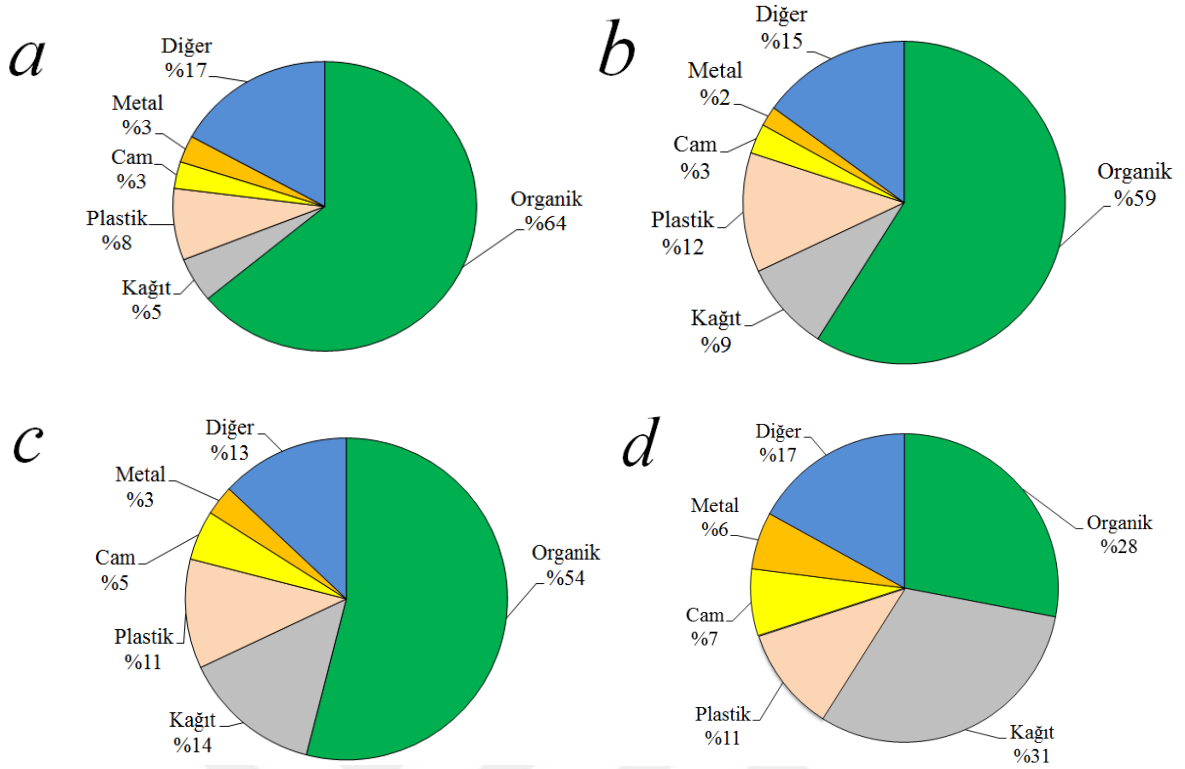
Atık yönetimi çalışmalarında öncelikle güvenilir bir atık envanteri oluşturulması gerekmektedir. KKA yapılarında, kâğıt, ambalaj atıkları, plastik, çeşitli organik maddeler,

tekstil, ahşap, kimyasal bileşen içeren atıklar gibi çok farklı materyal bulundurabilmektedir (Erdoğan ve Yönetken, 2018). Şekil 2.5'te Dünya genelinde oluşan KKA bileşenlerinin miktarları ve oranları gösterilmektedir.



Şekil 2.11: Dünya genelinde oluşan KKA bileşenlerinin miktarları ve oranları (Öztürk vd., 2015b).

KKA bileşenleri, dünya genelinde benzerlik göstermesine rağmen üretilen atığın hacmi, bileşenlerin yoğunluğu ve oranı bölgeler ya da ülkeler arası coğrafi unsurlar, sosyo-ekonomik düzey, iklimsel özellikler gibi çevresel ve sosyal etkenlere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterebilir (Sufian ve Bala, 2006; Aykol, 2008). Belirleyici bu etkenler ülkelerin kişi başına düşen gelir seviyesi ile de ilişkilidir (Hoornweg ve Bhada-Tata, 2012). Ülkelerin gelir seviyesine göre KKA kompozisyonu Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Genel olarak, düşük ve orta gelirli ülkelerde organik madde miktarının kentsel atık dağılımı içindeki oranı yüksektir (%40-85). Kentleşme oranı arttıkça, inorganik madde (plastik, kağıt ve alüminyum gibi) tüketimi artarken, organik madde içeriği azalmaktadır. Düşük gelirli ülkeler için, kağıt ve organik atıklar, kentsel atık dağılımının sırasıyla %5'ini ve %64'ünü oluştururken yüksek gelirli ülkelerde ise bu oran sırasıyla %28 ve %31'dir.



Şekil 2.12: Ülkelerin düşük (a), alt orta (b), üst orta (c), yüksek (d) gelir seviyesine göre KKA kompozisyonu (Hornweg ve Bhada-Tata, 2012).

#### 2.2.4 Katı Atık Karakterizasyonu Analiz Metodu (Madde Grupları Analizi)

Katı atıkların bertaraf edilmesi için uygulanacak doğru yöntemin seçiminde katı atık karakterizasyonunun yapılması çok önemli rol oynamaktadır. Karakterizasyon, o bölgede gerçekleştirilmesi planlanan katı atık sisteminin atık miktarı ile niteliğinin belirlenerek kurulacak tesis kapasitelerinin hesaplanmasını sağlar. Katı atık karakterizasyonu (maddesel grup analizi) kullanılan yöntem uluslararası alanda uygulanan ve kabul gören ASTM (D 5231-92) “Standard Test Method of Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste” kurallarına dayanmaktadır. Bu test yöntemi, temelinde işlenmemiş atığın temsili bir örneğinin toplanması, bileşenlerine ayrılması ve sonuçların raporlanması için prosedürleri içerir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak geri kazanım tesislerinin planlanması ve düzenli depolama sahalarının optimizasyonuna yönelik çalışmalar için kaynak oluşturulmaktadır (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2007).

Katı atık karakterizasyon işlemi için gerekli malzemeler:

- Kantar
- Sabit hacim kabı (1m×1m×1m ya da 1m×1m×0.5m)
- Plastik Örtü (5m×10m)
- Katı atık bileşenlerinin sayısına göre plastik ya da metal kap
- Kürek, süpürge, tırmık, maske, çizme, baret, eldiven, gözlük
- Tartım sonuçlarını kaydedilmesi için not defteri ve kalem'dir (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2007).

Karakterizasyona başlamadan öncelikle atık yığını içerisinde olabilecek tehlikelere karşı görevliler uyarılmalı ve gerekli önlemler alınarak baret, gözlük, eldiven, çizme gibi ekipmanlar kullanılmalıdır. Tehlikeli atıklar ayrı yerde toplanmalı ve görevli kişinin kontrolünde olmalıdır. Katı atık karakterizasyonu yapılacak bölgede oluşan katı atığı temsil eden numunenin alınması amacıyla gelir seviyesine göre bölgenin farklı noktalarından (düşük, orta, yüksek ve çarşı) ayrı toplama araçlarıyla numune alımı yapılır (Ünaldı, 2015). Numune alınacak atıkların hafta içi ve hafta sonunu temsil etmesi için pazartesi ve salı günü oluşan atıkların toplanılmasına dikkat edilmelidir. Karakterizasyonun gerçekleştirileceği alana getirilecek atıkların alındığı noktalar ve miktarları aynı olmalıdır (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2007).

Atık karakterizasyonun gerçekleştirileceği alanın düz bir zemininin olması gereklidir. Farklı bölgelerden atık toplama araçları ile karakterizasyon alanına getirilen atıkların her biri ayrı yığınlar oluşturacak biçimde, zemine serilen en az 5m×10m boyutlarında dayanıklı plastik bir üzerine boşaltılır. Boşaltıldıktan sonra yığınlar ayrı ayrı düzleştirilir ve dört bölüme ayrılır. Temsili numune almak için oluşturulan atık yığınlarından herhangi birinden altı ve üstü açık, kulplu sabit hacim kabına (1m×1m×1m 1 adet ya da 0.5m×1m×1m ölçülerinde 2 adet), içeriğini tamamen dolduracak miktardaki atık, her bölümünden eşit şekilde alınarak konulur (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2007). Atıkla dolu sabit hacim kabı kulplarından kaldırıldığında plastik örtünün üstünde kalan kısma madde grup analizi uygulanır. Tablo 2.8'deki katı atık karakterizasyonu için belirlenen 16 bileşenin her birinin ayrı ayrı konulacağı kapların üzerine karışıklık olmaması amacıyla madde gruplarının adı yazan etiketler yapıştırılır (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2007).



Tablo 2.13: Katı atık bileşenleri (Madde Grupları) (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2007).

Katı Atık Bileşenleri	
Mutfak Atıkları	Yemek artıkları, ekmek, sebze, meyve
Kâğıt	Gazete, dergi, defter
Karton	Süt kutusu, meyve suyu kutusu, tetrapak
Hacimli karton	Karton kutular
Plastik	Tüm plastikler
Cam	Cam şişe, cam bardak, kavanoz
Metal	Teneke kutu, çatal, bıçak
Hacimli metal	Metal dolap, masa vs.
Atık elektrik ve elektronik ekipman	Telefon, radyo vs.
Tehlikeli atık	Pil, boya kutusu, deterjan kutusu, ilaç kutuları
Park ve bahçe atıkları	Dal, ağaç parçası, çim vs.
Diğer yanmayanlar	Taş, kum, toz, seramik
Diğer yanabilenler	Kumaş, çocuk bezi, ayakkabı, terlik, yastık, halı, kilim, çanta
Diğer yanabilir hacimli atıklar	Mobilya, tahtadan yapılmış malzemeler vs.
Diğer yanmayan hacimli atıklar	
Diğer (yukarıdaki gruplar hariç)	

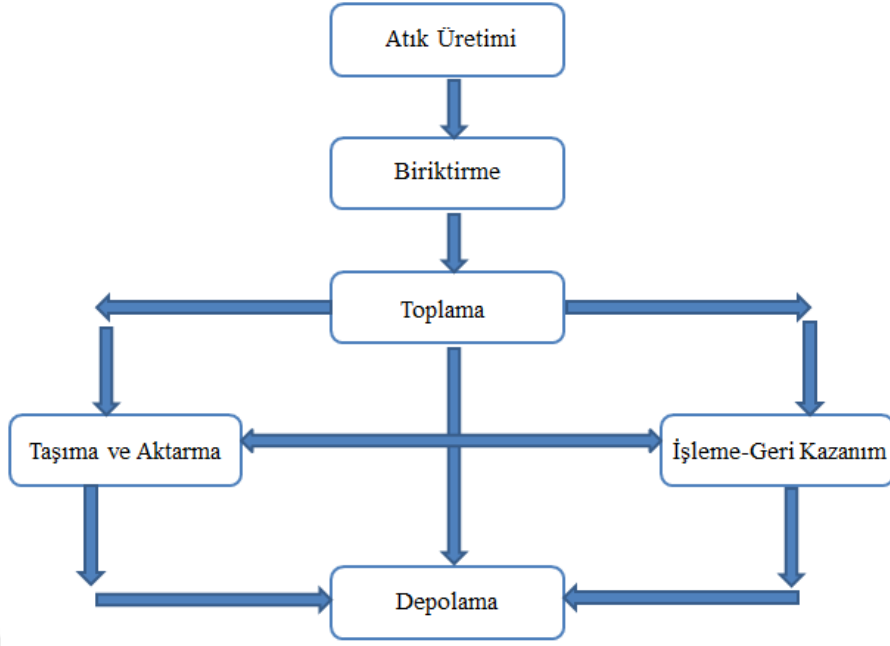
Madde grubu analizine başlamadan önce atık bileşenlerinin koyulacağı kapların daraları tartılarak not alınır. Karakterizasyon boyunca doğru sonuçların elde edilmesi amacıyla kullanılacak kantar tartım işleminden önce mutlaka kalibre edilmelidir (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2007). Yığın içerisinde sabit hacim kabı ile alınan numunenin tümü, yemek artıkları sona bırakılmak üzere uygun kaplara ayrılır. Suyun buharlaşmasının gruplandırma boyunca kütle kaybına neden olabileceğinden dolayı atık ayırma işlemi hızlı bir şekilde yapılmalıdır. Ayıklama yapılırken bağlanmış poşetler varsa bunlar açılmalı, içerisindeki atıklar uygun kaplara konmalıdır. Alınan numunenin uygun kaplara dağıtılmasından sonra tartım işlemine geçilerek, kapların dolu (brüt) ağırlıkları not edilir. Brüt ile dara arasındaki farkı hesaplanarak net ağırlık bulunur. Her bir katı atık bileşeni için bu işlem ayrı ayrı uygulanır. Her bir gelir seviyesi için elde edilen numunenin madde grup analizi yapılarak bileşenlerine ayrılması ve tartım işlemleri sırasıyla gerçekleştirilmelidir. Hazırlanan numunelerden herhangi birinin analiz sonuçları kaydedilmeden diğer bir numuneye geçilmemelidir (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2007).

Kış mevsiminde gerçekleştirilen katı atık karakterizasyonu için yaz mevsiminde olduğu gibi boş kapların ağırlıkları ölçülüp kaydedildikten sonra homojen hale getirilmiş atık yığınının sabit hacim kabına alınan numune, bileşenlerine göre kaplara ayrılır. Dolu

kaplar tartılarak sonuçları not edilir. Sonraki aşamada kış mevsiminde farklı olarak kül oluşumu da dikkate alınmalı ve karakterizasyon işlemi süresince yapılan tartımlarda daha farklı bir yöntem izlenmelidir. Kaplardaki atıklar elek çapı 1 cm olan elekten geçirilerek altta kalan kül kısmı ayrılır. Üstte kalanlar tekrar aynı kaba konduktan sonra tartılarak, tartım sonuçları not edilir. Her bir bileşen için atığın elenmesinden önce ve sonra gerçekleştirilen tartımlar arasındaki fark hesaplanarak kül miktarı ayrı ayrı bulunur. Tüm madde grupların tartım işlemi bittikten sonra tartımların toplanmasıyla toplam numune içindeki kül miktarı hesaplanır. Numunenin bileşenlerine göre ayrıldıktan sonra kül miktarının hesaplanması daha doğru sonuçların elde edilebilmesini sağlar (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2007).

### **2.2.5 Katı Atık Yönetimi**

Katı atıkların neden olduğu risk boyutu, günümüzde ekonomik gelişme ve yaşam standartlarının yükselmesiyle birlikte giderek artmaktadır. Bu önemli sorunun etkili bir şekilde çözümü amacıyla gerçekleştirilen faaliyetlerin bütünü kapsayan sistem “Katı Atık Yönetimi (KAY)” oluşturmaktadır (Soysal, 2015). Katı atık yönetimi, Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından yayımlanan Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik’te “*Atığın toplanması, taşınması, geri kazanılması, bertaraf edilmesi, bertaraf sahalarının kapatılma sonrası bakımı ve bu tür faaliyetlerin gözetim, denetim ve izlenmesi*” şeklinde tanımlanmıştır (RG: 05.07.2008 - 26927). KAY, atık oluşumundan itibaren nihai bertarafa kadar geçen süreçteki yöntemleri ve stratejileri kapsayan bir yönetim biçimidir (Hasanoğlu, 2012). Şekil 2.7’de katı atık yönetimi sisteminin bileşenleri verilmiştir.



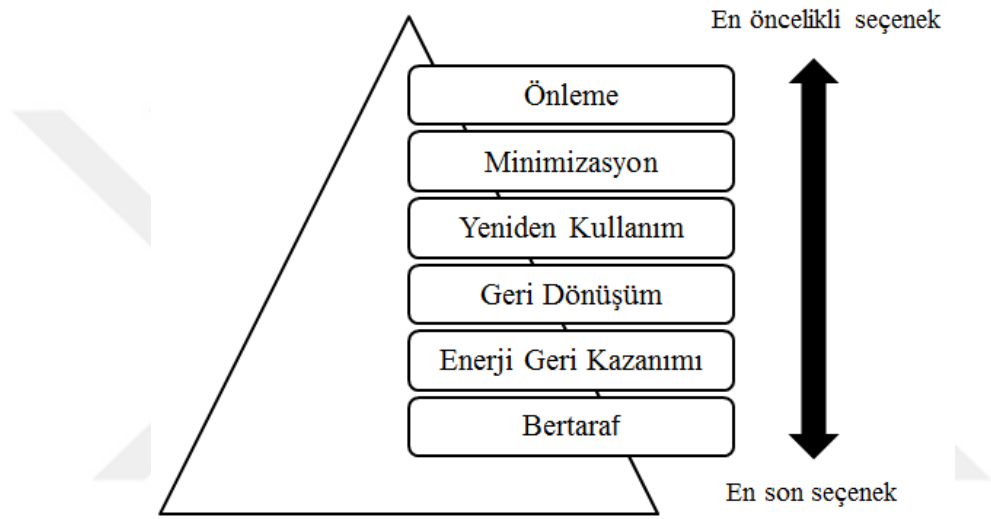
Şekil 2.13: Katı atık yönetimi sisteminin bileşenleri (Hasanoğlu, 2012).

Sistem yaklaşımı; atık oluşumu, toplama ve işleme ile uzaklaştırma gibi temel unsurlarla birlikte enerji, çevrenin ve kaynakların korunması, verimlilik artışı, gibi konularının bir bütünlük içinde değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Atık yönetimi kapsamında; katı atıkların sadece uzaklaştırılması değil aynı zamanda insan sağlığının ve çevrenin korunarak geliştirilmesi ekonomik kalkınmanın gerçekleşmesinde katkı sağlayacaktır (Gündüzalp ve Güven, 2016). Etkin bir KAY planında, katı atık bileşenleri ile bunların miktarları, bölgenin nüfusu ve ilerde oluşabilecek koşullar göz önünde bulundurulmalıdır (Coşkun, 2019).

### 2.2.5.1 Atık Yönetimi Hiyerarşisi

KAY sistemlerinde başlıca altı esas strateji uygulanmakta olup bu stratejilerin bütünü “Atık Yönetim Hiyerarşisi” olarak tanımlanmaktadır (Soysal, 2015). Atık hiyerarşisinde, atık yönetimi seçenekleri çevresel koşullar açısından öncelikli tercih edilmesi gerekenden, son tercih edilmesi gerekene doğru sıralanmaktadır (Şekil 2.8). Stratejilerdeki temel hedef, atıkların kaynağında azaltılması ve kaçınılmaz olarak üretilen atıkların da büyük oranda geri kazandırılarak bertaraf edilecek atık miktarının en aza düşürülmesidir. Atık Yönetim Piramidinin değerlendirilmesi üst basamaktan alt basamaklara doğru yapılmaktadır. İlk aşama atığın oluşumunun önlenmesidir. Bu yöntem uygulanamıyorsa atığın

minimizasyonu (azaltımı) gerçekleştirilir. Sonrasında atığın yeniden kullanımı, eğer mümkün değilse sırasıyla önce geri dönüşüm ve ardından enerji geri kazanımı amaçlanır. Piramidin en alt basamağında son işlem, bu yöntemleri uygulayamadığımız atıkların çevreye zarar verilmeden yakılması ya da güvenli bir şekilde depolanarak bertaraf edilmesidir (Yaydırgan, 2018). Dünya çapında benimsenmiş bu yönetim hiyerarşisi, “Entegre (Bütünleşik) Katı Atık Yönetim (EKAY)” sisteminin temelini oluşturur ve uyarlanması atık yönetimi içerisinde bütüncül bir sistem yaklaşımı oluşturulmasıyla mümkündür (Kıcım, 2015).



Şekil 2.14: Atık yönetim hiyerarşisi (Yaydırgan, 2018).

**Önleme;** Kaynakta önleme, atığın doğrudan oluşum kaynağına yönelik yapılan çalışmalardır. Yöntem yaklaşımı, atık oluşumu gerçekleşmeden bu oluşuma neden olan faktörlere karşı alınabilecek önlemler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Evsel katı atık miktarının kaynağında azaltılması amacıyla tüketicilerin veya kullanıcıların konuyla ilgili bilinçlendirilmesi bu yaklaşımın ilk basamağıdır. Katı atık oluşumunun önlenmesi, atık miktarını azaltarak üretim ve atıkların bertarafı için tüketilen doğal kaynaklar ile ekonomik kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır (Adaç, 2019).

**Atık minimizasyonu (azaltma):** Atık azaltımı, kaçınılmaz olarak oluşan atık miktarının ve atık içerisindeki toksin oranının minimuma indirilmesini amaçlamaktadır. Sistem içindeki önlenemez atıkların çevre ve ekonomi üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılmasının en kısa yoludur. Üretimde kullanılacak yöntem ve hammadde belirlenirken atık miktarının minimize edilmesini sağlayacak değişikliklerin yapılması, nihai ürünlerin

kullanım süresini uzatacak araştırma geliştirme çalışmaları bu yönetime örnek olarak verilebilir (Yaydırgan, 2018).

**Tekrar kullanım:** Atıkların toplama ve temizleme işlemleri haricinde başka bir işleme tabi tutulmadan aynı şekli koruyarak ekonomik ömrü bitinceye kadar defalarca kullanılmasıdır (Kaçtıoğlu ve Şengül, 2010). Evsel ve endüstriyel katı atıklar içerisinde değerli ve ekonomik ömrünü tamamlamamış çok sayıda materyal bulundurmaktadır. Bu materyaller temizlenerek aynı veya farklı amaçlarla tekrar kullanılması mümkün olabilmektedir. Örnek olarak evlerde ve endüstrilerde kullanılan kağıt, metal, plastik ve cam ambalajlar verilebilir (Hasanoğlu, 2012).

**Geri dönüşüm:** Çevre Bakanlığı'nın 25.04.2002 tarihli ve 24736 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Katı atıkların Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılması Hakkında Yönetmeliğinde göre geri dönüşüm; *“atıkların bir üretim prosedürüne tabi tutularak, orijinal amaçlı ya da enerji geri kazanımı hariç olmak üzere, organik geri dönüşüm dahil diğer amaçlar için yeniden işlenmesi”* olarak tanımlanmaktadır (RG: 14.3.1991 - 20814). Katı atık içindeki değerlendirilebilir maddeler geri dönüşüm sayesinde ekonomiye tekrar kazandırılır (Kaçtıoğlu ve Şengül, 2010). Bu yaklaşımda, atıklar fiziksel ya da kimyasal işlemlerden geçerek yeniden hammadde olarak kullanılırlar. Atıkların geri dönüşümü ile hem hammadde olarak kullanılan doğal kaynaklarda hem de ürün oluşumu sürecinde yararlanılan enerji kaynaklarının kullanımında önemli tasarruflar elde edilir (Yaydırgan, 2018).

**Geri kazanım:** Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'nde 2.11.1994 tarih ve 22099 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan değişiklikle birlikte geri kazanım; *“tekrar kullanım ve geri dönüşüm kavramlarını da kapsayan; atıkların özelliklerinden yararlanılarak içindeki bileşenlerin fiziksel, kimyasal veya biyokimyasal yöntemlerle başka ürünlere veya enerjiye çevrilmesi”* şeklinde tanımlanmaktadır (RG: 14.3.1991 - 20814). Geri kazanımda atıkların ya da bileşenlerinin atık işleme yöntemleriyle yeni bir nihai ürüne ya da enerjiye dönüştürülmesi amaçlanmaktadır. Organik maddelerin kompost işlemiyle, tarımda gübre olarak kullanılmak üzere dönüştürülmesi, yakarak enerji üretimi, depolama gazı ile enerji üretimi, yakma sonucu oluşan kül ve cürufun dolgu malzemesi olarak kullanımı çeşitli geri kazanım örnekleridir (Yaydırgan, 2018).

**Nihai Bertaraf (depolama);** Depolama, atık yönetim hiyerarşisinin üst basamaklarındaki yöntemler geçmiş atıkların geriye kalan ve bu yöntemleri uygulayamadığımız kısımlarının düzenli ve kontrollü bir şekilde depolanarak bertaraf edilmesidir (Yaydırgan, 2018). Sistem yaklaşımı, geri dönüştürülebilir ve geri kazanılabilir atıklar (kağıt, karton, plastik, cam, metal) ayrıştırıldıktan sonra kalan atıklar sistemli ve kontrollü şekilde depolama alanlarına gömülmektedir. Katı atıkların bertarafında düzenli depolamanın yanı sıra kompostlama, piroliz ve yakma yöntemleri de uygulanmaktadır (Adanç, 2019).

### **2.2.5.2 Entegre Katı Atık Yönetimi**

Nüfustaki hızla artış, endüstri ve teknolojik alanlardaki gelişmelere bağlı olarak yaşam standartlarının değişmesi, üretilen atık hacmini ve kompozisyonunu çeşitlendirmiş olup bu durum atıkların kontrol edilmesini ve yönetilmesini zorlaştırmıştır. Katı atıkların neden olduğu mevcut ve potansiyel risklerin boyutunun giderek artması, doğal kaynakların tükenmesi, ekonomik ve çeşitli sebeplerle günümüzde katı atık yönetimi her geçen gün önem kazanmakta ve karmaşıklaşmaktadır (Arıkan, 2013).

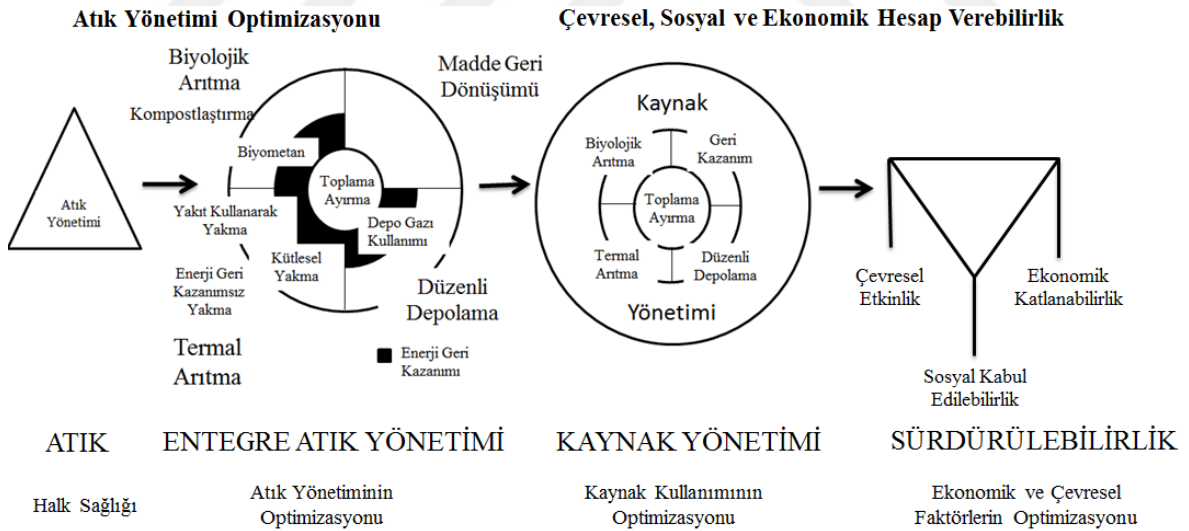
Katı atık yönetiminin, sürdürülebilir ve bütünsel bir yaklaşımla uygulanması gerekliliği EKAY içiminin benimsenmesinde etkili olmuştur. Bu sistemde, atık yönetiminin tüm unsurları hem çevresel hem de ekonomik yönden sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla bir bütün olarak değerlendirilir (Soysal, 2015). EKAY, belirli atık yönetimi amacına ulaşılması için gerekli olan uygun yöntem, teknoloji ile yönetim programlarının seçilip uygulanması şeklinde tanımlanabilir (Bay, 2018). Temel amacı, atıkların neden olduğu negatif çevresel etkileri en uygun maliyetle minimuma indirmek olan EKAY sistemlerinin aşağıda verilen 6 temel özelliği taşıması gereklidir:

- Bütüncül bir yaklaşıma sahip olmalıdır.
- Atık içerisindeki tüm maddeleri ele almalıdır.
- Farklı bertaraf ve toplama yöntemlerini kullanabilmelidir.
- Ekonomik açıdan karşılanabilir olmalıdır.
- Çevresel yönden etkili olmalıdır.
- Toplumsal olarak kabul edilmelidir.

Atık yönetim hiyerarşisinin aksine EKAY sistem yaklaşımında tüm yönetim seçeneklerinin bir rolü vardır. EKAY sisteminde, toplanan atığın sürdürülebilir yönetimin gerçekleştirilmesi amacıyla geri dönüşüm, termal ve biyolojik yöntemlerle birlikte bertaraf ve düzenli depolama seçenekleri de kullanılabilir (Soysal, 2015). Günümüzde, EKAY için öncelik sıralamasına göre uygulanması öngörülen başlıca 4 esas strateji;

- Atık azalma (azaltım-önleme)
- Maddesel geri dönüşüm (kompostlaştırma, ambalaj atıkları)
- Enerji geri kazanım, termal dönüşüm (gazlaştırma, biyometan enerjisi, yakma)
- Düzenli depolama

Bu stratejiler birbirleriyle bağlantılı olarak çalışır ve aralarında karşılıklı ilişkiler bulunmaktadır (Şekil 2.9). EKAY kapsamındaki teknolojik seçeneklerin uygulanmasında uluslararası eğitim ve kararlar büyük önem taşımaktadır. (Tabasaran, 2016). EKAY uygulamaları için her toplum, üretilen atık özelliklerini, ekonomik ve teknik olanaklarını dikkate almalıdır (Arıkan, 2013).



Şekil 2.15: EKAY bileşenleri ve zamansal gelişimleri (Tabasaran, 2016).

## 2.2.6 Katı Atık Bertaraf Etme Yöntemleri

Katı atıkların oluştukları bölgede geçici olarak biriktirilmeleri, daha sonrasında bu bölgelerden toplanıp taşınarak madde ve enerji geri kazanım amacıyla uygulanan

kompostlaştırma, yakma ve düzenli depolama işlemleri ile çevre ve insan sağlığı açısından zararsız hâle getirilmeleri bunun yanı sıra da ekonomiye katkı sağlama çalışmalarının tümü bertaraf etme kapsamına girmektedir (Aydoğan vd., 2011). Katı atıklara uygun bertaraf yöntemleri planlama ve idare metotlarına bağlı olarak seçilir. Bunlara örnek olarak mühendislik, ekonomi, çevre düzenlemesi, arazi kullanımını ile coğrafi ve sosyal faktörler verilebilir (MEB, 2011).

### **2.2.6.1 Depolama**

Katı atıkların, kontrolsüz bir şekilde araziye gelişigüzel atılması, çöp sızıntı sularının yeraltı ve yerüstü sularını kirletmesi, atmosfere patlama riski taşıyan metan gazlarının salınımı, sinek, fare gibi zararlıların sağlığa uygun olmayan ortam oluşturması ve daha birçok önemli problemlere yol açmaktadır (Akpınar, 2006). Depolamanın düzenli ve kontrollü olarak modern yöntemlerle yapılması, düzensiz (vahşi) depolamanın neden olduğu olumsuzlukların engellenmesi ya da minimum seviyede düşürülmesi sağlamaktadır. Düzenli depolama yönteminde ise farklı olarak, katı atıklar çevre sağlığını olumsuz etkilemeyecek şekilde önceden bu amaç için belirlenmiş alanlara dökülüp sıkıştırılır; günlük olarak üzeri toprakla örtülür, dolan arazi toprakla kapatılır ve çürümeye terk edilir. Atık bertarafı için kullanılan en ekonomik yöntem olmasının yanı sıra çevresel açıdan kabul edilebilir, emniyetli bir seçenek olması ve metan gazı ile elektrik enerjisi üretiminin mümkün olması düzenli depolamanın önemli özelliklerinden ve avantajlarındandır (Arıkan, 2013).

### **2.2.6.2 Geri Kazanım**

Geri kazanım, atıkların çeşitli yöntemler kullanılarak işlenmesi ile kazanılan enerji ya da oluşan yeni bir ürün demektir. Yöntem kapsamına atıkların geri dönüşümü ve yeniden kullanımı da dahildir (Kıcımın, 2015). Katı atıkların geri kazanım oranı, bu yöndeki hedeflerin doğru konulmasına ve hedefler için uygun sistemin oluşturulmasıyla ilişkilidir. Geri kazanımın hedefleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Kaya, 2013) :

- Enerji kazanımı
- Yer tasarrufu
- Kaynak koruma



- Çevre koruma

İçerisindeki ekonomik değeri olan maddelerin geri kazanımının verimli olabilmesi için katı atıkların kaynağında ayrı toplaması gerekmektedir. Atıkların kaynağında ayrıştırılmasında getirtme ve toplama olmak üzere yaygın olarak iki yöntem uygulanmaktadır. Getirtme, toplayıcı yönünden pasif bir yöntem olup temel prensibi ağırlıklı olarak tüketici etkinliğine dayanmaktadır. Bu yöntemde bireyler atıklarını, toplama kumbaralarına ya da ayırma/işleme merkezlerine götürürler. Kaynağından alma veya toplama yöntemi ise toplayıcı açısından aktif bir sistemdir. Ayrı olarak biriktirilen atıklar yerel yönetim ya da yetkilendirilmiş kuruluş tarafından toplanır (Kaya, 2013).

### 2.2.6.3 Biyolojik Sistemler

Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan eğilim artmasına bağlı olarak, günümüzde farklı teknolojiler kullanılarak atıktan enerji üretilebilir duruma gelinmiştir. Bu teknolojilerden biri olan biyolojik sistemler içerisinde farklı yöntemler bulundurmaktadır (Arıkan, 2013). Biyolojik sistemler biyolojik olarak ayrışabilir organik maddelerin, kararlı bir ürüne dönüştürüldüğü ve bu sayede atık hacminin azaltıldığı sistemlerdir. Bu sistemler dört grupta incelenebilir (Kıcıman, 2015).

**Kompostlama;** Mikroorganizmaların, ideal koşullar altında (yeterli oranda hava, nem, sıcaklık, pH, tane yapısı) biyokütle içerisindeki organik maddeleri ayrıştırarak, humusa benzer yapıdaki kompost adı verilen maddeye dönüştürdüğü işlemdir (Arıkan, 2013). Ekzotermik bir süreç olan bu proses sırasında enerji açığa çıkmakta olup aynı zamanda önemli miktarda ısı, H<sub>2</sub>O ve CO<sub>2</sub> de üretilmektedir (Mohammed, 2018). İşlem sonucunda elde edilen kompost, katı atığın kaynağında ayrıştırılabilmesi halinde daha kaliteli ve verimli olmaktadır. Gübreden farklı olarak kompost, toprağı iyileştirici, su tutma kabiliyeti ve organik değeri yüksek bir maddedir (Yıldız vd., 2009). Kompostlaştırma, düzenli depolama ile karşılaştırıldığında biraz daha pahalı, termal yöntemlerden ise daha ekonomik ve çevre dostu bir katı atık bertaraf metodudur. Düzenli depolama alanlarına gönderilecek katı atık miktarının azalmasını sağlayan kompostlaştırma metodu farklı sistemleriyle dünya genelinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Kıcıman, 2015).

**Biyometanizasyon;** Organik atıkların anaerobik (oksijensiz-havasız) koşullarda ayrıştırılarak biyogaz üretiminin gerçekleştirildiği çok aşamalı (Hidroliz-Asit üretimi-Metan üretimi) biyokimyasal reaksiyonlardan oluşan yöntemdir. Biyometanizasyon sonucu ortaya çıkan biyogaz, kokusuz, renksiz, parlak mavi bir alevle yanan ve havadan hafif bir gazdır (Kıcımın, 2015). Biyogaz doğrudan elektrik ve ısı üretimi için kullanılabilmesi gibi yakıtta da dönüştürülebilmektedir. Biyometanizasyon yönteminin sağladığı avantajlarından birisi de depolama alanlarında oluşan metan gazı emisyonlarının azaltılmasıdır (Mohammed, 2018).Biyometanizasyon yoluyla biyogaz üretimi, yenilenebilir enerji kapsamında değerlendirilmekte olup çevresel ve ekonomik yönden önem taşımaktadır (Arıkan, 2013).

**Bioetanol/Biyodizel;** oksijensiz ortamda biyobozunur kentsel atıkların biyolojik parçalanma işlemidir. İşlem sonucu üretilen maddeye göre “biyoetanol” ya da “biyodizel” adını alırlar (Kıcımın, 2015). Bioetanol, şeker pancarı, buğday mısır gibi şeker gibi tarımsal ürünlerin fermantasyonu ile elde edilir. Biyodizel üretiminde ise bitkisel ya da hayvansal yağlar kullanılmaktadır. Biyodizel, çevre dostu olması, doğada kolay bozulabilmesi, yenilenebilmesi, değişim gerektirmeden dizel motorlarda kullanılabilmesi gibi özellikleriyle ulaşım sektöründe biyoetanolün yanı sıra yaygın olarak kullanılan alternatif enerji kaynaklarından biridir (Arıkan, 2013).

**Biyokurutma (Biyodrying);** biyolojik olarak parçalanabilen, organik içeriği yüksek kentsel atıkların uygun koşullarda ve biyolojik faaliyetler neticesinde ortam sıcaklığının (60°C) etkisiyle nem oranının azaltılarak kalorifik değeri yüksek yakıtların elde edildiği yöntemdir (Kıcımın, 2015). Kompost yönteminde işlem süresinin uzun olması, istenilen nitelikte kompostun elde edilmesinde ve üretilen kompostun değerlendirilmesinde yaşanan güçlükler biyo-bozunur evsel atıkların bertarafında alternatif yöntemlerin göz önünde bulundurulmasını zorunlu kılmıştır. Evsel katı atıklara ön işlem uygulanarak hacimsel azalmanın sağlanması ve enerji elde edilmesi mümkündür. Fakat bu atıkların yüksek nem içeriğine sahip olması enerji üretim sürecini olumsuz yönde etkilemektedir. Biyokurutma işlemi havalandırma ve ısı etkisi ile hacim ve nem azaltımını sağlayan iyi bir ön işlem ve çözüm yolu olarak düşünülmektedir (Mohammed, 2018). Biyokurutma ile kompostlaştırmanın çok sayıda ortak noktası bulunmaktadır, temel fark işlemler sonrasında nihai üründür. Biyokurutma sonrası elde edilen kalorifik değeri yüksek ürünler çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılmakta ve böylece atıktan bertaraf

maliyeti ortadan kaldırılarak enerji elde edilmekte ve atıklar uygun koşullar altında uzaklaştırılarak doğal çevrenin korunması sağlanmaktadır (Arıkan, 2013).

#### 2.2.6.4 Termal Sistemler

Termal bertaraf yöntemleri, atığın hacminin ve miktarının azaltılması amacıyla atıkların yüksek sıcaklıkta enerji ve diğer yan ürünlere dönüştürüldüğü uygulamalardır. Böylelikle depolanacak atık miktarı azaltılırken, işlemler sonucu ortaya çıkan atık içerisindeki ısı kullanılarak enerji geri kazanımı gerçekleştirilmektedir (Saltabaş vd., 2011). Katı atıkların termal yöntemler ile hacimce %80-90, ağırlık olarak ise %75-80 oranında azaltılabilmesi mümkündür. Proses sonucunda ısı enerjisiyle birlikte inert gaz ve kül oluşmaktadır. Termal yöntemler sonucu elde edilen net enerji miktarı atığın bileşimine, nem oranına, içerisindeki inert maddelere ve yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Organik maddelerin ısıl içeriği termal yöntemler kullanılarak %65-80 oranında sıcak suya, buhara ve sıcak havaya dönüştürülebilmektedir (Soysal, 2015). Katı atıkların bertarafında kullanılan termal yöntemler sisteme verilen hava miktarına göre sınıflandırılırlar. Bu yöntemler dört başlık (Gazlaştırma, Piroliz, Plazma, Yakma) altında gruplandırılabilir (Kıcımın, 2015).

**Gazlaştırma/Gazifikasyon;** yanma için gerekli oksijen miktarından daha az miktarda oksijen kullanılarak atıkların bozunmasının gerçekleştirildiği yarı yakma işlemidir. (Arıkan, 2013). Gazlaştırma işleminde kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan gaz karışımlarına (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> gibi) sentez gaz (syngas) denmektedir. Gazlaştırma yöntemi için gerekli oksijen miktarı çoğunlukla teorik yanmada gerekli olan miktarın % 35'i veya daha azı olacak şekilde kontrol edilmektedir. Dünya genelinde farklı gazlaştırıcı sistemler bulunmaktadır. Gazlaştırma işleminde uygulanacak proses seçimi kullanılacak yakıt özelliklerine, tipine ve işlem sonrası nihai elde edilecek sentez gazından hangi ürünün üretileceği dikkate alınarak belirlenmektedir. Gazlaştırma yöntemi yakıt pili, içten yanmalı motor, sıvı yakıt üretimi gibi farklı alanlarda kullanılacak temiz gaz ürünlerinin elde edilmesini sağlayan alternatif bir teknoloji olarak öne plana çıkmaktadır (Nayır, 2012). Üretilen gazlar hem elektrik üretimi hem de doğrudan ısıtma amacıyla yakıt gazı olarak kullanılmaktadır. Biyometanizasyon yöntemi ile üretilen biyogazla karşılaştırıldığında gazifikasyonda oluşan gaz daha yüksek kalorifik değere sahip olup gaz motorları ve türbinlerinde daha iyi yanmaktadır. Gazifikasyon işlemi yan ürünleri genellikle inert/tehlikesiz olup, yol iyileştirme malzemesi yada stabilizasyon için

değerlendirilebilmektedir (Arıkan, 2013).

**Piroliz;** organik maddelerin oksijensiz ortamda ve 300-700°C arasında değişen sıcaklıklarda seri reaksiyonlar ile termal bozunmaya uğratıldığı metottur. Bu işlem sonucunda elde edilen ürünler piroliz gazı, yarı kok (kömür granülü) ve yağdır (Kıcımın, 2015). Piroliz ürünleri, ısıya elektriğe ve diğer yan ürünlere kolay bir şekilde dönüştürülebilir. Piroliz prosesi ile üretilen yüksek kalorifik değere sahip piroliz gazı, gaz motorları ya da türbinlerinde yakıt olarak kullanılabilir. Proses yan ürünleri ile atığı ise stabilizasyon materyali vb. olarak değerlendirilebilir (Arıkan, 2013). Piroliz için gerekli ısı miktarı, organik maddenin kimyasal yapısını bozulmasını bununla birlikte yeni kimyasal maddelerin oluşmasını sağlayacak düzeyde olmalıdır. Proses ürünlerinin verimi ve bileşimleri; piroliz ortamına (inert, basınçlı, vakum, kısmen reaktif, hidrojen eşliğinde), uygulanan piroliz tekniğine (yavaş, hızlı), piroliz parametrelerine (sıcaklık, alıkonma süresi, parçacık büyüklüğü), reaktör türüne (akışkan yataklı, sabit yataklı, serbest düşmeli sürüklemeli akışlı) ve hammaddeye bağlı olarak değişir (Akkuş, 2009). Piroliz ve gazlaştırma sistemlerinin ikisi de katı atıkların katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüştürmesinde kullanılmaktadır. Bu sistemler arasındaki temel fark piroliz sistemlerinde oksijensiz ortamda endotermik reaksiyonların devam edebilmesi için bir ısı kaynağına gerek duyulurken, gazlaştırma sistemlerinde ise gerekli ısı kendi içinde sağlanır ve katı atığın kısmi yanmasında havadan ya da oksijenden yararlanır. Yanma ve gazlaştırma proseslerinin yüksek oranda ekzotermik olmasına karşı, pirolitik prosesler yüksek oranda endotermiktir (Akpınar, 2006).

**Plazma;** çok yüksek sıcaklıklarda (5 000–100 000°C) katı atığın içerisindeki inorganik bileşenler cam, tuğla kiremit gibi materyallere, organik bileşenler (kâğıt, yağ, plastik, biyo malzemeler) ise elektrik enerjisinin üretiminde kullanılacak yüksek kalorifik değerli sentetik gazlara dönüştürülür. Tüm tıbbi, toksik, tehlikeli, nükleer ve endüstriyel atıklar bu yöntem ile işlenmektedir (Kıcımın, 2015).

Diğer bir termal bertaraf yöntemi ise yakmadır. Doğrudan yakma teknolojisi atıktan enerji üretiminde kullanılan en yaygın yöntemdir. Atıktan enerjiye dönüşüm için kurulan tesislerin birçoğu doğrudan yakma sistemlerini kullanmaktadır (Avcı, 2016).

## 2.2.7 Yakma

Katı atıkların hacimsel olarak azaltma bununla birlikte enerji elde edilmesi amacıyla özel olarak projelendirilmiş tesislerde yakılarak uzaklaştırma ve enerji kazanım yöntemidir (Işıldar, 2018). Yakma prosesi yüksek sıcaklıkta meydana gelen bir kuru oksidasyon işlemidir. Atıklar bu yöntemde yüksek bir ısıda yakılarak enerji ve diğer yan ürünlere dönüştürülmektedir (Kolukısa, 2013). Bu ısıveren tepkimenin sonucunda reaksiyon ürünü olarak inert gaz, su buharı, uçucu kül ve cüruf gibi maddeler ortaya çıkar. Atık yakma uygulamalarındaki temel amaç atıkların stabil hale getirilmesi, hacimsel azaltımı, içerisindeki toksik madde gibi tehlikeli etkilerinin ortadan kaldırılması ve işlem sırasında açığa çıkabilecek potansiyel kirletici maddeleri yakalamak ya da bertaraf etmektir. Atık yakma sistemleri, düzenli depolama yöntemi ile karşılaştırıldığında atık bertarafının daha kısa sürede gerçekleştirilmesi ve alan ihtiyacının daha az olması gibi avantajlara sahiptir (Aynur, 2011). İşlem sonucunda atıkların yaklaşık olarak hacimce %80-90, ağırlık bakımından %75-80 oranında azaltılabilmesi mümkündür. Yakma yöntemi ile genellikle yeniden işleyip kullanılabilir hale getirilemeyen atıkların bertaraf edilmesi sağlanmaktadır (Kolukısa, 2013). Modern atık yakma tesislerinde 1 ton KKA'nın termal yöntemle bertaraf edilmesiyle ~700 kg baca gazı (%70), 230-270 kg arasında taban külü (%24), 30 kg hurda demir (%3.2), 20-30 kg arasında filtre (uçucu) külü, (%2.2) ve 1-2 kg arasında baca gazı arıtma çamuru (jips) oluştuğu belirlenmiştir (Öztürk, 2015a). Yakma prosesinde oluşan cüruf ve taban külü ile uçucu küller, inşaat malzemesi olarak yeniden kullanılabilir (Sedef, 2016).

Yakma işleminde atık içerisindeki yanabilir organik maddeler stokiyometrik ihtiyaçtan daha fazla oksijenle kimyasal tepkimeye girer. Yanma için gerekli stokiyometrik hava katsayısı yakıtın faz durumuna (katı sıvı, gaz) ve işlemde kullanılan fırına bağlı olarak 1.2 ila 2.5 değerleri arasında değişiklik göstermektedir. Atıklar genellikle heterojen bir yapıya sahip olup içerisinde çeşitli organik maddeler, su, metaller ve mineral maddeler bulundurulur. Atıkta bulunan organik yakıt maddelerin yeterli sıcaklıkta oksijenle temas etmesi durumunda yanma gerçekleşir. Atığın kalorifik değeri ile sisteme verilen hava miktarı eğer yeterliyse tam yanma işlemi gaz fazında saniye fraksiyonunda bir ek yakıt ihtiyacı duyulmadan gerçekleşir (Aynur, 2011).

Yakma proseslerinde öncelikle tüm atığın buharlaşma sıcaklığına getirilerek içerisindeki suyun buharlaşıp uzaklaştırılması sağlanır. Kalan kuru maddeye ısı enerjisi verilerek tutuşma temin edildikten sonra organik içeriğin yanmasıyla enerji açığa çıkmaktadır. Katı atıkların yakılması sonucunda elde edilen enerji, elektrik ve ısı enerjisi olarak kullanılabilir. Net enerji üretimi atığın yoğunluk, nem oranı, içerisindeki inert maddeler gibi özelliklerine ve bileşimine bağlı olarak değişmektedir. Yakma işlemi ile organik maddenin ısı içeriğinin %65-80'lik kısmı sıcak su, sıcak hava ve buhara dönüştürülebilir (Saltabaş vd., 2011). Yanma işlemi ile oluşan kızgın buharın, bir buhar türbininden geçirilmesiyle elektrik enerjisi üretilmektedir (Sedef, 2016). Tablo 2.9'da kentsel atıkların yakılması sonucunda oluşan yanma ürünleri gösterilmiştir.

Tablo 2.14: Atık bileşenleri ile yanma ürünleri (Aynur,2011).

Atık Bileşeni	Yanma Ürünü
• Organik	
Karbon	CO <sub>2</sub>
Hidrojen	H <sub>2</sub> O
Kükürt	SO <sub>2</sub>
Azot	NO <sub>2</sub>
Oksijen	-
Klorit	HCl
Florid	HF
• Su (W)	W (buhar)
• İnorganik (I)	I

Katı atıkların yakılma işlemi için en önemli ölçüt, atık niteliğinin yakma işlemine uygun olup olmadığının incelenmesidir. Atıklar kalorifik değerleri ile ilişkili olarak enerjiye çevrilmektedirler. Bu nedenle araştırmalar yapılarak o bölgedeki farklı katı atık numuneleri incelenmeli ve yakma işlemi için katı atığın gerekli kalorifik değeri sağladığı belirlenmelidir. İşletim maliyeti yönünden yakma sistemlerinin akılcı olabilmesi için atığın yakılması ile elde edilen ısının, tüm sistemin enerji ihtiyacından daha fazla olması gerekmektedir. Bu durum atıktaki yanabilir içeriğin kalorifik değerinin belirli bir değerin üzerinde olması ile çözülmektedir (Saltabaş vd., 2011). Yakma işlemine tabi tutulacak atığın ortalama ısı değeri en az 1,600 kcal/kg civarında olmalı ve 1,400 kcal/kg değerinin altına düşmemelidir (Aynur,2011).

Enerji geri kazanımının sağlandığı yakma sistemlerinde atıklar doğrudan yakılabildiği gibi ısıl değerini yükseltmek için ön işlemden geçirilerek de yakılabilmektedir. Atığın kimyasal, fiziksel özelliklerinin ve karakterinin belirlenmesi atığa uygulanacak sistemin seçilmesi açısından önem taşımaktadır. Atıkların herhangi bir ön işlemden geçirilmeden yakılması, KKA'lerden enerji üretilmesi için kullanılan dünyadaki en yaygın teknolojidir (Aynur,2011). KKA'ları yakma sistemleri ön arıtma yöntemleri açısından; işlenmemiş katı atık yakma sistemleri (mass burning) ve işlenmiş katı atık yakma sistemleri (Refuse Derived Fuel/RDF burning) olarak ikiye ayrılır. İşlenmemiş katı atık yakma sistemlerinde ön işlem olmadan katı atık doğrudan fırında yakılır. Proses sonucunda elde edilen buhar direkt olarak kullanılabilir ya da sıcak suya, soğutma suyuna ve elektriğe dönüştürülmektedir. Bu yöntem farklı endüstriyel uygulamalarda uzun yıllardır kullanılmaktadır (Akpınar, 2006). Teorik olarak incelendiğinde, bir kentin elektrik ihtiyacının yaklaşık %20'sinin, üretilen kentsel atığın yakılması ile karşılanabilmekte olup bununla birlikte ülke geneli itibariyle de oluşan KKA'ların tamamının termal yöntemler kullanılarak enerji geri kazanım amaçlı işlenmesi durumunda toplam enerji ihtiyacının %5-10'u oranında bir yenilenebilir enerji geri kazanımı sağlanması mümkün olabilmektedir. Bu bize enerji geri kazanımında, atık yakmanın önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. Atıktan enerji geri kazanım ya da kütleli yakma tesisleri, düzenli depolamanın önemli bir alternatifidir (Öztürk, 2015a).

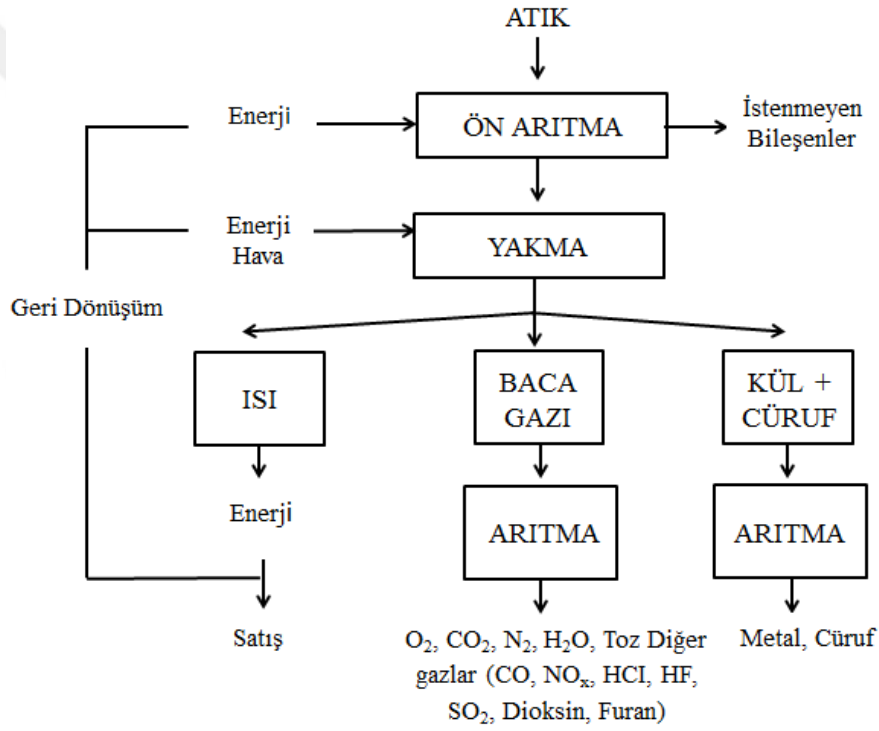
Katı atığın yakılması sırasında yürütülen faaliyetler aşağıdaki gibidir:

- **Atığın yakılması:** Yakma ızgarasında, atıkların yakma odası içerisinden geçirilerek karıştırılıp tamamen yanmasını sağlar. Yanmayan atıklar geriye taban külü olarak kalmaktadır. Bu taban külünde bulunan metal artıkların ve yapı malzemelerinin ayrıştırılarak geri dönüşüme katılmaları sağlanır. Böylelikle hammadde açısından önemli ölçüde tasarruf edilmiş olur.
- **Enerji geri kazanımı:** Atıkların yakılması sonucu açığa çıkan enerjinin % 80'inden fazlasının geri kazanım yoluyla buhar olarak kullanılması sağlanmaktadır.
- **Baca gazı temizliği:** Yakma tesislerindeki ileri teknoloji yöntemleri yardımıyla atıkların içerisinde bulunan ve yakma sırasında baca gazına geçen

zarar etkileri olan tüm maddeler güvenli, sürdürülebilir ve en iyi şekilde ayrılır.

- **Enerji kazanımı (Örnek; ısı pompası, türbin):** Katı atığın yakılması ile geri kazanılan enerjiden ısı veya elektrik enerjisi şeklinde merkezi ısıtma, soğutma bununla birlikte çeşitli endüstriyel süreçlerde yararlanılabilmektedir. Elde edilen enerji, atıkların karbon nötr fraksiyonundan meydana geldiği için enerjinin neredeyse yarıya yakını yenilenebilir enerjidir (Bayrak, 2019).

Şekil 2.10'da yakma prosesi akım şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.16: Yakma prosesi akım şeması (Öztürk, 2015a).



## BÖLÜM 3

### TERMODİNAMİK SİSTEMLER

#### 3.1 Rankine Çevrimi

Carnot çevrimlerinde karşılaşılan sorunların büyük bir kısmı kazan içerisinde suyun kızgın buhar haline ısıtılması ve yoğuşturucuda doymuş sıvı haline gelecek şekilde soğutulmasıyla giderilebilmektedir. Meydana gelen bu çevrim buharlı güç santrallerinin ideal çevrimi olarak tanımlanan Rankine çevrimidir. Rankine çevrimi, çalışma akışkanındaki faz değişimi süresince, ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesini sağlayan bir ısı makinesinin idealleştirilmiş termodinamik çevrimidir. Isı enerjisi, genellikle transfer akışkan ile kapalı bir çevrime verilir. Rankine çevriminde çalışma akışkanı olarak birçok madde kullanılabilir fakat bu maddeler arasından su, toksik yapıya ve reaktif kimyaya sahip olmaması, kolay temin edilebilir ve düşük maliyetli olması gibi uygun ekonomik, çevresel özellikleri, hem de termodinamik özellikleri nedeniyle çoğunlukla tercih edilen akışkandır. İdeal Rankine çevrimleri içten tersinmezliklerin olmadığı dört hal değişiminden oluşmaktadır. Bu değişimler, Şekil 3.1'de verilen basit ideal Rankine çevrim şeması ve  $T-s$  diyagramında numaralandırılarak gösterilmiştir.

1-2 Pompada izentropik sıkıştırma

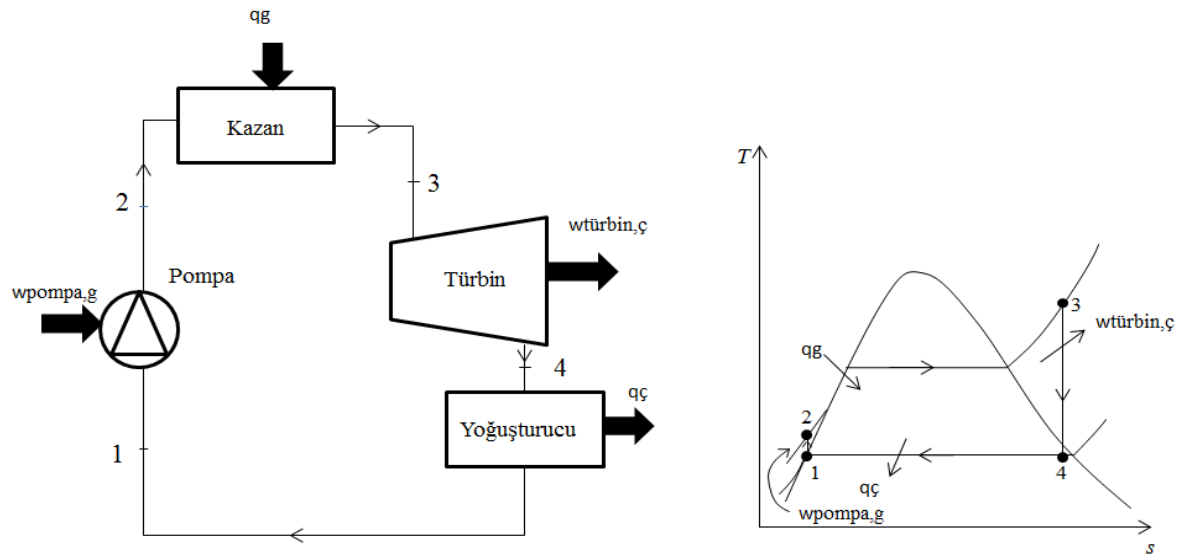
2-3 Kazanda, sisteme sabit basınçta ısı girişi

3-4 Türbinde izentropik genişleme

4-1 Yoğuşturucuda, sistemden sabit basınçta ısı atılması.

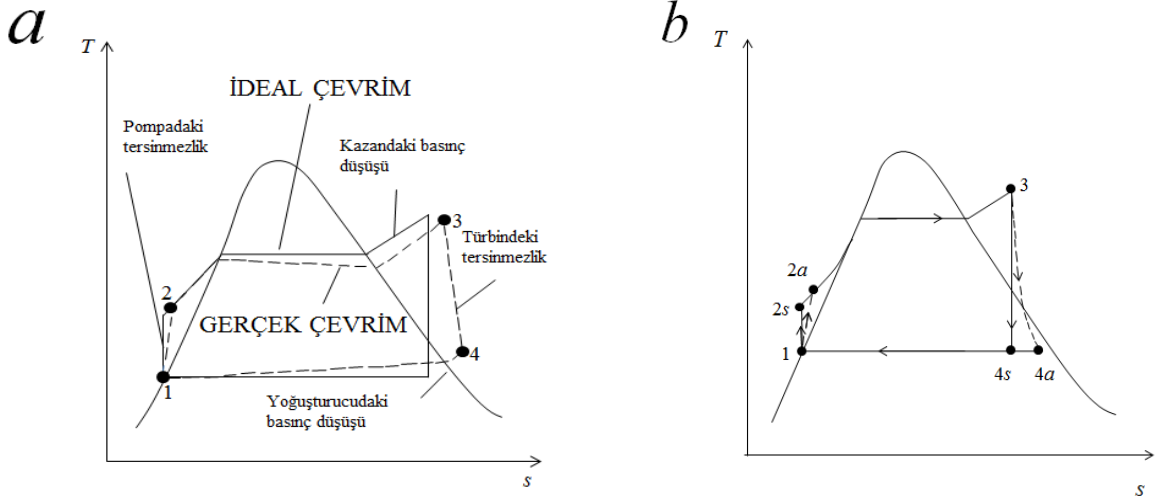
Pompaya 1 noktasında doymuş sıvı olarak giren su, izentropik bir hal değişimiyle kazan basıncına sıkıştırılır. İzentropik sıkıştırma işlemi sırasında sıcaklık, suyun özgül hacmindeki azalmaya bağlı olarak bir miktar artar. Su, kazana 2 noktasında sıkıştırılmış sıvı olarak girer ve 3 durumunda kızgın buhar olarak çıkar. Kazan temelde bir ısı değiştiricisidir. Nükleer reaktörden, yanma sonucunda oluşan gazlardan ya da diğer kaynaklardan sağlanan ısı, kazanda sabit basınçta, suya aktarılır. 3 durumundaki kızgın buhar, türbinde izantropik genişleme sırasında bir mili döndürerek iş yapar ve milin bağlı olduğu jeneratör aracılığıyla elektrik üretimi gerçekleştirilir. Elde edilen güç, sıcak ve

soğuk kaynak arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak değişmektedir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi sırasında buharın basıncı ile sıcaklığı düşer Buhar türbinden çıktıktan sonra 4 noktasında bir ısı değiştiricisi olan yoğuşturucuya yönlendirilir. Yoğuşturucuya gelen buhar genellikle yüksek kuruluk derecesine sahip sıvı-buhar karışımı halindedir. Buhar burada, akarsu, göl ya da atmosfere ısını vererek sabit basınçta yoğuşur. Soğutma havayla da yapılabilir. Yoğuşturucudan doymuş sıvı halinde çıkan su, pompaya gelerek çevrimi tamamlar. T-s diyagramında, 2-3 eğrisinin altında kalan alan kazanda suya verilen ısıyı, 4-1 eğrisinin altında kalan alan ise yoğuşturucuda sudan çevreye verilen ısıyı göstermektedir. Çevrim eğrisinin içinde iki alan arasındaki fark çevrimin net işi veya net ısı alışverişini belirtmektedir (Çengel ve Boles, 2008; Ergün, 2014).



Şekil 3.17: Basit ideal Rankine Çevrim şeması ve T-s diyagramı (Çengel ve Boles, 2008).

Gerçek buharlı güç çevrimleri, akışkanın sistem içerisinde meydana getirdiği sürtünme ve ısı kayıplarının neden iç bileşenlerde oluşturduğu tersinmezliklerden dolayı Şekil 3.2’de gösterildiği gibi ideal Rankine çevriminden farklıdır. Sürtünme, kazan, yoğuşturucu ve diğer bileşenler arasındaki bağlantı borularında basınç kayıplarına ve buharın, kazandan düşük bir basınçta çıkmasına neden olur. Isı kaybı elde edilen net işi azaltır (Çengel ve Boles, 2008).

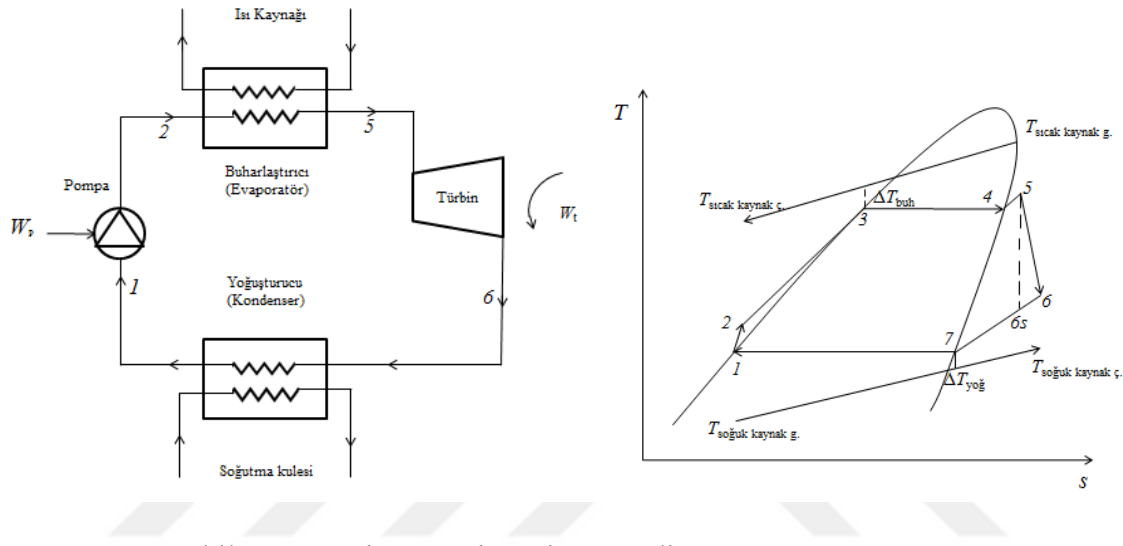


Şekil 3.18: Gerçek buharlı güç çevrimi ile ideal Rankine çevrimi arasındaki fark (a), pompa ve türbinde oluşan tersinmezliklerin ideal Rankine çevrimine etkisi (b) (Çengel ve Boles, 2008).

### 3.2 Organik Rankine Çevrimi

Klasik buharlı Rankine çevrimlerinde, çalışma akışkanı olarak su kullanılır ve bu çevrimlerin etkin bir şekilde işletilebilmeleri için suyun kızgın buhar haline dönüştürülebilmesini sağlayacak yüksek sıcaklık ve basınç değerlerine sahip ısı kaynaklarına ihtiyaç vardır. Yeterli ısı kapasitede olmayan kaynakların kullanımı ekonomik ve teknik açıdan zorluklar içermesinden dolayı yapılan araştırmalar sonucunda ORÇ sistemleri geliştirilmiştir (Yılmaz, 2013; Ergün vd., 2016). ORÇ sistemleri, bilinen Rankine çevrimleri gibi pompa, buharlaştırıcı, türbin ve yoğuşturucu olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır. ORÇ'nin diğer Rankine çevrimlerinden farkı, çalışma akışkanı olarak su yerine kritik sıcaklığı ile basıncı düşük, korozyon tehlikesi daha az olan ve moleküler kütlesi yüksek organik akışkanların kullanılmasıdır. Moleküler kütlesi yüksek olan akışkanların kullanımı, ORÇ sistemlerinde akışkanın türbin kanatçıklarına düşük hızla çarparak türbinin daha az zarar görmesini ve türbinin dolayısıyla sistemin ömrünün uzatılmasını sağlamaktadır. Başka bir avantaj ise ORÇ akışkanları düşük basınçta ve sıcaklıkta çalıştıkları için sistem bileşenleri üzerindeki termal ve mekanik gerilimler daha azdır (Kavasoğulları ve Cihan, 2015). ORÇ sistemleri, yenilebilir enerji kaynakları ve atık ısı kaynakları gibi düşük sıcaklıktaki kaynakların sahip olduğu enerjiyi bir çalışma akışkanı aracılığıyla işe dönüştürüldüğü temeli Rankine ilkesine dayalı bir termodinamik süreçtir. ORÇ ile çalışan güç üretim sistemleri, geleneksel güç çevrimlerinin aksine merkezi olmayan ve küçük ölçekli güç üretiminin gerçekleştirilmesine olanak sağlar.

Bununla birlikte ORÇ sistemleri, küçük değişiklikler yapılarak eş zamanlı farklı ısı kaynaklarıyla ilişkili şekilde de kullanılabilir (Acar, 2014). Isı kaynağının özelliklerine dayanarak birçok farklı ORÇ konfigürasyonu, ortaya konmuştur. Bu konfigürasyonların tümü temel ORÇ modifikasyonundan üretilir. ORÇ sistemi pompa, buharlaştırıcı, türbin ve yoğusturucu olmak üzere 4 ana elemandan oluşur (Su vd.,2017). Isıdan faydalanarak elektrik üretimi sağlayan bir basit ORÇ sisteminin termodinamik çevrimi, Şekil 3.3'te verilen  $T-s$  diyagramında numaralandırılarak gösterilmektedir.



Şekil 3.19: Basit ORÇ sistemi ve  $T-s$  diyagramı (Su vd.,2017).

(1) Sıkıştırma işlemi 1-2: Çevrimdeki organik akışkan pompa ile yüksek basınca sıkıştırılır ve buharlaştırıcıya gönderilir. Bu işlem için pompa tüketilen iş:

$$\dot{W}_{pompa} = \dot{m}_{o,a} (h_2 - h_1) = \dot{m}_{o,a} \frac{P_2 - P_1}{\rho_1 \eta_{pompa}} \quad (6)$$

$\dot{m}_{o,a}$  çalışma akışkanının kütle akış hızını,  $\rho_1$ , doymuş sıvı yoğunluğu,  $\eta_{pompa}$  pompanın izentropik verimini göstermektedir.

(2) İzobarik buharlaşma işlemi 2-5: Buharlaştırıcı ısı kaynağından aldığı enerjiyi, organik akışkana aktararak akışkanın yüksek sıcaklık ve basınca geçmesini sağlar. Isı girişi sabit basınçta ( $P = \text{sbt}$ ) gerçekleşir. Isı kaynağından çalışma akışkanına ısı aktarımı üç kısımdan oluşur:

$$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_{o,a} (h_5 - h_2) = \dot{m}_{o,a} (q_{23} + q_{34} + q_{45}) \quad (7)$$

$$q_{23} = \int_{T_2}^{T_3} c_p^s dT \quad (8)$$

$$q_{34} = \Delta H_b(T_3) \quad (9)$$

$$q_{45} = \int_{T_4}^{T_5} c_p^b dT \quad (10)$$

Denklemlerdeki  $q_{23}$ , sıkıştırılmış sıvı halde (2-3) emilen ısı;  $q_{34}$ , çalışma akışkanının doymuş sıvıdan doymuş buhara (3-4) geçmesi için gereken buharlaşma ısısı;  $q_{45}$ , aşırı kızdırma (4-5) için gerekli ısı miktarıdır. Buharlaştırıcıdaki enerji korunumuna dayanarak, belirli bir ısı kaynağı için çalışma akışkanını kütle akış hızı elde edilebilir:

$$\dot{m}_{\zeta,a} = \frac{c_p \dot{m}_{isi,k} (T_{isi,k,g} - T_3 - \Delta T_{buh})}{q_{34} + q_{45}} \quad (11)$$

Buradaki  $c_p$ , ısı kaynağının ısı kapasitesi,  $\dot{m}_{isi,k}$ , ısı kaynağının kütleli debisi,  $T_{isi,k,g}$  ve  $\Delta T_{buh}$  sırasıyla ısı kaynağı giriş sıcaklığı ile pinch noktası sıcaklık farkıdır.

(3) Genişleme prosesi 5-6: Buharlaştırıcıda elde edilen yüksek sıcaklık ve basınçtaki buhar, türbinde genişler ve bu işlem sırasında çalışma akışkanının kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. Türbin tarafından üretilen güç:

$$W_{türb} = \dot{m}_{o,a} (h_5 - h_6) = \dot{m}_{o,a} (h_5 - h_{6s}) \eta_{türb} \quad (12)$$

$\eta_{türb}$ , genellikle genişlemenin tersinmezliğini göstermek için kullanılan türbinin izentropik verimini, 5 ve 6s noktaları arasındaki entropi farkının sıfır olmasına dayanarak, türbin çıkışının izentropik sıcaklığı belirlenebilir, böylelikle türbin giriş ve çıkışı arasındaki entalpi farkı hesaplanabilir.

(4) Yoğuşma işlemi 6-1: Termodinamik çevrimin tamamlanması amacıyla türbinde

genişleyip basınç ve sıcaklığı düşen egzoz buharı, yoğuşturucuda soğutucu tarafından sabit basınçta ( $P = \text{sbt}$ ) ısını vererek doymuş sıvı haline gelir. Buharlaştırma prosesinde olduğu gibi, yoğuşma ısı oranı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{Q}_{\text{yoğ}} = \dot{m}_{o,a}(h_6 - h_1) = \dot{m}_{o,a}(q_{67} + q_{71}) \quad (13)$$

$$q_{67} = \int_{T_6}^{T_7} c_p^b dT \quad (14)$$

$$q_{71} = \Delta H_b(T_1) \quad (15)$$

Denklemdaki  $q_{67}$ , egzozdan doymuş buhara haline geçerken serbest bırakılan ısıyı,  $q_{71}$  doymuş buhardan doymuş sıvıya geçerken açığa çıkan ısıyı ifade eder. ORÇ'nin dört termodinamik prosesi modellendikten sonra, belirli bir ısı kaynağı için net çıkış gücü aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$W_{\text{net}} = W_{\text{türb}} - W_{\text{pompa}} \quad (16)$$

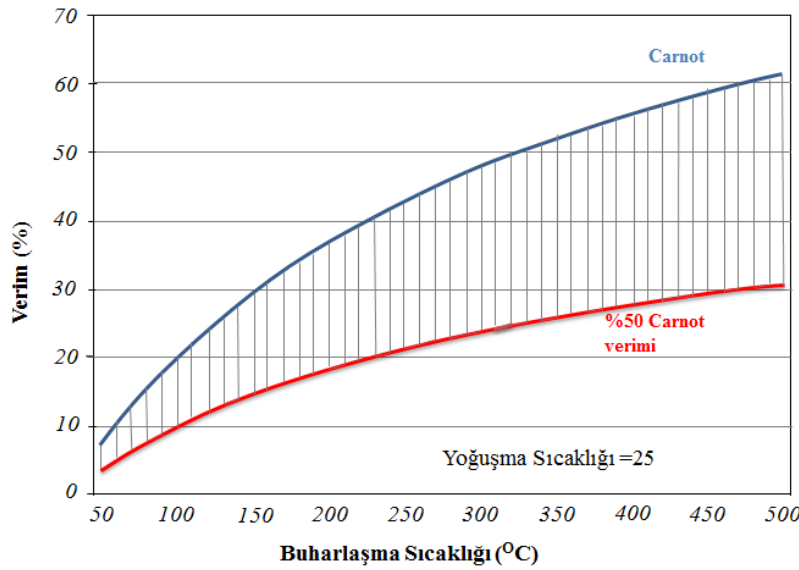
Çevrim verimi:

$$\eta_t = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{buh}}} \times \%100 \quad (17)$$

ORÇ teknolojilerinin, sistem büyüklüğüne ve çevrim üretiminde kullanılan teknolojiye bağlı olarak %8-20 arasında değişen verimi, bu sistemlerin kojenerasyon ya da trijenerasyon sistemlerine entegre edilmesi ile yaklaşık %40'lara çıkarılması mümkündür (Yağlı, 2014).

Bir makinenin verimliliği, maksimum kabul edilebilir ısı kaynağı sıcaklığı, soğutma ortamı sıcaklığı, çalışma akışkanı termodinamik parametreleri, pompa verimliliği, genişleme cihazı verimliliği, vb. birçok faktöre bağlıdır. Carnot verimliliği ORC makinesi için birinci yasa verimliliğinin maksimum değerini vermektedir. 25°C'lik bir yoğuşma sıcaklığı dikkate alındığında, 50°C ile 500°C arasında değişen farklı buharlaştırma sıcaklıkları için

kabul edilebilir sınır değerleri bulunmuştur. Yapılan değerlendirmeler sonucunda türetilen Technache vd., (2014) araştırmalarında yer verdikleri Őekil 3.4, yüksek verimli bir makinenin yaklaşık %25 verimliliğe sahip olabileceğini göstermektedir. Piyasadaki en verimli ORÇ makinelerinin verim değerleri %20–25 aralığındadır. Őekil 3.4 aynı zamanda CHP modunda çalışan makinelerin yoğuşma sıcaklığı yükseldikçe daha dūřuk elektrik verimliliği sağlanacağını ancak genel olarak yoğuşturucuda geri kazanılan ısıyı gōz önünde bulunduran verimliliğin %80'in üzerinde önemli oranda artacağını gōstermektedir.



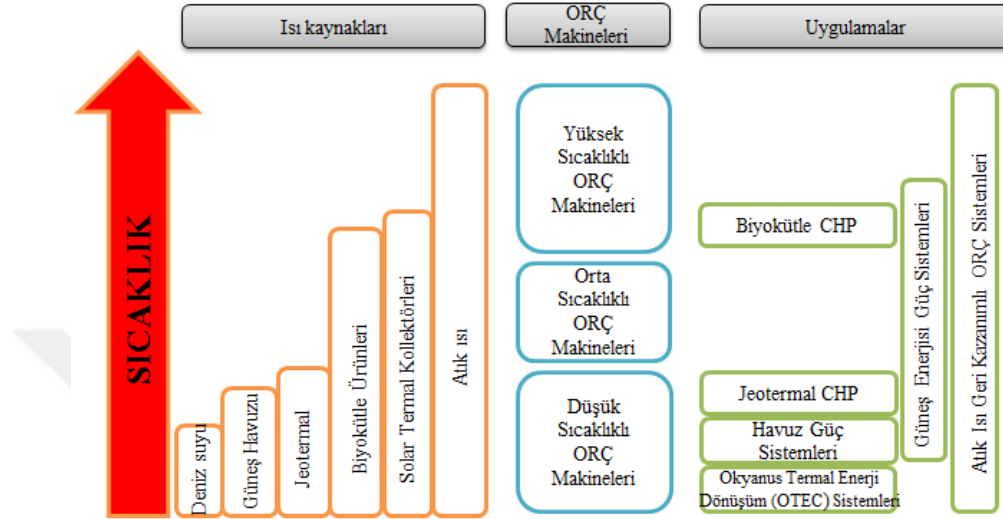
Şekil 3.20: Bir ORÇ makinesinin termodinamik sınırları (Technache vd.,2014).

### 3.2.1 Organik Rankine evrimi Uygulamaları

Yenilenebilir ve temiz enerji kaynakları olarak kabul edilen güneş enerjisi, biyoktle ve jeotermal enerji ve endüstriyel atık ısı, ORÇ sistemleri için ısı kaynakları olarak kullanılabilir. Isı taşıyıcınının (katı sıvı, gaz) durumu ve sıcaklığı mühendislik tasarımı ve uygulamanın ekonomisini etkilemektedir. Bunun yanı sıra ORÇ sistemlerinin amacı enerji üretimi ve ikincil amaçlı kojenerasyon veya trijenerasyon ile ısıtma/soğutma için sıcak su üretimi sağlamaktır (Technache vd.,2014). Şekil 3.5, ısı kaynağı sıcaklığı ve makine tipi ile uyumlu olarak çeşitli ORÇ uygulamalarını gōstermektedir.

Jeotermal projeler, saha, sondaj ve uygun ısı eşanjörleri tasarımınının jeolojik araştırmalarını gerektirecektir. Güneş enerjisi projeleri, saha araştırması/seçimi, güneş kaynağı değerlendirmesi ve uygun solar termal kollektörler, temizlik ve soğutma sistemleri

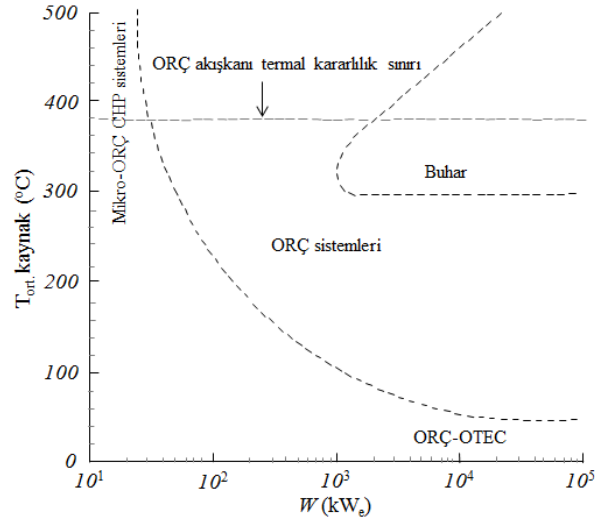
gerektirir. Biyokütle projeleri, alandaki/bölgedeki katı biyokütle potansiyelinin değerlendirilmesine, binalar için kojenerasyon olasılığının araştırılmasına ve endüstriyel prosesler için ısı kullanımına ihtiyaç duymaktadır. Isı geri kazanım projeleri, ısı israfının iyi değerlendirilmesini gerektirir (Tchnache vd.,2014).



Şekil 3.21: ORÇ sistemi uygulamaları (Tchnache vd.,2014).

ORÇ sistemleri, ısıl enerji kaynağı ve güç kapasitesi özelliklerine göre tasarlanmaktadır. Şekil 3.6'da verilen grafik, enerji kaynağının sıcaklığı ile klasik buhar güç sistemleri ve ORÇ güç sistemlerinin güç kapasitesi arasındaki mevcut ilişkiyi göstermektedir. Ticari olarak temin edilebilen sistemlere ya da geliştirilmekte ve incelenmekte olan sistemler dikkate alınarak oluşturulmuş grafikte ORÇ uygulamalarının sınırının geleneksel buhar enerji santrali uygulamaları bölgesine doğru genişlediğini görülmektedir. Isı geri kazanım projeleri, ısı israfının iyi değerlendirilmesini gerektirir.





Şekil 3.22: Enerji kaynağının ortalama sıcaklığı ve sistemin güç kapasitesi açısından ORÇ'nin buharlı güç sistemlerine karşı mevcut ve gelecekteki uygulama alanları (Colonna vd., 2015).

### 3.2.2 Organik Rankine Çevrimi Çalışma Akışkanları

Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimleri, ısı pompası çevrimleri ve ORÇ sistemleri düşük sıcaklıktaki buhar çevrimleri olarak düşünülebilir. Bu teknolojiler aynı çalışma akışkanlarını kullanırlar, ancak çevrim için istenen en yüksek sıcaklığa bağlı olarak, uygulama ile uyumlu belirli özellikler gerekebilir (Technache vd., 2014). Tablo 3.1'de kriterlerin karşılaştırılması verilmektedir.

Tablo 3.15: Çevrimler ve istenen akışkan özellikleri (Technache vd., 2014).

	Soğutma çevrimi	Isı pompası çevrimi	ORÇ
<b>Buhar/sıvı yoğunluğu</b>	Kompresör emiş ağzında yüksek	Kompresör çıkışında yüksek	Türbin girişinde yüksek Pompa girişinde yüksek
<b>Kritik sıcaklık</b>	Düşük / orta	Orta / yüksek	Orta / yüksek
<b>Enerji/ekserji</b>	Yüksek verim	Yüksek verim	Yüksek verim
<b>Güç</b>	Düşük güç tüketimi	Düşük güç tüketimi	Yüksek güç çıkışı ve düşük pompa çalışması
<b>Çevresel etki</b>	Düşük ODP, düşük GWP	Düşük ODP, düşük GWP	Düşük ODP, düşük GWP
<b>Materyal ve yağlama maddeleri</b>	İyi uyumluluk	İyi uyumluluk	İyi uyumluluk
<b>Güvenlik</b>	Yüksek güvenlik seviyesi	Yüksek güvenlik seviyesi	Yüksek güvenlik seviyesi
<b>Termal kararlılık</b>	İyi	İyi	İyi
<b>Kullanılabilirlik ve maliyet</b>	İyi kullanılabilirlik - düşük maliyet	İyi kullanılabilirlik - düşük maliyet	İyi kullanılabilirlik - düşük maliyet

ORÇ sistemlerinde çalışma koşullarına, farklı kaynak ve emici sıcaklıklarına uygun olarak çeşitli çalışma akışkanları kullanılabilir. Bu sistemlerde kullanılacak enerji kaynağının düşük sıcaklığa sahip olması; ısı transfer sırasında verimde yaşanan kayıpların azaltılmasında, sistemde kullanılacak çalışma akışkanının belirlenmesinin önemini artırmaktadır (Yılmaz, 2013; Karaman, 2016). Kullanılacak çalışma akışkanı, sistemin performansını ve ekonomisini etkileyen parametrelerden biridir (Ergün, 2014). ORÇ sistemlerinde kullanılabilen hidrokarbon içerikli çok sayıda akışkan bulunmasından dolayı çalışma akışkanları, belirli kriterler göz önünde bulundurularak seçilmektedir. Bu kriterler; akışkanın türü ve termodinamik özellikleri, malzemeler üzerindeki korozif etkileri, güvenilirliği ve çevresel etkileri, stabilite tehlike seviyesi, temin edilebilirliği ve birim fiyatı gibi konulardır. Kriterlerin birlikte değerlendirilerek sistem için optimum çalışma akışkanının seçilmesi büyük önem taşımaktadır (Yağlı, 2014). Akışkanların özellikleri çalışma şartlarına göre değişebilmektedir. Özelliklerin hepsini her zaman yerine getirmek mümkün olmamaktadır ve uygulama şartlarına göre bu özelliklerden birkaçı aranmayabilir. Akışkanlarda bakılması gereken özelliklerin hepsini her koşulda sağlayan genel bir soğutucu akışkan bulunmamaktadır (Çakır ve Çomaklı, 2011).

### **3.2.2.1 Termodinamik ve Fiziksel Özellikler**

Enerji dönüşüm sistemlerinde çevrim performansını ve verimini etkileyen önemli hususlardan biri akışkanların termodinamik ile termo-fiziksel özelliklerdir (kritik sıcaklık, kritik basınç, kaynama noktası, buharlaşma entalpisi, vizkozite, ısıl iletkenlik vb.). Soğutucu akışkanların termodinamik özelliklerinin hesaplanmasında gerçek gaz denklemlerinden yararlanılır. Günümüzde soğutucu akışkanların termodinamik ve termo-fiziksel özelliklerini hesaplayan bazı programlar geliştirilmiştir olup bilgisayar ortamında daha kolay kullanım sağlayan bu programlar iyi bir sistem analizinin ve optimizasyonunun yapılmasına yardımcı olmaktadır (Atalay, 2011).

### **3.2.2.2 Tehlike Seviyesi, Güvenirlik ve Çevresel Etkiler**

Seçim yapılırken gereken akışkanın çevreye, canlılara ve atmosfere olası zararları göz önünde bulundurulmalı ve bu konuyla ilgili yapılan incelemeler sonucunda zararı daha az olan alternatif akışkanlar seçilmelidir. Akışkan seçimi açısından alternatiflerin kısıtlı olduğu durumlarda, seçilen ve zararlı etkileri olan akışkanın, tehlike oranının azaltılmasına

yönelik gerekli güvenlik önlemleri alınmalıdır. Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (American National Standards Institute ANSI)/Amerikan Isıtma Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; ASHRAE) güvenlik sınıflandırılması kullanılarak çevrim akışkanlarının tehlike seviyeleri belirlenebilmektedir (Yağlı, 2014). Soğutucu akışkanların güvenlik sınıflandırılması Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.16: Soğutucu akışkanların güvenlik sınıflandırılması (Calm,1994; ANSI/ASHRAE Standard 34-2016).

	Düşük zehirleyicilik	Yüksek zehirleyicilik	
Yüksek Yanıcılık	A3	B3	$LFL \leq 0.10 \text{ kg/m}^3$ veya yanma ısısı $\geq 19,000 \text{ kJ/kg}$
Düşük Yanıcılık	A2	B2	$LFL > 0.10 \text{ kg/m}^3$ yanma ısısı $< 19,000 \text{ kJ/kg}$
	A2L	B2L	$LFL > 0.10 \text{ kg/m}^3$ yanma ısısı $< 19,000 \text{ kJ/kg}$ (Yanma hızı $\leq 10 \text{ cm/s}$ )
Alevlenme özelliği yok	A1	B1	LFL (alt yanma limiti) sıfır olan akışkanlar
	$\leq 400 \text{ ppm}$ (milyonda parçalık sayısı) kontrasyonda tanımlanan zehirlenme olmayan akışkanlar	400 ppm’ den (milyonda parçalık sayısı) düşük kontrasyonda zehirlenme belirtisi olan akışkanlar	

Soğutucu akışkanların güvenlik sınıflandırmasında, zehirlilik ve yanıcılık olmak üzere iki temel parametre dikkate alınmaktadır. Zehirlilik yönünden iki grup olarak inceleme yapılmaktadır. 400 ppm ve altında zehirlenme belirtisi göstermeyen akışkanlar A sınıfındaki, 400 ppm’ den düşük kontrasyonda zehirlenme belirtisi olan akışkanlar ise B sınıfındaki soğutucu akışkanları göstermektedir. Yanıcılık, alt yanma limiti (Lower flammability limit: LFL) ve yanma ısısı ile ifade edilmektedir. Yanıcılık özelliğine göre soğutucu akışkanlar üç sınıfa ayrılmaktadır. Sınıf 1, 140°F (60°C) ve 14.7 psia (101.3 kPa) basınçta test edildiğinde alev almıyan akışkanları gösterir. Sınıf 2; 60°C ve 101.3 kPa basınçta  $LFL > 0.10 \text{ kg/m}^3$  ve yanma ısısı 19,000 kJ/kg düşük olan akışkanları ifade etmektedir. Sınıf 3 ise 60°C ve 101.3 kPa basınçta  $LFL \leq 0.10 \text{ kg/m}^3$  ve yanma ısısı 19,000 kJ/kg’e eşit veya büyük yanma ısısı olan akışkanlardır. Sınıf 2L yanma hızı maksimum 3.9

in./s (10 cm/s) olan soğutucu akışkanları göstermektedir.

Soğutucu akışkanların sahip olduğu çevresel özelliklerini ifade eden temel kavramlar:

- Ozon Tüketme Potansiyeli (Ozone Depletion Potential: ODP): Ozon tabakasına verebilecek zararın göstergesidir. ODP'si 1 olarak kabul edilen R11 referans alınarak bağıl bir değer olarak bulunur (Tosun, 2013).
- Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential: GWP): Belli zaman aralığında bir sera gazının küresel ısınma etkisini GWP'si 1 kabul edilen CO<sub>2</sub>'e bağıl olarak veren değerdir (Tosun, 2013). Bu etki, 100 ya da 500 yıllık bir süre için değerlendirilebilir (Söğüt ve Karakoç, 2013).
- Atmosferde kalma süresi (atmospheric lifetime): Atmosfere salınan bir maddenin atmosferde bozulması, diğer maddeler ile reaksiyona girmesi veya yok olmasına kadar geçen sürenin bir ölçütüdür (Başegmez, 2019).

Çevreye verilecek olası zararların önlenmesi veya azaltılması amacıyla, uygulamalarda optimum çalışma akışkanının seçilmesinde düşük ODP, GWP ve atmosferde kalma süresi değerlerine sahip olmasının göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Başegmez, 2019). Literatürde, ODP ve GWP kavramlarına ek olarak soğutucu akışkan ile bulunduğu sistemin küresel ısınma üzerindeki doğrudan ve dolaylı etkilerini tanımlayan Toplam Eşdeğer Isınma Etkisi (Total Equivalent Warming Impact: TEWI) kavramı da bulunmaktadır. Akışkanın özelliklerine bağıl olarak çevrede oluşturduğu emisyon etkisi doğrudan etki, kullanıldığı sistemde enerji kullanımı sırasında oluşan CO<sub>2</sub> emisyonu ise dolaylı etki olup bu iki etkinin toplamı ise TEWI'yi belirtmektedir (Söğüt ve Karakoç, 2013; Tosun, 2013).

### 3.2.2.3 Korozyon Etkileri

Uzun ömürlü ve düzenli çalışan bir sistemin sağlanması açısından akışkanın korozyon etkilerinin bilinmesi büyük rol oynamaktadır. Sistemde kullanılan ekipmanların ve boru malzemelerinin çevrim akışkanı ile etkileşime girmeleri buna bağıl olarak aşınmaya veya paslanmaya uğramaları, sistem ömrünü kısaltmaktadır ayrıca yüksek basınçlarda çalışan güç çevrimlerinde et kalınlıklarında meydana gelen azalmalar dolayısıyla patlamaların

gerçekleşebileceği dikkate alınarak çevrim akışkana uygun şekilde malzeme seçimi yapılmalıdır. Akışkanın, sistemde kullanılan diğer akışkanlarla tepkimeye girmemesi de dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Akışkanın yağda ve suda eriyip erimeğine bakılmalıdır. Suda kolay eriyen akışkanlar, karışımın donma noktasını düşürerek, akışkanın ekipmanlar içerisinde donma tehlikelerini azaltmaktadır. Akışkanın yağda eriyip erimeğine bakılması, kompresör parçalarında oluşabilecek olası bir yağ sızıntısı ve yağın akışkan içerisinde çözünmemesi halinde yoğunlaştırıcı ya da buharlaştırıcı kısımlarında yağın birikme yapma riskinin azaltılmasında oldukça önemlidir (Yağlı, 2014).

### 3.2.2.4 Temin Edilebilirlik ve Fiyat

Ön yatırım maliyetini etkileyen parametrelerin başında gelmektedir. Soğutucu akışkanların ticari açıdan iyi bir sonuç elde edebilmeleri maliyetleri ile ilişkilidir. Sistem tasarımı yapılırken kullanılacak akışkanın kolay temin edilebilir olması ve birim maliyetinin düşük olması, sistemin maliyeti ve çalışacağı süre boyunca meydana gelebilecek giderleri önemli oranda azaltacaktır (Yağlı, 2014).

### 3.2.2.5 Akışkan Tipi

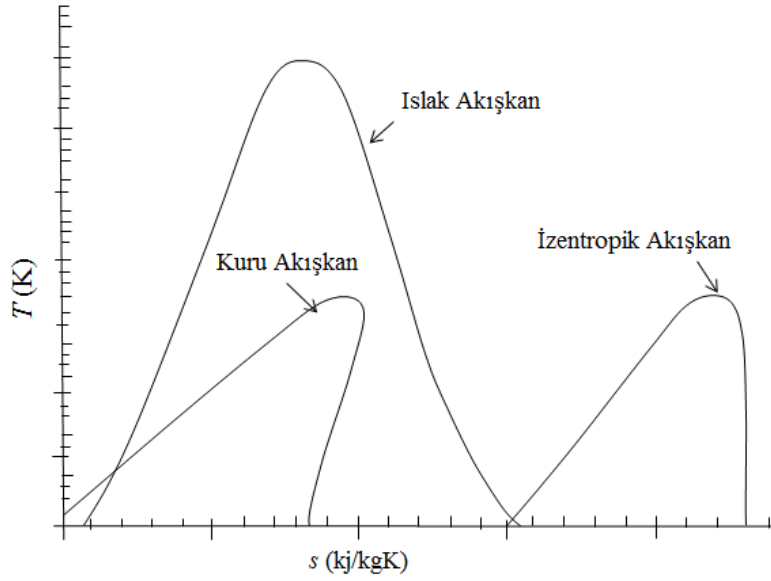
Performans ve sistemin devamlılığının değerlendirilmesi açısından akışkanların tipi belirlenirken  $T-s$  grafiğinde doymuş buhar eğrisinin eğiminden yararlanılmaktadır. Buna göre (Chen vd., 2010);

$$\xi = \frac{dT}{ds} < 0 \text{ olan akışkanlar 'Islak Akışkan' olarak} \quad (18)$$

$$\xi = \frac{dT}{ds} \approx 0 \text{ olan akışkanlar 'İzentropik Akışkan' olarak} \quad (19)$$

$$\xi = \frac{dT}{ds} > 0 \text{ olan akışkanlar 'Kuru Akışkan' olarak} \quad (20)$$

tanımlanır. Şekil 3.7'de  $T-s$  diyagramı üzerinde akışkanların doymuş buhar eğrisine göre sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 3.23:  $T$ - $s$  diyagramının eğime göre akışkan tiplerinin gösterimi (Yağlı, 2018).

Islak akışkanların doymuş buhar eğrisi negatif bir eğime sahipken kuru tip akışkanların doymuş buhar çizgisinin eğimi pozitif ve izentropik akışkanların ise eğimi sıfırdır. Akışkanın tipi, genişlemeden sonra türbinden çıkan akışkanın fazının belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Kuru ve izentropik tipteki akışkanlar izentropik genişlemeden sonra bile yüksek kuruluk derecelerine sahiplerdir. Islak tipteki akışkanlarda genişleme sırasında veya genişleme sonrasında ıslak-buhar fazındaki akışkan damlacıkları türbin kanatçıklarına ve sistem ekipmanlarına ciddi zararlar vermektedir. Zamanla bu damlacıkların verdiği zararlardan dolayı oluşan aşınma neticesinde türbin performansı düşmekte ve sistemin çalışma ömrü kısalmaktadır (Yağlı, 2018). Türbin çıkışında kuruluk oranı genellikle %85'in üstünde tutulmalıdır. Islak akışkanların kullanılması durumunda türbin çıkışında gerekli kuruluk derecesinin ayarlanması için türbin girişinde aşırı kızdırılma yapılmalıdır (Pektezel, 2019).

### 3.3 Kojenerasyon (Bileşik Isı-Güç Üretimi) Sistemleri

Isı ve elektrik çoğunlukla klasik sistemler yardımıyla üretimi sağlanan, sanayi alanlarıyla birlikte günlük yaşamda kullanılan, küresel tüketimi karşılamada insanlığın ihtiyaç duyduğu önemli kaynak türleridir. Birincil enerji kaynakları rezervlerinde meydana gelen azalmaların göz önünde bulundurulmaya başlanması bu kaynakların yüksek verimlilikte değerlendirilmesini sağlayan CHP sistemlerini günümüzde önemli bir pazar haline getirmiştir (Yüksel ve Goza, 2014). CHP sistemleri, tek bir yakıt kaynağından, ısı ve

elektrik enerjisinin birlikte ve yüksek verimle üretildiği sistemlerdir. Bu sistemlerde, sıcak su, buhar ve elektriğin eş zamanlı bir şekilde üretilerek kullanıcıya iletilmesi sağlanır (Pravadalıoğlu, 2011).

CHP sistemlerinin klasik sistemlere göre avantajlarından en önemlileri yüksek verimlilik elde edilmesi ve yanma sonucu açığa çıkan atık emisyonlarının minimum seviyelere indirilmesidir (Yüksel ve Goza, 2014). Klasik sistemler kullanarak sadece elektrik üretimi yapan işletmelerde verim %30-40 arasında değişirken CHP sistemlerinde ikili üretim ile %80–90’larda yüksek verim değerlerine ulaşılmaktadır (Pravadalıoğlu, 2011). CHP ve klasik sistemler arasındaki bu verimlilik farkı, hem atık ısı enerjisinin büyük bir bölümünün kullanılabilir enerjiye dönüştürülmesiyle hem de enerji üretim ve tüketim yerinin birbirine yakın olması dolayısıyla iletim sırasında gerçekleşen sistem kayıplarının azalmasıyla ilişkilendirilebilir (Yüksel ve Goza, 2014). CHP sistemlerinde endüstriyel tesisler ve konutlar için gerekli olan ısı ve elektrik enerjisi ihtiyacının tümünün veya belirli bir bölümünün karşılanması için aynı kaynağın kullanılması ile sağlanacak enerji tasarrufu çevre kirliliğinin ve enerjide dışa bağımlılığının azaltılmasında etkili olmaktadır (Donk, 2017). CHP sistemleri, yakıt açısından geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu sistemler biyogaz, doğalgaz ve LPG gibi farklı yakıt türleri ile çalışabilmektedir (Yüksel ve Goza, 2014). CHP sistemlerinde kullanılan yakıt türleri Tablo 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.17: CHP sistemlerinde kullanılan yakıt türleri.

Yakıt Türü	Özgül Ağırlık kg/ nm <sup>3</sup>	Alt Isıl Değer, kWh/nm <sup>3</sup>	Metan Sayısı	Alev Hızı cm/s
<b>Doğalgaz</b>	0.798	10.14	80	41
<b>Metan</b>	0.717	9.971	100	41
<b>Çöplük</b>	1.274	4.98	150	20
<b>Propan</b>	2.003	26	33	45
<b>CO</b>	1.25	3.51	75	24
<b>Hidrojen</b>	0.0899	2.996	0	302
<b>Aritma</b>	1.158	6.5	135	27
<b>Odun gazı</b>	1.25	1.38	13	-

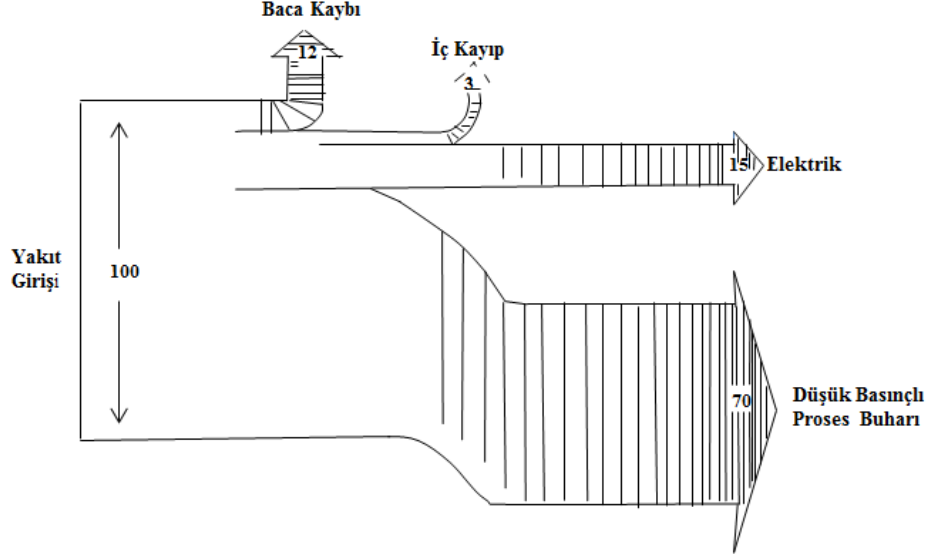
CHP sistemlerinde, kullanıcının ısı ve elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayacak uygun sistem seçimi yakıt türü ya da türlerine göre yapılmaktadır. Bazı uygulamalarda birden fazla yakıtlı sistemler kullanılabilir (Çeçil, 2018). CHP sistemleri; buhar türbinleri, gaz türbinleri, birleşik gaz-buhar (kombine) çevrimleri, içten yanmalı motorlar, yakıt hücresi

gibi birçok farklı teknoloji ve uygulamaları kapsamaktadır. Buhar türbinleri, eski zamanlardan beri endüstriyel CHP sistemlerinde güç makinesi olarak kullanılmaktadır. Üretilen güç, prosesler için gerekli ısı enerjisine göre, türbinde düşürülebilecek basınç miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Gaz türbini ve pistonlu motor sistemleri ile karşılaştırıldığında buhar türbini sistemlerinde birim yakıt başına üretilen elektrik enerjisi miktarı daha az olmasına rağmen toplam verim daha yüksektir. Türbine giren buharın yüksek basınç ve sıcaklıkta olması durumunda uygun güç üretimi sağlanmaktadır. Proses için gerekli sıcaklık değeri, buharın türbinden çıkış koşullarını belirler. Türbine giren buharın basıncı arttırıldığında elde edilen güçte artırılmış olur. Fakat böyle bir durumda sistem maliyetleri de artmaktadır. Optimum çalışma basıncı belirlenirken santral boyutu ve proses ihtiyaçları dikkate alınmaktadır (Yöntem, 2011).

Buhar türbinli CHP sistemlerinde karşı basınçlı buhar türbini kullanılması durumunda fosil yakıtların ya da çeşitli atıkların yakılmasıyla elde edilen yüksek basınçlı buharın, türbine gönderilerek jeneratörü tahrik etmesi ile elektrik üretimi gerçekleştirilir. Türbinden daha düşük sıcaklık ve basınçta çıkan buhar proses ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanılabilir. Proses buhar ihtiyacının sabit olmadığı ya da türbin için gerekli miktardan daha az olduğu durumlarda, karşı basınçlı sistemlerin yerine ara buhar almalı türbinler tercih edilmektedir. Ara buhar almalı sistemlerde, türbinde belirli bir basınca kadar genişleyen buharın bir kısmı proses ısı değiştiricisine gönderilerek proses ısı ihtiyacının karşılanmasında kullanılmaktadır. Isı gereksiniminin değişkenlik gösterdiği uygulamalarda ara buhar almalı türbinden çekilen buhar miktarı ayarlanarak sistem değişik ısı elektrik oranlarında çalıştırılabilir (Çeçil, 2018).

Isı ve mekanik güç gereksinimleri, uygulanacak CHP sisteminin önemli seçim parametrelerini oluşturmaktadır. Kurulum aşamasında öncelikle tesisin proses ısı ihtiyacı ya da elektrik ihtiyacının mı daha fazla olması gerektiği belirlenmelidir. Buhar türbinli sistemler, proses ısı ihtiyacının fazla olması durumunda tercih edilmektedir. Elektrik güç çıkışı, türbinden atılan buharın basınç değerinin yükselmesi ile oransal olarak azalır (Akdeniz, 2007). Şekil 3.8'de buhar türbinli CHP sistemlerindeki enerji akışı görülmektedir.





Şekil 3.24: Buhar türbinli CHP sistemlerindeki enerji akışı (Akdeniz, 2007).

CHP sistemlerinin verimliliği, kullanılan yakıtın sahip olduğu kimyasal enerjinin faydalı ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülebilir kesridir. Enerjinin geri kalan kısmı, atık ısı olarak kaybedilmektedir. Verimlilik genellikle hem elektriksel verimlilik hem de genel (toplam) verimlilik açısından ifade edilir (Onovwiona ve Ugursal, 2006):

$$\text{Elektrik verimi} = \frac{\text{Elektrik çıktısı (kW)}}{\text{Yakıt girdisi (kW)}} \quad (21)$$

$$\text{Toplam verim} = \frac{\text{Yararlı ısı} + \text{Elektrik çıktısı (kW)}}{\text{Yakıt girdisi (kW)}} \quad (22)$$

Bir CHP sisteminin verimliliği, ana taşıyıcı tipi, büyüklüğü ve geri kazanılan ısının kullanılabilirliği sıcaklık ile ilişkilidir. Bununla birlikte verimlilik, CHP ünitesinin durumuna ve işletim rejimine de bağlıdır (Onovwiona ve Ugursal, 2006).

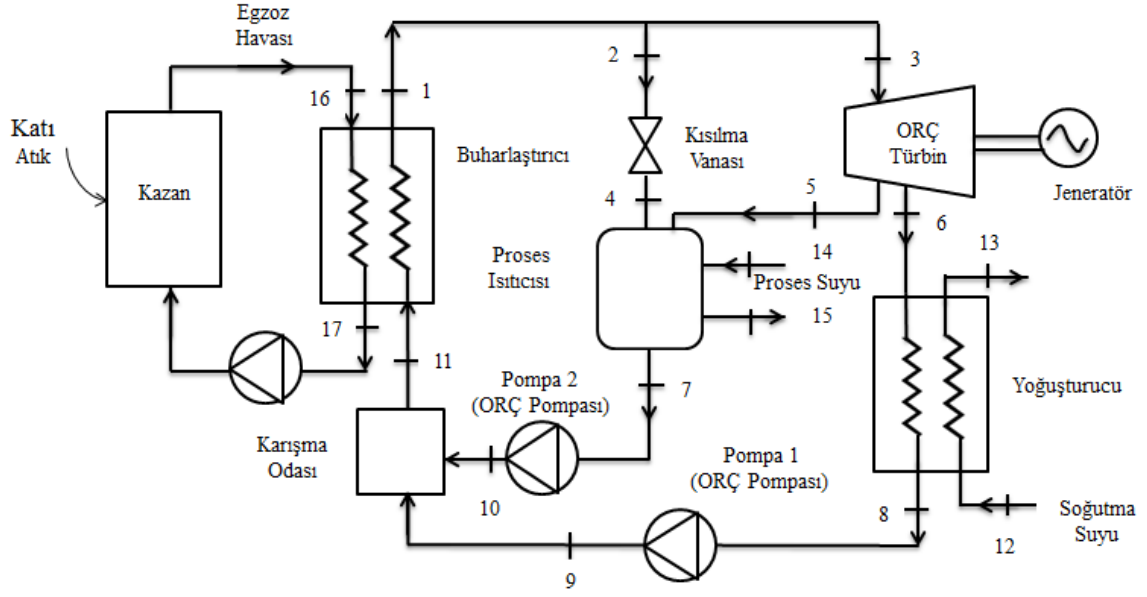
## BÖLÜM 4

### MATERYAL VE METOT

#### 4.1 Kojeneratif Organik Rankine Çevrimi

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi, KKA’ların organik bileşenlerinin yakılması sonucu elde edilen ısı enerjisi, kazan içerisinde transfer akışkanı olarak kullanılan egzoz havasına iletilmektedir. Buharlaştırıcıda gelen egzoz havası, ısı kaynağından aldığı enerjiyi, sistem çalışma akışkanına aktararak akışkanın yüksek sıcaklık ve basınca geçmesini sağlar. Normal çalışma zamanları için buharlaştırıcıdan çıkan buharın bir kısmı, türbine yönlendirilerek yoğuşturucu basıncına kadar genişletilir ve buhardaki ısı enerjisinin mekanik işe dönüştürülmesi sağlanır. Mekanik enerji, türbine bağlı jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine çevrilir. Oluşan buharın bir kısmı ise sıcak su ve ısınma ihtiyaçlarında kullanılmak amacıyla belirlenen bir ara basınçta türbinden ayrılarak proses ısıtıcısına yönlendirilir. Buhar türbininde yoğuşturucu basıncına genişletildikten sonra basıncı ve sıcaklığı düşen buhar, yoğuşturucuya gelir burada soğutma kulesi tarafından üretilen soğutma suyu aracılığıyla sabit basınçta soğutulmuş sıvı hale dönüştürülür. Yoğuşturucudan ayrılan akışkan ve proses ısıtıcısından çıkan akışkanın basıncı, pompalar (Pompa 1,2) yardımıyla sıkıştırılarak tekrar buharlaştırıcı basıncına çıkarılmaktadır. Daha sonra bu akışkanlar karışma odasında birleştirilerek buharlaştırıcıya gönderilmektedir. Tamamlanan çevrimin çalışma süreci bu şekilde devam eder.

Proses yükünün fazla olduğu durumda, buharlaştırıcıdan çıkan buharın bir kısmı, kısımla vanasıyla genişletildikten sonra proses-ısıtıcısına gönderilmektedir. Sistemden elde edilen maksimum proses ısı, kazandan çıkan tüm buharın basınç düşürücü vanadan geçirilmesiyle elde edilmektedir. Güç üretimi, bu durum için sıfır olmaktadır. Proses ısısının gerekli olmadığı durumlarda ise buharın tümü türbin ve yoğuşturucuya yönlendirilmektedir. CHP sistemi bu kez ORÇ buharlı güç sistemi gibi çalışır.



Şekil 4.25: Kojeneratif ORÇ sisteminin şematik gösterimi.

## 4.2 Tasarım Parametreleri

Tasarımın aşamasında, öncelikle sistem ekipmanları ve kullanılacak akışkan türleri tespit edilmiş olup sonrasında belirlenen kriterler doğrultusunda seçimler yapılmıştır. Seçimler neticesinde tasarımı yapılan kojeneratif ORÇ sisteminin, enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmanın tasarım ve simülasyon süresince kojeneratif ORÇ sisteminde kullanılacak ısı kaynağının ve çalışma koşullarının belirlenmesi, gerçeğe yakın daha doğru sonuçların elde edilebilmesi yönünden büyük önem taşımaktadır. Sistemde ısı kaynağı olarak kullanılan KKA'lerden elde edilecek ısı yükü hesaplanmıştır. Hesaplanan ısı yükü ile belirlenen üst ve alt basınç değerlerine göre uygun akışkanlar çevrim bileşenlerinden geçirilmiştir. Tasarım ve analizlerde ORÇ için Tablo 4.1'de verilen çalışma koşulları göz önünde bulundurulmuştur.

Tablo 4.18: ORÇ sisteminin çalışma şartları.

Parametre	Değer
Egzoz hava debisi	5 kg/s
Egzoz hava giriş sıcaklığı	150°C
Egzoz hava giriş basıncı	150 kPa
Sistemdeki organik akışkan debisi	5 kg/s
Kazan verimi	%83
Buharlaştırıcı basıncı	1400 kPa
Yoğuşturucu basıncı	150 kPa
Ara basınç	500 kPa
Soğutma suyu giriş sıcaklığı	24°C
Soğutma suyu çıkış sıcaklığı	32°C
Proses suyu giriş sıcaklığı	25°C
Proses suyu debisi	3 kg/s
Proses suyu giriş basıncı	101.325 kPa
Türbin izentropik verim	%85
Pompa 1-2 izentropik verim	%85
Ölü hal sıcaklığı	25°C
Ölü hal basıncı	101.325 kPa
Sistem çalışma süresi	24 saat/gün

Hesaplamaları kolaylaştırmak için kabul edilen tüm varsayımlar:

- Tüm sistemin denge (kararlı) durumda olduğu varsayılır.
- Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilir.
- Sistem bileşenleri adyabatiktir.
- Isı kayıpları ve borulardaki basınç düşüşleri ihmal edilir.
- ORÇ pompalarının her biri için girişteki çalışma akışkanını doymuş sıvı olarak kabul edilir.
- Ölü hal basıncı  $P_0$  ve sıcaklık  $T_0$ , sırasıyla 101.325 kPa ve 25°C olarak kabul edilir.

#### 4.2.1 Karakterizasyon

Isı kaynağı kapasitesi enerji üretim sistemleri için önemli bir tasarım parametresidir. Bu çalışmada, kojeneratif ORÇ sisteminde ısı kaynağı olarak Bartın ili için değerlendirilen mutfak atıkları, evsel ve endüstriyel atıklar gibi farklı kalorifik değerlere sahip çeşitli KKA'ların yakılmasıyla elde edilen ısı verileri kullanılmıştır.

Bartın ili merkezinde gelir seviyesine göre belirlenen dört mahalleden (Aladağ, Esentepe, TOKİ, Kırtepe) mutfak atıkları, evsel atıklar ve çeşitli endüstriyel katı atıklardan atık karakterizasyonu için temsili numuneler alınmıştır. Atık depolama yetkilileri ile görüşülerek alınan numunelerin, daha net verilerin elde edilmesinde hafta sonu oluşan atıkların dikkate alınmasının önem taşımasından dolayı Çevre ve Şehircilik Bakanlığının yayımladığı “Katı Atık Karakterizasyon Kitapçığı” ’na uygun olarak hafta içi ve hafta sonunu temsil edecek atıklar olması göz önünde bulundurulmuştur. Öncelikle gerekli malzemeler temini sağlanmış ve işlemler sırasında gelebilecek tehlikelere karşı güvenlik önlemleri alınarak her bir numune için sırasıyla ASTM 2003 standartlarına göre katı atık karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Karakterizasyon alanına toplama araçları ile farklı noktalardan getirilen atıklar, atıkların etrafa dağılmaması ve atık sularının zemine geçmemesi için 5m×10m ebatlarındaki plastik örtünün üzerine her biri ayrı bir yığın oluşturacak şekilde boşaltıldı. Boşaltılan yığınlar tek tek düzleştirildikten sonra dört bölüme ayrıldı. Birinden başlanarak, tüm yığınlar için 1m×1m×0.5m ölçülerindeki iki adet sabit hacim kabını dolduracak miktardaki homojen hale getirilmiş atık, yığının her bölümünden eşit olacak şekilde konarak numune alındı. Karakterizasyon, ASTM 2003 standartında belirlenen 16 atık bileşeni esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

Her bir bileşen için bulundurulan kapların boş ağırlıkları (dara) tartılıp not edildikten sonra madde grup analizine geçildi. Plastik örtü üzerine boşaltılan yığın içerisindeki tüm atıklar, ıslak yapıdaki yemek atıklarının zorluk çıkarabilmesinden dolayı yemek atıkları en sona kalacak şekilde, özelliklerine göre bu kaplardan uygun olanlara kondu. Gruplandırma yapılırken, atık içerisindeki suyun buharlaşmasına bağlı olarak kütle kaybı gerçekleşebilir. Bu nedenle ayırma işlemi olabildiğince hızlı bir şekilde tamamlandı ve atık yığını içerisindeki olacak tehlikelere karşı baret, gözlük, eldiven, çizme gibi ekipmanlar kullanıldı. Bağlanmış poşetler ayırma sırasında açıldı, bunlardan çıkan atıkların uygun kaplara kondu. Dolu kapların ağırlıkları (brüt) not defteri ile kaydedildi. Net tartım sonuçlarından sonra, bileşenlerin toplam atık içerisindeki oranları hesaplandı. Katı atık karakterizasyon çalışması 2018 yılı Haziran ayında gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon sonunda elde edilen veriler ortalama yüzde olarak Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.19: Katı atık karakterizasyonun gerçekleştirildiği yerleşimlerin analiz sonuçları.

	ALADAĞ	ESENTEPE	KIRTEPE	TOKİ	ORT.
<b>Katı Atık Bileşenleri</b>	%	%	%	%	%
Mutfak atıkları	29.05	34.34	39.24	35.23	34.47
Kâğıt	5.99	1.53	11.63	4.42	5.89
Karton	4.45	3.06	6.98	7.05	5.38
Hacimli karton	2.17	0.83	0.00	2.24	1.31
Plastik	26.72	30.00	31.40	28.76	29.22
Cam	7.06	6.58	4.43	4.29	5.59
Metal	0.51	0.17	0.00	0.38	0.27
Hacimli metal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Atık elektrik ve elektronik ekipman	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tehlikeli atık	0.99	0.83	0.00	0.96	0.69
Park ve bahçe atıkları	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Diğer yanmayanlar	15.29	0.00	0.00	0.00	3.82
Diğer yanabilenler	7.77	22.67	6.32	16.66	13.35
Diğer yanabilir hacimli atıklar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Diğer yanmayan hacimli atıklar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Diğer (yukarıdaki gruplar hariç)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Yaz mevsiminde yapılmış olan çalışmada kül bileşeni görülmemiş olup, elde edilen veriler göre, tüm noktalar için bileşenler arasında en büyük yüzdeyi mutfak atıkları oluşturmaktadır. Bunu Esentepe ve TOKİ yerleşim yerleri için sırasıyla plastik atıklar ve diğer yanabilenler, Aladağ mahallesinde plastik ve diğer yanmayanlar, Esentepe mahallesinde ise plastik ve kâğıt atıkları takip etmektedir. Mutfak atıkları yemek artıkları ve meyve ile sebze kalıntılarında oluşmaktadır. Bu atıklarının en büyük paya sahip olmalarının nedeni yaz aylarında sıcaklığa bağlı olarak bozulan yemek atıkları ek olarak meyve ve sebzelerin çokça tüketimi gösterilebilir. Plastik, metal ve cam gibi geri kazanılabilir atıkların büyük bölümünü yaz mevsiminde hava sıcaklığının yüksek olması nedeniyle tüketimi artan içeceklerin ve yiyeceklerin ambalajlarının oluşturduğu gözlemlenmiştir. Diğer yanabilen atıklar incelendiğinde farklı tekstil atıkları ile kullanılmış

çocuk bezleri oluşturduğu görülmüştür.

Karakterizasyon sonuçlarından yararlanılarak, yanma yöntemi ile enerjiye dönüştürülüp çalışmada ısı kaynağı olarak kullanılması planlanan mutfak atıkları, plastik kutular, kâğıt, karton, tekstil vb organik bileşime sahip atıkların bileşimdeki oranları ve miktarları belirlenmiştir. Sonraki adımda elde edilen bu data, TÜİK'in yayınladığı 2018 yılı Bartın ili için belediye atık istatistik verilerinden toplanan atık miktarı baz alınarak hesaplamalarda kullanılmak üzere entegre edilmiştir. EES programı ile Tablo 2.2'deki parametreler referans alınarak her bir bileşenin nem içeriği tespit edilip kuru ağırlıkları bulunmuş daha sonra Tablo 2.6'daki kalorifik değerler kullanılarak atıkların yakılması sonucu elde edilecek toplam enerji miktarı tespit edilmiştir.

#### 4.2.1.1 Atıkların Kuru Ağırlıklarının Hesaplanması

Atıkların kuru ağırlıklarının hesaplamaları sonucu elde edilen veriler Tablo 4.3'te gösterilmektedir.

Tablo 4.20: Atık bileşenlerinin kuru ağırlık miktarı (yıllık).

Bileşen	Ağırlık (kg/yıl)	Kuru Ağırlık (kg/yıl)	Nem içeriği (%)
Mutfak atıkları	24,470,000	7,342,000	70
Kâğıt	4,182,000	3,931,000	6
Karton	3,820,000	3,629,000	5
Hacimli karton	930,100	883,595	5
Plastik	20,750,000	20,330,000	2
Diğer yanabilenler	9,479,000	8,531,000	10

#### 4.2.1.2 Atıkların Kalorifik Değerlerinin Hesaplanması

Atıkların kalorifik değerlerinin hesaplamaları sonucu elde edilen veriler Tablo 4.4'te gösterilmektedir.

Tablo 4.21: Atık bileşenlerinin yıllık miktarlarının ısı değerleri

Bileşen	Kuru Atık Miktarı (kg/s)	Kalorifik Değeri (kj/kg kuru ağırlık)	Toplam Kalorifik Değer (kj/kg)
Mutfak Atıkları	0.2328	4,652	1,083
Kağıt	0.1247	16,747	2,088
Plastik	0.6447	32,564	20,994
Karton	0.1151	16,282	1,874
Hacimli Karton	0.02802	16,282	456.2
Diğer yanabilenler	0.2705	17,445	4,719
TOPLAM			31,213

\*:Kuru atık miktarının (kg/s) hesaplanmasında sistem çalışma süresi dikkate alınmıştır.

\*\*::Atıklardan elde edilen toplam kalorifik değer 20 bina için kullanılacağı düşünülmüştür.

#### 4.2.2 Organik Rankine Çevrimi Çalışma Akışkanı Seçimi

Çalışma akışkanı, ORÇ sistem tasarımıyla ve fizibilite araştırmalarıyla doğrudan ilişkili önemli bir parametredir. Akışkanların her biri, bileşen tasarımını, sistem verimini ve optimizasyonunu etkileyen fiziksel, termodinamik ve kimyasal özelliklere sahiptir. ORÇ sisteminde kullanılacak akışkan seçimi yapılırken daha önce belirtilen kriterler göz önünde tutulmuştur. Bu konuyla ilgili literatürde bulunan farklı birçok akışkan değerlendirilmiştir. Sistemin sıcaklığının ve basıncının değerlendirilen akışkanların kritik sıcaklıklarını ve basınçlarını aşmamasına dikkat edilerek gerekli parametreler belirlenmiştir. Akışkan ile sistem materyalleri arasında oluşabilecek korozif etkiler ve kimyasal reaksiyonlar araştırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, çalışma akışkanı olarak Tablo 4.5'te görülen kuru, ıslak ve izentropik türdeki akışkanlar seçilmiştir.

HCFC-123 ve HCFC-141b akışkanlarının Çevre ve Orman Bakanlığı'nın 12/11/2008 tarihli ve 27052 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Ozon Tabakasını İncelten Maddelerin Azaltılmasına İlişkin Yönetmeliğe göre 1/1/2015 tarihinde servis amaçlı kullanımları hariç ithalatına son verilmiş olup (1/1/2015 tarihinden sonra ihracat amaçlı üretimde ihtiyaç duyulan miktara Bakanlıkça izin verilmiştir.) 1/1/2025 tarihinden itibaren de zorunlu kullanım alanları hariç Türkiye sınırları içinde servis amaçlı kullanımı yasaktır fakat 1/1/2020 tarihinden sonra ekonomik ya da teknik olarak kullanılabilir alternatiflerinin veya teknolojilerin var olmadığını belgelenmesi halinde 31/12/2029 tarihine kadar ithalatına izin verilmiştir. İzopentan (R601a)'nın yanıcı özellikte olmasından dolayı ve



Metanolün de zehirleyici ve yanıcı olması kullanımlarda yeterli güvenlik önlemlerinin alınmasını gerektirmektedir. Benzer şekilde R123 akışkanının zehirleyici özelliğinden dolayı kullanılacağı ortamlarda ek tedbirler gerektirdiği ve maruz kalınacak maksimum doz miktarını aşılmamasının çok önemli olduğu yapılan araştırmalarda görülmüştür.

Tablo 4.22: Seçilen çalışma akışkanlarının özellikleri (Liu vd., 2004; Calm ve Hourahan, 2011; Kerme ve Orfi, 2015; Javanshir ve Sarunac, 2017).

	M	NBP	T <sub>cr</sub>	P <sub>cr</sub>	OEL	LFL	A34 GG	ALT	ODP	GWP	Tür
Akışkan	kg/kmol	°C	°C	MPa	PPMv	%	-	yıl	-	100 yıl	-
Izopentan-R601a	72.15	27.8	187.2	3.38	600	1.3	A3	0.009	0.000	~20	kuru
n-pentan	72.15	36.1	196.6	3.37	600	1.2	A3	0.009	0.000	~20	kuru
n-oktan	114.2	125.5	296.2	2,497	-	-	-	-	-	-	kuru
n-heptan	100.2	98.38	267	2,727	-	-	-	-	-	-	kuru
R141b	116.95	32.0	204.4	4.21	500	5.8	-	9.2	0.120	717	izentropik
R123	152.93	27.8	183.7	3.66	50	none	B1	1.3	0.010	77	izentropik
Metanol	32.042	64.7	239.45	8.10	-	-	-	-	n.a	n.a	ıslak
R718-H <sub>2</sub> O	18.02	100.0	373.9	22.06	-	none	A1	-	0.000	<1	ıslak

\* M - moleküler kütle; NBP - normal kaynama noktası; T<sub>cr</sub> - kritik sıcaklık; P<sub>cr</sub> - kritik basınç; OEL - mesleki maruziyet limiti (PPMv); LFL - alt yanma limiti (% - havadaki hacimce); A34 GG - ANSI/ASHRAE 34 Güvenlik Sınıflandırması; ALT - atmosferik ömür (yıl); ODP- ozon tüketme potansiyeli (R11'e göre); GWP - küresel ısınma potansiyeli (CO<sub>2</sub>'ye göre).

### 4.3 Termodinamik Formüller

#### 4.3.1 Enerji ve Ekserji Analizleri

Sistemin kararlı haldeki analizi yapılırken enerji, ekserji, kütle ve entropi denge formülleri kullanılmıştır. Enerji ve ekserji analizleri termodinamiğin birinci ve ikinci yasa ile kütlenin korunumu ilkelerini kapsamaktadır. Kinetik ve potansiyel enerjilerin ihmal edilerek, kararlı durum için kütlenin korunumu denklemi (Ustaoğlu ve Alptekin, 2016) :

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (23)$$

Denklemdaki  $\dot{m}_g$  ve  $\dot{m}_ç$  sırasıyla sisteme giren ve sistemden çıkan kütleli debiyi ifade etmektedir. Sürekli akışlı açık sistemlerde (SASA), kontrol hacmi içerisindeki toplam

enerji sabit olması nedeniyle toplam enerji değişimi sıfırdır. Böylece tüm biçimler (ısı, iş ve kütle) için kontrol hacmine giren ve çıkan enerji miktarı eşit olmaktadır. Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edildiğinde ( $\Delta ke=0$ ) ve ( $\Delta pe=0$ ), enerji korunumu denklemi (Çengel ve Boles, 2008):

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum(\dot{m}h)_{\zeta} - \sum(\dot{m}h)_{g} \quad (24)$$

$\dot{Q}$  sistem ile çevre arasında birim zamandaki ısı geçişini,  $\dot{W}$  gücü,  $h$  entalpi değerini göstermektedir. Bu denklem kütle debisi  $\dot{m}$  ile bölünerek, termodinamiğin birinci yasası birim kütle açısından tanımlanır.

$$q - w = \sum h_{\zeta} - \sum h_g \quad (25)$$

Buradaki  $q$  ve  $w$  sırasıyla birim kütle için ısı geçişini ve işi ifade etmektedir. Kinetik, potansiyel ve kimyasal ekserjiler ihmal edildiğinde, kararlı durum için ekserji dengesi (Garousi Farshi vd., 2014; Akpınar ve Hepbaslı, 2007);

$$\dot{E}x_Q - \dot{E}x_W = \sum(\dot{m}ex)_{\zeta} - \sum(\dot{m}ex)_{g} + T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (26)$$

$$\dot{E}x_{\text{yokols}} = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (27)$$

Denklemdaki  $\dot{E}x_Q$ ,  $\dot{E}x_W$  ve  $ex$  sırasıyla ısı ekserjisini, iş ekserjisini ve akış ekserjisini ifade etmektedir. Bu ifadeler aşağıda verildiği gibi yazılabilir (Kaşka, 2014):

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (28)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W}_{\text{net}} \quad (29)$$

$$ex_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (30)$$

$$\dot{S}_g + \dot{S}_{\text{üretim}} = \dot{S}_{\zeta} \quad (31)$$

Denklemden yazılan  $0$  alt indisi ölü hal (referans) koşullarını (sıcaklık, entalpi, entropi),  $T_k$  ısı transferinin gerçekleştiği yüzey sıcaklığını,  $h_i$   $s_i$  akışkanın belirli noktadaki entalpi ve entropi değerini göstermektedir.  $\dot{W}_{net}$  ise sistemden ele edilen net gücü olup şu şekilde tanımlanır (Chen vd., 2019):

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{türb} - \dot{W}_{pomp} \quad (32)$$

$\dot{W}_{türb}$ , türbinde üretilen gücü  $\dot{W}_{pomp}$  pompaya tüketilen gücü ifade etmektedir. Sistemin enerji ve ekserji verimlerinin hesaplanmasında aşağıdaki denklemlerden yararlanılmıştır:

$$\eta_{I,ORÇ} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{buh}} \quad (33)$$

$$\eta_{I,proses} = \frac{\dot{Q}_{pro}}{\dot{Q}_{buh}} \quad (34)$$

$$\eta_{I,CHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{proses}}{\dot{Q}_{buh}} \quad (35)$$

$\dot{Q}_{buh}$  ısı kaynağı tarafından buharlaştırıcıya verilen ısıyı,  $\dot{Q}_{proses}$  sistemdeki proses ısıtıcısından elde edilen ısıyı ifade etmektedir.

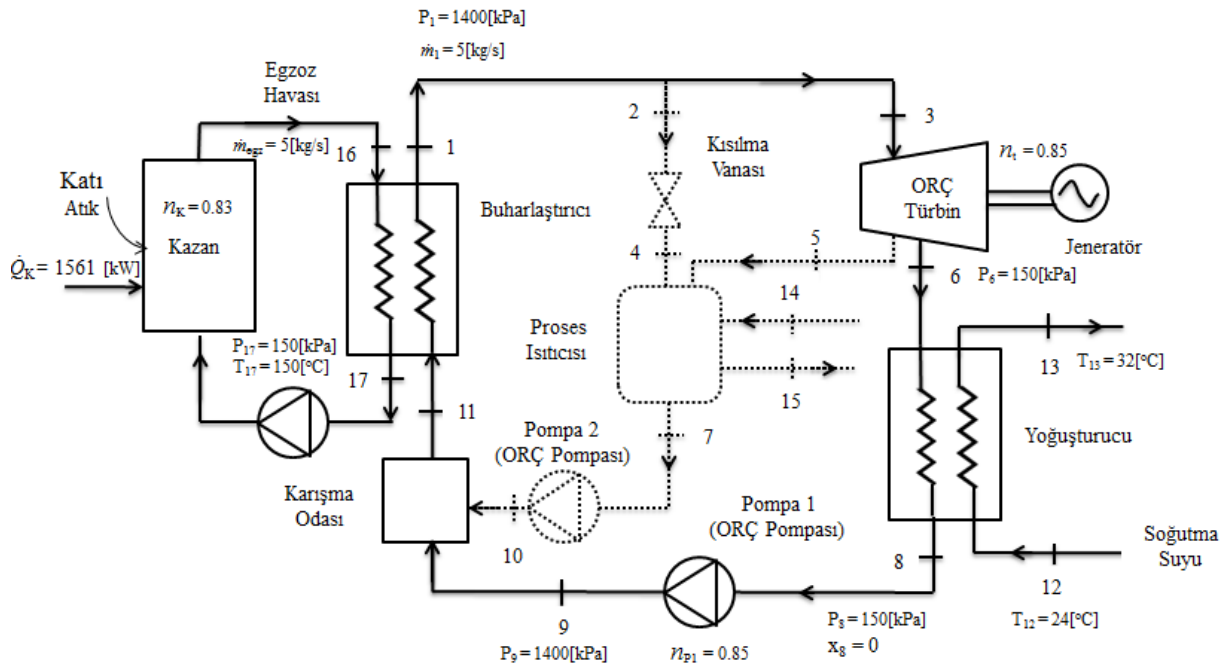
$$\eta_{II,ORÇ} = \frac{\dot{Ex}_{W_{net,\xi}}}{\dot{Ex}_{Q_{buh}}} \quad (36)$$

$$\eta_{II,proses} = \frac{\dot{Ex}_{Q_{proses}}}{\dot{Ex}_{Q_{buh}}} \quad (37)$$

$$\eta_{II,CHP} = \frac{\dot{Ex}_{W_{net,\xi}} + \dot{Ex}_{Q_{proses}}}{\dot{Ex}_{Q_{buh}}} \quad (38)$$

### 4.3.2 Denge Denklemleri

Kojeneratif ORÇ sisteminde bulunan her bir bileşenin kütle, enerji, ekserji, entropi denge denklemleri, varsayımlara bağlı olarak üstteki eşitlikler yardımıyla üç ayrı durum için geliştirilmiştir. Birinci çalışma durumunda proses ısısının gerekli olmadığı ve buharın tümünün türbin ve yoğuşturucuya yönlendirilerek ( $\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = 0$ ) sistemin ORÇ buharlı güç sistemi gibi çalıştığı kabul edilmiş olup hesaplamalar buharın yoğuşturucudan doymuş sıvı halinde ( $x_8 = 0$ ) çıktığı dikkate alınarak yapılmıştır (Şekil 4.2). Birinci durum için elde edilen denge denklemleri Tablo 4.6 ve Tablo 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.26: 1.durum için ORÇ/CHP sisteminin akış şeması.

Tablo 4.23: Kojeneratif ORÇ sistemi 1.çalışma durumu için kütle ve enerji denge denklemleri.

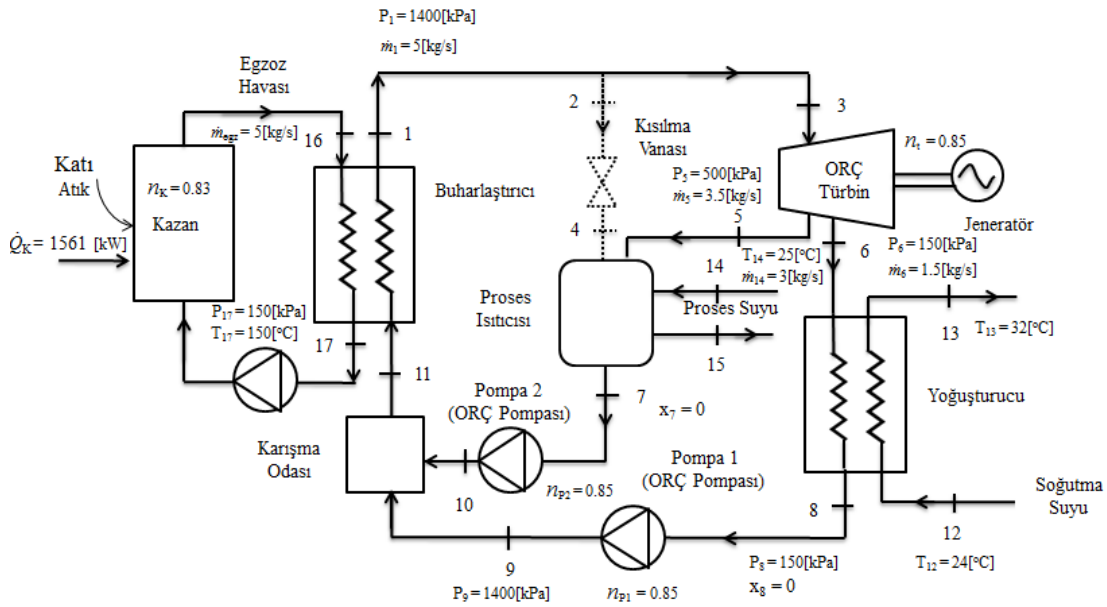
Sistem Bileşenleri	Kütle Denge Denklemleri (M)	Enerji Denge Denklemleri (E)
	$\dot{m}_1 = \dot{m}_3 = \dot{m}_6 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{sistem}$	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17} = \dot{m}_{egzhava}$
	$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} = \dot{m}_{SS}$	
Pompa 1	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	$\dot{W}_{Pomp1.} = \dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_8 h_8$
Buharlaştırıcı	$\dot{m}_{11} + \dot{m}_{16} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{17}$	$\dot{Q}_{buh} = \dot{Q}_{egzhava}$
ORÇ türbin	$\dot{m}_3 = \dot{m}_6$	$\dot{W}_{türb} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_6 h_6$
Yoğusturucu	$\dot{m}_6 + \dot{m}_{12} = \dot{m}_8 + \dot{m}_{13}$	$\dot{Q}_{yoğ} = \dot{Q}_{SS}$
Karışma odası	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{11}$	$\dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_{12} h_{12}$
		$\dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_{11} h_{11}$

Tablo 4.24: Kojeneratif ORÇ sistemi 1.çalışma durumu için ekserji ve entropi denge denklemleri.

Sistem Bileşenleri	Ekserji Denge Denklemleri (Ex)	Entropi Denge Denklemleri (En)
Pompa 1	$\dot{m}_8 ex_8 + \dot{W}_{Pomp1.} = \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{yokols,Pomp1.}$	$\dot{m}_8 s_8 + \left( \frac{\dot{E}x_{yokols,Pomp1.}}{T_0} \right) = \dot{m}_9 s_9$
Buharlaştırıcı	$\dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{E}x_{Q_{egzhava}} = \dot{m}_1 ex_1 + \dot{E}x_{yokols,buh}$ $\dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{m}_{16} ex_{16} = \dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_{17} ex_{17} + \dot{E}x_{yokols,b}$	$\dot{m}_{11} s_{11} + \dot{m}_{16} s_{16} + \left( \frac{\dot{E}x_{yokols,buh}}{T_0} \right) = \dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_{17} s_{17}$
ORÇ türbin	$\dot{m}_3 ex_3 = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{W}_{türb} + \dot{E}x_{yokols,türb}$	$\dot{m}_3 s_3 + \left( \frac{\dot{E}x_{yokols,türb}}{T_0} \right) = \dot{m}_6 s_6$
Yoğusturucu	$\dot{m}_6 ex_6 = \dot{m}_8 ex_8 + \dot{E}x_{Q_{yoğ}} + \dot{E}x_{yokols,yoğ}$ $\dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_{12} ex_{12} = \dot{m}_{13} ex_{13} + \dot{m}_{15} ex_{15} + \dot{E}x_{yokols,yoğ}$	$\dot{m}_6 s_6 + \dot{m}_{12} s_{12} + \left( \frac{\dot{E}x_{yokols,yoğ}}{T_0} \right) = \dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_{13} s_{13}$
Karışma odası	$\dot{m}_9 ex_9 = \dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{E}x_{yokols,ko.}$	$\dot{m}_9 s_9 + \left( \frac{\dot{E}x_{yokols,ko.}}{T_0} \right) = \dot{m}_{11} s_{11}$

İkinci çalışma durumu için, buharlaştırıcıdan çıkan buharın %70'inin türbinde ara basınca ( $P_5 = 500$  kPa) kadar genişletilip proses suyu sağlanması amacıyla proses ısıtıcısına yönlendirildiği ve buradan doymuş sıvı olarak çıktığı ( $x_7 = 0$ ), geri kalan kısmının yoğusturucu basıncına ( $P_6 = 150$  kPa) kadar genişledikten sonra yoğusturucuda sabit basınçta ısı vererek doymuş sıvı halinde ( $x_8 = 0$ ) pompaya girdiği kabul edilmiştir ( $\dot{m}_4 = 0$ ,

$\dot{m}_5 \neq 0, \dot{m}_6 \neq 0$ ). Analizler, proses ısıtıcısına ve yoğuşturucuya gönderilen buharın pompalar aracılığıyla buharlaştırıcı basıncına ( $P_9 = P_{10} = 1400$  kPa) sıkıştırıldıktan sonra buharlaştırıcıdan geçirilmek amacıyla karışma odasında birleştiği düşünülerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3). Bu durum için denge denklemleri Tablo 4.8 ve Tablo 4.9’da verilmektedir.



Şekil 4.27: 2.durum için ORÇ/CHP sisteminin akış şeması.

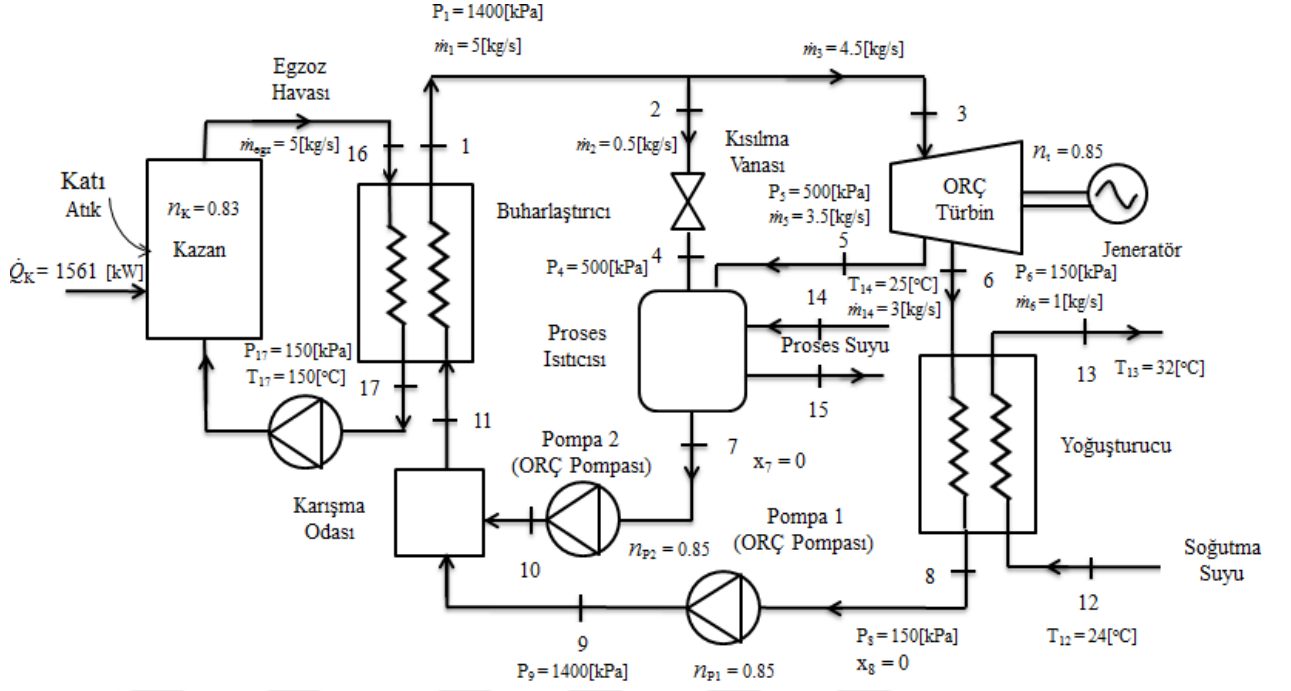
Tablo 4.25: Kojeneratif ORÇ sistemi 2.çalışma durumu için kütle ve enerji denge denklemleri.

Sistem Bileşenleri	Kütle Denge Denklemleri (M)	Enerji Denge Denklemleri (E)
Pompa 1	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	$\dot{W}_{Pomp1.} = \dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_8 h_8$
Pompa 2	$\dot{m}_7 = \dot{m}_{10}$	$\dot{W}_{Pomp2.} = \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_7 h_7$
Buharlaştırıcı	$\dot{m}_{11} + \dot{m}_{16} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{17}$	$\dot{Q}_{buh} = \dot{Q}_{egzhava}$ $\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_{12} h_{12}$
ORÇ türbin	$\dot{m}_3 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6$	$\dot{W}_{türb} = \dot{m}_3 h_3 - (\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6)$
Yoğuşturucu	$\dot{m}_6 + \dot{m}_{12} = \dot{m}_8 + \dot{m}_{13}$	$\dot{Q}_{yoğ} = \dot{Q}_{SS}$ $\dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_{12} h_{12}$
Proses ısıtıcısı	$\dot{m}_5 + \dot{m}_{14} = \dot{m}_7 + \dot{m}_{15}$	$\dot{Q}_{pro} = \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_{15} h_{15} - \dot{m}_{14} h_{14}$
Karışma odası	$\dot{m}_9 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$	$\dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_{11} h_{11}$

Tablo 4.26: Kojeneratif ORÇ sistemi 2.çalışma durumu için ekserji ve entropi denge denklemleri.

Sistem Bileşenleri	Ekserji Denge Denklemleri (Ex)	Entropi Denge Denklemleri (En)
Pompa 1	$\dot{m}_8 ex_8 + \dot{W}_{Pomp1.} = \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{yokolş.,Pomp1.}$	$\dot{m}_8 s_8 + \left( \frac{\dot{E}x_{yok olan Pomp1.}}{T_0} \right) = \dot{m}_9 s_9$
Pompa 2	$\dot{m}_7 ex_7 + \dot{W}_{Pomp2.} = \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{E}x_{yokolş.,Pomp2.}$	$\dot{m}_7 s_7 + \left( \frac{\dot{E}x_{yok olan Pomp2.}}{T_0} \right) = \dot{m}_{10} s_{10}$
Buharlaştırıcı	$\dot{m}_1 ex_{11} + \dot{E}x_{Q_{egz.hava}} = \dot{m}_1 ex_1 + \dot{E}x_{yokolş.,b}$ $\dot{m}_1 ex_{11} + \dot{m}_{16} ex_{16} = \dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_{17} ex_{17} + \dot{E}x_{yokolş.,buh}$	$\dot{m}_{11} s_{11} + \dot{m}_{16} s_{16} + \left( \frac{\dot{E}x_{yok olan.buh}}{T_0} \right) = \dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_{17} s_{17}$
ORÇ türbin	$\dot{m}_3 ex_3 = \dot{m}_5 ex_5 + \dot{m}_6 ex_6 + \dot{W}_{türb} + \dot{E}x_{yokolş.,türb}$	$\dot{m}_3 s_3 + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş.türb}}{T_0} \right) = \dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_6 s_6$
Yoğuşturucu	$\dot{m}_6 ex_6 = \dot{m}_8 ex_8 + \dot{E}x_{Q_y} + \dot{E}x_{yokolş.,yoğ}$ $\dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_{12} ex_{12} = \dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_{13} ex_{13} + \dot{E}x_{yokolş.,yoğ}$	$\dot{m}_6 s_6 + \dot{m}_{12} s_{12} + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş.yoğ}}{T_0} \right) = \dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_{13} s_{13}$
Proses ısıtıcısı	$\dot{m}_5 ex_5 + \dot{m}_{14} ex_{14} = \dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_{15} ex_{15} + \dot{E}x_{yokolş.,pro}$	$\dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_{14} s_{14} + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş.,pro}}{T_0} \right) = \dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_{15} s_{15}$
Karışma odası	$\dot{m}_9 ex_9 + \dot{m}_{10} ex_{10} = \dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{E}x_{yokolş.,ko.}$	$\dot{m}_9 s_9 + \dot{m}_{10} s_{10} + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş.ko.}}{T_0} \right) = \dot{m}_{11} s_{11}$

Üçüncü çalışma durumu için, proses yükünün fazla olduğu, buharlaştırıcıdan çıkan buharın %10'luk kısmının kısılma vanasıyla türbine girmeden önce, %70'inin türbinde ara basınca genişledikten sonra proses ısıtıcısına gönderildiği, buharın geri kalan kısmının ise yoğuşturucu basıncına kadar genişledikten sonra sabit basınçta soğutulduğu kabul edilmiştir ( $\dot{m}_4 \neq 0$ ,  $\dot{m}_5 \neq 0$ ,  $\dot{m}_6 \neq 0$ ). Yapılan hesaplamalarda, buharın proses ısıtıcısından ve yoğuşturucudan doymuş sıvı halinde çıktığı ( $x_7 = x_8 = 0$ ), buharlaştırıcı basıncına pompalandıktan sonra karışma odasında birleşerek buharlaştırıcıya gönderildiği göz önünde bulundurulmuştur (Şekil 4.4). Bu durum için denge denklemleri Tablo 4.10 ve Tablo 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.28: 3.durum için ORÇ/CHP sisteminin akış şeması.

Tablo 4.27: Kojeneratif ORÇ sistemi 3.çalışma durumu için kütle ve enerji denge denklemleri.

$\dot{m}_1 = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{sistem}$	$\dot{m}_2 = \dot{m}_4 = (\dot{m}_{sistem}) \times 0.1$	$\dot{m}_3 = (\dot{m}_{sistem}) \times 0.9$
$\dot{m}_5 = (\dot{m}_{sistem}) \times 0.7$	$\dot{m}_6 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = (\dot{m}_{sistem}) \times 0.2$	$\dot{m}_7 = \dot{m}_{10} = (\dot{m}_{sistem}) \times 0.8$
$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17} = \dot{m}_{egzhava}$	$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{15} = \dot{m}_{proses,su}$	$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} = \dot{m}_{SS}$
Sistem Bileşenleri	Kütle Denge Denklemleri (M)	Enerji Denge Denklemleri (E)
Pompa 1	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	$\dot{W}_{Pomp1.} = \dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_8 h_8$
Pompa 2	$\dot{m}_7 = \dot{m}_{10}$	$\dot{W}_{Pomp2.} = \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_7 h_7$
Buharlaştırıcı	$\dot{m}_{11} + \dot{m}_{16} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{17}$	$\dot{Q}_{buh} = \dot{Q}_{egzhava}$ $\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{16} h_{16}$
Kısılma vanası	$\dot{m}_2 = \dot{m}_4$	$\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_4 h_4$
ORÇ türbin	$\dot{m}_3 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6$	$\dot{W}_{türb} = \dot{m}_3 h_3 - (\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6)$
Yoğuşturucu	$\dot{m}_6 + \dot{m}_{12} = \dot{m}_8 + \dot{m}_{13}$	$\dot{Q}_{yoğ} = \dot{Q}_{SS}$ $\dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_{12} h_{12}$
Proses ısıtıcısı	$\dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_{14} = \dot{m}_7 + \dot{m}_{15}$	$\dot{Q}_{pro} = (\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5) - \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_{15} h_{15} - \dot{m}_{14} h_{14}$
Karışma odası	$\dot{m}_9 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$	$\dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_{11} h_{11}$



Tablo 4.28: Kojeneratif ORÇ sistemi 3.çalışma durumu için ekserji ve entropi denge denklemleri.

Sistem Bileşenleri	Ekserji Denge Denklemleri (Ex)	Entropi Denge Denklemleri (En)
Pompa 1	$\dot{m}_8 ex_8 + \dot{W}_{Pomp1.} = \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{yokolş,Pomp1.}$	$\dot{m}_8 s_8 + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş,Pomp1.}}{T_0} \right) = \dot{m}_9 s_9$
Pompa 2	$\dot{m}_7 ex_7 + \dot{W}_{Pomp2.} = \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{E}x_{yokolş,Pomp2.}$	$\dot{m}_7 s_7 + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş,Pomp2.}}{T_0} \right) = \dot{m}_{10} s_{10}$
Buharlaştırıcı	$\dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{E}x_{Q_{egz,hava}} = \dot{m}_1 ex_1 + \dot{E}x_{yokolş,buh}$ $\dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{m}_{16} ex_{16} = \dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_{17} ex_{17} + \dot{E}x_{yokolş,buh}$	$\dot{m}_{11} s_{11} + \dot{m}_{16} s_{16} + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş,buh}}{T_0} \right) = \dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_{17} s_{17}$
Kısıma vanası	$\dot{m}_2 ex_2 = \dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{yokolş,KV}$	$\dot{m}_2 s_2 + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş,PRV}}{T_0} \right) = \dot{m}_4 s_4$
ORÇ türbin	$\dot{m}_3 ex_3 = \dot{m}_5 ex_5 + \dot{m}_6 ex_6 + \dot{W}_{türb} + \dot{E}x_{yokolş,türb}$	$\dot{m}_3 s_3 + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş,türb}}{T_0} \right) = \dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_6 s_6$
Yoğuşturucu	$\dot{m}_6 ex_6 = \dot{m}_8 ex_8 + \dot{E}x_{Q_{yoğ}} + \dot{E}x_{yokolş,yoğ}$ $\dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_{12} ex_{12} = \dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_{13} ex_{13} + \dot{E}x_{yokolş,yoğ}$	$\dot{m}_6 s_6 + \dot{m}_{12} s_{12} + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş,yoğ}}{T_0} \right) = \dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_{13} s_{13}$
Proses ısıtıcısı	$\dot{m}_4 ex_4 + \dot{m}_5 ex_5 + \dot{m}_{14} ex_{14}$ $= \dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_{15} ex_{15} + \dot{E}x_{yokolş,pro}$	$\dot{m}_4 s_4 + \dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_{14} s_{14} + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş,pro}}{T_0} \right)$ $= \dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_{15} s_{15}$
Karışma odası	$\dot{m}_9 ex_9 + \dot{m}_{10} ex_{10} = \dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{E}x_{yokolş,ko.}$	$\dot{m}_9 s_9 + \dot{m}_{10} s_{10} + \left( \frac{\dot{E}x_{yokolş,ko.}}{T_0} \right) = \dot{m}_{11} s_{11}$

### 4.3.3 İleri Ekserji Analizi

Toplam ekserji yıkımı şu şekilde hesaplanabilir (Ustaoğlu, 2020):

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{P,k} = T_0 \dot{m}_k s_{p,k} \quad (39)$$

Denklemdaki,  $\dot{E}_{F,k}$  k ve  $\dot{E}_{P,k}$  sırasıyla yakıt ekserjisini ve ürün ekserjisini gösterir. Böylece, ekserji verimliliği, k'inci bileşen için aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir (Zhang vd., 2020):

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (40)$$

Geleneksel ekserji analizi, ekserji yıkım oranının ve bileşenlerin her birinde meydana gelen tersinmezliğin belirlenmesini sağlar. Fakat bu yöntem bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimi anlamak ve optimizasyon oranının daha gerçekçi yaklaşımla hesaplanabilmesinde kullanılamamaktadır. Bileşenlerin etkileşim içinde oldukları termodinamik sistemler için, bu etkileşimin göz ardı edilerek yapılacak optimizasyon çalışmalarında geleneksel yaklaşımdan yararlanmak doğru değildir. Sonuç olarak ileri ekserji analizi olarak tanımlanan ve detaylı analizleri içeren yöntem gereklidir. İleri ekserji analizinde, kaçınılamaz-önlenebilir ve içsel-dışsal şeklinde iki farklı grupta incelemeler gerçekleştirilmektedir (Morosuk vd., 2012).

Önlenebilir/Kaçınılamaz: Ekserji yıkımı  $\dot{E}_{D,k}$  önlenebilir  $\dot{E}_{D,k}^{\text{ÖN}}$  ve kaçınılamaz  $\dot{E}_{D,k}^{\text{KAC}}$  olarak sınıflandırılabilir (Cziesla vd., 2006; Nami vd., 2017). Önlenebilir ve kaçınılamaz kısımların toplamı bir komponentteki ekserji yıkımına eşittir. Sistemdeki tüm komponentlerin kaçınılamaz koşullarda çalıştırıldığında komponentler için elde edilen ekserji yıkımı o komponent için kaçınılamaz ekserji yıkımını belirtmektedir. Her bir komponent için gerçek durumda bulunan ekserji yıkımı ile kaçınılamaz koşullarda hesaplanan ekserji yıkımı arasındaki fark önlenebilir ekserji yıkımını göstermektedir (Eşitlik 41).

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{\text{KAC}} + \dot{E}_{D,k}^{\text{ÖN}} \quad (41)$$

Bileşenlerin geliştirme potansiyellerinin daha gerçekçi bir yaklaşımla ele alınıp tespit edilmesinde, ekserji yıkımının kaçınılamaz ve önlenebilir kısımları oldukça önem taşımaktadır. Bir komponentteki kaçınılamaz ekserji yıkımı, malzeme özellikleri ve bulunabilirliği buna ek olarak malzeme ve üretim maliyetleri gibi teknolojik kısıtlamalar nedeniyle azaltılamayan kısımdır. Ekserji yıkımının önlenebilir kısmı ise komponentin tasarımda yapılan geliştirmelerle azaltılabilir. Birim ürün başına ekserji yok olma oranı  $(\dot{E}_D/\dot{E}_P)^{\text{KAC}}$  sistemin kaçınılamaz koşullarda yüksek verimlilik ve düşük kayıplarla çalıştığı varsayılarak hesaplanabilir.

Gerçek durum ürün ekserji oranı kullanılarak k'inci bileşen için kaçınılmaz ekserji yok etme aşağıdaki denklemle ifade edilir (Ustaoğlu, 2020):

$$\dot{E}_{D,k}^{KAÇ} = \dot{E}_{P,k}^{gerçek} \left( \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{P,k}} \right)^{KAÇ} \quad (42)$$

Dışsal/İçsel: Ekserji yıkımı için diğer bir yaklaşım ise, içsel  $\dot{E}_{D,k}^{İÇ}$  ve dışsal  $\dot{E}_{D,k}^{DİŞ}$  kısımlara ayrılmasıdır. (Morosuk vd., 2012). Bu kısımlar, komponentlerdeki ekserji yıkımının kendisinden veya sistemde bulunan diğer komponentlerden kaynaklandığını belirtir. İçsel ekserji yıkımı bulunurken, incelenen komponent gerçek şartlarda, diğer komponentler ise ideal şartlarda çalıştırılmaktadır. Dışsal ekserji yıkımı, herhangi bir komponentin gerçek şartlardaki ekserji yıkımı ile içsel ekserji yıkımı arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır (Eşitlik 43). Çevrimdeki komponentlerin tümüne bu yaklaşımın uygulanması durumunda sistemde meydana gelen bütün dışsal ve içsel ekserji yıkımları hesaplanabilir. Dışsal ekserji yıkımı, bir komponentteki tersinmezliklerin diğer komponentlere bağlı olarak oluştuğunu, içsel ekserji yıkımı ise o komponentin kendisinden kaynaklandığını gösterir. Bu sayede çevrimdeki komponentlerden hangisine, hangi düzeyde odaklanılması gerektiğini anlaşılmaktadır.

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{İÇ} + \dot{E}_{D,k}^{DİŞ} \quad (43)$$

## BÖLÜM 5

### BULGULAR VE TARTIŞMA

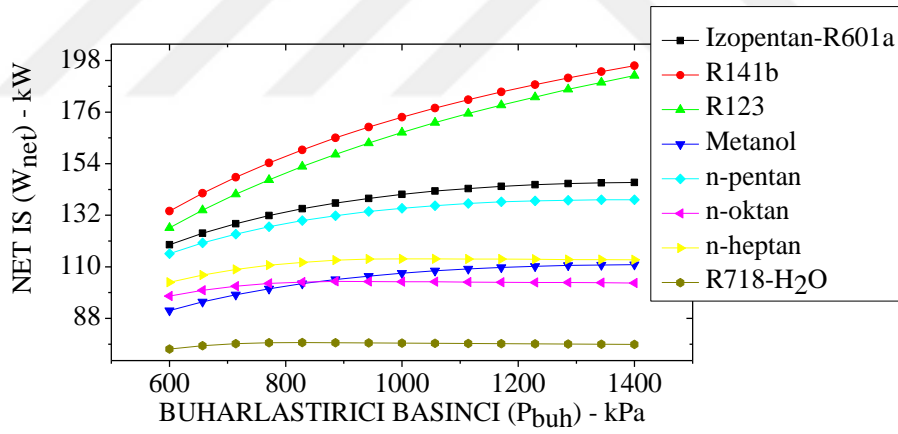
Dünya'nın elektrik ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan buharlı güç santrallerinde yapılacak performans değerlendirme ve optimizasyon çalışmaları bu sistemlere dayalı çevrimlerin sürdürülebilirliği açısından oldukça önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, ısı kaynağı olarak katı atık kullanan ORÇ teknolojisine dayalı CHP sisteminin, bileşenlerdeki tersinmezliklerin neden olduğu kayıpların belirlenerek sistemde yapılabilecek iyileştirmelerin değerlendirilmesi amacıyla enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. EES programında, nümerik olarak modellenmesi yapılan ORÇ/CHP sisteminin analizi için üç farklı enerji üretim projeksiyonu göz önünde bulundurulmuştur. Sistemde organik akışkan olarak Izopentan (R601a), R141b, R123, Metanol, n-pentan, n-oktan, n-heptan, R718 (H<sub>2</sub>O) akışkanları kullanılmıştır. Çalışma basınçlarının enerji ve ekserji verimi, net çıkış gücü üzerindeki etkisi belirlenen koşullarda üç enerji üretim projeksiyonu dikkate alınarak her bir akışkan için analiz edilmiş olup Origin programında grafiksel olarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

#### 5.1 1. Durum Enerji ve Ekserji Analizleri

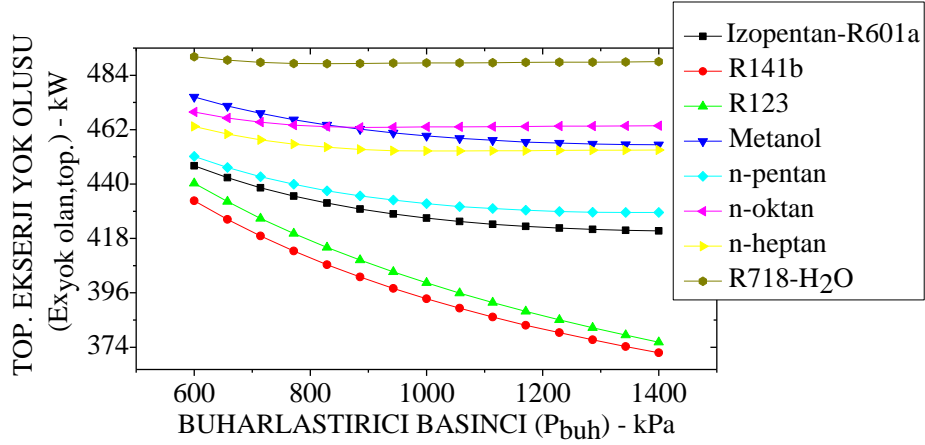
##### 5.1.1 Buharlaştırıcı Basınç Değişiminin Etkisi

Buharlaştırıcı basıncının sistem üzerindeki etkisinin incelendiği analizlerde, ara basıncın 500 kPa ve yoğuşturucu basıncının 150 kPa olduğu varsayılırken, buharlaştırıcı bir hesaplama parametresi olarak kabul edilir. Buharlaştırıcı basıncı 600 ile 1400 kPa arasında değiştirilmiştir. 1.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak sistemden elde edilen net iş çıktısı Şekil 5.1' de gösterilmektedir. Bilindiği üzere, bir sistemin ortalama yüksek sıcaklığını artırmanın, temel Rankine çevrimi için performans iyileştirme etkisi bulunmaktadır. Bu durum aynı zamanda çalışma akışkanının buhar kalitesinde bir azalmaya da neden olur. Fakat bu sorun, ORÇ'ye ara ısıtma uygulanarak ortadan kaldırılabilir. Buharlaştırıcı basıncı tüm çalışma akışkanları için arttığında net iş çıktısı artar. 1.durumun 2. ve 3. durumdan en büyük farkı sistem ara basınçta çalıştırılmadığı için ara basınç değişiminin etkisine bakılmamıştır. Buharlaştırıcı basıncındaki artış n-pentan,

n-oktan, n-heptan ve R718 dışındaki akışkanlarda belirlenen basınç aralığı için net iş çıktısında sürekli artma sağlamaktadır. N-pentan'ın grafiksel eğrisi yaklaşık 1343 kPa'lık buharlaştırıcı basıncına kadar artarken 1343-1400 kPa aralığında basınçtaki artışa rağmen sabit kalmaktadır. N-oktan ve n-heptan akışkanlarının elde edilen net iş değerleri sırasıyla yaklaşık 942.9 kPa ve 1114 kPa basınç değerinden itibaren azalma göstermektedir. Azalma sırasında n-oktan'ın grafiksel eğrisi 1000-1057 kPa ile 1229-1286 kPa basınç aralığında sabit kalmıştır. Benzer şekilde n-heptan'ın net iş değerleri basınçtaki artışa rağmen 1114-1171 kPa ile 1286-1343 kPa basınç aralıklarında değişmemiştir. R718 akışkanının grafiksel eğrisi 885.7 kPa'dan itibaren azalma eğilimindedir. Azalmaya rağmen buharlaştırıcı basıncının bu üç akışkanın net iş değerlerine toplam etkisi artış şeklinde olmuştur. 1400 kPa'lık buharlaştırıcı basıncı için 195.8 kW ile en yüksek net iş çıkışı R141b akışkanı için elde edilmiştir. Metanol'ün grafiksel eğrisi yaklaşık 885.7 kPa'dan itibaren n-oktan'ı geçerek n-heptan'a yaklaşmaktadır. Düşük buharlaştırıcı basınçlarında Izopentan ve n-pentan'ın ekserji verimleri birbirine yakındır. N-pentan'ın ekserji verimi, yüksek basınçlarda Izopentan'ninkinden daha küçüktür.



Şekil 5.29: 1.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.

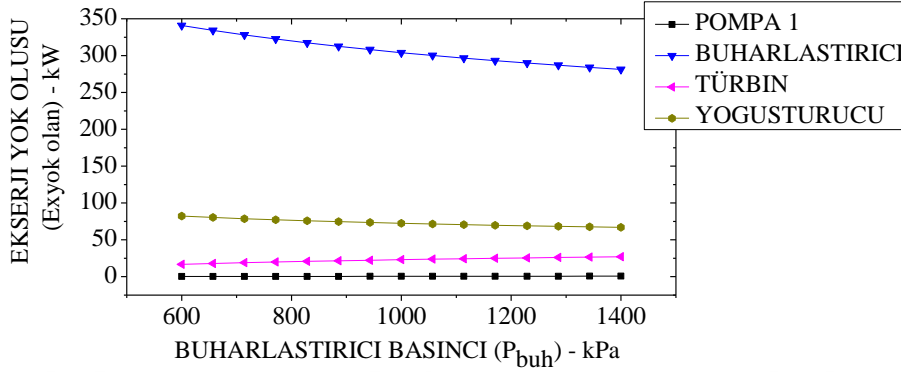


Şekil 5.30: 1.durumda farklı organik çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı.

Şekil 5.2, 1. durumda buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak çevrimde meydana gelen toplam ekserji yok oluşu göstermektedir. R123 ve R141b'nin ekserji yok oluş grafikleri 1400 kPa'dan sonra da azalmaya devam eden bir eğilim gösterirken diğer akışkanların ekserji yok oluş grafikleri basınç artışı ile 900-1100 kPa aralığında basınç çizgisine paralel bir görünüm almaya başlamaktadır. Buharlaştırıcı basıncındaki artış n-pentan, n-oktan, n-heptan ve R718 dışındaki akışkanlarda belirlenen basınç aralığı için toplam ekserji yok oluş oranında sürekli azalmaya neden olmaktadır. N-pentan'ın grafiksel eğrisi yaklaşık 1343 kPa'lık buharlaştırıcı basıncına kadar azalırken 1343-1400 kPa aralığında basınçtaki artışa rağmen sabit kalmaktadır. R718 ve n-oktan akışkanlarının kullanılmasıyla sistemde meydana gelen toplam ekserji yok oluşu sırasıyla yaklaşık 885.7 kPa ve 942.9 kPa basınç değerinden itibaren artma göstermektedir. Artma sırasında n-oktan ve R718 akışkanlarının grafiksel eğrileri 1000-1057 kPa ile 1229-1286 kPa basınç aralığında basınçtaki artışa rağmen sabit kalmıştır. Benzer şekilde n-heptan için basınç artışıyla ters orantılı şekilde azalan toplam ekserji yok oluş değerleri 1114 kPa'dan itibaren artma eğilimindedir. Bu artma ve azalma sırasında n-heptan'ın grafiksel eğrisi 1000-1057 kPa, 1114-1171 kPa ve 1286-1343 kPa basınç aralıklarında sabit kalmıştır. Artışa rağmen buharlaştırıcı basıncının n-heptan, n-oktan ve R718 akışkanlarının toplam ekserji yok oluş oranlarına etkisi başlangıç değerlerinin altına düştükleri için azalma şeklinde olmuştur.

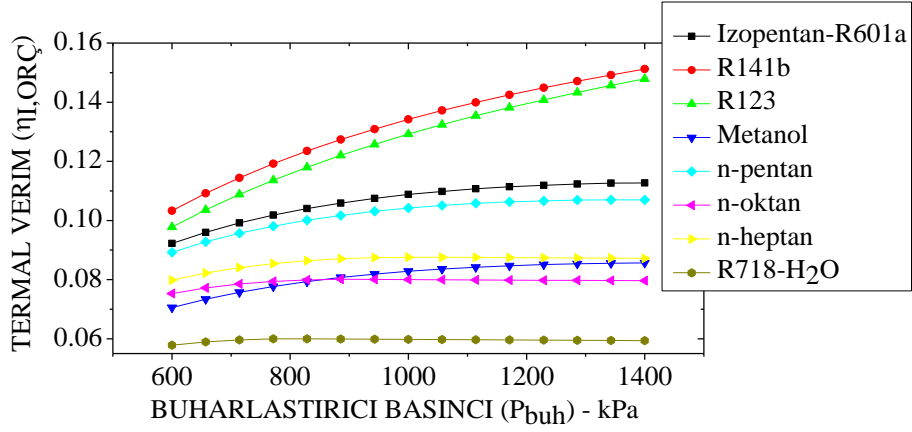
Grafiksel eğrileri birbirine paralel şekilde devam eden n-pentan ile Izopentan ve R123 ile R141b akışkanlarının ekserji yok oluş oranları arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artmaktadır. N-oktanın grafiksel eğrisinin sabitleşmeye başladığı noktada Metanol'ün

grafiksel eğrisinin azalmaya devam etmesine bağlı olarak Metanol'ün ekserji yok oluş değerleri yaklaşık 885.7 kPa'dan itibaren n-oktan'ın altına düşmektedir. Bununla birlikte Matanol'ün grafiksel eğrisi n-heptan'a yaklaşmaktadır.



Şekil 5.31: 1.durumda R123 için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı.

Net iş çıktısı ve toplam ekserji tahribatının değerlendirilmesinin bir sonucu olarak, R123 tercih edilebilir bir performans gösterdi. Buna bağlı olarak ORÇ/CHP sistemindeki her bir bileşenin ekserji yok etme oranını değerlendirmek için R123 dikkate alınmıştır (Şekil 5.3). 1.durumda R123 için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı Şekil 5.3'te gösterilmektedir. 1.durumun en büyük farkı buharlaştırıcı, türbin, yoğusturucu ve pompa 1 dışındaki diğer sistem bileşenlerinde ekserji yok oluşu meydana gelmemesidir. Buharlaştırıcıdaki organik akışkan ile ısı transfer akışkanı arasındaki ortalama sıcaklık farkı buharlaştırıcı basıncının artmasıyla azalır. Bu, buharlaştırıcı ve yoğusturucu ekserji yıkım oranının azalmasına neden olur. Öte yandan, pompa 1 ve türbinde ekserji yok etme oranı artar. Buharlaştırıcı basıncındaki artış ile bileşenlerde meydana gelen en yüksek ekserji yok etme oranı grafiksel eğrideki azalmaya rağmen buharlaştırıcıda görülmektedir. Buharlaştırıcı basıncındaki artışın türbini daha fazla etkilemesi nedeniyle türbin ve pompa 1'in ekserji yok oluş grafikleri arasındaki fark artmaktadır. Bu fark 1400 kPa'da maksimum değeri almaktadır. Buharlaştırıcı ve yoğusturucu bileşenlerinin ekserji yok oluş oranları arasındaki fark, basınç değişiminin buharlaştırıcı ekserji yok oluşunda oranında neden olduğu daha fazla azalmaya bağlı olarak azalmaktadır. Yoğusturucudaki ekserji yok oluşun azalırken türbindeki ekserji yok oluşun basınç artışıyla artması grafiksel eğrileri arasındaki farkı azaltmaktadır.



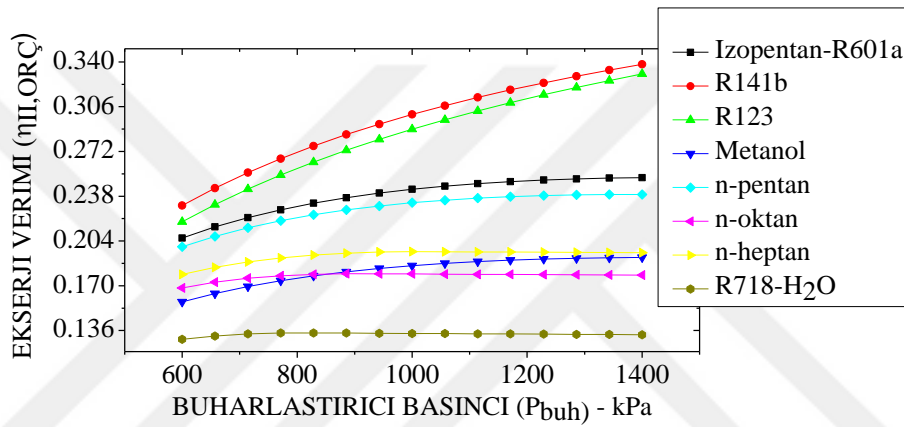
Şekil 5.32: 1.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP sisteminin termal verimliliği.

Şekil 5.4'te, 1.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ termal verimi gösterilmektedir. 1.durumda sistem basit ORÇ gibi çalıştığı için sadece elektrik üretimi ile elde edilen ORÇ termal verim değişimleri incelenmiştir. Buharlaştırıcı basıncındaki artış n-pentan, n-oktan, n-heptan ve R718 dışındaki akışkanlarda belirlenen basınç aralığı için ORÇ termal verimde sürekli artma sağlamaktadır. N-pentan'ın grafiksel eğrisi yaklaşık 1343 kPa'lık buharlaştırıcı basıncına kadar artarken 1343-1400 kPa aralığında basınçtaki artışa rağmen sabit kalmaktadır. N-oktan ve n-heptan akışkanlarının ORÇ termal verim değerleri buharlaştırıcı basıncıyla birlikte artarken sırasıyla yaklaşık 942.9 kPa ve 1057 kPa basınç değerinden itibaren pompada harcanan işteki artışın türbinde üretilen işteki artıştan daha yüksek olması ve bu iki değer birbirine yaklaşması nedeniyle azalma göstermektedir. R718 akışkanının grafiksel eğrisi bu nedenle benzer şekilde yaklaşık 885.7 kPa'dan itibaren azalma eğilimindedir. Azalmaya rağmen 600-1400 kPa basınç aralığında n-oktan, n-heptan ve R718 akışkanlarının ORÇ termal verim grafikleri başlangıç değerinin altına düşmediği için buharlaştırıcı basıncının toplam etkisi artış şeklinde olmuştur.

R141b ve R123 akışkanlarının ORÇ termal verim değerleri arasındaki fark yaklaşık 657.1 kPa'kadar basınç artışıyla birlikte artarken 657.1-771.4 kPa aralığında sabit kaldıktan sonra azalmış ve 1400 kPa'da minimum değeri almıştır. Birbirlerine paralel şekilde devam eden Izopentan ve n-pentan akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte belirlenen basınç aralığında sürekli artmaktadır. N-heptan ile n-oktan akışkanlarının ORÇ termal verimleri arasındaki fark ise buharlaştırıcı basıncının aldığı değere göre azalmakta artmakta ya da sabit kalmaktadır. Diğer akışkanların grafiksel



eğrileri belli bir basınç değerinden itibaren giderek basınç çizgisine paralel bir görünüm alırken R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri farklı olarak 1400 kPa'dan sonrada devam eden bir eğilim göstermektedir. Fakat soğutucu akışkanlar kritik basınç değerlerinin üstündeki basınçlarda beklenen performansı sağlayamadıklarından dolayı bu akışkanlar için optimum çalışma aralığı seçilen maksimum basınç değeri olan 1400 kPa ile kritik basınç değerleri arasındadır. N-oktan ve n-heptan akışkanlarının grafiksel eğrilerinin paralel bir görünüm almaya başladığı basınç değerinde Metanol'un ORÇ termal verimdeki artışın devam etmesine bağlı olarak Metanol'un grafiksel eğrisi yaklaşık 885.7 kPa'dan itibaren n-oktan'ı geçerek n-heptan'a yaklaşmaktadır.



Şekil 5.33: 1.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP sisteminin ekserji verimliliği.

1.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ ekserji verimi Şekil 5.5'te verilmektedir. Ekserji veriminin yükselme eğilimi termal verimi ile aynıdır. R141b en yüksek termal ve ekserji verimliliklerine sahipken, R718 en düşük performansı gösterir. R141b'nin termal verimi %10.33'ten %15.12'ye, ekserji verimi ise 800 kPa'lık bir basınç artışıyla %23.1'den %33.82'ye artar. R718'in termal ve ekserji verimleri, aynı basınç artışı için sırasıyla %5.784'ten %5.939'a ve %12.94'ten %13.28'e yükselir. N-pentan'ın grafiksel eğrisi yaklaşık 1343 kPa'lık buharlaştırıcı basıncına kadar artarken 1343-1400 kPa aralığında basınçtaki artışa rağmen sabit kalmaktadır. N-oktan ve n-heptan akışkanlarının ORÇ ekserji verim değerleri buharlaştırıcı basıncıyla birlikte artarken sırasıyla yaklaşık 942.9 kPa ve 1057 kPa basınç değerinden itibaren azalma göstermektedir. R718 akışkanının grafiksel eğrisi benzer şekilde yaklaşık 885.7 kPa'dan itibaren azalma eğilimindedir. Azalmaya rağmen 600-1400 kPa basınç aralığında n-oktan, n-heptan ve R718 akışkanlarının ORÇ ekserji verim grafikleri başlangıç değerinin altına düşmediği için

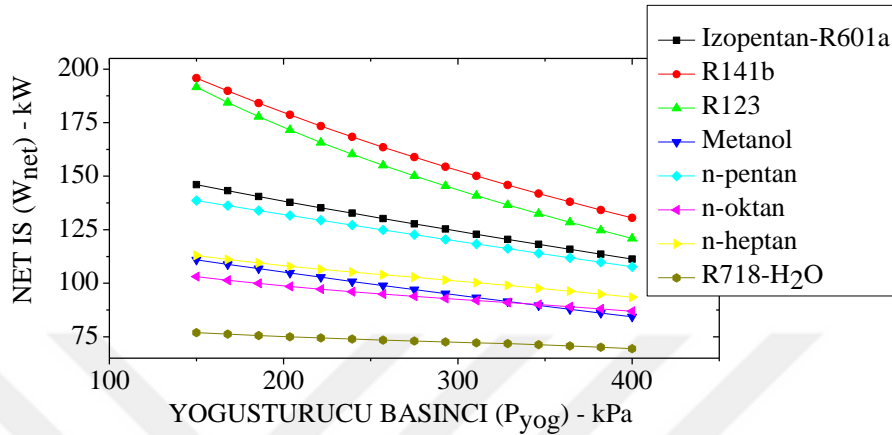
buharlaştırıcı basıncının toplam etkisi artış şeklinde olmuştur.

R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri 1400 kPa'dan sonrada devam eden bir eğilim göstermektedir. N-oktan ve n-heptan akışkanlarının grafiksel eğrilerinin paralel bir görünüm almaya başladığı basınç değerinde Metanol'ün ORÇ ekserji verimindeki artışın devam etmesine bağlı olarak Metanol'ün grafiksel eğrisi yaklaşık 885.7 kPa'dan itibaren n-oktan'ı geçerek n-heptan'a yaklaşmaktadır. Düşük buharlaştırıcı basınçlarında Izopentan ve ve n-pentan'ın ekserji verimleri birbirine yakındır. N-pentan'ın ekserji verimi, yüksek basınçlarda Izopentan'ninkinden daha küçüktür.

### 5.1.2 Yoğuşturucu Basınç Değişiminin Etkisi

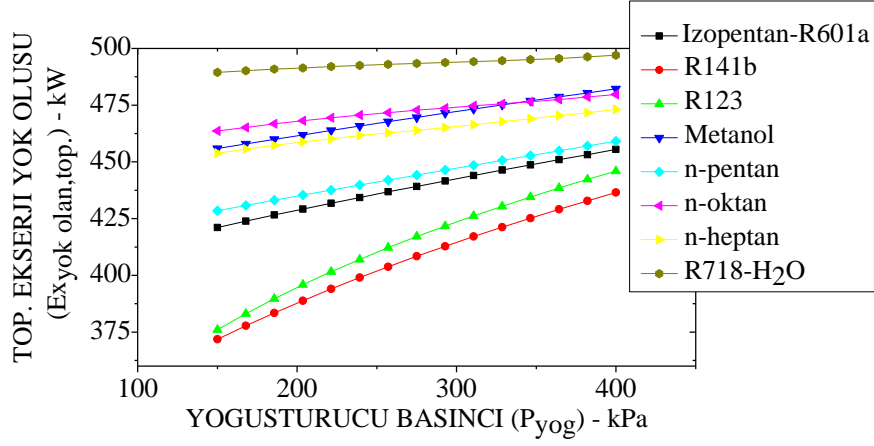
Yoğuşturucu basıncının sistem üzerindeki etkisinin incelendiği analizlerde, buharlaştırıcı basıncının 1400 kPa ve ara basıncın 500 kPa olduğu varsayılırken, yoğuşturucu bir hesaplama parametresi olarak kabul edilir. Yoğuşturucu basıncı 150 ile 400 kPa arasında değiştirilmiştir. Şekil 5.6, 1.durum için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP sisteminden elde edilen net iş çıktısını göstermektedir. Temelde yoğuşturucu basıncı düştüğünde net iş çıktısı artmalıdır. Yoğuşturucu basıncı düşürmedeki amaç, çalışma akışkanının sıcaklığını ve buna bağlı olarak çevrimden ısının atıldığı ortalama sıcaklığın düşürülmesidir. Bu sayede sistemin Carnot verimi artarken performansı da artar. Bu durumda çevrim için gerekli ısı girdisi artar. Ancak bu artışın çok küçük olması yoğuşturucu basıncını düşürmenin toplam etkisinin, ısıl veriminde artış şeklinde görülmesini sağlamaktadır. Şekilde görüldüğü gibi, yoğuşturucu basıncı arttığında net iş çıktısı tüm akışkanlar için azalmaktadır. Buharlı güç santrallerinde yoğuşturucular atmosfer basıncından çok daha düşük basınçta çalıştırılır. Fakat bu basıncın bir alt sınırı vardır ve soğutma suyunun sıcaklığına karşılık gelen doyma basıncından daha düşük olmamalıdır. En yüksek çıktı R141b akışkanı için hesaplanırken en düşük çıktı R718 için elde edilir. Bununla birlikte, R123 için net iş çıktısındaki azalma, diğer akışkanlara kıyasla daha fazladır. Net iş çıktısı, R141b için 250 kPa'lık basınç artışı için yaklaşık 65.3 kW azalır. Aynı basınç farkı için R718'de, basınç değiştiğinde net iş çıkışı yaklaşık 7.53 kW azalır. R141b ve R123 akışkanlarının net iş çıktıları arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artmakta ve bu iki akışkanın grafiksel eğrileri azalmanın daha fazla belirgin olmasına bağlı olarak Izopentan'a yaklaşmaktadır. R123 ve R141b akışkanlarının arasındaki fark artarken Izopentan ve n-pentan akışkanlarının net iş çıktıları grafikleri arasındaki fark basınç

artışıyla ters orantılı şekilde azalmaktadır.150 kPa’da grafiksel eğrileri birbirine yakın olan n-heptan ve Metanol akışkanlarının net iş çıktıları arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artmakta ve Metanol’ün grafiksel eğrisi n-oktan’a yaklaşarak yaklaşık 346.4 kPa’dan itibaren n-oktan akışkanının altına düşmektedir.

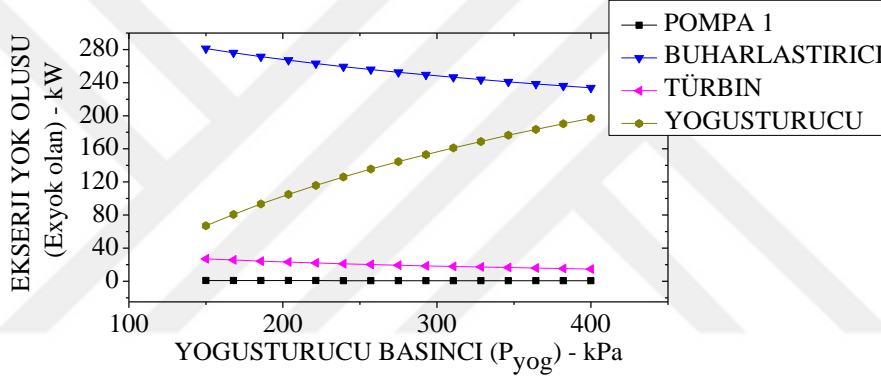


Şekil 5.34: 1.durum için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.

Şekil 5.7, 1. durumda yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak çevrimde meydana gelen toplam ekserji yok oluşu göstermektedir. 150 kPa’da ekserji yok oluş oranları birbirine yakın olan n-heptan ile Metanol akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artarak 1400 kPa’da maksimum değere ulaşmaktadır. Metanol ile n-heptan arasındaki fark artarken Metanol akışkanının toplam ekserji yok oluş değerleri n-oktan’a yaklaşmakta ve yaklaşık 346.4 kPa’dan itibaren n-oktan’ın üstüne çıkmaktadır. Grafiksel eğrileri birbirine yakın olan n-pentan ile İzopentan akışkanlarının ekserji yok oluş oranları arasındaki fark azalırken, R123 ile R141b akışkanlarının ekserji yok oluş oranları arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artmaktadır. Bu artma ve azalma sonucunda R123 ile İzopentan akışkanlarının grafiksel eğrileri birbirine yaklaşmaktadır.150-400 kPa basınç aralığında en yüksek ekserji yok oluş değerleri R718 akışkanından elde edilmekte olup 1.durum için toplam ekserji yok oluşu 1400 kPa’da 497 kW olan maksimum değere ulaşmaktadır. Öte yandan, en düşük ekserji yok etme oranı R141b için meydana gelir ve yok etme oranı, 250 kPa’lık basınç artışı için yaklaşık 371.8 kW’tan 436.5 kW’a çıkar. Basınç artışı ile ekserji yok etme oranındaki en büyük artma, çalışma akışkanı R123 için meydana geldiği görülebilmektedir.



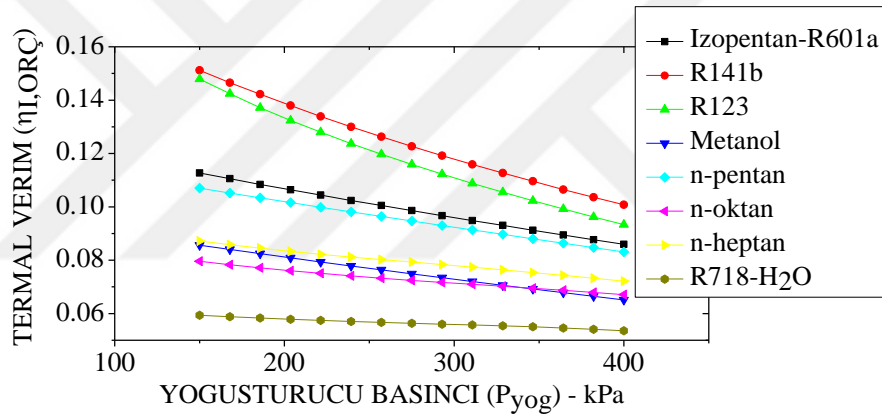
Şekil 5.35: 1.durumda farklı organik çalışma akışkanları için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı.



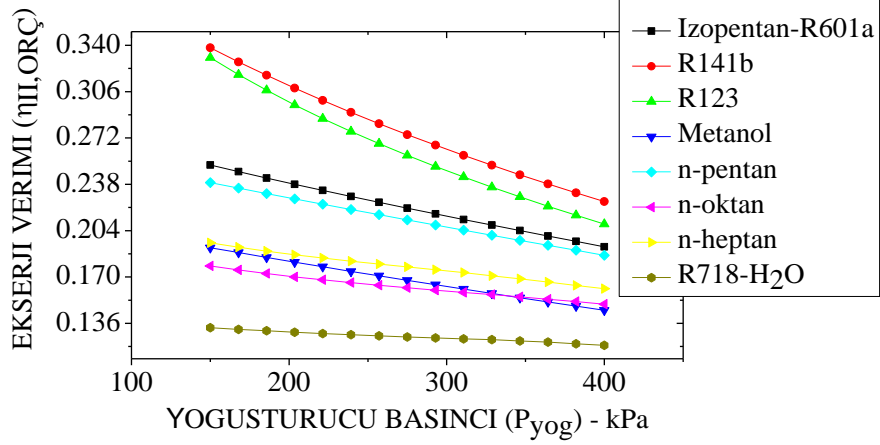
Şekil 5.36: 1.durumda R123 için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı.

1.durumda R123 için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı Şekil 5.8'de verilmiştir. Yoğuşturucu basıncının 150 kPa'dan 400 kPa'a çıkarılması türbinin, pompa 1'in ve buharlaştırıcının ekserji yok etme oranını azaltırken, yoğuşturucunun ekserji yok etme oranını artırmaktadır. Yoğuşturucu basıncındaki değişime bağlı olarak buharlaştırıcı ile yoğuşturucu ve türbin ile pompa 1 bileşenlerinin grafiksel eğrileri arasındaki fark belirlenen basınç aralığında azalarak minimum değere ulaşırken yoğuşturucu ve türbin bileşenlerinin ekserji yok oluş oranları arasındaki fark maksimum değerini almaktadır. Yoğuşturucu basıncının 1.durumda ORC/CHP sisteminin termal ve ekserji verimlilikleri üzerindeki etkisi, Şekil 5.9 ve 5.10'da farklı çalışma akışkanları için gösterilmiştir. Tüm çalışma akışkanları için yoğuşturucu basıncı arttıkça termal ve ekserji verimleri azalır. R141b en yüksek termal ve ekserji verimliliklerine sahipken, R718 en düşük performansı gösterir. R141b'nin termal verimi

%15.2'den %10.08'e, ekserji verimi ise 250 kPa'lık bir basınç artışıyla %33.82'den %22.54'e azalır. R718'in termal ve ekserji verimleri, aynı basınç artışı için sırasıyla %5.939'dan %5.357'ye ve %13.28'den %11.98'e düşer. R141b ve R123 akışkanlarının ORÇ termal verim değerleri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artmakta ve bu iki akışkanın grafiksel eğrileri, azalmanın diğer akışkanlara kıyasla daha fazla belirgin olmasına bağlı olarak İzopentan'a yaklaşmaktadır. R123 ve R141b akışkanlarının arasındaki fark artarken İzopentan ve n-pentan akışkanlarının ORÇ termal verim grafikleri arasındaki fark basınç artışıyla ters orantılı şekilde azalmaktadır Düşük yoğunlaştırıcı basınçlarında n-heptan ve Metanol 'ün termal verimleri birbirine yakındır. Metanol'ün termal verimi, yüksek basınçlarda n-heptan'inkinden daha küçüktür. Metanol'ün grafiksel eğrisi basınç artışıyla birlikte n-oktan'a yaklaşarak yaklaşık 346.4 kPa'dan itibaren n-oktan akışkanının altına düşmektedir



Şekil 5.37: 1.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP sisteminin termal verimliliği.



Şekil 5.38: 1.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP sisteminin ekserji verimliliği.

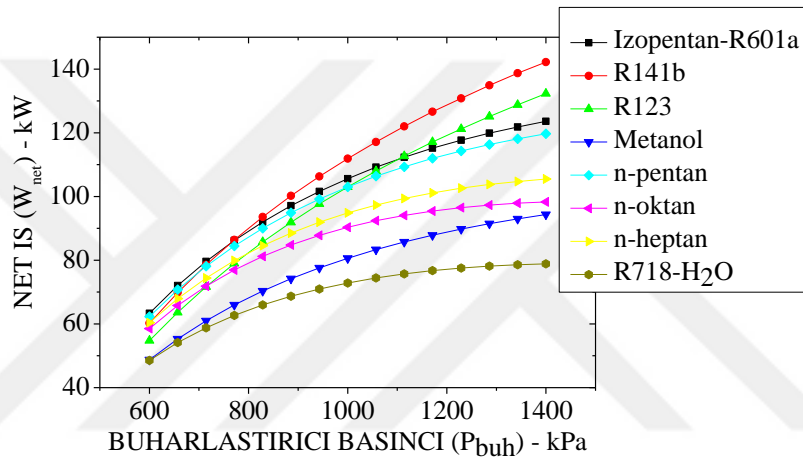
Izopentan, R123 ve R141b akışkanları arasında R123 ile R141b'nin ekserji verimlerinin grafiksel eğrileri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artarak 1400 kPa'da maksimum değere ulaşmaktadır. R123 ile R141b arasındaki fark artarken R123 akışkanının ORÇ ekserji verim değerleri Izopentan'a yaklaşmaktadır. 250 kPa'lık basınç artışı için Izopentan ile n-pentan akışkanlarının ORÇ ekserji verim grafikleri arasındaki fark minimum değeri almaktadır. Düşük yoğuşturucu basınçlarında n-heptan ve Metanol 'ün termal verimleri birbirine yakındır. Metanol'ün termal verimi, yüksek basınçlarda n-heptan'inkinden daha küçüktür. Metanol'ün grafiksel eğrisi basınç artışıyla birlikte n-oktan'a yaklaşarak yaklaşık 346.4 kPa'dan itibaren n-oktan akışkanının altına düşmektedir. Yoğuşturucu basıncındaki artışla akışkanların ORÇ ekserji verimlerinde meydana gelen azalma en düşük değer %9.8 ile en yüksek değer %36.9 arasında değişmektedir.

## 5.2.2.Durum Enerji ve Ekserji Analizleri

### 5.2.1 Buharlaştırıcı Basınç Değişiminin Etkisi

2.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak sistemden elde edilen net iş çıktısı Şekil 5.11' de gösterilmektedir. 1400 kPa'da tüm akışkanlar için sistemden maksimum net iş sağlanmaktadır. Net işteki artış R718, n-heptan ve n-oktan akışkanları için yaklaşık 1100 kPa'lık buharlaştırıcı basıncına kadar, Metanol, Izopentan ve n-pentan akışkanları için ise yaklaşık 1300 kPa'a kadar önemli hale gelir ve bu basınç değerlerinden itibaren akışkanların net iş çıktılarındaki değişim azalarak grafiksel eğriler sabitleşmeye

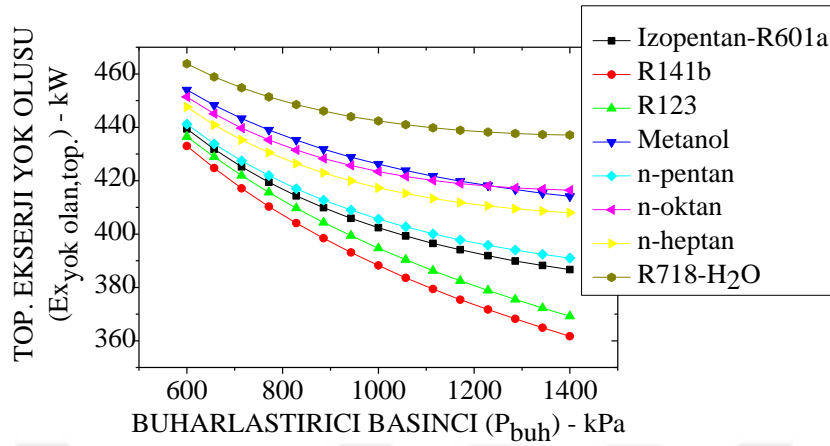
başlamaktadır. R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri farklı olarak 1400 kPa'dan sonrada artmaya devam eden bir eğilim göstermektedir. Net iş, R718 akışkanı için 800 kPa'lık basınç artışında 78.85 kW ile minimum değerde kalırken basınç artışıyla 1400 kPa'da R141b akışkanı için 142.2 kW olarak maksimum değere ulaşmaktadır. 600 ile 1400 kPa basınç değerleri arasında net işteki en büyük artış, 60.22 kW'tan 142.2 kW'a çıkan R141b akışkanının kullanılmasıyla elde edilmektedir. R718 akışkanı haricinde 1.durumda buharlaştırıcı basıncı değişimiyle elde edilen net iş çıktıları 2. durumla karşılaştırıldığında daha yüksektir. 1.durum için R718'in net iş değerleri yaklaşık 1229 kPa'dan itibaren 2.durumda elde edilen değerlerin altına düşmektedir.



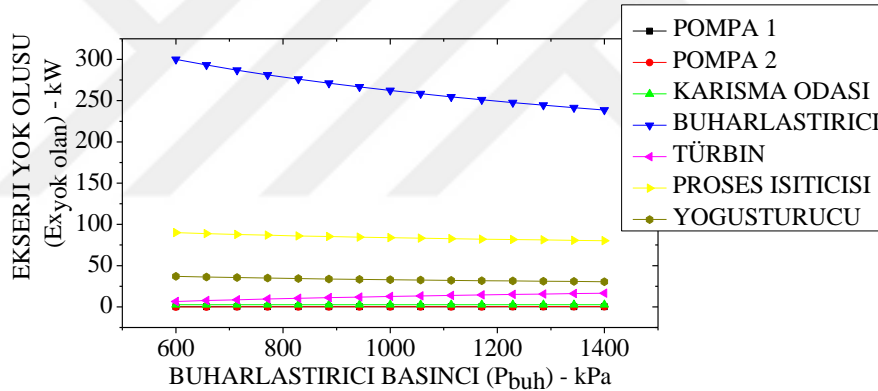
Şekil 5.39: 2.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.

2.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı Şekil 5.12'de verilmektedir. 2.durumda buharlaştırıcı basıncı değişimiyle elde edilen toplam ekserji yok oluş değerleri tüm akışkanlar için 1. durumla karşılaştırıldığında daha düşüktür. Ekserji yok etme oranının, R718 için buharlaştırıcı basıncı arttığında 463.8 kW'tan 437.1 kW'a düştüğü görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek yıkım oranını göstermektedir. Diğer taraftan, en düşük ekserji yok etme oranı R141b için meydana gelir ve yok etme oranı, 800 kPa'lık basınç artışı için 433 kW'tan 361.7 kW'a düşer. Basınç artışı ile ekserji yok etme oranındaki en büyük azalma, çalışma akışkanı R141b'de görülmektedir. R123 ve R141b'nin grafiksel eğrileri 1400 kPa'dan sonra da azalmaya devam eden bir eğilim gösterirken diğer akışkanların ekserji yok oluş grafikleri basınç artışı ile yaklaşık 1100 kPa'dan itibaren sabitleşmeye başlamaktadır. Metanol ve n-oktan akışkanlarının ekserji yok etme oranları arasındaki ilişki 1286 kPa'dan itibaren Metanol'ün grafiksel eğrisinin n-oktan altına düşmesiyle değişmektedir. Grafiksel eğrileri birbirlerine

paralel olarak devam eden R141b ile R123 ve İzopentan ile n-pentan akışkanlarının ekserji yok oluş oranları arasındaki fark basınç artışıyla birlikte belirginleşmektedir.



Şekil 5.40: 2.durumda farklı organik çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı.

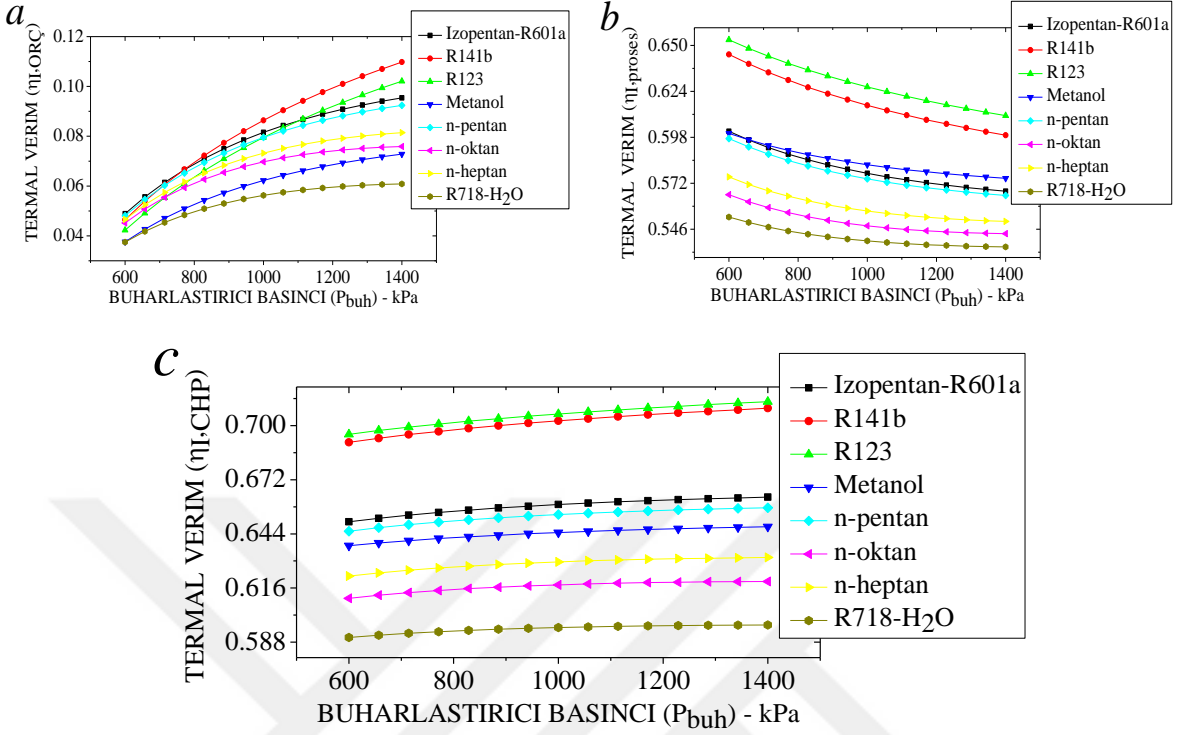


Şekil 5.41: 2.durumda R123 için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı.

Şekil 5.13'te, 2.durumda R123 için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak çevrimdeki her bileşenin ekserji yok etme oranı verilmektedir. 2.durum için bileşenlerdeki ekserji yok oluş oranları 1.duruma göre daha düşüktür. Diğer sistem bileşenleri ile kıyaslandığında pompaların ve karışım odasının ekserji yok etme oranı oldukça düşüktür. Buharlaştırıcı basıncındaki değişim ile bileşenlerde meydana gelen en yüksek ekserji yok etme oranı buharlaştırıcıda görülmektedir. Buharlaştırıcının, yoğusturucunun ve proses ısıtıcısının ekserji yok etme hızı, artan buharlaştırıcı basıncıyla birlikte azalırken, çevrimde bulunan diğer bileşenlerin ekserji yok etme hızı artmaktadır. Pompa 2'de basınç değişimiyle meydana gelen hızlı artışın etkisiyle yaklaşık 771.4 kPa'dan itibaren pompa



1'in grafiksel eğrisi pompa 2'nin altına düşmektedir.



Şekil 5.42: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.

2.çalışma durumu için buharlaştırıcı basıncına bağlı olarak kojeneratif ORÇ sisteminin termal verim değişimleri Şekil 5.14'te gösterilmektedir. Buharlaştırıcı basıncındaki artış, tüm akışkanlar için buharlaşmanın gerçekleşeceği sıcaklık olan doyma sıcaklığının yükselmesini sağlayarak buhara ısı aktarımının yapıldığı ortalama sıcaklığı ve bu sayede kojenerasyon sisteminin ORÇ termal verimini arttırmaktadır. ORÇ termal verimi, R718 için 800 kPa'lık basınç artışında %6.087 ile minimum değerde kalırken, 1400 kPa'da R141b akışkanı için %10.98 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. 600 ile 1400 kPa basınç değerleri arasında ORÇ termal verimdeki en büyük artış, %4.649'dan %10.98'e çıkan R141b akışkanının kullanılmasıyla elde edilmektedir. ORÇ termal verimlerdeki değişimin azalmasına bağlı olarak diğer çalışma akışkanlarının grafiksel eğrileri basınç artışıyla birlikte azalarak artan eğim gösterir fakat diğer akışkanların grafiksel eğrileri giderek basınç çizgisine paralel bir görünüm alırken R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri farklı olarak belirlenen basınç aralığı dışında da artmaya devam etmektedir. Seçilen akışkanlar arasında n-oktan, n-heptan ve R718 akışkanlarının ORÇ termal verimin buharlaştırıcı basıncına göre değişim eğrileri azalarak artan bir eğilim

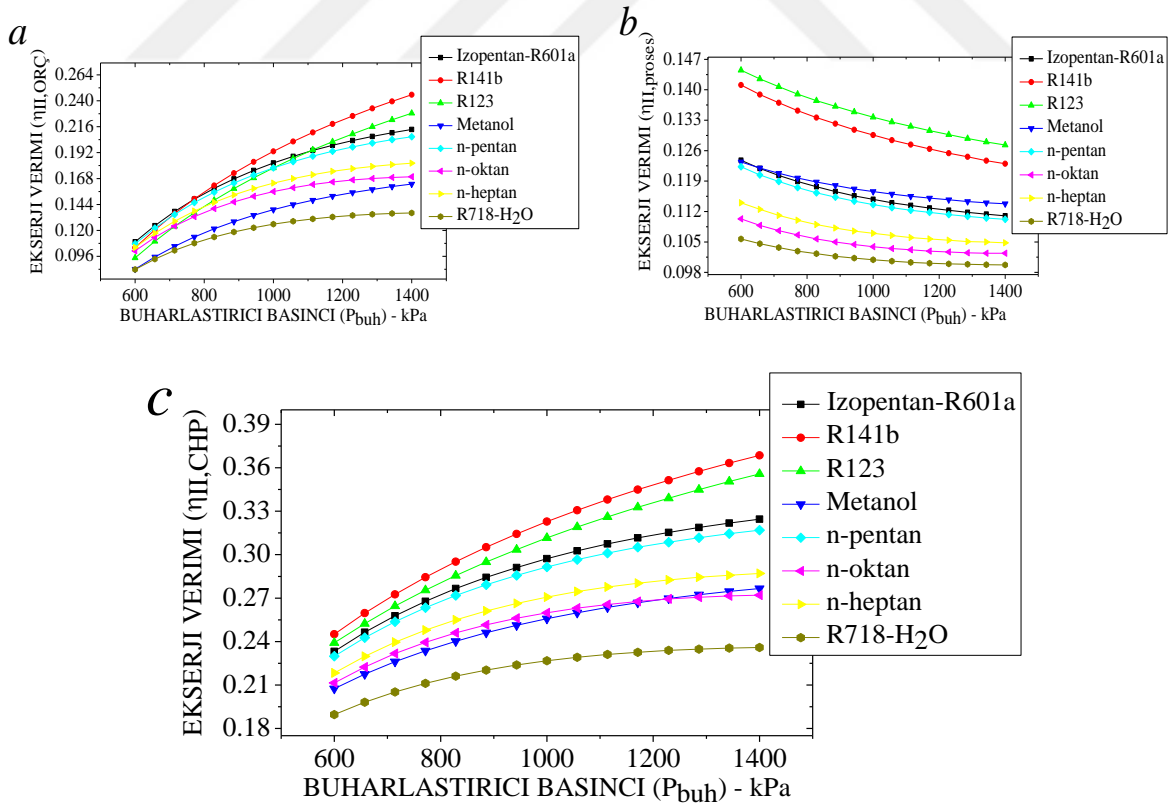
gösterdikten sonra yaklaşık 1100 kPa'dan itibaren basınçtaki artışa rağmen çok az değişerek basınç çizgisine paralel bir doğrultuda ilerlemeye başlamaktadır. Izopentan, n-pentan ve Metanol akışkanlarında ise bu durum yaklaşık 1300 kPa'dan itibaren gerçekleşmektedir. 600 kPa'da ORÇ termal verimleri çok yakın olan Metanol ve R718 arasındaki fark basınçtaki artışla birlikte daha belirgin hale gelerek Metanol'ün grafiksel eğrisi n-oktan'a yaklaşmaktadır. R141b'nin grafiksel eğrisi hızlı bir şekilde artarak 714.3 kPa'dan itibaren n-pentan'ı ve 771.4 kPa'dan itibaren Izopentan'ı geçerek maksimum değerler sağlamaktadır. Belirlenen basınç aralığında Izopentan'ının ORÇ termal verim değerleri n-pentan'a göre daha yüksektir ve bu iki akışkan arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artmaktadır. R123 ve n-oktan akışkanlarının ORÇ termal verim değerleri arasındaki ilişki R123'ün grafiksel eğrisinin hızlı bir şekilde artarak yaklaşık 771.4 kPa'dan itibaren n-oktan'ı geçmesiyle değişmektedir.

800-1000 kPa basınç aralığında grafiksel eğrisi azalarak artan bir eğim göstermeye başlayan n-heptan'ın verim değerleri yaklaşık 828.6 kPa'dan itibaren R123 akışkanının verim değerlerinin altına düşmektedir. Aralarındaki fark buharlaştırıcı basıncındaki artış ile birlikte giderek artarak 1400 kPa'da maksimum değeri almaktadır. 1000 kPa ile 1200 kPa basınç aralığına kadar n-pentan ile R123 akışkanlarından elde edilen ORÇ termal verim değerleri birbirine yaklaşırken, grafiksel eğrileri arasındaki fark 1114 kPa'dan itibaren çalışma akışkanı olarak R123'ü kullanıldığı sistemin ORÇ termal verim değerleri n-pentan'a kıyasla daha yüksek olmasına bağlı olarak artmaktadır. 1114 kPa'lık buharlaştırıcı basıncından itibaren R123 akışkanından elde edilen ORÇ termal verim değerleri Izopentan ile karşılaştırıldığında daha yüksektir.

Tüm akışkanların proses termal verimlerinin grafiksel eğrileri negatif azalan eğime sahiptir. Buharlaştırıcı basıncının artmasıyla akışkanların proses termal verimindeki değişim azalarak sabit bir değere doğru yaklaşmaktadır. Diğer akışkanların grafiksel eğrileri basınç artışıyla birlikte belli bir noktadan itibaren sabitleşmeye başlarken R123 ve R141b'nin verim değerleri 1400 kPa'dan itibaren de azalmaya devam etmektedir. Izopentan ile Metanol'ün 600 kPa'da birbirine yakın olan proses termal verimleri arasındaki ilişki basınç artışının Izopentan'da neden olduğu azalmanın daha yüksek olmasına bağlı olarak yaklaşık 657.1 kPa'dan itibaren değişerek Izopentan'ın grafiksel eğrisi Metanol'ün altına düşmektedir. Izopentan ile Metanol akışkanlarının verimleri arasındaki fark artarken, n-pentan ve Izopentan akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki

fark basınç artışıyla ters orantılı şekilde azalarak 1400 kPa'da minimum değeri almaktadır. Benzer şekilde buharlaştırıcı basıncındaki artış, R141b ve R123 arasındaki farkı artırmaktayken, R141b ile Metanol arasındaki farkı azaltmaktadır. Proses termal veriminin, R123 için buharlaştırıcı basıncı arttığında %65.32'den %61.03'e düştüğü görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek proses termal verimini göstermektedir. Diğer taraftan, en düşük proses termal verimi R718 için meydana gelir ve 800 kPa'lık basınç artışı için %55.29'dan %53.6'ya düşer. Basınç artışı ile proses termal verimdeki en büyük azalma, çalışma akışkanını R141b'de görülmektedir.

Akışkanların CHP termal verim değerlerindeki değişim basınç artışıyla ters orantılı şekilde azalarak sabit bir değere doğru yaklaşmaktadır. Basınç artışının, CHP termal verim üzerindeki etkisi en az R718'de görülmektedir. CHP termal verimi, 800 kPa'lık basınç artışında R718 için %59.69 ile minimum değerde kalırken, 1400 kPa'da R123 akışkanını için %71.24 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. 600 ile 1400 kPa basınç değerleri arasında CHP termal verimdeki en büyük artış, %69.14'ten %70.09'a çıkan R141b akışkanının kullanılmasıyla elde edilmektedir.



Şekil 5.43: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri.

Şekil 5.15, 2.durum için buharlaştırıcı basıncı değişiminin ekserji verimlerine etkisini göstermektedir. 2.durumda buharlaştırıcı basıncındaki artış akışkanların ORÇ ekserji verimleri ile CHP ekserji verimlerini artırırken proses ekserji verimlerini azaltır. Ekserji verimliliğinde sağlanan artış, toplam ekserji yok etme oranındaki azalmadan kaynaklanmaktadır. Seçilen çalışma akışkanlarının ORÇ ekserji verimlerindeki değişim basınç artışıyla birlikte azalmaktadır. R718 akışkanı haricinde 1.durumda buharlaştırıcı basıncı değişimiyle elde edilen ORÇ termal ve ekserji verim değerleri 2. durumla karşılaştırıldığında sistemden edilen tüm buharın türbine gönderilmesine bağlı olarak daha yüksektir. 1.durum için R718 akışkanının ORÇ termal ve ekserji verim değerleri yaklaşık 1229 kPa'dan itibaren 2.durumda elde edilen değerlerin altına düşmektedir. Diğer akışkanların grafiksel eğrileri giderek basınç çizgisine paralel bir görünüm alırken R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri farklı olarak belirlenen basınç aralığı dışında da artmaya devam eden bir eğilim göstermektedir. Düşük buharlaştırıcı basınçlarında Metanol ve R718'in ORÇ ekserji verimleri hemen hemen aynıdır. R718'in ORÇ ekserji verimi, yüksek basınçlarda Metanol'inkinden daha küçüktür. Metanol, yüksek buharlaştırıcı basınçlarında n-oktan'a alternatif olabilir. Izopentan akışkanından yaklaşık 771.4 kPa buharlaştırıcı basıncına kadar en yüksek ORÇ ekserji verim değerleri elde edilmektedir. R141b'nin grafiksel eğrisi hızlı bir şekilde artarak 714.3 kPa'dan itibaren n-pentan'ı ve 771.4 kPa'dan itibaren Izopentan'ı geçerek maksimum değerler sağlamaktadır.

Grafiksel eğrileri birbirine paralel şekilde devam eden Izopentan ile n-pentan'ın ORÇ ekserji verim değerleri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artmaktadır. R123'in ORÇ ekserji verim değerleri 771.4 kPa'dan itibaren n-oktan'dan daha yüksektir. Basınç artışı R123 ve n-oktan arasındaki farkı artırmaktayken, R123 ile n-heptan arasındaki farkı azaltmaktadır. R123 ve n-heptan akışkanlarının ORÇ ekserji verim grafikleri arasındaki fark 828.6 kPa'a kadar basınç artışıyla azalmaya devam ederken bu basınç değerinden itibaren sonra R123'ün n-heptan'ı geçmesiyle artmaktadır. N-pentan ile R123 akışkanlarının ORÇ ekserji verim değerleri arasındaki fark 1000 kPa'da bu iki akışkanının verim değerleri aynı değeri aldıktan sonra R123'ü kullanıldığı sistemin ORÇ ekserji verim değerleri n-pentan'a kıyasla daha yüksek olmasına bağlı olarak artmaktadır. 1114 kPa'lık buharlaştırıcı basıncından itibaren R123 akışkanından elde edilen ORÇ ekserji verim değerleri Izopentan ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. R123, yüksek buharlaştırıcı basınçlarında R141b'ye alternatif olabilir. ORÇ ekserji veriminin, R141b için buharlaştırıcı basıncı arttığında %10.4'ten %24.56'ya çıkarak 1400 kPa'da maksimum değere ulaştığı

görülmektedir. Bu basınçta en düşük ORÇ ekserji verimi, R718 için meydana gelir ve 800 kPa'lık basınç artışı için %8.357'den %13.62'ye çıkar. 600-1400 kPa basınç aralığında ORÇ ekserji verimindeki en büyük artış, R141b için elde edilmektedir.

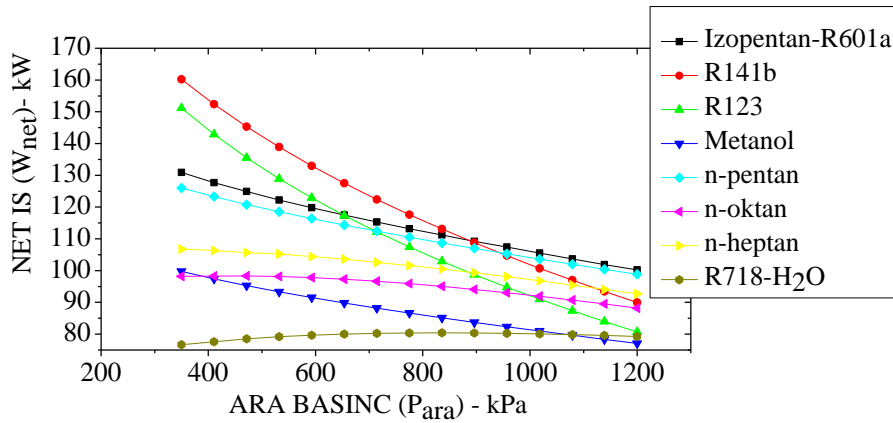
Tüm akışkanların proses ekserji verim grafikleri negatif azalan eğime sahiptir. Diğer akışkanların grafiksel eğrilerinde basınç artışıyla birlikte belli bir noktadan itibaren sabitleşme görülürken R123 ve R141b'nin proses ekserji verim değerleri 1400 kPa'dan itibaren de azalmaya devam etmektedir. Buharlaştırıcı basıncındaki artışla akışkanların proses ekserji verimlerindeki azalma en belirgin şekilde 600 ile 900 kPa basınç aralığında görülmektedir. Proses ekserji veriminin, R123 için buharlaştırıcı basıncı arttığında %14.45'ten %12.73'e düştüğü görülmektedir. R123 en yüksek proses ekserji verim değerlerinin görüldüğü akışkandır. Buna ek olarak, en düşük proses ekserji verimi R718 için meydana gelir ve proses ekserji verimi, 800 kPa'lık basınç artışı için %10.57'den %9.972'ye düşer. Basınç artışı ile proses ekserji verimdeki maksimum azalma, %14.11'den %12.3'e R141b'de görülmektedir. Basınç artışının İzopentan'da neden olduğu azalmanın daha yüksek olmasına bağlı olarak yaklaşık 657.1 kPa'dan itibaren İzopentan'ın grafiksel eğrisi düşük buharlaştırıcı basıncında proses ekserji verimi kendisine yakın olan Metanol'ün altına düşmektedir. N-pentan ve İzopentan akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark basınç artışıyla ters orantılı şekilde azalarak 1400 kPa'da minimum değeri almaktadır. Buharlaştırıcı basıncındaki artışla birlikte, R141b ve R123 akışkanlarının proses ekserji verimleri arasındaki farkı artarken, R141b ile Metanol arasındaki fark ters orantılı şekilde azalmaktadır. N-oktan, n-heptan ve R718 akışkanlarının proses ekserji verimlerindeki değişim yaklaşık 1000 kPa'dan itibaren çok azdır.

Akışkanların CHP ekserji verim değerlerindeki değişim basınç artışıyla ters orantılı şekilde azalarak sabit bir değere doğru yaklaşmaktadır. Basınç artışının, CHP ekserji verim üzerindeki etkisi en az R718'de görülmektedir. CHP termal verimi, buharlaştırıcı basıncındaki 800 kPa'lık artış ile yaklaşık %2.43 yükselerek R123 akışkanı ile maksimum değerine ulaşır. Öte yandan bu basınç artışı sırasında sistemden elde edilen en yüksek CHP ekserji verim değerleri belirlenen basınç aralığı için R141b'de görülmektedir. Buharlaştırıcı basıncının 600 kPa'dan 1400 kPa çıkarılmasıyla R141b akışkanının CHP ekserji verimi % 24.51'den %36.86'ya yükselir. Basınç artışı R123 ile R141b ve İzopentan ile n-pentan akışkanlarının CHP ekserji verimleri arasındaki farkı artırmaktadır. Metanol ile n-oktan akışkanlarının CHP ekserji verim değerleri arasındaki fark Metanol'ün yaklaşık

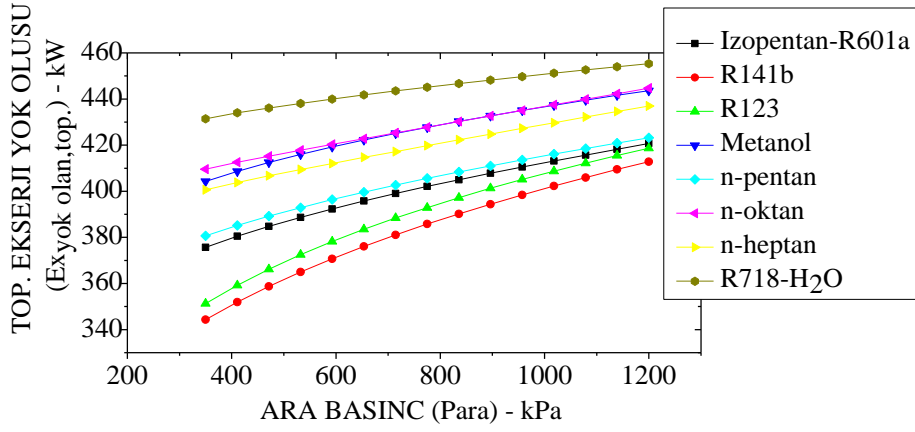
1229 kPa'dan itibaren n-oktan'ı geçmesiyle artmaktadır. Bu artışla birlikte Metanol'ün grafiksel eğrisi n-heptan'a yaklaşmaktadır.

### 5.2.2 Ara Basınç Değişiminin Etkisi

Ara basıncın sistem üzerindeki etkisinin incelendiği analizlerde, buharlaştırıcı basıncının 1400 kPa ve yoğuşurucu basıncının 150 kPa olduğu varsayılırken, ara basınç bir hesaplama parametresi olarak kabul edilir. Ara basınç 350 ile 1200 kPa arasında değiştirilmiştir. 2.durum için ara basıncın bir fonksiyonu olarak sistemden elde edilen net iş çıktısı Şekil 5.16'da gösterilmektedir. R718 ve n-oktan haricindeki diğer akışkanların net iş çıktılarında ara basınçtaki artış, belirlenen basınç aralığında sürekli azalmaya neden olmaktadır. N-oktan'ın net iş grafiksel eğrisi yaklaşık 532.1 kPa'a kadar arttıktan sonra bu basınç değerinden itibaren azalma eğilimindedir. Benzer şekilde ara basıncın R718'de etkisi yaklaşık 896.4 kPa'a kadar artış sağladıktan sonra bu basınçtan itibaren azalma şeklinde olmuştur. Bu azalmaya rağmen R718'in grafiksel eğrisi belirlenen basınç aralığı için başlangıç değerinin altına düşmediği için ara basıncın R718'in net iş değerlerindeki etkisi artma şeklinde olmuştur. N-oktan'dan elde edilen net iş çıktısı ise başlangıç değerinin altına düşerek 1200 kPa'da minimum değerini almaktadır. Net iş çıktısındaki en belirgin değişim 70.5 kW ve 70.23 kW azalma ile sırasıyla R123 ve R141b akışkanlarında görülmektedir. 350 kPa'lık ara basınç için R141b kullanılarak 160.2 kW ile en yüksek net iş çıkışı sağlanmıştır.

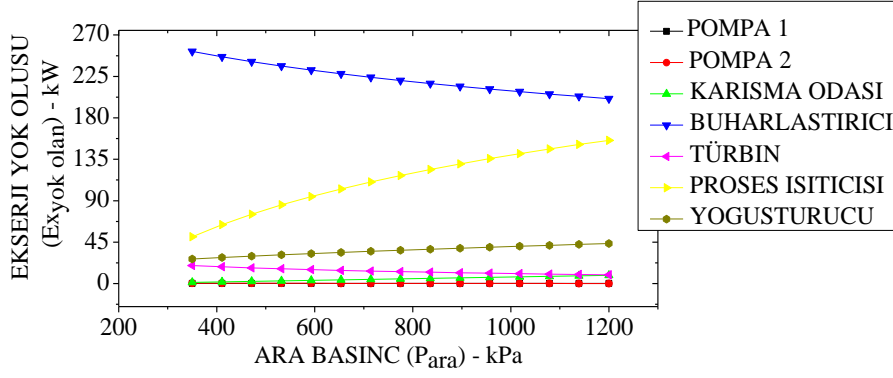


Şekil 5.44: 2.durum için ara basıncın bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.



Şekil 5.45: 2.durumda farklı organik çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı.

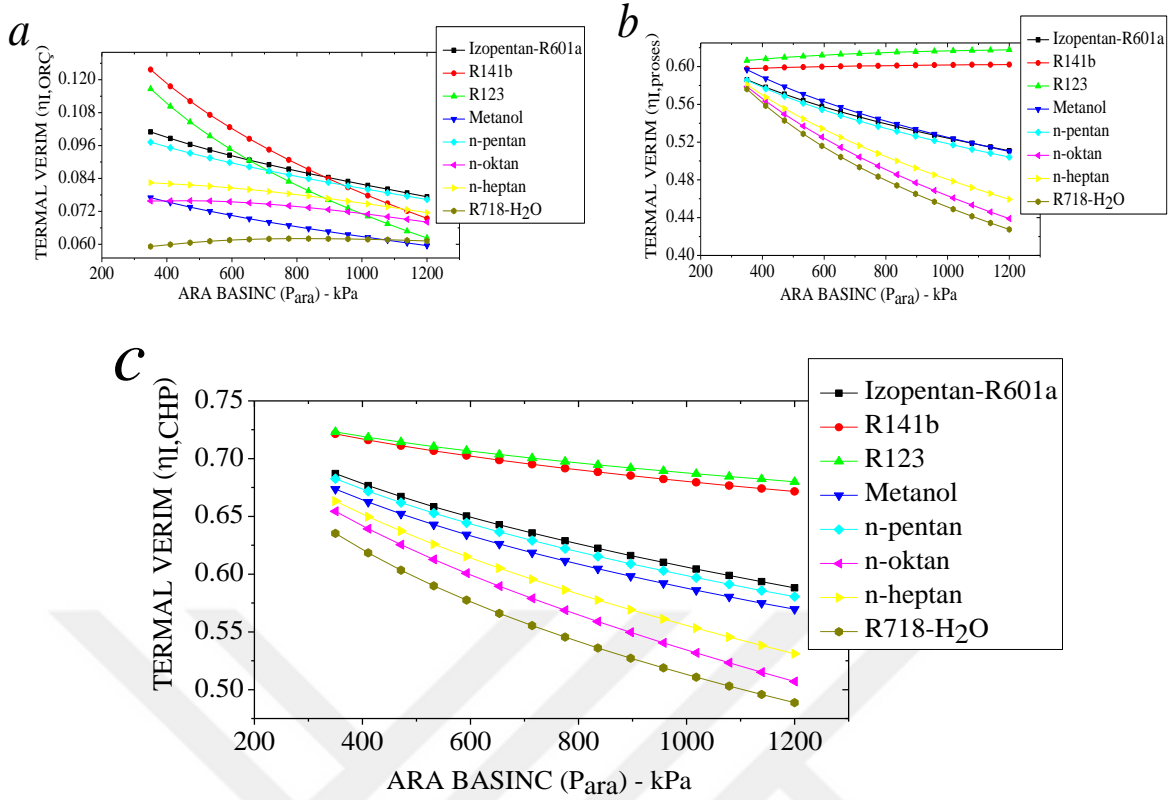
2.durum için ara basıncın bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı Şekil 5.17’de gösterilmektedir. R718 ve n-oktan haricindeki akışkanlar için 350 kPa için çevrimden en yüksek net iş çıktısı sağlanırken en düşük ekserji yok oluş oranı elde edilmiştir. Akışkanların ekserji yok oluş oranlarındaki değişim ara basınçtaki artış ile sabit bir değere doğru yaklaşmaktadır. Ara basınçtaki 850 kPa’lık artışla çevrimdeki toplam ekserji yok oluş oranı 455.3 kW olarak R718 ile maksimum değere ulaşmaktadır. Ekserji yok oluş oranındaki artma, net işteki azalmaya bağlı olarak akışkanlar için en düşük %5.54 ile en yüksek %19.89 değer aralığında değişmektedir. N-oktan’ın Metanol’e göre daha yüksek olan toplam ekserji yok etme oranı, 835.7- 896.4 kPa basınç aralığı için Metanol akışkanından elde edilen değerlerin altına düşmektedir. Bu iki akışkan için çevrimde meydana gelen toplam ekserji yok etme oranı 896.4-957.1 kPa basınç aralığında aynı değeri aldıktan sonra n-oktan’ın grafiksel eğrisi tekrar Metanol’ün üstüne çıkmaktadır. Metanol ile n-heptan akışkanlarının ekserji yok oluş oranları arasındaki fark yaklaşık 835.7.9 kPa’a kadar artıktan sonra bu basınçtan itibaren azalmaktadır. Bu azalmaya rağmen aradaki fark belirlenen basınç aralığında başlangıç değerinin altına düşmemektedir. Grafiksel eğrileri birbirine paralel şekilde hareket eden, R123 ile R141b ve n-pentan ile Izopentan akışkanlarının ekserji yok oluş oranları birbirine yaklaşmaktadır.



Şekil 5.46: 2.durumda R123 için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı.

Şekil 5.18, 2.durumda R123 için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranını göstermektedir. Ara basınçtaki değişimin pompa 1 üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Pompa 2'nin ekserji yok etme hızı yaklaşık 835.7 kPa'dan itibaren pompa 1'in grafiksel eğrisinin altına düşerek 1200 kPa'lık ara basınç değerinde 0.07557 kW ile en düşük ekserji yok etme oranını göstermektedir. Ara basınçtaki artış, proses ısıtıcısı, yoğusturucu ve karışma odasında meydana gelen ekserji yok oluşun artmasına sebep olurken; pompa 2, buharlaştırıcı ve türbin bileşenlerinin ekserji yok oluşunu ters orantılı şekilde azaltmaktadır. Buharlaştırıcıdaki ekserji yok oluşun azalırken proses ısıtıcısındaki ekserji yok oluşun basınç artışıyla artması grafiksel eğrileri arasındaki farkı azaltmaktadır. Benzer şekilde ara basınç değişime bağlı olarak bileşenlerin ekserji yok oluş oranlarındaki artma ve azalmanın etkisiyle karışma odası ve türbin bileşenlerinin grafiksel eğrileri birbirine yaklaşmaktadır. 350 kPa'lık ara basınçta ekserji yok etme oranları birbirine yakın olan türbin ve yoğusturucu bileşenlerinin grafiksel eğrileri arasındaki fark; basınç artışıyla yoğusturucunun daha yüksek olan ekserji yok oluş oranının artması ve ekserji yok etme hızı daha düşük olan türbin değerlerin azalmasına bağlı olarak daha belirgin duruma gelir. Ara basınç değişime bağlı olarak proses ısıtıcısı ve yoğusturucu bileşenlerindeki ekserji yok oluş oranları artmaktadır. Fakat basınç artışının proses ısıtıcısını daha fazla etkilemesi nedeniyle proses ısıtıcısı ve yoğusturucu ekserji yok oluş grafikleri arasındaki fark artmaktadır. Bu fark 1200 kPa'lık ara basınçta maksimum değeri almaktadır.





Şekil 5.47: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.

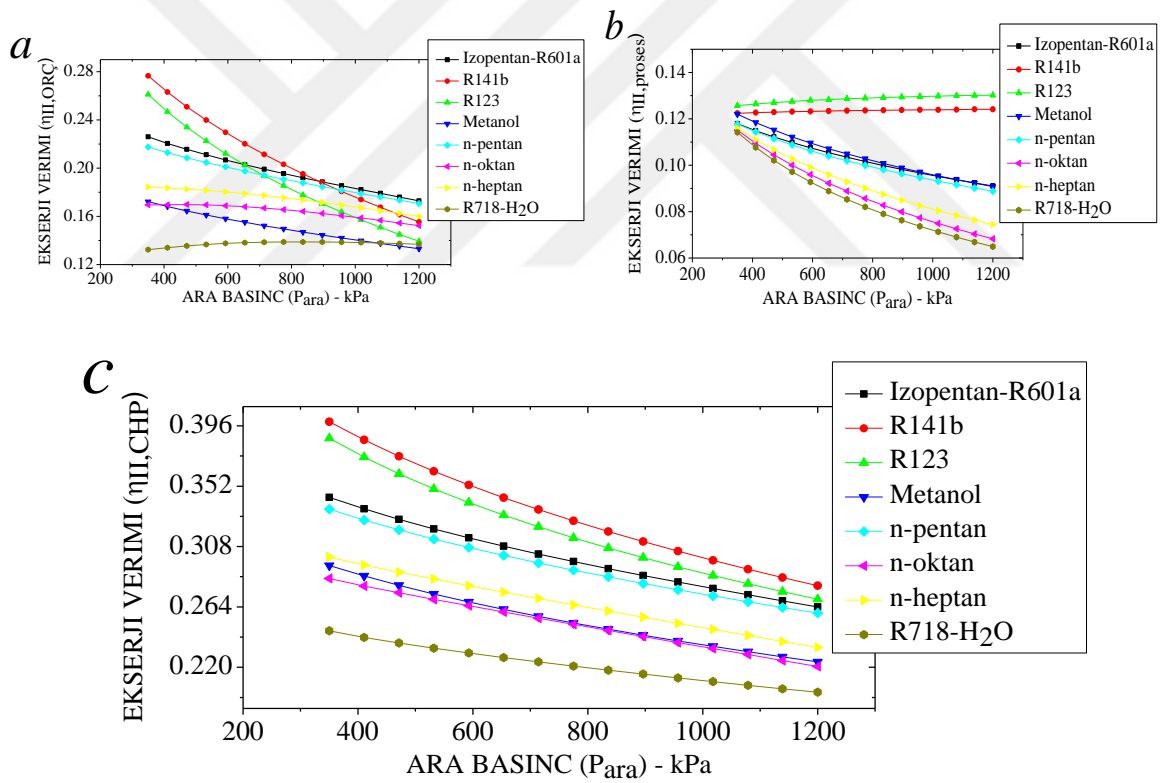
2.durum için ara basıncın bir fonksiyonu olarak termal verimler Şekil 5.19'da gösterilmektedir. Ara basınçtaki artış, n-oktan ve R718 haricindeki diğer akışkanların ORÇ termal verimlerinde belirlenen basınç aralığında sürekli azalmaya neden olmaktadır. Ara basıncın R718'de etkisi yaklaşık 896.4 kPa'a kadar artış sağladıktan sonra bu basınçtan itibaren azalma şeklinde olmuştur. Bu azalmaya rağmen R718'in grafiksel eğrisi belirlenen basınç aralığı için başlangıç değerinin altına düşmediği için ara basıncın R718'in ORÇ termal verim değerlerinde etkisi artma şeklinde olmuştur. Benzer şekilde n-oktan'ın grafiksel eğrisi yaklaşık 532.1 kPa'a kadar arttıktan sonra bu basınç değerinden itibaren azalma eğilimindedir. R718'den farklı olarak n-oktan'ın ORÇ termal verimi başlangıç değerinin altına düşerek 1200 kPa'da minimum değerini almaktadır. Ara basıncın R718 ve n-oktan'ın ORÇ termal verim değerlerine etkisi sırasıyla artma ve azalma olarak kendini göstermektedir. 350 kPa'da Metanol'ün ORÇ termal verim değeri kendisine yakın olan n-oktan'dan daha yüksek olmasına rağmen, basınç artışıyla birlikte Metanol'ün grafiksel eğrisi yaklaşık 410.7 kPa'dan itibaren n-oktan'ın altına düşmekte ve giderek R718'e yaklaşmaktadır. Metanol ve R718 akışkanlarının basınç değişime bağlı olarak yaklaşık

1079 kPa'a kadar azalmakta olan ORÇ termal verim değerleri arasındaki fark, bu basınçtan itibaren Metanol'ün grafiksel eğrisinin R718'in altına düşmesiyle birlikte artmaktadır.

Ara basınca bağlı olarak ORÇ termal verimi, 1200 kPa'da Metanol ile %5.952'lik minimum değerini almaktadır. 850 kPa'lık basınç artışı için Izopentan ile n-pentan akışkanlarının verimleri arasındaki fark azalarak minimum değere ulaşmaktadır. R123'ün grafiksel eğrisi basınç artışının neden olduğu hızlı azalmaya bağlı olarak, verim değerleri birbirine yakın olan Izopentan ve n-pentan akışkanlarının grafiksel eğrilerinin sırasıyla yaklaşık 653.6 kPa ve 714.3 kPa basınç değerlerinden itibaren altına düştükten sonra n-heptan'a doğru yaklaşmaktadır. R123 ve n-heptan akışkanlarının ORÇ termal verim değerleri arasındaki fark, yaklaşık 896.4 kPa'a kadar azalmakta ve bu basınçtan itibaren R123'ün grafiksel eğrisinin n-heptan'ın altına düşmesiyle artmaktadır. 1018 kPa'dan itibaren n-oktan'ın ORÇ termal verim değerleri R123'e göre daha yüksektir. Basınçtaki artışla birlikte, R718 ile R123'ün verimleri arasındaki fark azalmaktadır. R141b akışkanı yaklaşık 896.4 kPa'a kadar maksimum ORÇ termal verim değerleri sağlarken, bu basınç değerinden itibaren R141b'nin verim değerleri Izopentan'nın altına düşmektedir. N-pentan'dan elde edilen verim değerleri yaklaşık 957.1 kPa'dan itibaren R141b'ye göre daha yüksektir. Grafiksel eğrisi yaklaşık 1139 kPa'dan itibaren n-heptan'ın altına düşen R141b ile n-oktan akışkanlarının ORÇ termal verimleri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte azalmakta ve 1200 kPa'da minimum değeri almaktadır.

Ara basınçtaki değişim, R141b ve R123 haricindeki diğer akışkanların proses termal verimlerinde azalmaya neden olmaktadır. R141b ve R123 akışkanlarında farklı olarak kısımla vanasından ve türbinde genişletildikten sonra proses ısıtıcısına gönderilen buharın entalpisindeki artış oranının pompa 2 'ye doymuş sıvı halinde giren akışkanın entalpisindeki artış oranından daha fazla olmasına nedeniyle proses termal veriminde artış sağlamıştır. Metanol ve Izopentan akışkanlarının proses termal verimleri arasındaki ilişki yaklaşık 1139 kPa'dan itibaren Metanol'ün grafiksel eğrisinin Izopentan'nın altına düşmesiyle değişmektedir. Grafiksel eğrileri birbirine yakın olan n-pentan ile Izopentan arasındaki fark basınç artışıyla birlikte belirginleşir. 350-1200 kPa basınç aralığında grafiksel eğrileri paralel şekilde devam eden n-heptan, n-oktan ve R718 akışkanlarının 350 kPa'da birbirlerine yakın olan proses termal verimleri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artmaktadır. Proses termal veriminin, R123 için ara basınç arttığında %60.64'ten %61.77'ye yükseldiği görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek proses termal verimini

göstermektedir. Diğer taraftan, en düşük proses termal verimi 1200 kPa'da R718 için meydana gelir ve 850 kPa'lık basınç artışı için %57.61'den %42.75'e düşer. Basınç artışı ile proses termal verimdeki en büyük değişim, çalışma akışkanı R718'de görülmektedir. Akışkanların ara basınçtaki artış ile ters orantılı şekilde azalan CHP termal verimlerinin grafiksel eğrileri arasındaki fark genel olarak basınçtaki değişimle beraber daha belirginleşmektedir. Farklı olarak, n-oktan ile R718 akışkanlarının verim değerleri arasındaki fark yaklaşık 653.6 kPa ara basınç değerine kadar artıp sabit kaldıktan sonra azalma eğilimindedir. CHP termal verimi, R123 için ara basınçtaki artışla birlikte %72.31'den %68'e düşmektedir. Bunun yanı sıra R123 akışkanı en yüksek CHP termal verimi göstermektedir. En düşük CHP termal verimi ise çalışma akışkanı R718 için meydana gelir ve ara basıncın 350 kPa'dan 1200 kPa'a çıkarılmasıyla %63.53'ten %48.87'ye düşer. Basınç artışı ile CHP termal verimindeki en büyük azalma, %65.44'ten %50.71'e düşen n-oktan için meydana gelmektedir.



Şekil 5.48: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri.

Şekil 5.20, 2.durum için ara basınç değişiminin ekserji verimlerine etkisini göstermektedir. Ara basınçtaki artış, n-oktan ve R718 haricindeki diğer akışkanların ORÇ ekserji verimlerinde belirlenen basınç aralığında sürekli azalmaya neden olmaktadır. Ara basıncın R718'de etkisi yaklaşık 775 kPa'a kadar artış sağlayıp 775-896.4 kPa basınç aralığında

sabit kaldıktan sonra azalma şeklinde olmuştur. Benzer şekilde n-oktan'ın grafiksel eğrisi yaklaşık 532.1 kPa'a kadar arttıktan sonra bu basınç değerinden itibaren azalma eğilimindedir. Bu azalmaya rağmen R718'in grafiksel eğrisi belirlenen basınç aralığı için başlangıç değerinin altına düşmezken n-oktan'ın ORÇ ekserji verimi başlangıç değerinin altına düşerek 1200 kPa'da minimum değerini almaktadır. Ara basıncın R718 ve n-oktan'ın ORÇ ekserji verim değerlerine etkisi sırasıyla artma ve azalma olarak kendini göstermektedir. 350 kPa'da Metanol'ün ORÇ ekserji verimi kendisine yakın olan n-oktan'dan daha yüksek olmasına rağmen, basınç artışıyla birlikte Metanol'ün ekserji verim değerleri azalırken n-oktan'ın ekserji veriminin artmasına bağlı olarak Metanol'ün grafiksel eğrisi yaklaşık 410.7 kPa'dan itibaren n-oktan'ın altına düşmektedir. Bunun yanı sıra Metanol'ün ORÇ ekserji verim değerleri R718'e yaklaşmaktadır. Metanol ve R718 akışkanlarının basınç değişimine bağlı olarak yaklaşık 1079 kPa'a kadar azalmakta olan ORÇ ekserji verim grafikleri arasındaki fark, ve bu basınçtan itibaren Metanol'ün grafiksel eğrisinin R718'in altına düşmesiyle birlikte artmaktadır.

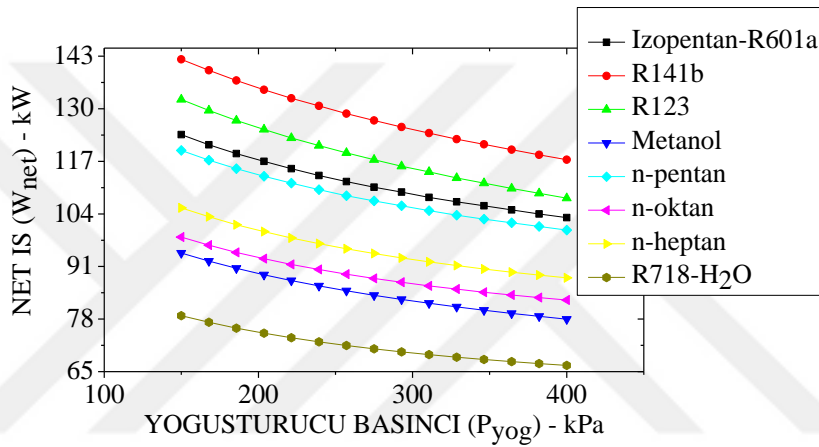
ORÇ ekserji verimi, ara basınç değişimine bağlı olarak 1200 kPa'da Metanol ile %13.31'lik minimum değerini almaktadır. Ara basıncın 350 kPa'dan 1200 kPa'a çıkarılmasıyla Izopentan ile n-pentan akışkanlarının verimleri arasındaki fark azalarak minimum değere ulaşmaktadır. R123'ün grafiksel eğrisi Izopentan ve n-pentan akışkanlarının grafiksel eğrilerinin sırasıyla yaklaşık 653.6 kPa ve 714.3 kPa basınç değerlerinden itibaren altına düştükten sonra n-heptan'a doğru yaklaşmaktadır. R123 ve n-heptan akışkanlarının yaklaşık 896.4 kPa'a kadar azalmakta olan ORÇ ekserji verimleri arasındaki fark bu basınçtan itibaren R123'ün grafiksel eğrisinin n-heptan'ın altına düşmesiyle artmaktadır. 1018 kPa'dan itibaren n-oktan'dan elde edilen ORÇ ekserji verim değerleri R123'e göre daha yüksektir. Basıncadaki artışla birlikte, R718 ile R123'ün verimleri arasındaki fark azalmaktadır. R141b akışkanı yaklaşık 896.4 kPa'a kadar maksimum ORÇ ekserji verim değerleri sağlarken, bu basınç değerinden itibaren R141b'nin grafiksel eğrisi Izopentan'ın altına düşmektedir. N-pentan'ın ORÇ ekserji verim değerleri yaklaşık 957.1 kPa'dan itibaren R141b'ye göre daha yüksektir. Yaklaşık 1139 kPa'dan itibaren ORÇ ekserji verimi n-heptan'ın altına düşen R141b ile n-oktan akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte azalmakta ve 1200 kPa'da minimum değeri almaktadır.

Ara basınçtaki artış, diğer akışkanların proses ekserji verimlerinde azalmaya neden olurken R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrilerinde artış sağlamaktadır. Proses ekserji veriminin, R123 için ara basınç arttığında %12.57'den %13.02'ye yükseldiği görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek proses ekserji verimini göstermektedir. Diğer taraftan, en düşük proses ekserji verimi 1200 kPa'da R718 için meydana gelir ve 850 kPa'lık basınç artışı için %11.42'den %6.493'e düşer. Basınç artışı ile proses ekserji verimindeki en büyük değişim, çalışma akışkanı R718'de görülmektedir. 350 kPa'da proses ekserji verimleri birbirine yakın olan R141b ile Metanol'ün grafiksel eğrileri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte belirginleşmektedir. Metanol ve Izopentan akışkanlarının proses ekserji verimleri arasındaki ilişki yaklaşık 1139 kPa'dan itibaren Metanol'ün grafiksel eğrisinin Izopentan'nın altına düşmesiyle değişmektedir. Düşük ara basınçlarda n-pentan ile Izopentan'nin proses ekserji verimleri hemen hemen aynıdır. N-pentan'ın proses ekserji verimi, yüksek basınçlarda Izopentan'inkinden daha küçüktür. Grafiksel eğrileri paralel şekilde devam eden n-heptan, n-oktan ve R718 akışkanlarının 350 kPa'da birbirlerine yakın olan proses ekserji verimleri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artmaktadır.

Tüm çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak elde edilen CHP ekserji verimleri ara basınç arttığında azalmaktadır. CHP ekserji verimi, R141b için ara basınç arttığında %39.9'dan %27.95'e düşmektedir. R141b azalmaya rağmen en yüksek CHP ekserji verim değerleri göstermektedir. En düşük CHP ekserji verim değerleri ise R718 için meydana gelir ve ara basıncın 350 kPa'dan 1200 kPa'a çıkarılmasıyla %24.66'dan %20.18'e düşer. Basınç artışı ile CHP ekserji veriminde en büyük azalma, çalışma akışkanı R141b için meydana gelmektedir. R141b ile R123 ve n-heptan ile Metanol akışkanlarının CHP ekserji verimleri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artarken, sırasıyla 471.4-592.9 kPa ve 775-896.4 kPa basınç aralıklarında sabir kaldıktan sonra azalma eğilindedir. R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark 1200 kPa'da minimum değere ulaşırken, n-heptan ile Metanol akışkanlarının CHP ekserji verimleri arasındaki fark azalmaya rağmen başlangıç değerinin altına düşmemektedir. Metanol ile n-oktan akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark ise basınç artışıyla ters orantılı şekilde azalırken, 775-896.4 kPa basınç aralığında sabir kaldıktan sonra artma eğilindedir.

### 5.2.3 Yoğuşturucu Basınç Değişiminin Etkisi

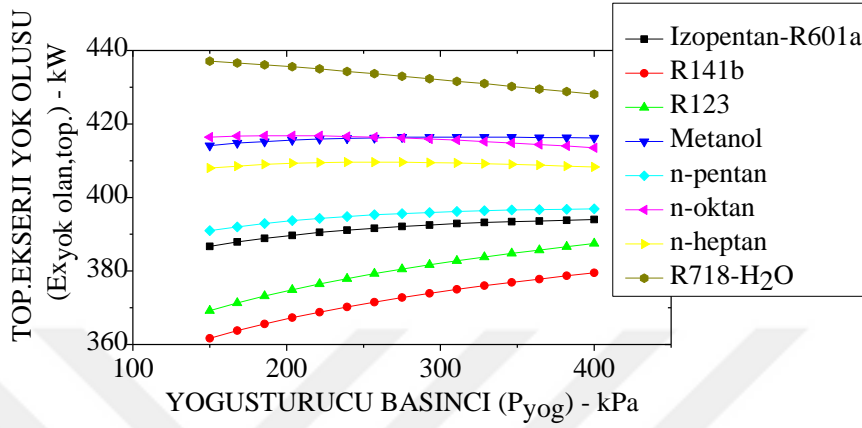
2.durum için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak, ORÇ/CHP sisteminden elde edilen net iş çıktısı Şekil 5.21’de gösterilmektedir. Akışkanların yoğuşturucu basıncına bağlı olarak net iş çıktılarında meydana gelen azalma, basınç artışıyla düşerek giderek sabit bir değere doğru yaklaşmaktadır. 1.durumda yoğuşturucu basıncı değişimiyle elde edilen net iş değerleri tüm akışkanlar için 2. durumdan daha yüksektir. Basıncındaki artışın, %24.8 ve %12.31 oranlarında net iş çıktısını en çok ve en az etkilediği akışkanlar sırasıyla R141b ve R718’dir. 150 kPa’lık yoğuşturucu basıncı için 142.2 kW ile en yüksek net iş çıkışı R141b akışkanı için elde edilmiştir.



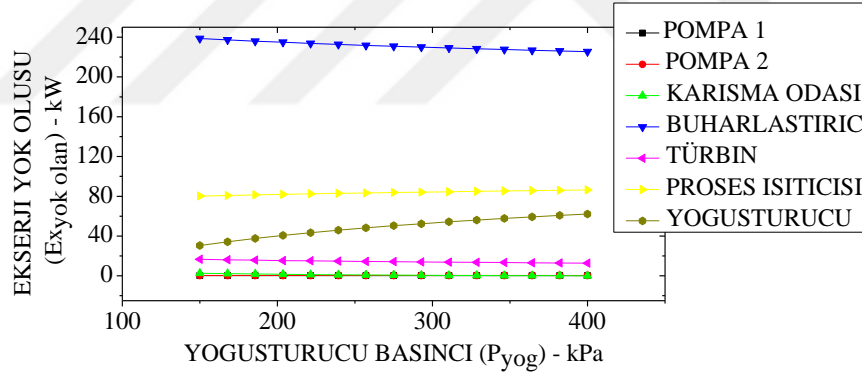
Şekil 5.49: 2.durum için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.

Şekil 5.22’de yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak çevrimde meydana gelen toplam ekserji yok oluşu görülmektedir. Yoğuşturucu basıncındaki artış, Izopentan, R141b, R123, n-pentan akışkanlarının kullanıldığı sistemde ekserji yok oluşu artırırken, R718’de azalmaya neden olmaktadır. Metanol’ün ekserji yok oluş değerleri basınç değişimiyle birlikte yaklaşık 275 kPa’a kadar artmış ve 275-346.4 kPa aralığında sabit kaldıktan sonra bu basınç aralığından itibaren azalmıştır. Bu azalmaya rağmen Metanol’ün toplam ekserji yok oluş oranı başlangıç değerinin altına düşmemektedir. Benzer şekilde n-heptan’ın grafiksel eğrisi öncelikle artma eğilimindeyken 239.3-275 kPa basınç aralığında sabit kaldıktan sonra azalmaya başlamıştır. Metanol’de olduğu gibi n-heptan’ın grafiksel eğrisi de belirlenen basınç aralığında başlangıç değerinin altına düşmemiştir. Metanol ve n-heptan akışkanlarından farklı olarak; n-oktan’ın ekserji yok oluş değerleri basınç artışıyla artıp 185.7-221.4 kPa aralığında sabit kaldıktan sonra azalmış ve 257.1 kPa’da başlangıç değeri ile aynı değeri aldıktan sonra grafiksel eğri başlangıç değerinin altına düşmüştür.

Sonuç olarak n-oktan akışkanında yoğunlaştırıcı basıncındaki artış, ekserji yok oluşunda azalmaya neden olurken, Metanol ve n-heptan akışkanlarında yoğunlaştırıcı basıncının etkisi artış şeklinde olmuştur. N-oktan'ın grafiksel eğrisi yaklaşık 275 kPa'dan itibaren Metanol'ün aşağısına düşmekte ve aralarındaki fark basınç artışıyla birlikte artmaktadır.



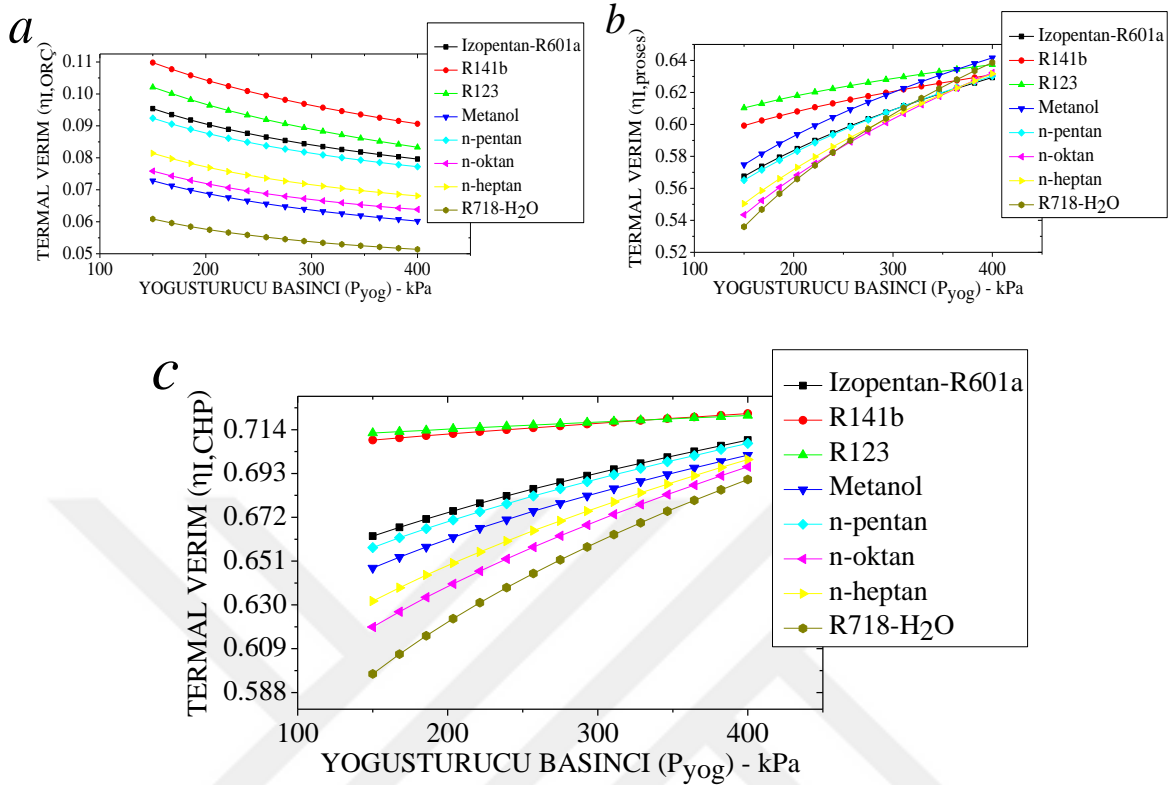
Şekil 5.50: 2.durumda farklı organik çalışma akışkanları için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı.



Şekil 5.51: 2.durumda R123 için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı.

2.durumda R123 için yoğunlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı Şekil 5.23'te verilmiştir. Yoğunlaştırıcı basıncındaki artışa rağmen pompa 2'nin ekserji yok etme hızı sabit kalmaktadır. Türbinin, karışma odasının, pompa 1'in ve buharlaştırıcının ekserji yok etme hızı, basınç artışıyla ters orantılı şekilde azalırken, yoğunlaştırıcunun ve proses ısıtıcısının ekserji yok etme oranı artmaktadır. Karışma odasının ekserji yok etme oranı yaklaşık 346.4 kPa'dan itibaren pompa 2'den daha düşüktür. Karışma odasının ekserji yok etme hızı 382.1 kPa'lık yoğunlaştırıcı basıncından itibaren pompa 1'in grafiksel eğrisinin altına düşerek en düşük ekserji yok

etme oranını gösterir.



Şekil 5.52: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğuşturucu basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.

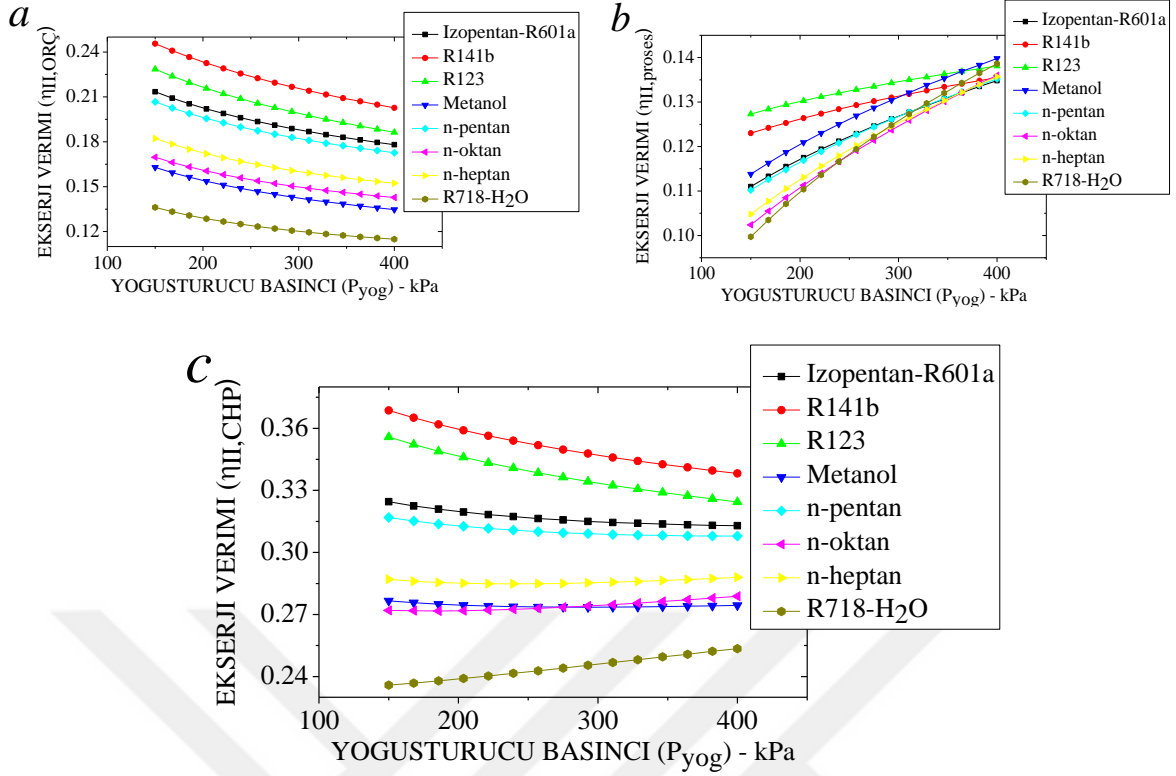
Şekil 5.24'te, 2.durum için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak termal verimler gösterilmektedir. 150 kPa'lık yoğuşturucu basıncını için sistem, tüm akışkanlar için en iyi ORÇ termal verimi sağlar. ORÇ termal veriminin, en yüksek ORÇ termal verimini gösteren R141b için yoğuşturucu basıncı arttığında %10.98'den %9.063 'ye düştüğü görülmektedir. Öte yandan en düşük ekserji yok etme oranı R718 için meydana gelir ve 250 kPa'lık basınç artışı için yaklaşık %6.087'den %5.137'e düşer. Yoğuşturucuda 250 kPa'lık basınç artışı ile ORÇ termal verimde maksimum azalma R141b akışkanında meydana gelmiştir.

Yoğuşturucu basıncındaki artışla birlikte ORÇ termal verimleri azalırken, proses termal verimleri artmaktadır. N-oktan, n-heptan ve R718 akışkanları arasında R718 en düşük proses termal verim değerleri sağlarken yaklaşık 257.1 kPa'da n-oktan'ı ve 292.9 kPa'da n-heptan'ı geçerek daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. N-heptan'ın grafiksel eğrisi yaklaşık 382.1 kPa'dan itibaren n-oktan'ın altına düşmektedir. 360-400 kPa basınç aralığı



için n-oktan ve n-heptan akışkanlarının grafiksel eğrileri İzopentan, n-pentan ve R141b'yi geçerek R123'e yaklaşmıştır. N-heptan ile İzopentan akışkanlarının proses termal verim değerleri 364.3 kPa'da aynıdır. Grafiksel eğrileri birbirine oldukça yakın olan İzopentan ve n-pentan akışkanlarının verim değerleri arasındaki ilişki 310.7 kPa'da akışkanların verimleri aynı değeri aldıktan sonra n-pentan'ın grafiksel eğrisinin İzopentan'ını geçmesiyle değişmektedir. İzopentan'nın ve n-pentan'ın verim değerleri 380 kPa ile 400 kPa basınç aralığında n-heptan'a doğru yaklaşmaktadır. R141b ve R123 akışkanlarının verim değerlerinde basınç artışıyla birlikte görülen değişim diğer akışkanlara göre daha az olup bu iki akışkanın grafiksel eğrileri belirlenen basınç aralığında birbirlerine paralel şekilde ilerlemektedir. Metanol'den elde edilen proses termal verim değerleri yoğunlaştırıcı basıncının 150 kPa'dan 400 kPa'a çıkarılmasıyla giderek yükselmekte ve Metanol'ün grafiksel eğrisi yaklaşık 310.7 kPa ve 382.1 kPa basınç değerlerinde sırasıyla R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri geçerek 400 kPa'da sistem için %64.16 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. Proses termal veriminin, 250 kPa'lık basınç artışında minimum değeri ise %62.94 ile İzopentan akışkanı için elde edilmiştir. R718'in termal verim değerleri diğer akışkanlara göre başlangıçta daha düşük olsada yoğunlaştırıcı basıncının artmasıyla birlikte grafiksel eğri hızlı bir şekilde artarak 250-400 kPa basınç aralığında diğer akışkanları geçip Metanol'e yaklaşmıştır. 150-400 kPa basınç aralığında proses termal verimi, R718 akışkanının kullanılmasıyla %53.6'dan %63.87'ye çıkmaktadır.

Yoğunlaştırıcı basıncındaki artışın CHP termal verimlerinde sağladığı artış R141b ve R123'e göre diğer akışkanlarda daha belirgindir. Diğer akışkanların basınç artışıyla birbirlerine yaklaşan grafiksel eğrileri 400 kPa'dan sonra da artmaya devam ederken, farklı olarak R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri yaklaşık 300 kPa'dan sonra basınç çizgisine paralel bir görünüm almaya başlamıştır. R141b'nin CHP verim değeri 346.4 kPa'da R123 ile aynı değeri aldıktan sonra, R141b akışkanının grafiksel eğrisi R123'ten daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. CHP termal verimi, 250 kPa'lık basınç artışında R718 için %69.01 ile minimum değerde kalırken, 400 kPa'da R141b akışkanı için %72.17 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. 150 ile 400 kPa basınç değerleri arasında CHP termal verimdeki maksimum artış, %59.69'dan %69.01'e çıkan R718 akışkanının kullanılmasıyla elde edilmektedir.



Şekil 5.53: 2.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri.

2.durum için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ekserji verimliliği Şekil 5.25'te verilmektedir. ORÇ ekserji verimi, tüm akışkanlar için 150 kPa'lık yoğuşturucu basıncında maksimum düzeydeyken 400 kPa'da minimum değere ulaşır. Yoğuşturucu basıncının 150 kPa'dan 400 kPa'a çıkarılmasıyla R141b'nin ORÇ ekserji verimi %24.56'dan %20.27'ye düştüğü görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek ORÇ ekserji verim değerleri göstermektedir. En düşük ORÇ ekserji verimi ise R718 için meydana gelmekte ve 250 kPa'lık basınç artışı için %13.62'den %11.49'a düşer. Aynı basınç değeri için, 1.durumda elde edilen ORÇ termal ve ekserji verimleri R718 haricindeki diğer akışkanlar için 2. duruma göre daha yüksektir. 1.durumda R718 akışkanından elde edilen termal ve ekserji verimleri yaklaşık 203.6 kPa'a kadar 2.durumda elde edilen verimlere göre daha düşükken bu basınçtan itibaren daha yüksek değerler sağlamaktadır. ORÇ ekserji verim grafiklerinde en belirgin değişiklik 150 kPa ile 250 kPa basınç aralığında görülmektedir. R141b ile R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark başlangıç değerinin altına düşerek 382.1-400 kPa basınç aralığında minimum değerini almaktadır. Bu azalma sırasında R141b ile R123 akışkanlarının arasındaki fark belli basınç aralıklarında sabit kalmaktadır. R123 ve İzopentan akışkanlarının ORÇ ekserji verimleri arasındaki fark sürekli azalırken, İzopentan ve n-pentan akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark

azalırken sırasıyla 221.4-239.3 kPa, 292.9-310.7 kPa, 346.4.9-364.3 kPa ve 382.1-400 kPa basınç aralıklarında sabit kalmaktadır. Basınç artışıyla birlikte n-heptan ve n-oktan akışkanlarının ORÇ ekserji verimleri arasındaki fark azalırken n-oktan ve Metanol akışkanlarının ORÇ ekserji verimleri arasındaki fark artmaktadır. Bu azalma ve artma sırasında n-heptan ile n-oktan ve n-oktan ve Metanol akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark sabit kalmaktadır.

Yoğuşturucu basıncındaki artışla birlikte tüm akışkanların proses ekserji verimleri artmaktadır. N-oktan ve R718 akışkanlarının proses ekserji verimleri arasındaki ilişki yaklaşık 239.3 kPa'da aynı değeri aldıktan sonra değişerek R718'den daha yüksek proses ekserji verim değerleri elde edilmektedir. Bununla birlikte R718'in grafiksel eğrisi n-heptan'a yaklaşmaktadır. R718 ile n-heptan akışkanlarının proses ekserji verimleri arasındaki fark yaklaşık 292.9 kPa'da R718'in grafiksel eğrisinin n-heptan'ı geçmesiyle ara basınçla birlikte artmaktadır. N-heptan'ın proses ekserji verim değerleri yaklaşık 382.1 kPa'dan itibaren n-oktan'dan daha düşüktür. 345-400 kPa basınç aralığı için n-oktan ve n-heptan akışkanlarının grafiksel eğrileri Izopentan, n-pentan ve R141b'yi geçerek R123'e yaklaşmıştır. Izopentan ve n-pentan akışkanlarının proses ekserji verimleri arasındaki ilişki 310.7 kPa'da akışkanların verimleri aynı değeri aldıktan sonra n-pentan'ın grafiksel eğrisinin Izopentan'ını geçmesiyle değişmektedir. Izopentan ve n-pentan akışkanlarının grafiksel eğrileri 380 kPa ile 400 kPa basınç aralığında n-heptan'a doğru yaklaşmaktadır. Yoğuşturucu basıncındaki artışla birlikte R141b ve R123 akışkanlarının proses ekserji verimlerinde görülen değişim diğer akışkanlara göre daha az olup bu iki akışkanın grafiksel eğrileri belirlenen basınç aralığında birbirlerine paralel şekilde ilerlemektedir. Metanol'ün grafiksel eğrisi yaklaşık 310.7 kPa'dan itibaren R141b'yi geçerek R123'e yaklaşmaktadır. Metanol ile R123 akışkanlarının proses ekserji verimleri 364.3 kPa'da aynı değeri aldıktan sonra Metanol'ün grafiksel eğrisi R123'ü geçerek 400 kPa'da sistem için %13.98 ile maksimum değere ulaşmaktadır. Buna ek olarak 250 kPa'lık basınç artışında proses ekserji verimi, Izopentan akışkanı için %13.48 ile minimum değerde kalmaktadır. R718'in ekserji verim değerleri diğer akışkanlara göre başlangıçta daha düşük olsada yoğuşturucu basıncının artmasıyla birlikte grafiksel eğri hızlı bir şekilde artarak diğer akışkanları geçip Metanol'e yaklaşmıştır. 150 ile 400 kPa basınç değerleri arasında R718 akışkanının kullanılmasıyla proses ekserji verimi, %9.972'den %13.86'ya çıkmaktadır.

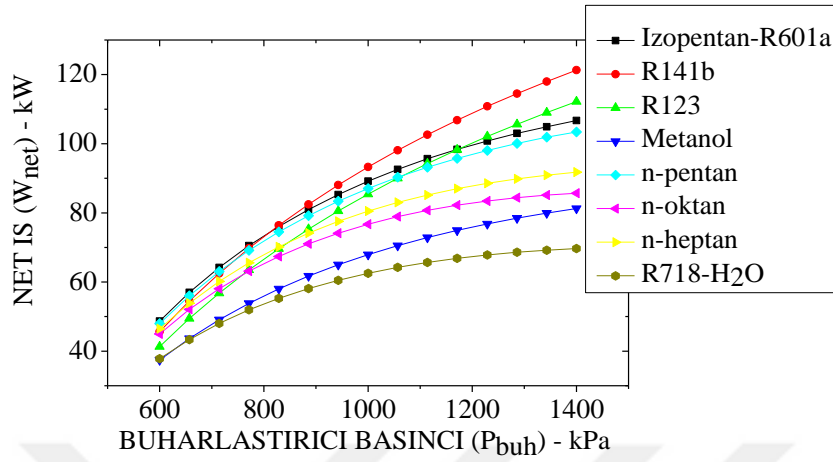
Yoğuşturucu basıncındaki artış Metanol, n-pentan, n-oktan, n-heptan ve R718 dışındaki akışkanlarda belirlenen basınç aralığı için CHP ekserji veriminde sürekli azalmaya neden olmaktadır. N-pentan'ın grafiksel eğrisi yaklaşık 382.1 kPa'lık yoğuşturucu basıncına kadar azalırken 382.1-400 kPa aralığında basınçtaki artışa rağmen sabit kalmaktadır. Metanol'ün CHP ekserji verim değerleri yaklaşık 310.7 kPa kadar azalırken bu basınç değerinden itibaren artma eğilimindedir. Benzer şekilde n-oktan ve n-heptan akışkanlarının grafiksel eğrileri sırasıyla yaklaşık 203.6 kPa ve 257.1 kPa kadar azalırken bu basınç değerlerinden itibaren artma eğilimindedir. N-oktan ve n-heptan akışkanlarının CHP ekserji verim değerleri başlangıç değerinin üstüne çıkarken, artışa rağmen Metanol'ün grafiksel eğrisi başlangıç değerinin altında kalmıştır. R718 akışkanının CHP ekserji verim değerleri basınçtaki artışla birlikte sürekli bir artma eğilimindedir. Artışa bağlı olarak R718'in grafiksel eğrisi Metanol'e yaklaşmaktadır. Metanol'ün CHP ekserji verim değerleri yaklaşık 292.9 kPa'dan itibaren n-oktan'ın altına düşmektedir. R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark artarken sırasıyla 185.7-203.6 kPa, 292.9-310.7 kPa ve 364.3.-382.1 kPa basınç aralıklarında sabit kalmaktadır. Izopentan ile n-pentan ve n-heptan ile n-oktan akışkanlarının CHP ekserji verimleri arasındaki fark sürekli azalarak 400 kPa'da minimum değeri almaktadır.

### **5.3 3.Durum Enerji ve Ekserji Analizleri**

#### **5.3.1 Buharlaştırıcı Basınç Değişiminin Etkisi**

3.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak sistemden elde edilen net iş çıktısı Şekil 5.26'da gösterilmektedir. 1. ve 2. durum için akışkanlardan elde edilen net iş değerleri 3.duruma göre daha yüksektir. Net iş, R718 akışkanı için 800 kPa'lık basınç artışında 69.67 kW ile minimum değerde kalırken, 1400 kPa'da R141b akışkanı için 121.3 kW olarak maksimum değere ulaşmaktadır. 600 ile 1400 kPa basınç değerleri arasında net işteki en büyük artış, 45.63 kW'tan 121.3 kW'a çıkan R141b akışkanının kullanılmasıyla elde edilmektedir. Termodinamik bir sistem için, bu miktardaki artış enerji kaynaklarının, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğin gerçekleştirilmesi açısından önemli katkı sağlayabilir. Net işteki artış, 1400 kPa'dan sonrada kritik basınçlarına kadar grafiksel eğrilerinin yükselmeye devam ettiği R141b ve R123 haricindeki diğer akışkanlar arasında R718, n-heptan ve n-oktan akışkanları için yaklaşık 1100 kPa'lık buharlaştırıcı basıncına kadar, Metanol, Izopentan ve n-pentan akışkanları için yaklaşık 1300 kPa'a kadar önemli

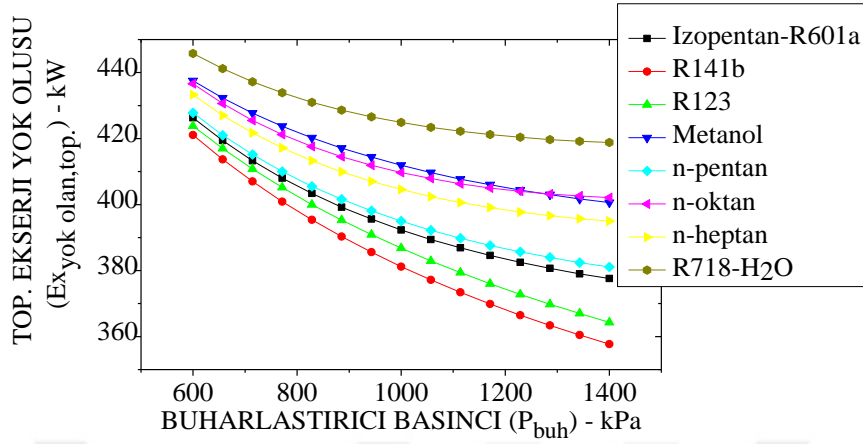
hale gelir ve daha sonra net işi belirten eğrinin eğimi, buharlaştırıcı basıncının artmasıyla sıfıra doğru yaklaşmaktadır.



Şekil 5.54: 3.durum için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.

Şekil 5.27 ve 5.28, 3.durumda buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak tüm sistem ve her ORÇ bileşeni için ekserji yok etme oranı varyasyonlarını göstermektedir. Tüm çalışma akışkanları için toplam ekserji yok etme oranı, Şekil 5.27'de görüldüğü gibi buharlaştırıcı basıncı arttığında azalmaktadır. Aynı basınç değeri için 2.durumda sistemde oluşan toplam ekserji yok oluş oranları tüm akışkanlar için 3.duruma göre daha yüksektir. Ekserji yok etme oranının, R718 için buharlaştırıcı basıncı arttığında 445.8 kW'tan 418.8 kW'a düştüğü görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek yıkım oranını göstermektedir. Diğer taraftan, en düşük ekserji yok etme oranı R141b için meydana gelir ve yok etme oranı, 800 kPa'lık basınç artışı için 421.1 kW'tan 357.7 kW'a düşer. Basınç artışı ile ekserji yok etme oranındaki en büyük azalma, çalışma akışkanını R141b'de görülmektedir. Düşük buharlaştırıcı basınçlarında n-pentan ve Izopentan'ın ekserji yok etme oranları hemen hemen aynıdır. Izopentan'ın ekserji yok etme oranı, yüksek basınçlarda n-pentan'ınkinden daha küçüktür. Akışkanlar arasında R123 ve R141b 1400 kPa'dan sonra da azalmaya devam eden bir eğilim göstermektedir. Metanol ve n-oktan akışkanlarının ekserji yok etme oranları basınç artışıyla birlikte birbirine yaklaşmakta 1286 kPa'dan itibaren Metanol değerleri n-oktan değerlerinin altına düşmektedir. Metanol, yüksek buharlaştırıcı basınçlarında n-heptan'a alternatif olabilir. R718'in toplam ekserji yok etme oranının artan buharlaştırıcı basıncı ile azaldığı ve 1050 kPa'lık buharlaştırıcı basıncından sonra çok az değiştiği fark edilmiştir. Grafiksnel eğrileri birbirlerine paralel olarak devam eden R141b ile

R123 akışkanlarının ekserji yok oluş oranları arasındaki fark basınç artışıyla birlikte belirginleşmektedir.

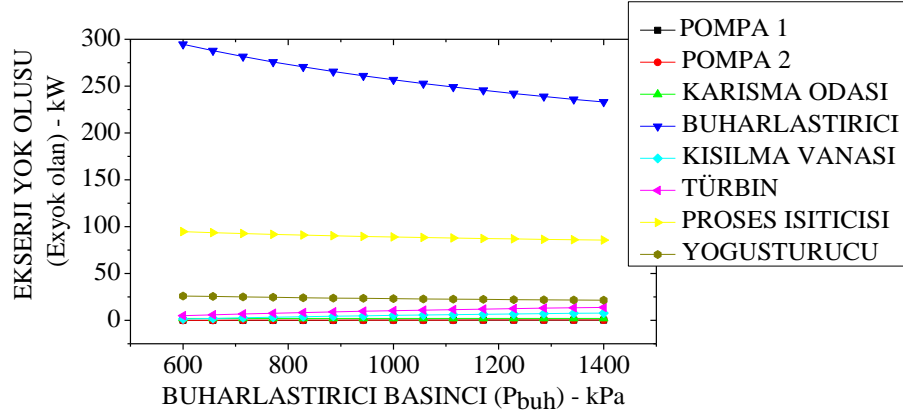


Şekil 5.55: 3.durumda farklı organik çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı.

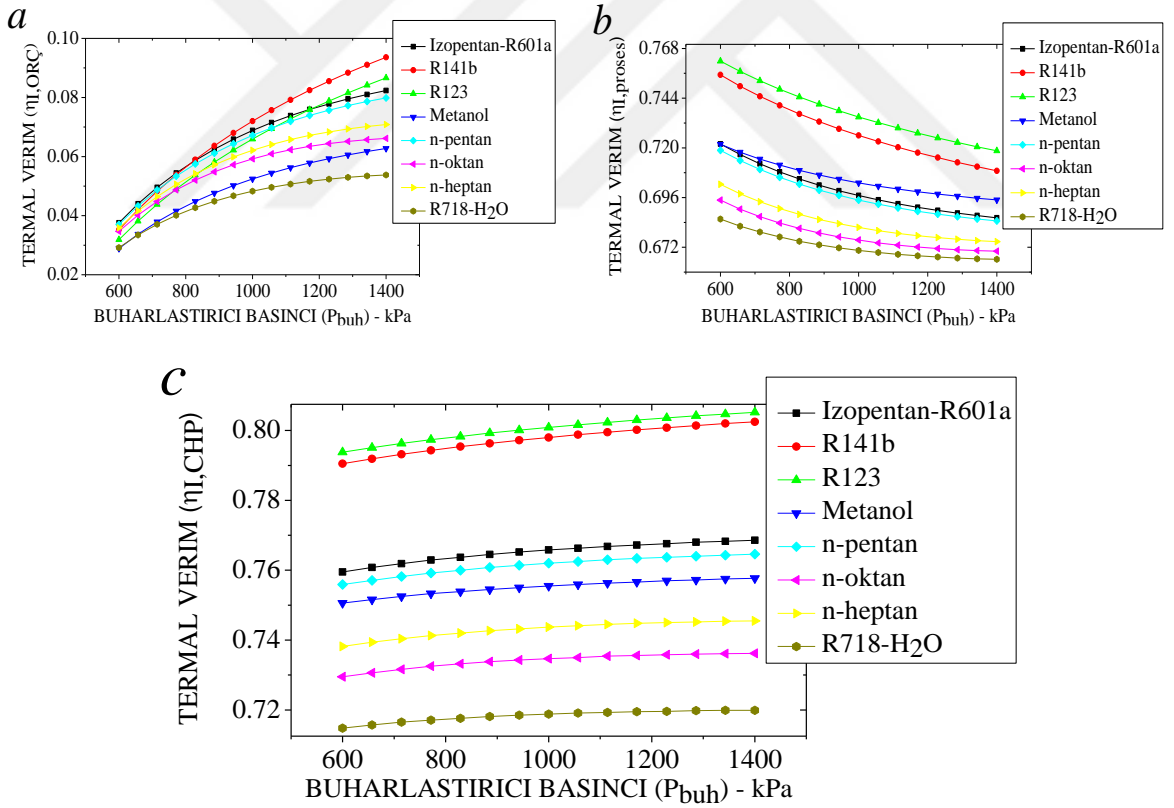
3.durum için bileşenlerin ekserji yok oluş oranlarının buharlaştırıcı basıncıyla değişimi 1. ve 2.durumla oldukça benzerlik göstermektedir. 3.durumun en büyük farkı buharın kısılma vanasından geçirilmesi sonucunda bu bileşende meydana gelen ekserji kaybıdır. Buharlaştırıcı basıncının artmasıyla buharlaştırıcı yoğuşturucu ve proses ısıtıcısı ekserji yıkım oranının azalmaktadır. Öte yandan, pompa 1, pompa 2, karışma odası, kısılma vanası ve türbinde ekserji yok etme oranı artar. 2.durum için buharlaştırıcı, yoğuşturucu, türbin, karışma odası ve pompa 1 bileşenlerindeki ekserji yok oluş oranları 3.duruma göre daha yüksekken proses ısıtıcısı ile pompa 2'de meydana gelen ekserji yıkımı ise 3.duruma kıyasla daha düşüktür. En yüksek tersinmezlik sırasıyla buharlaştırıcı, proses ısıtıcısı, yoğuşturucu, türbinde meydana gelir. Diğer bileşenlerin ekserji oranları arasındaki ilişki basınca bağlı olarak değişmektedir. Pompa 1 ve pompa 2'nin ekserji yok etme oranı oldukça düşüktür. 600 kPa'da pompa 1'in ekserji yok etme oranı pompa 2'ye göre daha yüksektir. Fakat pompa 2'de basınç değişimiyle meydana gelen hızlı artışın etkisiyle yaklaşık 657.1 kPa'dan itibaren pompa 1'in grafiksel eğrisi pompa 2'nin altına düşmektedir. Benzer şekilde kısılma vanasının ekserji yıkım oranı yaklaşık 657.1 kPa'dan itibaren karışma odasından daha yüksek değerlere ulaşmaktadır.

3.durumda buharlaştırıcı basıncının ORC/CHP sisteminin termal ve ekserji verimlilikleri üzerindeki etkisi, Şekil 5.29 ve 5.30'da farklı çalışma akışkanları için verilmiştir. Tüm

çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncı arttıkça ORÇ ile CHP termal ve ekserji verimleri artarken, proses termal ve ekserji verimleri azalmaktadır.



Şekil 5.56: 3.durumda R123 için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı.



Şekil 5.57: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.

3.durumda buharlaştırıcı basıncının 600 kPa'dan 1400 kPa'a çıkarılmasıyla akışkanların termal verimlerindeki değişim 2.durum ile benzerlik göstermektedir. Belirlenen basınç

aralığında buharlaştırıcı basıncı değişimi ile 2.durumdan elde edilen ORÇ termal verim değerleri, türbinden geçen organik akışkan debisinin daha fazla olmasına bağlı olarak 3.duruma göre daha yüksektir. ORÇ termal veriminde önemli bir oranda artma olduğu için buharlaştırıcı basıncının etkisi diğer akışkanlara kıyasla R141b akışkanında daha belirgin olarak görülmekte ve ardından sırasıyla R123 ve Izopentan akışkanları gelmektedir. R141b ve R123 akışkanlarının dışında, seçilen diğer akışkanlar için ORÇ termal verimin buharlaştırıcı basıncına göre değişim eğrisi belirli bir basınçtan itibaren azalarak artan bir eğilim gösterdikten sonra basınçtaki artışa rağmen basınç çizgisine paralel bir doğrultuda ilerlemeye başlamaktadır. Bu durum R718’de net bir şekilde görülmektedir. 800 kPa ile 1000 kPa basınç değerleri arasında azalarak artan eğilim göstermeye başlayan R718 akışkanının grafiksel eğrisi buharlaştırıcı basıncındaki artışa rağmen 1100 kPa ve 1400 kPa değer aralığında çok az değişerek sabit bir görünüme yaklaşmaktadır. ORÇ termal verimi, R718 için 800 kPa’lık basınç artışında %5.378 ile minimum değerde kalırken, 1400 kPa’da R141b akışkanı için %9.361 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. 600 ile 1400 kPa basınç değerleri arasında ORÇ termal verimdeki en büyük artış, %3.523’ten %9.361’e çıkan R141b akışkanının kullanılmasıyla elde edilmektedir. Belirlenen buharlaştırıcı basınç aralığının başlangıç basınç değeri olan 600 kPa’da Metanol’ün ORÇ termal verimi kendisine çok yakın olan R718’e göre düşük olmasına rağmen buharlaştırıcı basıncının artırılmasıyla birlikte 657.1 kPa’dan itibaren değişerek daha yüksek değerlere ulaşmakta ve n-oktan’a yaklaşmaktadır. Bu iki akışkan arasındaki verim farkı buharlaştırıcı basıncındaki artışa bağlı olarak artmaktadır. ORÇ termal verimleri ilk aşamada birbirlerine yakın olan Izopentan, R141b ve n-pentan akışkanlarından elde edilen değerler arasındaki ilişki R141b’nin hızlı bir şekilde artarak 771.4 kPa’dan itibaren n-pentan’dan ve 828.6 kPa’dan itibaren Izopentan’dan daha yüksek değerler sağlamasıyla değişmektedir. 600 kPa’dan 1400 kPa’a kadar Izopentan akışkanı n-pentan’a göre daha yüksek ORÇ termal verim değerleri sağlamaya devam etmektedir ve aralarındaki fark basınç artışına bağlı olarak artmaktadır.

R123’ün 600 kPa’taki ORÇ termal verimi n-oktan’tan düşük olmasına rağmen buharlaştırıcı basıncı 600 kPa’dan 800 kPa doğru artırıldığında hızlı bir şekilde artmakta ve yaklaşık 771.4 kPa’da n-oktan’ı geçmektedir. 800 kPa ile 1000 kPa basınç aralığı için n-heptan akışkanının grafiksel eğrisi azalarak artan bir eğim göstermeye başlamakta ve bu şekilde devam etmektedir. 885.7 kPa’dan itibaren R123 akışkanın ORÇ termal verim değerleri n-heptan’dan yüksek olup aralarındaki fark buharlaştırıcı basıncındaki artışa bağlı

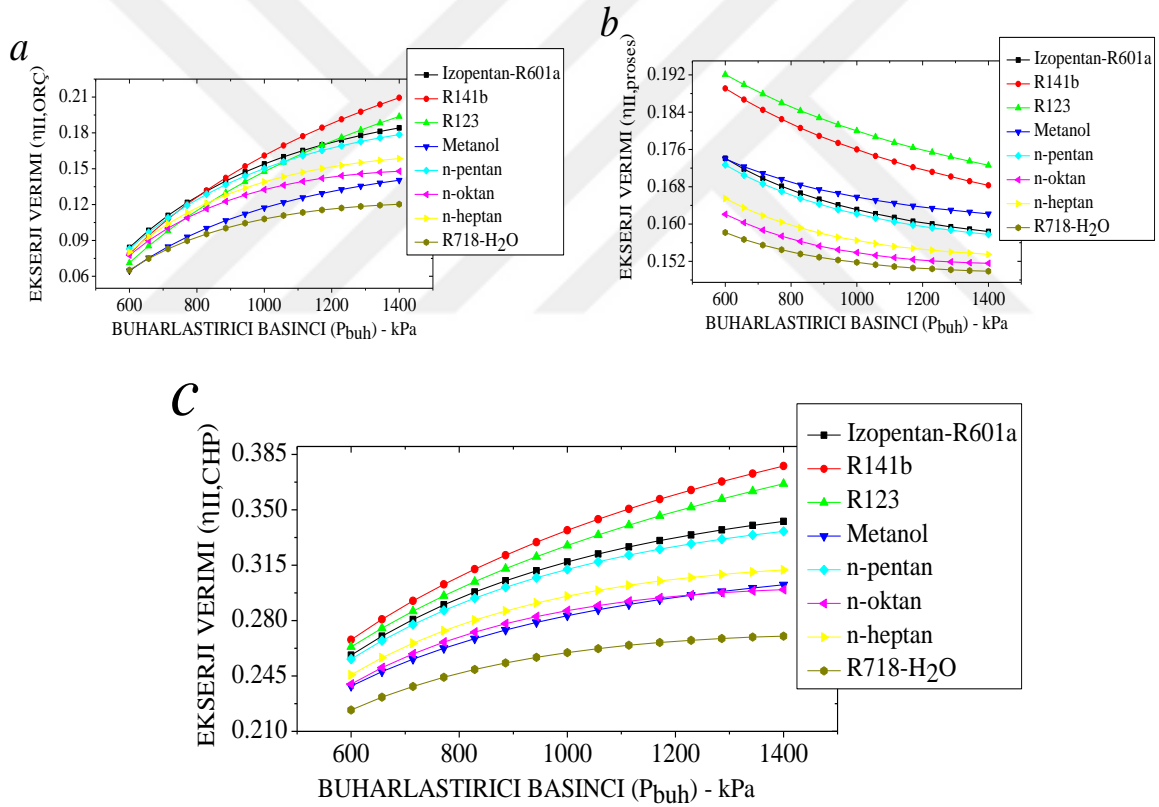


olarak giderek artmaktadır. 1000 kPa ile 1200 kPa basınç aralığı incelendiğinde, bu basınç aralığına kadar n-pentan ile R123 akışkanlarının ORÇ termal verimleri arasındaki farkın buharlaştırıcı basıncı artışıyla ters orantılı bir şekilde azaldığı ve elde edilen verim değerlerinin birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bunun yanı sıra 1114 kPa basınç değerinden itibaren çalışma akışkanı olarak R123'ü kullanıldığı sistemin ORÇ termal verim değerleri n-pentan'a kıyasla daha yüksektir ve aradaki fark bu basınç değerinden sonra artmaktadır. Buharlaştırıcı basıncının 1171 kPa olduğu durumda Izopentan ile R123 akışkanlarının verim değerleri birbirine oldukça yakın olup 1229 kPa'dan itibaren R123 akışkanından elde edilen ORÇ termal verim değerleri Izopentan ile karşılaştırıldığında daha yüksektir.

2.durum için akışkanların proses termal verim değerleri, 3.durumda proses ısıtıcısına gönderen akışkan debisinden daha az olduğu için daha düşüktür. 3.durumda çevrimde üretilen buhar hem kısılma vanasından hem de türbinde ara basınca kadar genişletildikten sonra proses ısıtıcısına gönderilirken 2.durumda sadece türbinde ara basınca kadar genişletilen buhar proses ısıtıcısına gönderilmektedir. R141b ile R123 akışkanlarının proses termal verim değerleri belirlenen basınç aralığı dışında da azalmaya devam ederken, diğer akışkanların grafiksel eğrileri belirli bir basınç değerinden itibaren sabitleşmeye başlamaktadır. 600 kPa'da Izopentan ile Metanol'ün birbirine oldukça yakın olan proses termal verimleri arasındaki fark, Izopentan'nın grafiksel eğrisinin yaklaşık 657.1 kPa'dan itibaren Metanol'ün altına düşmesiyle artmakta ve Izopentan'nın termal verimi n-pentan'a yaklaşmaktadır. Benzer şekilde basınç artışı R141b ve R123 arasındaki farkı artırmaktayken, R141b ile Metanol arasındaki farkı azaltmaktadır. Buna ek olarak grafiksel eğrileri birbirine yakın olan n-heptan, n-oktan ve R718 akışkanlarının proses termal verimleri arasındaki fark buharlaştırıcı basıncındaki artışla ters orantılı şekilde azalmaktadır. Proses termal veriminin, R123 için buharlaştırıcı basıncı arttığında %76.19'dan %71.86'ya düştüğü görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek proses termal verimini göstermektedir. Diğer taraftan, en düşük proses termal verimi R718 için meydana gelir ve 800 kPa'lık basınç artışı için %68.56'dan %66.62'ye düşer. Basınç artışı ile proses termal verimdeki en büyük azalma, çalışma akışkanı R141b'de görülmektedir.

3. durum için kojenerasyon sisteminde sadece elektrik üretiminden elde edilen ORÇ termal verim değerleri %2 ile %10 arasındayken ısı ve elektriğin birlikte üretimi sağlanan CHP termal verim değerleri %70-80'lere çıkmaktadır. Buharlaştırıcı basıncındaki artışın

etkisiyle akışkanların CHP termal verimindeki değişim proses termal verimindeki azalma ile ORÇ termal verimindeki artış arasındaki farkın düşmesine bağlı olarak azalmaktadır. Buna bağlı olarak akışkanların CHP termal verim grafikleri basınç çizgisine paralel bir görünüm almaktadır. 2.durumda ısı ve elektriğin birlikte üretilmesiyle elde edilen CHP termal verim değerleri, tüm akışkanlar için 3.duruma göre daha düşüktür. R718 akışkanının CHP verim değeri 1343-1400 kPa basınç aralığında basınç artışına rağmen sabit kalmaktadır. CHP termal verimi, 800 kPa'lık basınç artışında R718 için %71.99 ile minimum değerde kalırken, 1400 kPa'da R123 akışkanı için %80.52 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. 600 ile 1400 kPa basınç değerleri arasında CHP termal verimdeki en büyük artış, %79.05'ten %80.25'e çıkan R141b akışkanının kullanılmasıyla elde edilmektedir.



Şekil 5.58: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için buharlaştırıcı basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri.

3.durumla karşılaştırıldığında 2.durumda elde edilen ORÇ ekserji verim değerleri daha yüksekken, proses ekserji verim değerleri ve CHP ekserji verim değerleri daha düşüktür. Buharlaştırıcı basıncının ORÇ ekserji verimine etkisi en fazla R141b akışkanında görülmektedir. Ardından sırasıyla R123 ve Izopentan akışkanları gelmektedir. ORÇ ekserji

veriminin, R141b için buharlaştırıcı basıncı arttığında %7.88'den %20.94'e çıkararak 1400 kPa'da maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Bu basınçta en düşük ORÇ ekserji verimi, R718 için meydana gelir ve 800 kPa'lık basınç artışı için %6.529'dan %12.03'e çıkar. 600-1400 kPa basınç aralığında ORÇ ekserji verimindeki en büyük artış, R141b için elde edilmektedir. R141b ve R123 dışında, seçilen diğer akışkanlar için ORÇ ekserji verim grafikleri belirli bir basınçtan itibaren azalarak artan bir eğilim gösterdikten sonra basınç çizgisine paralel bir doğrultuda ilerlemeye başlamaktadır. R141b ve R123 akışkanlarının ORÇ ekserji veriminin buharlaştırıcı basıncı ile değişim grafikleri 600-1400 kPa basınç aralığı dışında da artmaya devam eden bir eğilim göstermektedir. R718, n-oktan ve n-heptan akışkanlarının ORÇ ekserji verim grafikleri buharlaştırıcı basıncındaki artışa rağmen 1000 kPa ve 1400 kPa değer aralığında çok az değişerek sabit bir görünüme yaklaşmaktadır.

600 kPa'lık buharlaştırıcı basıncında Metanol'ün ORÇ ekserji verimi kendisine çok yakın olan R718'e göre düşük olmasına rağmen basınçtaki artışla birlikte 657.1 kPa'dan itibaren değişerek daha yüksek değerlere ulaşmakta ve n-oktan'a yaklaşmaktadır. R141b'nin grafiksel eğrisi hızlı bir şekilde artarak yaklaşık 771.4 kPa ve 828.6 kPa'da sırasıyla n-pentan ve İzopentan'ı geçerek maksimum değere ulaşmaktadır. Düşük buharlaştırıcı basınçlarında İzopentan ve n-pentan 'ın ORÇ ekserji verimleri hemen hemen aynıdır. N-pentan 'ın ORÇ ekserji verimi, yüksek basınçlarda İzopentan 'inkinden daha küçüktür. R123'ün grafiksel eğrisi yaklaşık 771.4 kPa'dan itibaren n-oktan'dan daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. 885.7 kPa'dan itibaren R123 akışkanının ORÇ ekserji verim değerleri n-heptan'dan yüksek olup aralarındaki fark buharlaştırıcı basıncındaki artışla birlikte artmaktadır. N-pentan ile R123 akışkanlarının ORÇ ekserji verimleri arasındaki fark 1114 kPa'a kadar buharlaştırıcı basıncı artışıyla ters orantılı bir şekilde azalırken bu basınç değerinden itibaren R123'ün grafiksel eğrisinin n-pentan'ı geçmesiyle artmaktadır. İzopentan ile R123 akışkanlarının ORÇ ekserji verimleri 1171 kPa'da birbirine oldukça yakın olup R123 akışkanından elde edilen ORÇ ekserji verim değerleri yaklaşık 1229 kPa'dan itibaren İzopentan ile karşılaştırıldığında daha yüksektir.

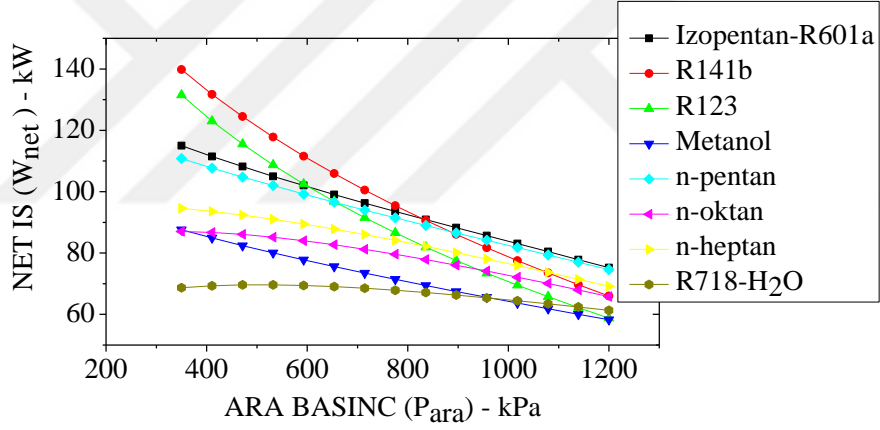
R141b ile R123 akışkanlarının proses ekserji verimleri 1400 kPa'dan sonra da azalmaya devam eden bir eğilim gösterirken, diğer akışkanların grafiksel eğrileri belirli bir basınç değerinden itibaren basınç çizgisine paralel bir görünüm almaktadır. İzopentan'ın proses ekserji verim grafiği yaklaşık 657.1 kPa'dan itibaren Metanol'ün altına düşmekte ve

Izopentan'ın proses ekserji verim değerleri n-pentan'a yaklaşmaktadır. Basınç artışıyla birlikte R141b ve R123 arasındaki proses ekserji verimleri arasındaki fark artarken, R141b ile Metanol arasındaki fark azaltmaktadır. R141b ve R123 arasındaki fark bu artış sırasında 1057-1114 kPa, 1171-1286 kPa ve 1343-1400 kPa basınç aralıklarında sabit kalmaktadır. R141b ile Metanol arasındaki fark ise sürekli azalma eğilimindedir. N-heptan ile n-oktan ve n-oktan ile R718 akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark basınç artışıyla ters orantılı şekilde azalmaktadır. Bu azalmalar sırasında n-heptan ile n-oktan akışkanlarının proses ekserji verimleri arasındaki fark 1114-1171 kPa ve 1286-1343 kPa basınç aralıklarında sabit kalmaktadır. Benzer şekilde N-oktan ile R718 akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark, 1229-1400 kPa basınç aralığında değişmemiştir. Proses ekserji veriminin, R123 için buharlaştırıcı basıncı arttığında %19.21'den %17.26'ya düştüğü görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek proses ekserji verimini göstermektedir. Diğer taraftan, en düşük proses ekserji verimi R718 için meydana gelir ve 800 kPa'lık basınç artışı için %15.82'den %14.99'a düşer. Basınç artışı ile proses ekserji verimindeki en büyük azalma, %18.91'den %16.83'e R141b'de görülmektedir.

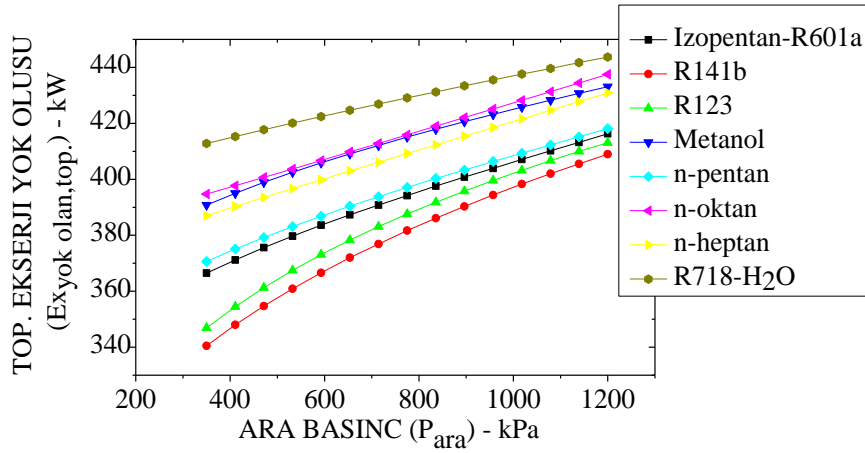
3. durum için kojenerasyon sisteminde sadece elektrik üretiminden elde edilen ORÇ ekserji verim değerleri %6 ile %21 arasındayken ısı ve elektriğin birlikte üretimi sağlanan CHP ekserji verim değerleri %21 ile %38.5 arasında değişmektedir. CHP ekserji verimi, en yüksek CHP ekserji verim değerleri sağlayan R141b için buharlaştırıcı basıncı arttığında %26.79 'dan %37.77'ye yükselmektedir. Öte yandan, en düşük CHP ekserji verimi R718 akışkanından elde edilmekte ve 800 kPa'lık basınç artışı için %22.35'ten %27.02'ye çıkar. 600-1400 kPa basınç aralığında CHP ekserji verimindeki en büyük artış, R141b için elde edilmektedir. Buharlaştırıcı basıncındaki artışla birlikte akışkanların CHP ekserji verimlerindeki değişim azalmaktadır. R141b ile R123 akışkanlarının CHP ekserji verimleri arasındaki fark R141b'deki artışın daha fazla olmasına bağlı olarak basınç artışıyla birlikte artmaktadır. R123 ve Izopentan akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark yaklaşık 714.3 kPa'a kadar azalırken bu basınç değerinden itibaren artarak 1400 kPa'da maksimum değere ulaşır. Düşük buharlaştırıcı basınçları için Izopentan ve n-pentan'ın CHP ekserji verimleri hemen hemen aynıdır. N-pentan'ın CHP ekserji verimi, yüksek basınçlarda Izopentan 'ninkinden daha küçüktür. N-oktan ile Metanol akışkanının CHP ekserji verimleri arasındaki ilişki yaklaşık 1286 kPa'dan itibaren değişerek Metanol akışkanı kullanılan sistemden daha yüksek CHP ekserji verimi sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra Metanol'ün grafiksel eğrisi basınç artışıyla birlikte n-heptan'a yaklaşmaktadır.

### 5.3.2 Ara Basınç Değişiminin Etkisi

Şekil 5.31’de 3.durum için ara basıncın bir fonksiyonu olarak sistemden elde edilen net iş çıktısı gösterilmektedir. Ara basınçtaki artış diğer akışkanların net iş çıktılarında belirlenen basınç aralığında sürekli azalmaya neden olurken, basıncın R718’de etkisi yaklaşık 592.9 kPa’a kadar artış sağladıktan sonra bu basınç değerinden itibaren azalma şeklinde olmuştur. Bu azalmayla birlikte R718’in grafiksel eğrisi yaklaşık 714.3 kPa’dan itibaren başlangıç değerinin altına düşmektedir. Ara basınç değişimiyle 2.durumda elde edilen net iş değerleri tüm akışkanlar için 3.durumla kıyaslandığında daha yüksektir. Net iş çıktısındaki en belirgin değişim 73.79 kW ve 72.74 kW azalma ile sırasıyla R141b ve R123 akışkanlarında görülmektedir. 350 kPa’lık ara basınç için R141b kullanılarak 139.8 kW ile en yüksek net iş çıkışı sağlanmıştır. Buna ek olarak net iş, 1200 kPa’da Metanol ile 58.26 kW’lık minimum değerini almaktadır.

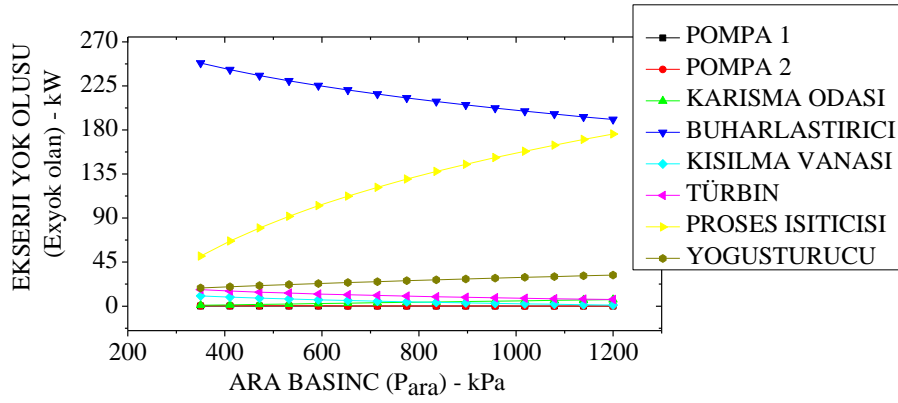


Şekil 5.59: 3.durum için ara basıncın bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.



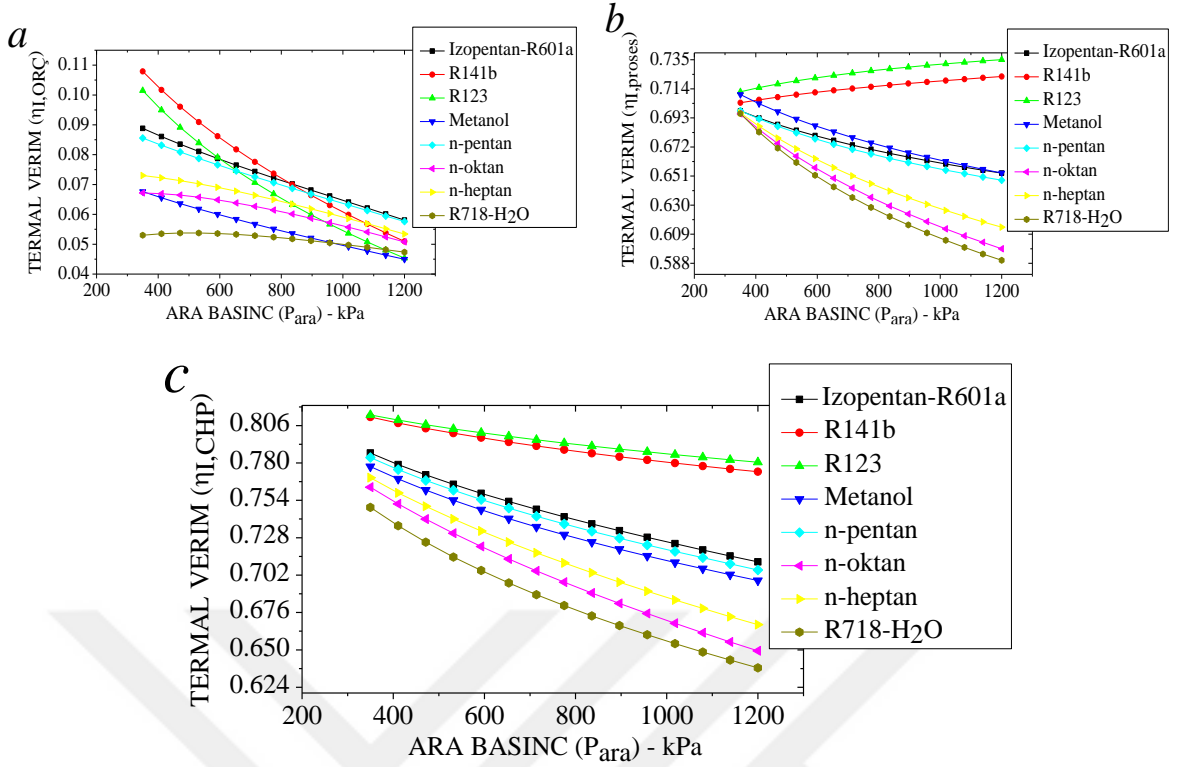
Şekil 5.60: 3.durumda farklı organik çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı.

Şekil 5.32’de 3.durum için ara basıncın bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı gösterilmektedir. 2.durumda ara basınca bağlı olarak çevrimdeki toplam ekserji yok etme oranı tüm akışkanlar için 3.durumla karşılaştırıldığında daha yüksektir. Belirlenen basınç aralığında R718 haricindeki diğer tüm akışkanlardan, 350 kPa’lık ara basınç değerinde sistemden en yüksek net iş çıktısı sağlanırken en düşük ekserji yok oluş oranı elde edilmiştir. Ara basınçtaki artış ile akışkanların ekserji yok oluş oranlarındaki değişim sabit bir değere doğru yaklaşmaktadır. Ara basıncın 350 kPa’dan 1200 kPa’a çıkarılmasıyla çevrimdeki toplam ekserji yok oluş oranı 443.7 kW olarak R718 ile maksimum değere ulaşmaktadır. Öte yandan, en düşük toplam ekserji yok oluş oranı R141b akışkanından elde edilmekte ve 850 kPa’lık basınç artışı için 340.5 kW ‘tan 409 kW’a çıkar. Net işteki azalmaya bağlı olarak ekserji yok oluş oranındaki artma akışkanlar için en düşük %7.48 ile en yüksek %20.11 değer aralığında değişmektedir. N-oktan ile Metanol akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark yaklaşık 653.6 kPa’a kadar azalır 653.6 - 714.3 kPa basınç aralığında sabit kaldıktan sonra artma eğilimi göstermektedir. Gerçekleşen artışa bağlı olarak fark 1200 kPa’da başlangıç değerinin üstüne çıkarak maksimum değere ulaşmakta ve aynı zamanda n-oktan ekserji yok oluş oranı R718’e doğru yaklaşmaktadır. Bunun tersi şekilde Metanol ile n-heptan akışkanlarının ekserji yok oluş oranları arasındaki fark ise yaklaşık 592.9 kPa’a kadar artıp 592.9- 653.6 kPa basınç aralığında sabit kaldıktan sonra azalarak 1200 kPa’da minimum değeri almaktadır. Grafiksel eğrileri birbirine paralel şekilde hareket eden, R123 ile R141b ve n-pentan ile Izopentan akışkanlarının ekserji yok oluş oranları birbirine yaklaşmaktadır.



Şekil 5.61: 3.durumda R123 için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı.

3.durumda R123 için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı Şekil 5.33'te sunulmuştur. Ara basınçtaki değişimin pompa 1 üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Pompa 2'nin ekserji yok etme hızı basınç artışıyla azalmakta ve yaklaşık 1079 kPa'dan itibaren pompa 1'in grafiksel eğrisinin altına düşerek 1200 kPa'da 0.08637 kW ile en düşük ekserji yok etme oranını göstermektedir. Ara basınçtaki artış, karışma odasında meydana gelen ekserji yok oluşu artırırken kısılma vanasının ekserji yok oluşunu ters orantılı şekilde azaltmaktadır. Buna bağlı olarak karışma odasının grafiksel eğrisi yaklaşık 835.7kPa'dan itibaren kısılma vanasını geçmekte ve aynı zamanda türbinin grafiksel eğrisine yaklaşmaktadır. 350 kPa'lık ara basınçta ekserji yok etme oranları birbirine yakın olan türbin ve yoğusturucu bileşenlerinin değerleri arasındaki fark, basınç artışıyla birlikte türbinin ekserji yok oluş oranı azalırken yoğusturucunun ekserji yok oluş oranının artmasına bağlı olarak daha belirgin duruma gelir. Ara basınç değişime bağlı olarak proses ısıtıcısı ve yoğusturucu bileşenlerindeki ekserji yok oluş oranları artmaktadır. Fakat basınç artışının proses ısıtıcısını daha fazla etkilemesi nedeniyle proses ısıtıcısı ve yoğusturucu ekserji yok oluş grafikleri arasındaki fark artmaktadır. Bu fark 850 kPa'lık basınç artışıyla maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Buharlaştırıcıdaki ekserji yok oluşun azalırken proses ısıtıcısındaki ekserji yok oluşun basınç artışıyla artması grafiksel eğrileri arasındaki farkı azaltmaktadır.



Şekil 5.62: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.

3.durum için ara basıncın bir fonksiyonu olarak termal verimler Şekil 5.34'te gösterilmektedir. 2.duruma kıyasla ara basınç değişimiyle akışkanlardan elde edilen ORÇ termal verim değerleri 3.durumda daha düşüktür. Ara basınçtaki artış diğer akışkanların ORÇ termal verimlerinde belirlenen basınç aralığında sürekli azalmaya neden olurken, basıncın R718'de etkisi yaklaşık 592.9 kPa'a kadar artış sağladıktan sonra bu basınçtan itibaren azalma şeklinde olmuştur. Bu azalmayla birlikte R718'in grafiksel eğrisi yaklaşık 714.3 kPa'dan itibaren başlangıç değerinin altına düşmektedir. Başlangıçta Metanol'ün verim değerleri kendisine yakın olan n-oktan'dan daha yüksek olmasına rağmen, basınç artışıyla birlikte Metanol'deki hızlı azalmanın etkisiyle Metanol'ün grafiksel eğrisi yaklaşık 410.7 kPa'dan itibaren n-oktan'ın altına düşmekte ve giderek R718'e yaklaşmaktadır. Metanol ve R718 akışkanlarının ORÇ termal verim değerleri arasındaki fark, basınç değişime bağlı olarak yaklaşık 1018 kPa'a kadar azalmakta ve bu basınçtan itibaren Metanol'ün grafiksel eğrisinin R718'in altına düşmesiyle artmaktadır. ORÇ termal verimi, 1200 kPa'da Metanol ile %4.497'lik minimum değerini almaktadır. ORÇ termal verimdeki en belirgin değişim %10.79'dan %5.096'ya düşen R141b akışkanında görülmektedir. 350 kPa'da R141b için %10.79 ile en yüksek ORÇ termal verimi sağlanmıştır. Basıncın 350 kPa'dan 1200 kPa'a çıkarılmasıyla Izopentan ile n-pentan

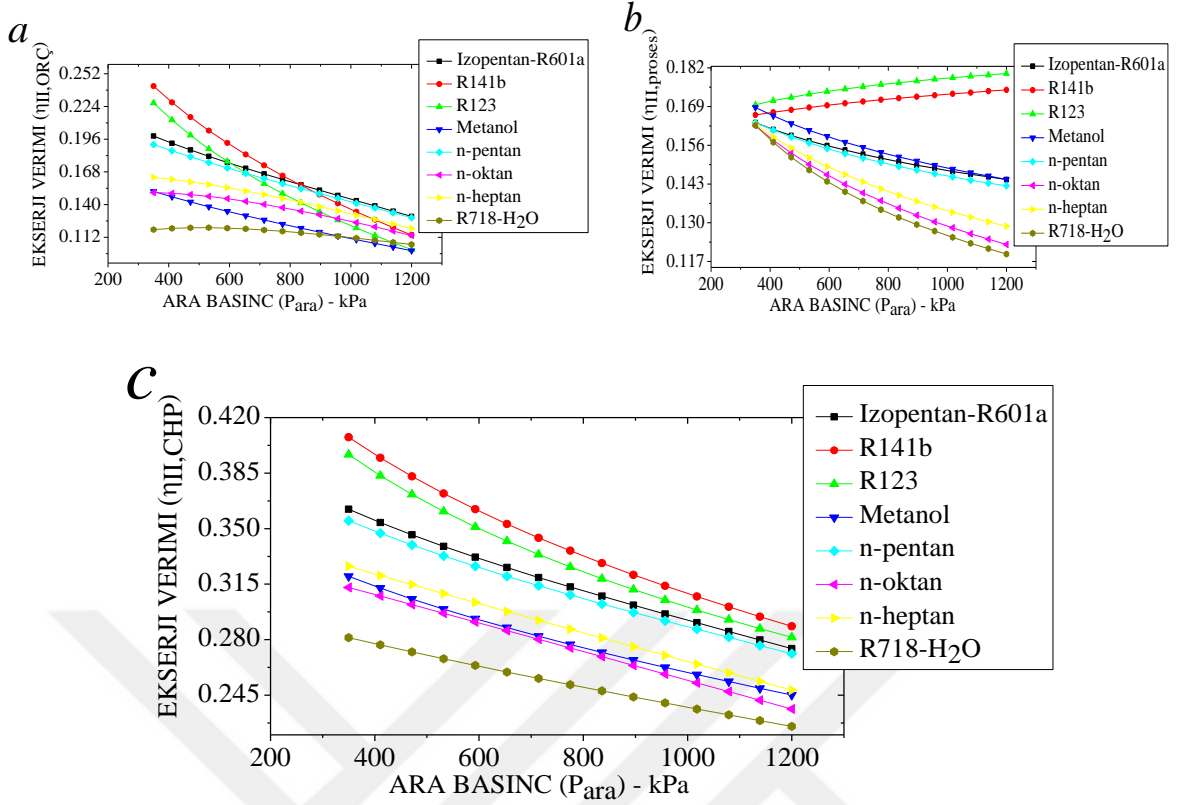


akışkanlarının verimleri arasındaki fark 1200 kPa’da minimum değerini almaktadır. R123’ün grafiksel eğrisi, verim değerleri birbirine yakın olan Izopentan ve n-pentan akışkanlarının grafiksel eğrilerinin sırasıyla yaklaşık 653.6 kPa ve 714.3 kPa basınç değerlerinden itibaren altına düştükten sonra n-heptan’a doğru yaklaşmaktadır. R123 ve n-heptan akışkanlarının ORÇ termal verim değerleri arasındaki fark, basınç değişime bağlı olarak yaklaşık 835.7 kPa’a kadar azalmakta ve bu basınçtan itibaren R123’ün grafiksel eğrisinin n-heptan’ın altına düşmesiyle artmaktadır. N-oktan ile R123 verim arasındaki ilişki yaklaşık 957.1 kPa’dan itibaren değişerek N-oktan’dan daha yüksek ORÇ termal verim değerleri elde edilmektedir. Basınçtaki artışla birlikte, Metanol ile yaklaşık 1139 kPa’dan itibaren R718’in grafiksel eğrisi altına düşen R123’ün verimleri arasındaki fark azalarak 1200 kPa’da minimum değere ulaşmaktadır. R141b akışkanı yaklaşık 835.7 kPa’a kadar maksimum ORÇ termal verim değerleri sağlarken, bu basınç değerinden itibaren R141b’nin verim değerleri Izopentan’ın altına düşmektedir. N-pentan’dan elde edilen verim değerleri yaklaşık 896.4 kPa’dan itibaren R141b’ye göre daha yüksektir. Grafiksel eğrisi yaklaşık 1079 kPa’dan itibaren n-heptan’ın altına düşen R141b ile n-oktan akışkanlarının ORÇ termal verimleri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte azalmakta ve 1200 kPa’da minimum değeri almaktadır.

3.durumda ara basınç değişimiyle akışkanlardan elde edilen proses termal verim değerleri 2.duruma göre daha yüksektir. Ara basınçtaki değişim, R141b ve R123 haricindeki diğer akışkanların proses termal verimlerinde azalmaya neden olmaktadır. Proses termal veriminin, R123 için ara basınç arttığında %71.19’dan %73.51’e yükseldiği görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek proses termal verimini göstermektedir. Diğer taraftan, en düşük proses termal verimi 1200 kPa’da R718 için meydana gelir ve 850 kPa’lık basınç artışı için %69.61’den %59.02’ye düşer. Basınç artışı ile proses termal verimdeki en büyük değişim, çalışma akışkanı R718’de görülmektedir. 410.7 kPa’dan itibaren grafiksel eğrideki artıştan dolayı R141b’nin verim değerleri Metanol’dan daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır. 350 kPa’da grafiksel eğrileri birbirine yakın olan R123 ile Metanol akışkanlarının proses ekserji verim değerleri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artarak 1200 kPa’da maksimum değere ulaşmaktadır. 850 kPa’lık bir basınç artışı için Metanol ve Izopentan arasındaki fark minimum seviyeye ulaşırken, n-pentan ile Izopentan arasındaki fark maksimum değerini almaktadır. N-pentan’ın kendisine çok yakın Izopentan’a göre yüksek olan verim değerleri yaklaşık 410.7 kPa’dan itibaren Izopentan’ın altına düşmektedir. Grafiksel eğrileri belirlenen basınç aralığı için birbirine yakın şekilde devam

eden n-heptan, n-oktan ve R718 akışkanlarının aralarında ilişki yaklaşık 410.7 kPa'dan itibaren değişip R718'in grafiksel eğrisi n-oktan'ın ve diğer tüm akışkanların altına düşerek proses ekserji verimi 1200 kPa'da R718 ile minimum değeri almaktadır.

Tüm akışkanların CHP termal verim değerleri ara basınçtaki artış ile azalmaktadır. 2.durumda ara basıncın bir fonksiyonu olarak akışkanlardan elde edilen CHP termal verim değerleri 3.duruma göre daha düşüktür. CHP termal verimi, R123 için ara basınçtaki artışla birlikte %81.34'ten %78.05'e düşmektedir. Bunun yanı sıra R123 akışkanı en yüksek CHP termal verimi göstermektedir. En düşük CHP ekserji verimi ise çalışma akışkanı R718 için meydana gelir ve ara basıncın 350 kPa'dan 1200 kPa'a çıkarılmasıyla %74.91'den %63.75'e düşer. Basınç artışı ile CHP ekserji verimindeki en büyük azalma, %76.31'den %64.93'e düşen n-oktan için meydana gelmektedir. Akışkanların grafiksel eğrileri arasındaki fark genel olarak basınçtaki değişimle beraber daha belirginleşmektedir. Izopentan ile n-pentan akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark yaklaşık 1079 kPa'da azaldıktan sonra tekrar basınç artışıyla birlikte artmaktadır. N-oktan ile R718 ve n-pentan ile Metanol akışkanlarının verim değerleri arasındaki fark ise sırasıyla yaklaşık 592.9 kPa ve 835.7 kPa ara basınç değerine kadar artıp sabit kaldıktan sonra azalma eğilimindedir. Azalmayla birlikte n-oktan ile R718 arasındaki fark başlangıç değerinin altına düşerken, n-pentan ile Metanol akışkanlarının arasındaki fark azalmaya rağmen başlangıç değerinin altına düşmemiştir.



Şekil 5.63: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için ara basıncın bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri.

3.durum için ara basınç değişiminin ekserji verimlerine etkisi Şekil 5.35'te gösterilmektedir. 3.durumda ara basınca bağlı olarak akışkanlardan elde edilen ORÇ ekserji verim değerleri 2.duruma göre daha düşükken proses ve CHP ekserji verim değerleri 2.duruma göre daha yüksektir. Ara basınçtaki artış R718 haricinde diğer akışkanların ORÇ ekserji verimlerinde belirlenen basınç aralığında sürekli azalmaya neden olmaktadır. R718'in ORÇ ekserji verim değerleri yaklaşık 592.9 kPa'a kadar artarken bu basınç değerinden itibaren azalma eğilimindedir. Belirlenen basınç aralığında ara basıncın R718'in ORÇ ekserji verimindeki toplam etkisi grafiksel eğrinin yaklaşık 714.3 kPa'dan itibaren başlangıç değerinin altına düşmesine bağlı olarak azalma şeklinde görülmektedir. Metanol'ün grafiksel eğrisi yaklaşık 410.7 kPa'dan itibaren n-oktan'ın altına düşmekte ve giderek R718'e yaklaşmaktadır. Metanol ve R718 akışkanlarının ORÇ ekserji verim değerleri arasındaki ilişki yaklaşık 1018 kPa'dan itibaren değişerek Metanol'ün grafiksel eğrisi R718'in altına düşmektedir. ORÇ ekserji veriminin minimum değeri, %10.06 olarak 1200 kPa'da Metanol akışkanından elde edilmiştir. ORÇ ekserji verimindeki en belirgin değişim %24.14'ten %11.4'e düşen R141b akışkanında görülmektedir. 350 kPa'da R141b için %24.14 ile en yüksek ORÇ ekserji verimi sağlanmıştır.

Yüksek ara basınçta İzopentan ve n-pentan'ın ORÇ ekserji verimleri hemen hemen aynıdır. R123'ün grafiksel eğrisi İzopentan ve n-pentan akışkanlarının grafiksel eğrilerinin sırasıyla yaklaşık 653.6 kPa ve 714.3 kPa basınç değerlerinden itibaren altına düştükten sonra n-heptan'a doğru yaklaşmaktadır. N-heptan'ın ORÇ ekserji verim değerleri yaklaşık 835.7 kPa'dan itibaren R123'ten daha yüksektir. R123 ve n-oktan akışkanlarının ORÇ ekserji verim değerleri arasındaki fark, basınç değişimine bağlı olarak yaklaşık 957.1 kPa'a kadar azalmakta ve bu basınçtan itibaren R123'ün grafiksel eğrisinin n-oktan'ın altına düşmesiyle artmaktadır. Metanol ile yaklaşık 1139 kPa'dan itibaren R718'in grafiksel eğrisi altına düşen R123'ün ORÇ ekserji verimleri arasındaki fark azalarak 1200 kPa'da minimum değere ulaşmaktadır. Yaklaşık 835.7 kPa'a kadar maksimum ORÇ ekserji verim değerleri sağlayan R141b'nin grafiksel eğrisi bu basınçtan itibaren İzopentan'nın altına düşmektedir. N-pentan ile R141b akışkanlarının ORÇ ekserji verimleri arasındaki ilişki yaklaşık 896.4 kPa'dan itibaren değişerek n-pentan'dan daha yüksek ORÇ ekserji verim değerleri elde edilmektedir. Grafiksel eğrisi yaklaşık 1079 kPa'dan itibaren n-heptan'ın altına düşen R141b ile n-oktan akışkanlarının ORÇ ekserji verimleri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte azalmakta ve 1200 kPa'da minimum değeri almaktadır.

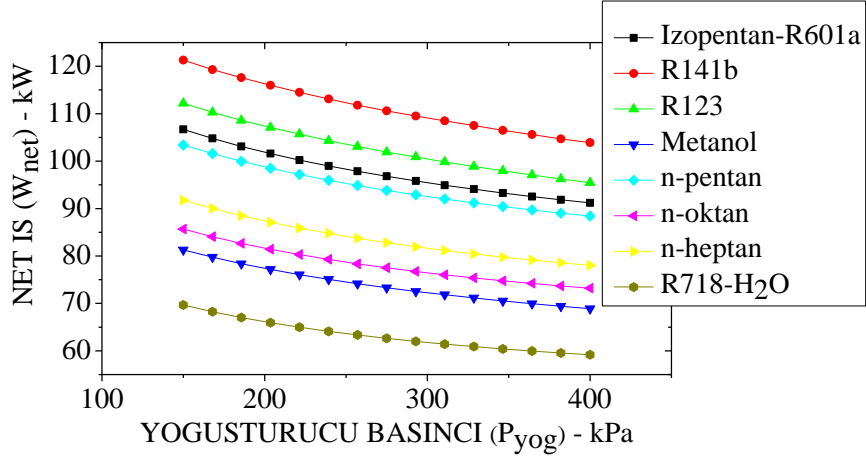
Ara basınçtaki değişim, diğer akışkanların proses ekserji verimlerinde azalmaya neden olurken R141b ve R123 akışkanlarında farklı olarak proses ekserji veriminde artış sağlamıştır. Proses ekserji veriminin, R123 için ara basınç arttığında %16.96'dan %18.01'e yükseldiği görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek proses ekserji verimini göstermektedir. 350 kPa'da grafiksel eğrileri birbirine yakın olan R123 ile Metanol akışkanlarının proses ekserji verim değerleri arasındaki fark basınç artışıyla birlikte artarak 1200 kPa'da maksimum değere ulaşmaktadır. Metanol'ün proses ekserji verim değerlerinin azaldığı basınç noktasında R141b'nin proses ekserji verim değerlerinin artması sonucunda Metanol'ün grafiksel eğrisi 410.7 kPa'dan itibaren R141b'nin altına düşmektedir. Metanol ile İzopentan akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark basınç artışıyla ters orantılı bir şekilde azalmakta ve bu iki akışkanın proses ekserji verimi 1200 kPa'da aynı değeri almaktadır. 350 kPa'da proses ekserji verimi aynı olan İzopentan ile n-pentan akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark basınç artışıyla belirginleşmektedir. Belirlenen basınç aralığında grafiksel eğrileri birbirine yakın şekilde devam eden n-heptan, n-oktan ve R718 akışkanlarının proses ekserji verimleri arasındaki ilişki yaklaşık 410.7 kPa'dan itibaren değişmekte ve R718'in grafiksel eğrisi diğer tüm akışkanların altına düşmektedir. Proses ekserji verimi 1200 kPa'da R718 ile %11.95'lik minimum değerini

almaktadır. Bununla birlikte proses ekserji verimindeki en büyük değişim, 850 kPa'lık basınç artışı için %16.27'den %11.95'e düşen çalışma akışkanı R718'de görülmektedir.

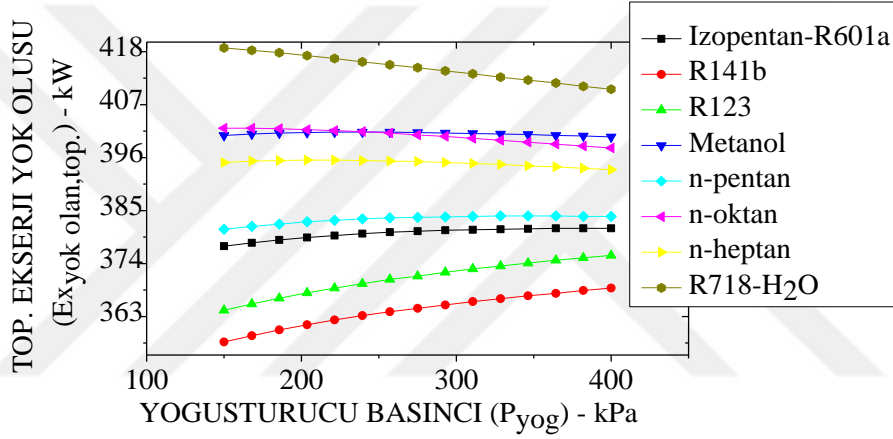
Ara basınçtaki artış ile tüm akışkanların CHP ekserji verim değerleri azalmaktadır. CHP ekserji veriminin, R141b için ara basınç arttığında %40.76'dan %28.85'e düştüğü görülmektedir. Basınç artışı ile CHP ekserji verimindeki en büyük azalma, çalışma akışkanı R141b için meydana gelmektedir. Azalmaya rağmen R141b'nin grafiksel eğrisi diğer akışkanlarının üstündedir. En düşük CHP ekserji verimi R718 için meydana gelir ve CHP ekserji verimi 850 kPa'lık basınç artışı için %28.13'ten %22.54'e düşer. R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki fark yaklaşık 532.1 kPa'a kadar basınç artışıyla birlikte artarken bu basınç değerinden itibaren azalma eğilimindedir. Azalmaya bağlı olarak bu iki akışkanın arasındaki fark yaklaşık 653.6 kPa'dan itibaren başlangıç değerinin altına düşmektedir. R123 ve İzopentan ile İzopentan ve n-pentan akışkanlarının CHP ekserji verimleri arasındaki fark ara basınçtaki artışla ters orantılı şekilde sürekli azalma eğilimi göstermektedir. N-heptan ve Metanol akışkanlarının CHP ekserji verimi değişim grafikleri arasındaki fark yaklaşık 592.9 kPa'a kadar artıp 592.9- 653.6 kPa basınç aralığında sabit kaldıktan sonra azalarak 1200 kPa'da minimum değeri almaktadır. Bunun tersi şekilde Metanol ile n-oktan akışkanlarının verim değerleri arasındaki fark yaklaşık 653.96 kPa'a kadar azalıp 653.6-714.3 kPa basınç aralığında sabit kaldıktan sonra artma eğilimi göstermektedir. Metanol ve n-oktan akışkanlarının CHP ekserji verimleri arasındaki fark artarken n-oktan'ın grafiksel eğrisi R718'e yaklaşmaktadır.

### **5.3.3 Yoğuşturucu Basınç Değişiminin Etkisi**

Şekil 5.36, 3.durum için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP sisteminden elde edilen net iş çıktısını göstermektedir. Aynı yoğuşturucu basıncı için 3.durumda akışkanlar elde edilen net iş değerleri 1. ve 2.duruma göre daha düşüktür. Yoğuşturucu basıncı arttığında net iş çıktısı tüm akışkanlar için azalmaktadır. Net iş çıktısının, R141b için ara basınç arttığında 121.3 kW'tan 103.9 kW'a düştüğü görülmektedir. Basınç artışı ile net işteki en büyük azalma, çalışma akışkanı R141b için meydana gelmektedir. Azalmaya rağmen R141b'nin grafiksel eğrisi diğer akışkanlarının üstündedir. En düşük net iş çıktısı R718 için meydana gelir ve 250 kPa'lık basınç artışı için 69.67 kW'tan 59.17 kW'a düşer.



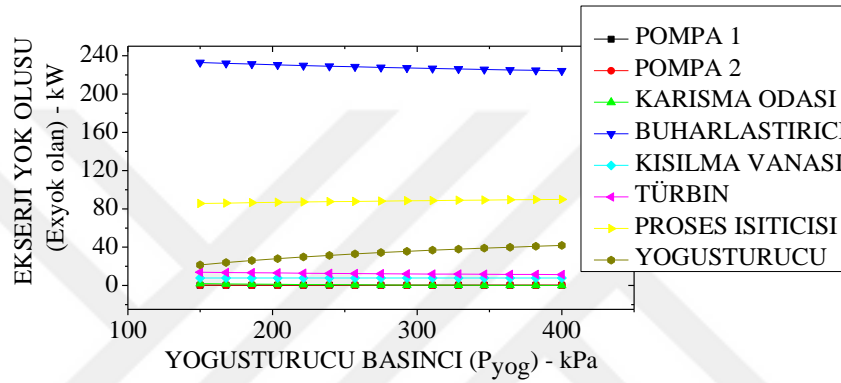
Şekil 5.64: 3.durum için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak net iş çıkışı.



Şekil 5.65: 3.durumda farklı organik çalışma akışkanları için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak toplam ekserji yok etme oranı.

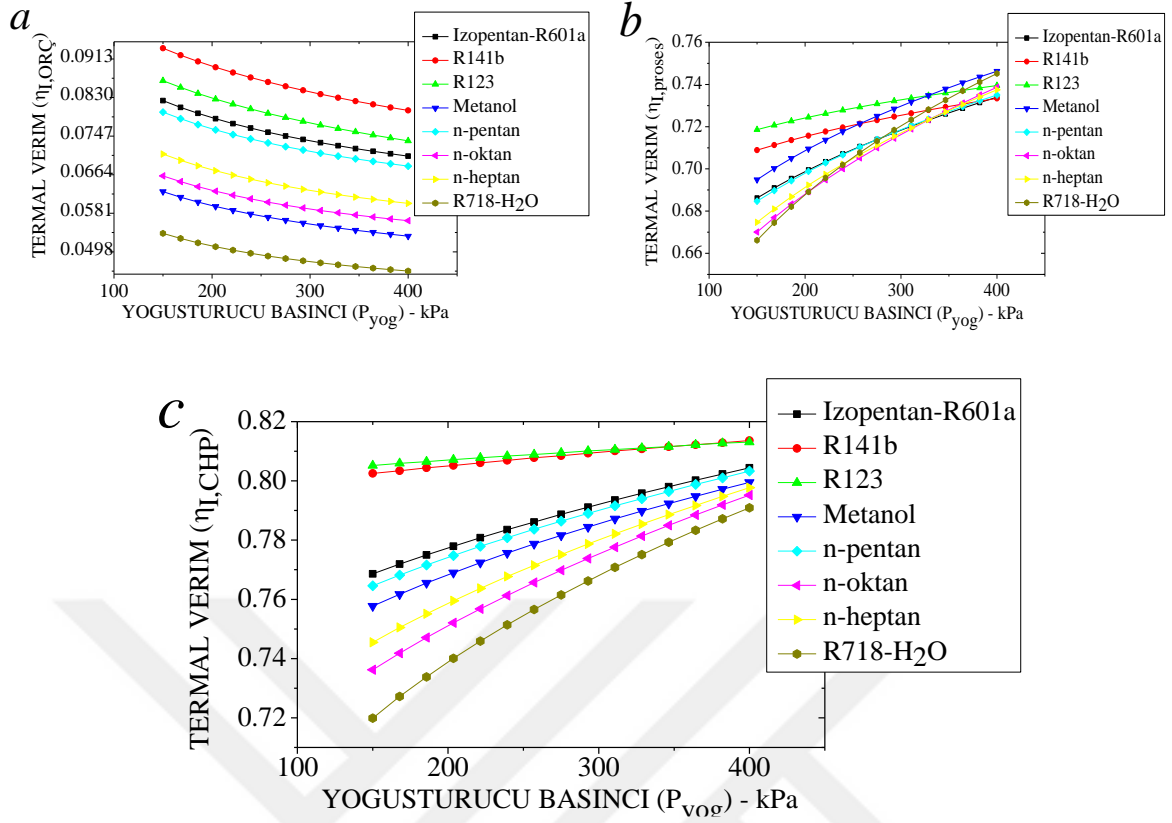
Şekil 5.37’de yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak çevrimde meydana gelen toplam ekserji yok oluşu görülmektedir. Yoğuşturucu basıncındaki artış, Izopentan, R141b ve R123 akışkanlarının kullanıldığı sistemde ekserji yok oluşu artırırken, n-oktan ve R718’de azalmaya neden olmaktadır. Bu azalma ve artma sırasında Izopentan ve n-oktan’ın grafiksel eğrileri sırasıyla 364.3-400 kPa ve 150-167.9 kPa basınç aralığında sabit kalmaktadır. Metanol’ün ekserji yok oluş değerleri basınç değişimiyle birlikte yaklaşık 221.4 kPa’a kadar artmış ve 221.4-257.1 kPa aralığında sabit kaldıktan sonra azalma eğilimi göstermiştir. Bu azalmaya bağlı olarak Metanol’ün ekserji yok oluşu 364.3 kPa’da başlangıç değeri ile aynı değeri aldıktan sonra grafiksel eğri başlangıç değerinin altına düşmektedir. Benzer şekilde n-heptan’ın grafiksel eğrisi öncelikle artma eğilimindeyken, toplam ekserji yok oluş oranı 203.6-221.4 kPa basınç aralığında sabit kaldıktan sonra azalmaya başlamıştır. Bununla birlikte 292.9 kPa’da tekrar başlangıç değerine dönen

grafiksel eğri bu basınç değerinden sonra başlangıç değerinin altına düşmektedir. Metanol ve n-heptan akışkanlarından farklı olarak; n-pentan'ın ekserji yok oluş değerleri basınç artışıyla artıp 328.6-364.3 kPa aralığında sabit kaldıktan sonra azalmış ama belirlenen basınç aralığında başlangıç değerinin altına düşmemiştir. Sonuç olarak Metanol ve n-heptan akışkanlarında yoğusturucu basıncındaki artış, ekserji yok oluşunda azalmaya neden olurken, n-pentan akışkanında yoğusturucu basıncının etkisi artış şeklinde olmuştur. N-oktan'ın grafiksel eğrisi yaklaşık 257.1 kPa'dan itibaren Metanol'ün aşağısına düşmekte ve aralarındaki fark basınç artışıyla birlikte artmaktadır.



Şekil 5.66: 3.durumda R123 için yoğusturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı.

Şekil 5.38'de 3.durumda R123 için yoğusturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ/CHP bileşenlerinin ekserji yok etme oranı gösterilmektedir. Yoğusturucu basıncının değişmesiyle pompa 2'nin ekserji yok etme hızı değişmemektedir. Yoğusturucu basıncının artmasıyla yoğusturucunun, kısılma vanasının ve proses ısıtıcısının ekserji yok etme oranı artarken, türbinin, karışma odasının, pompa 1'in ve buharlaştırıcının ekserji yok etme hızı, basınç arttıkça azalmaktadır. 150 kPa ile 400 kPa basınç aralığı için en yüksek ekserji yok etme oranı buharlaştırıcıda meydana gelmektedir. Yaklaşık 310.7 kPa'dan itibaren karışma odasının ekserji yok etme oranı pompa 2'den daha düşüktür. Karışma odasının ekserji yok etme hızı 400 kPa'lık yoğusturucu basıncına kadar düşer, bu basınç değerinde pompa 1'in grafiksel eğrisinin altına düşerek en düşük ekserji yok etme oranını gösterir.



Şekil 5.67: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) termal verimlilikleri.

Şekil 5.39, 3.durum için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak termal verimleri göstermektedir. Sistem, tüm akışkanlar için 150 kPa'da en iyi ORÇ termal verimi sağlar. 2.durumla karşılaştırıldığında yoğuşturucu basıncındaki değişim ile elde edilen ORÇ termal verim değerleri 3.durumda tüm akışkanlar için daha düşüktür. ORÇ termal veriminin, en yüksek ORÇ termal verimini gösteren R141b için yoğuşturucu basıncı arttığında %9.361'den %8.022 'ye düştüğü görülmektedir. Öte yandan en düşük ekserji yok etme oranı R718 için meydana gelir ve 250 kPa'lık basınç artışı için %5.378'den %4.568'e düşer. Yoğuşturucuda 250 kPa'lık basınç artışı ile ORÇ termal verimde maksimum azalma R141b akışkanında meydana gelmiştir. ORÇ termal verimlerin aksine yoğuşturucu basıncındaki artışla birlikte proses termal verimleri artmaktadır. Proses termal verimleri düşük yoğuşturucu basınçlarında birbirine yakın n-oktan, n-heptan ve R718 akışkanları arasında R718 en düşük termal verim değerleri sağlarken yaklaşık 221.4 kPa'da n-oktan'ı ve 257.1 kPa'da n-heptan'ı geçerek daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu üç akışkan arasında n-oktan ve n-heptan arasındaki ilişki 346.4 kPa'dan sonra değişmiş olup bu basınçtan itibaren n-oktan'dan daha yüksek değerler elde edilmiştir. 325 kPa ile 385 kPa

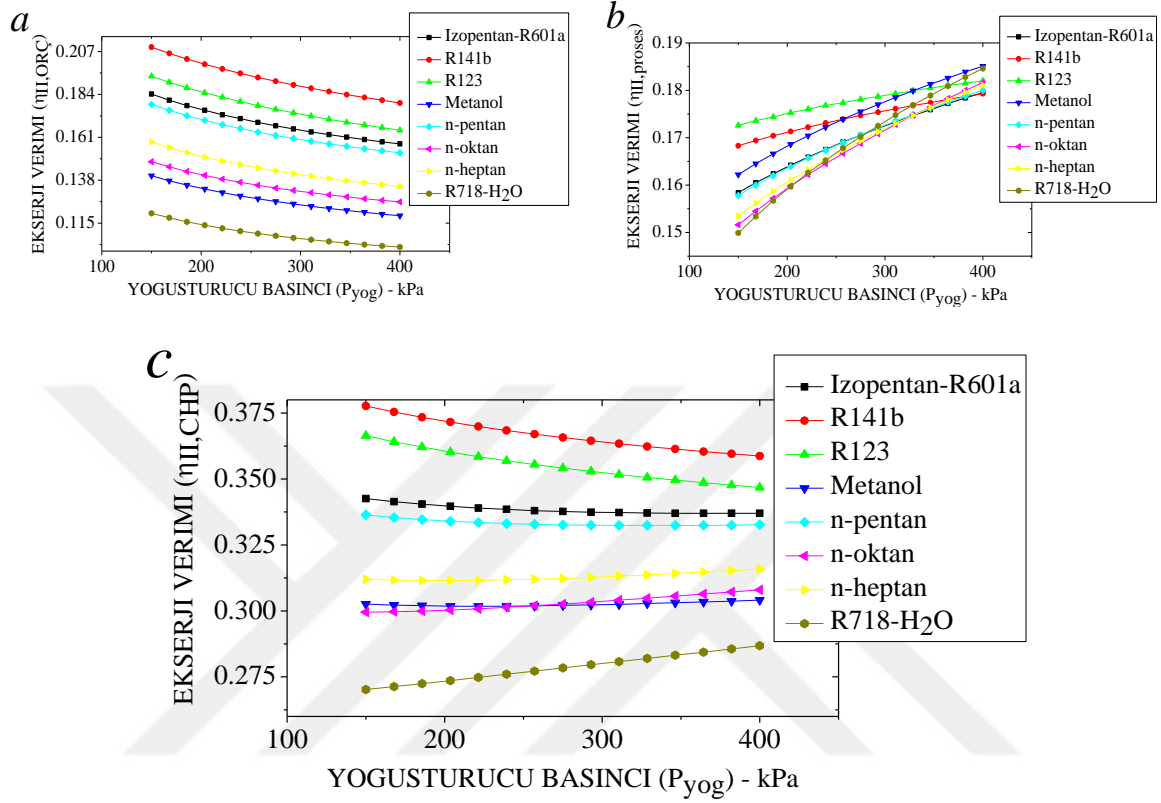


basınç aralığında n-oktan ve n-heptan akışkanlarının grafiksel eğrileri İzopentan, n-pentan ve R141b'yi geçerek R123'e yaklaşmıştır.

Birbirine yakın değerler sağlayan İzopentan ve n-pentan'ın proses termal verimleri arasındaki fark basınç artışıyla ters orantılı bir şekilde azalmakta ve 275 kPa'da akışkanların verimleri aynı değeri almaktadır. Bu basınç değerinden itibaren n-pentan'ın verimi daha yüksek değerlere ulaşmakta olup iki akışkan arasındaki fark yoğunlaştırıcı basıncı artışıyla birlikte artmaktadır. Buna ek olarak İzopentan ve n-pentan'ın grafiksel eğrileri 380 kPa ile 400 kPa basınç aralığında R141b'yi geçerek n-heptan'a doğru yaklaşmaktadır. R141b ve R123 akışkanlarının proses termal verim değerlerinde basınç artışıyla birlikte görülen değişim diğer akışkanlara göre daha az olup bu iki akışkanın grafiksel eğrileri belirlenen basınç aralığında birbirlerine paralel şekilde ilerlemektedir. Metanol'den elde edilen proses termal verim değerleri yoğunlaştırıcı basıncının 150 kPa'dan 400 kPa'a çıkarılmasıyla giderek yükselmekte ve 257.1 kPa ve 328.6 kPa basınç değerlerinde sırasıyla R141b ve R123 akışkanlarıyla aynı değeri aldıktan sonra Metanol'ün grafiksel eğrisi R141b ve R123 geçerek 400 kPa'da maksimum değere ulaşmaktadır. R718'in proses termal verim değerleri diğer akışkanlara göre başlangıçta daha düşük olsada yoğunlaştırıcı basıncının artmasıyla birlikte grafiksel eğri hızlı bir şekilde artarak 256-400 kPa basınç aralığında diğer akışkanları geçip Metanol'e yaklaşmıştır. Proses termal verimi, R141b akışkanı için 250 kPa'lık basınç artışında %73.34 ile minimum değerde kalırken, 400 kPa'da Metanol akışkanı için %74.63 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. 150 ile 400 kPa basınç değerleri arasında proses termal verimdeki en büyük artış, %66.62'den %74.52'ye çıkan R718 akışkanının kullanılmasıyla elde edilmektedir.

Tüm çalışma akışkanları için yoğunlaştırıcı basıncındaki artışın proses termal verimde sağladığı artışın, ORÇ termal verimde neden olduğu azalmadan daha yüksek olmasına bağlı olarak sistemin CHP termal verimi artmaktadır. 3.durumda akışkanlardan elde edilen CHP termal verim değerleri 2.duruma göre daha yüksektir. CHP termal verimdeki artış R141b ve R123'e göre diğer akışkanlarda daha belirgindir. Diğer akışkanların basınç artışıyla birbirlerine yaklaşan grafiksel eğrileri 400 kPa'dan sonra da artmaya devam ederken, R141b ve R123 akışkanların grafiksel eğrileri yaklaşık 300 kPa'dan sonra basınç çizgisine paralel bir görünüm almaya başlamıştır. 364.3 kPa'da R123 ile aynı değeri aldıktan sonra R141b akışkanı R123'ten daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. CHP termal verimi, 250 kPa'lık basınç artışında R718 için %79.09 ile minimum değerde kalırken, 400

kPa’da R141b akışkanı için %81.36 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. 150 ile 400 kPa basınç değerleri arasında CHP termal verimdeki en büyük artış, %71.99’dan %79.09’a çıkan R718 akışkanının kullanılmasıyla elde edilmektedir.



Şekil 5.68: 3.durumda farklı çalışma akışkanları için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ (a), proses (b), CHP (c) ekserji verimlilikleri.

3.çalışma durumu için yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ekserji verimleri Şekil 5.40'ta gösterilmektedir. 3. durum için sistemin ORÇ ekserji verimi 3. duruma göre daha düşük olmasına rağmen proses ve CHP ekserji verim değerleri daha yüksektir. Tüm akışkanlar için ORÇ ekserji verimi, 150 kPa'lık yoğuşturucu basıncında maksimum düzeydeyken 400 kPa'da minimum değere almaktadır.. Sistemin ORÇ ekserji verimi ısı veriminden daha iyi olmasına rağmen proses ve CHP ekserji verimleri termal verim değerlerine göre daha düşüktür. Yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ ekserji verim grafiklerinde en belirgin değişiklik 150 kPa ile 250 kPa basınç aralığında görülmektedir. Bu aralıktan sonra akışkanların grafiksel eğrileri basınç çizgisine paralel bir görünüm almaya başlamaktadır. ORÇ ekserji veriminin, R141b için yoğuşturucu basıncı arttığında %20.94'ten %17.94'e düştüğü görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek ORÇ ekserji verimini göstermektedir. En düşük ekserji yok etme oranı R718 için meydana

gelir ve ORÇ ekserji verimi, 250 kPa'lık basınç artışı için yaklaşık %12.03'ten %10.22'ye düşer. ORÇ ekserji verimindeki maksimum azalma, R141b akışkanında görülmüştür.

Yoğuşturucu basıncındaki değişim, proses ekserji verim grafiklerinde artış şeklinde kendini göstermektedir. R141b ile Metanol akışkanlarının proses ekserji verimleri arasındaki fark bu iki akışkanın grafiksel eğrilerinin yaklaşık 257.1 kPa'da kesiştikten sonra Metanol'ün proses ekserji veriminin daha yüksek değerler ulaşmasıyla basınçtaki artışla birlikte artmaktadır. Metanol ile R141b akışkanlarının proses ekserji verim değerleri arasındaki fark artarken, R123 ve Metanol arasındaki farkbasınç artışıyla ters orantılı bir şekilde azalmaktadır. En yüksek proses ekserji verim sonuçları yaklaşık 328.6 kPa'a kadar R123'ten elde edilirken, bu basınçta Metanol ile R123 akışkanlarının proses ekserji verimlerinin aynı değeri aldıktan sonra Metanol'ün grafiksel eğrisinin R123'ü geçmesiyle değişmektedir. Proses ekserji verimi, R141b akışkanı için 250 kPa'lık basınç artışında %17.93 ile minimum değerde kalırken, 400 kPa'da Metanol akışkanı için %18.51 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. Grafiksel eğrileri başlangıçta birbirine yakın n-oktan, n-heptan ve R718 akışkanları arasında R718 en düşük proses ekserji verim değerleri sağlarken yaklaşık 221.4 kPa'da n-oktan'ı ve 257.1 kPa'da n-heptan'ı geçerek daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. 328.6 kPa'da proses ekserji verimleri eşit olan Izopentan, n-heptan ve n-oktan akışkanlarının grafiksel eğrileri arasındaki ilişki basınç artışıyla birlikte değişerek Izopentan'ın proses ekserji verim değerleri n-oktan ve n-heptan'ın altına düşmektedir. Aynı zamanda bu basınç değerinden sonra n-heptan'ın grafiksel eğrisi n-oktan'ın altına düşmektedir. 345-385 kPa basınç aralığında n-oktan ve n-heptan akışkanlarının proses ekserji verim değerleri n-pentan ve R141b'yi geçerek R123'e yaklaşmıştır.

Yaklaşık 275 kPa'dan itibaren n-pentan'ın proses ekserji verimi Izopentan'dan daha yüksek değerlere ulaşmakta olup iki akışkan arasındaki fark yoğuşturucu basıncı artışıyla birlikte artmaktadır. Izopentan ile n-pentan akışkanlarının proses ekserji verim değerleri 380-400 kPa basınç aralığında R141b'yi geçerek n-heptan'a doğru yaklaşmaktadır. Yoğuşturucu basıncının 150 kPa'dan 400 kPa'a çıkarılmasıyla R718'in başlangıçta diğer akışkanlara göre daha düşük olan proses ekserji verim değerleri hızlı bir şekilde artarak 256-400 kPa basınç aralığında diğer akışkanları geçip Metanol'e yaklaşmıştır. 150 ile 400 kPa basınç değerleri arasında proses ekserji verimindeki en büyük artış, %14.99'dan %18.46'ya çıkan R718 akışkanının kullanılmasıyla elde edilmektedir. Diğer akışkanlar ile

karşılaştırıldığında R141b ve R123 akışkanlarının proses ekserji verimlerinde basınç artışıyla birlikte görülen değişim diğer akışkanlara göre daha az olup bu iki akışkanın grafiksel eğrileri 150-400 kPa basınç aralığında birbirlerine paralel şekilde ilerlemektedir. Yoğuşturucu basıncındaki artış R141b ile R123 ve n-oktan ile R718 akışkanlarının CHP ekserji verimlerinde sırasıyla sürekli azalma ve artma sağlarken, diğer akışkanların grafiksel eğrilerindeki etkisi basınç noktalarına göre değişiklik göstermektedir. İzopentan'ın CHP ekserji verim değerleri yaklaşık 346.4 kPa'a kadar azalırken 346.4-400 kPa basınç aralığında basınçtaki artışa rağmen sabit kalmıştır. N-pentan'ın grafiksel eğrisi yaklaşık 310.7 kPa'a kadar azalırken 310.7-364.3 kPa basınç aralığında sabit kaldıktan sonra artma eğilimindedir. Benzer şekilde Metanol ve n-heptan akışkanlarının CHP ekserji verim değerleri azalırken sırasıyla 203.6-239.3 kPa ve 185.7-203.6 kPa basınç aralıklarında sabit kaldıktan sonra basınç artışıyla birlikte artan bir eğilim göstermiştir. Metanol ve n-heptan akışkanlarının CHP ekserji verimleri bu artışla birlikte başlangıç değerinin üstüne çıkarak 400 kPa'da maksimum değere ulaşırken, yoğuşturucu basıncının n-pentan'ın CHP ekserji verimine toplam etkisi grafiksel egrideki artışa rağmen azalma şeklinde kendini göstermektedir. N-oktan'ın grafiksel eğrisi Metanol'ün proses ekserji verim değerlerindeki artışın n-oktan'dan daha az olmasına bağlı olarak yaklaşık 257.1 kPa'dan itibaren Metanol'ü geçerek n-heptan'a yaklaşmaktadır.

Tablo 5.29: Gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşullarda ORÇ/CHP için çevrim değerleri (Nami vd., 2017; Ustaoglu, 2020).

Komponent	Parametre	Gerçek	İdeal	Kaçınılmaz
Pompa 1	$\eta_{\text{pomp 1}}$	%85	%100	%95
Pompa 2	$\eta_{\text{pomp 2}}$	%85	%100	%95
Buharlaştırıcı	$\Delta P_{\text{BUH}}$	%2	%0	%1
Kısılma vanası	-	İzentalpik	İzentropik	İzentalpik
Proses ısıtıcısı	$\Delta P_{\text{ARA}}$	%1	%0	%0.5
Türbin	$\eta_{\text{türb}}$	%85	%100	%95
Yoğuşturucu	$\Delta P_{\text{YOĞ}}$	%1	%0	%0.5

Tablo 5.1'de belirlenen üç enerji üretim projeksiyonu dikkate alınarak ORÇ/CHP sisteminde bulunan bileşenlerin ideal, gerçek ve kaçınılmaz koşullarda çevrim değerleri gösterilmektedir. Gerçek ve kaçınılmaz şartların dikkate alınmasındaki amaç ileri ekserji

analizi için yapılan hesaplamalarda önlenebilir/kaçınılamaz kısımların belirlenmesidir. Bunun yanı sıra ideal ve gerçek şartlar ise bileşenlerdeki ekserji yıkımının içsel/dışsal kısımlarının bulunmasında kullanılmaktadır. Gerçek ve ideal şartlar arasında olan kaçınılamaz çevrim şartları hesaplanırken ideal duruma yakın değerler alınır.  $\Delta P_{YOĞ}$ ,  $\Delta P_{ARA}$  ve  $\Delta P_{BUH}$  sırasıyla yoğunlaştırıcunun, proses ısıtıcısının ve buharlaştırıcının kaçınılamaz ve gerçek basınç farkı olup ideal koşul ile arasındaki farkı ifade etmektedir. Tablo 5.2-5.3'te sırasıyla 1.durumda R141b akışkanı için gerçek ve kaçınılamaz koşullarda ORÇ/CHP'nin farklı noktalarına ait termodinamik özellikler ve kütle akış hızları görülmektedir.

Tablo 5.30: 1.durum için gerçek koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikler ve kütle akış hızları.

Nokta	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	$\dot{m}$ (kg/s)	e (kJ/kg)	$\dot{E}$ (kW)
1	136.1	1400	349.8	0.997	5	60.91	304.5
3	136.1	1400	349.8	0.997	5	60.91	304.5
6	46.44	150	309.4	1.019	5	13.82	69.08
8	43.71	150	89.51	0.3255	5	0.7177	3.588
9	44.72	1400	90.74	0.3294	5	0.7965	3.983
11	44.72	1400	90.74	0.3294	5	0.7965	3.983
12	24	101.3	100.7	0.3529	32.86	0.004923	0.1617
13	32	101.3	134.1	0.464	32.86	0.353	11.6
16	398.9	150	683.7	7.582	5	170.3	851.3
17	150	150	424.7	7.101	5	54.45	272.2

Tablo 5.31: 1.durum için kaçınılamaz koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikleri ve kütle akış hızları.

Nokta	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	$\dot{m}$ (kg/s)	e (kJ/kg)	$\dot{E}$ (kW)
1KAÇ	136.6	1414	349.5	0.9957	5	60.97	304.8
3KAÇ	136.6	1414	349.5	0.9957	5	60.97	304.8
6KAÇ	43.54	149.2	304.2	1.003	5	13.39	66.94
8KAÇ	43.54	149.2	89.31	0.3249	5	0.7052	3.526
9KAÇ	44.46	1414	90.42	0.3284	5	0.7759	3.879
11KAÇ	44.46	1414	90.42	0.3284	5	0.7759	3.879
12KAÇ	24	101.3	100.7	0.3529	32.1	0.004923	0.158
13KAÇ	32	101.3	134.1	0.464	32.1	0.353	11.33
16KAÇ	398.9	150	683.7	7.582	5	170.3	851.3
17KAÇ	150	150	424.7	7.101	5	54.45	272.2

Tablo 5.32: 1.durum için ORÇ/CHP sisteminin gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşullardaki güç ve verimleri.

	<b>Gerçek</b>	<b>İdeal</b>	<b>Kaçınılmaz</b>
$\dot{W}_{POMPA\ 1}(kW)$	6.14	5.339	5.557
$\dot{W}_{TÜRBİN}(kW)$	202	239.6	226.7
$\dot{W}_{NET}(kW)$	195.8	234.3	221.1
$\dot{Q}_{BUH}(kW)$	1295	1295	1295
$\dot{Q}_{YOĞ}(kW)$	1100	1061	1074
$\dot{E}_{BUH}(kW)$	579.1	579.1	579.1
$\eta_{I,ORÇ}(\%)$	15.12	18.08	17.07
$\eta_{II,ORÇ}(\%)$	33.82	40.45	38.18

Tablo 5.4'te 1.durum için ORÇ/CHP sisteminin gerçek,ideal ve kaçınılmaz koşullardaki ısı, net güç, termal verimi ile ekserji verimi gösterilmiştir. Gerçek koşullar altında çevrimden elde edilen net iş çıkışı, türbinin izantropik veriminin diğer şartlarla kıyaslandığında daha düşük olmasına bağlı olarak ideal ve kaçınılmaz koşullara göre daha düşüktür. 1.durumda sistem basit ORÇ gibi çalıştığı için sadece elektrik üretimi ile elde edilen ORÇ termal ve ekserji verimleri incelenmiştir. Sistemin ORÇ termal ve ekserji verimleri tablodan görüldüğü gibi ideal koşullarda en yüksek değere ulaşmıştır. İdeal koşullarda ORÇ termal ve ekserji verimi sırasıyla %18.08 ve %40.45 değerindedir. Kaçınılmaz durumda teknolojik engeller dolayısıyla sırasıyla %17.07 ve %38.18 iken gerçek koşullarda ise bu verimler sırasıyla %15.12 ve %33.82 değerini almıştır. Sistemdeki her bir komponent için uygulanan geleneksel ekserji denklemlerinden elde edilen sonuçlara göre gerçek şartlarda 1. durum için sistemde toplam ekserji yıkımı 371.8 kW olarak hesaplanmıştır. Komponentlerde meydana gelen ekserji yıkımları en yüksekten düşüğe doğru şu şekilde sıralanmaktadır: buharlaştırıcı (278.5 kW-%74.91), yoğusturucu (54.05 kW-%14.54), türbin (33.48 kW-%9.005) ve pompa 1 (5.745 kW-%1.545).

Sistem veriminin artırılmasında ekserji yıkım oranının azaltılması önemli rol oynamaktadır. Buna bağlı olarak sistem komponentlerinin birbirleriyle olan etkileşimlerinin ve komponentlerin her birinin gerçek geliştirme potansiyelinin belirlenmesi amacıyla 1.durum için yapılan ORÇ/CHP sisteminin ileri ekserji analiz sonuçları Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

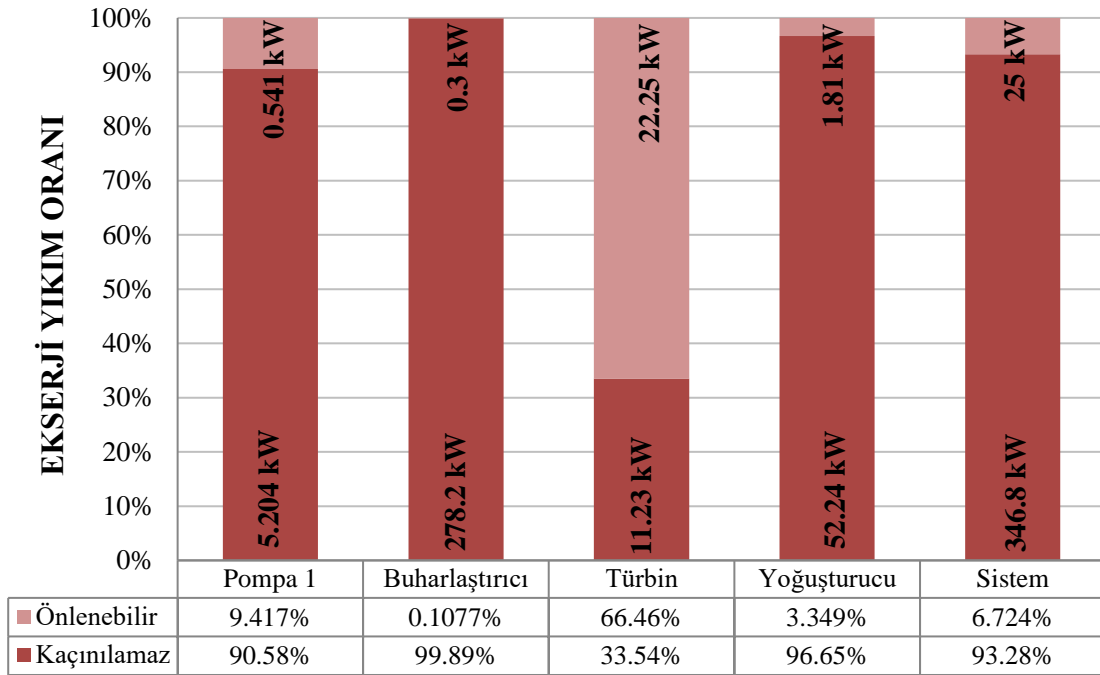
Tablo 5.33: 1.durum için ORÇ/CHP sisteminin ileri ekserji analizi sonuçları (kW).

Komponent	R141b				
	$\dot{E}_D(kW)$	$\dot{E}_D^{KAC}(kW)$	$\dot{E}_D^{ON}(kW)$	$\dot{E}_D^{IC}(kW)$	$\dot{E}_D^{DIS}(kW)$
Pompa 1	5.745	5.204	0.541	5.884	-0.139
Buharlaştırıcı	278.5	278.2	0.3	279.1	-0.6
Türbin	33.48	11.23	22.25	33.81	-0.33
Yoğuşturucu	54.05	52.24	1.81	52.15	1.9
Sistem	371.8	346.8	25	370.9	0.9

Geleneksel ekserji analizinden elde edilen sonuçlara göre 1.durum için sistemdeki toplam ekserji yıkımının %89.45'i buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda meydana gelmiştir. Ekserji yıkımının geri kalan kısmı pompa 1 ve türbinde gerçekleşmiştir. Toplam ekserji yıkımında en büyük paya sahip komponent olan buharlaştırıcıdaki ekserji yıkımının neredeyse tümü kaçınılmaz kısımdan oluşmaktadır. Ayrıca tüm sistem büyük oranda içsel (%99.76) ve kaçınılmaz (%93.28) ekserji yıkımlarına sahiptir. İçsel ekserji yıkımının tüm komponentler için dışsal kısımdan daha büyük olmasına bağlı olarak komponentlerin ekserji yıkımlarındaki en önemli faktörün, kendi içindeki tersinmezlikler olduğu söylenebilir. Dışsal ekserji yıkımları incelendiğinde, yoğuşturucunun en yüksek değere (1.9 kW) sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle, diğer komponentlerin verimlerindeki artış, bu komponentin ekserji yıkımında azalmaya ve dolayısıyla toplam sistem veriminde bir iyileşme sağlayabilir.

Sistemdeki komponentlerin birbirleriyle olan etkileşimleri olumsuz ya da olumlu olabilir. Bu etkiler, sistemde ilave tersinmezliklerin oluşmasına bağlı olarak komponent içerisindeki kütle akış değişikliklerinin veya malzeme akışlarının termodinamik özellik değişimlerinin bir sonucu olabilir. 1.durum için kojeneratif ORÇ sistemine bakıldığında komponentlerden bazılarının, ekserji yıkımından daha büyük içsel ekserji değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Sistem koşullarının ideal durumdan içsel duruma değiştirilmesi, pinch noktasındaki değişikliklere bağlı olarak bu iki durum arasındaki organik akışkanın kütle akışının değişmesine neden olmaktadır (Galindo vd., 2016). Sonuç olarak, içsel ekserji yıkımı buharlaştırıcı, türbin ve pompa için gerçek ekserji yıkımından daha yüksek çıkmaktadır (Tablo 5.5). Bununla birlikte Tablo 5.5 incelendiğinde sadece önlenemez kısmın azaltılabileceği dikkate alınarak toplam ekserji yıkımının 25 kW'lık kısmının azaltılabileceği görülmektedir. Diğer komponentlerden farklı olarak türbinde ekserjinin önlenemez kısmı (22.25 kW) kaçınılmaz kısımdan (11.23 kW) daha büyüktür (Şekil 5.41).

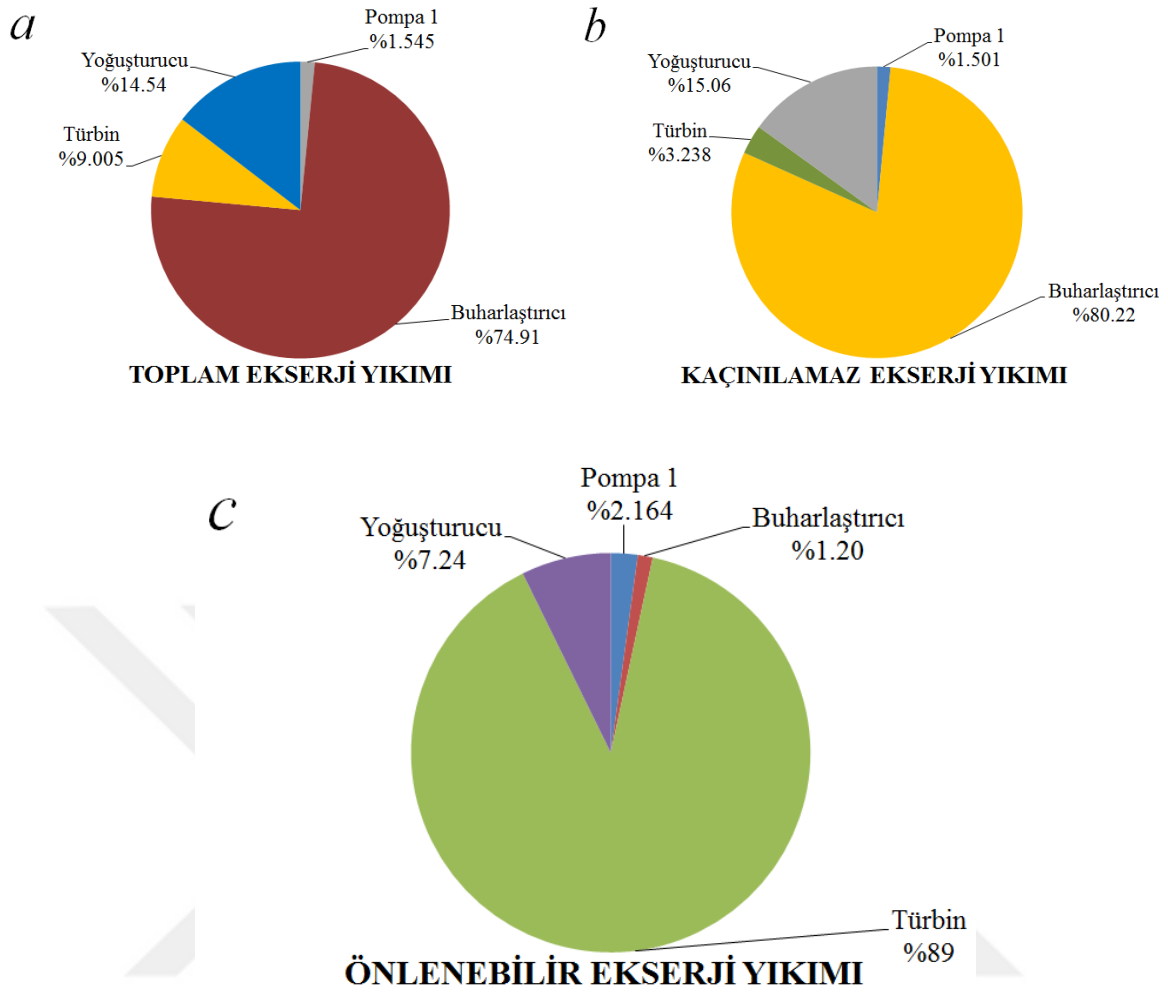
Bu komponent, sistemdeki diğer komponentlerde yapılacak teknik modifikasyonlar ile maksimum gelişme potansiyeline sahip olacaktır.



Şekil 5.69: 1.durumda önlenebilir ve kaçınılamaz ekserji yıkımlarının bileşenlerdeki ve sistemdeki yüzdesi (R141b).

Şekil 5.41’de 1. durumda önlenebilir ve kaçınılamaz ekserji yıkımlarının komponentlerdeki ve sistemdeki yüzdesi ve miktarı gösterilmiştir. Sistemde meydana gelen ekserji yıkımının çok büyük kısmı (%93.28) kaçınılamazdır. Buna bağlı olarak sistem veriminin iyileştirilmesinde komponentlerin her birine ne kadar odaklanılması gerektiği önemli rol oynamaktadır. En yüksek ekserji yıkım oranına sahip buharlaştırıcıdaki ekserji yıkımının neredeyde tümü kaçınılamaz kısımdan oluşmaktadır. Toplam ekserji yıkımının %9.005’lik kısmı türbinde meydana gelmesine rağmen, türbindeki önlenebilir ekserji toplam önlenebilir kısmın %89’una eşittir (22.25 kW). Pompa 1’deki önlenebilir kısım %9.417’dir. Fakat bu miktar çok düşüktür (0.541 kW).



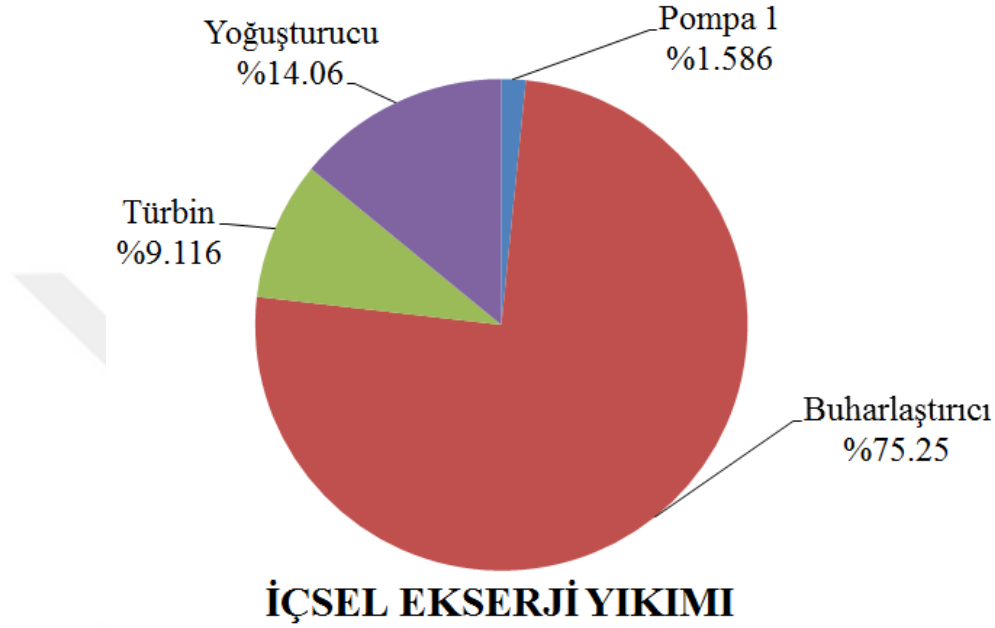


Şekil 5.70: 1.durumda bileşenlerin toplam (a), kaçınılamaz (b), önlenebilir (c) ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b).

Komponentlerin kaçınılamaz ekserji yıkımı, önlenebilir kısımdan farklıdır (Şekil 5.42). Kaçınılamaz kısım, teknolojik kısımtalara bağlı olarak komponentlerin maksimum olası performansına yakınlığı belirtir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda meydana gelen tüm yıkımlar neredeyse, 278.2 kW ve 52.24 kW ile kaçınılamaz yıkımın bir parçasıdır (Tablo 5.5). Kaçınılamaz kısımda en büyük pay (%80.22) 278.2 kW ile buharlaştırıcıya aittir. Bunu %15.06 (52.24 kW) ile yoğuşturucu takip etmektedir. Ekserji yıkımın en büyük payı kaçınılamaz tersinmezlik olarak ortaya çıkan bu bileşenleri sırasıyla %3.238 (11.23 kW) ile türbin,%1.501 (5.204 kW) ile pompa 1 takip etmektedir.

Sistem performansının iyileştirilmesinde odaklanılması gereken ilk komponent toplam önlenebilir ekserji yıkımında en yüksek orana sahip türbindir (%89– 22.25 kW). Ardından %7.24'lük oranla yoğuşturucu gelmektedir. Bu komponentlerin geliştirme potansiyeli, toplam önlenebilir ekserjinin %96.24'ünü oluşturmaktadır. Yoğuşturucuda meydana gelen

tersinmezlik (54.05 kW) türbinle (33.48 kW) karşılaştırıldığında çok daha büyüktür fakat türbindeki önlenebilir kısım yoğuşturucudan (1.81 kW- %7.24) daha fazladır. Benzer şekilde buharlaştırıcıdaki ekserji yıkımı (278.5 kW) diğer komponentlerden daha fazla olsada bu komponentlerdeki önlenebilir kısım buharlaştırıcıdan daha fazladır. Pompa 1 önlenebilir kısmın %2.164'üne eşittir.



Şekil 5.71: 1.durumda bileşenlerin içsel ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b).

Şekil 5.43, 1.durum için bileşenlerin içsel ekserji yıkımındaki yüzdelerini göstermektedir. İçsel ekserji yıkımının, 1.durumda tüm sistem için %99.76 olduğu görülmektedir. Buharlaştırıcı, türbin ve pompada meydana gelen ekserji yıkımlarının içsel kısmı kendisinden daha büyüktür. İçsel ekserji yıkım değerlerine bakıldığında komponentlerde meydana gelen tersinmezliklerin kaynağının büyük oranda komponentlerin kendisinin olduğu söylenebilir. Maksimum içsel ve dışsal ekserji yıkımı komponentler arasında 279.1 kW (%75.25) ve 1.9 kW ile sırasıyla buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda görülmektedir. Buharlaştırıcının içsel ekserji yıkımında en yüksek paya sahip komponent olması bu komponentin veriminde yapılacak artış ile ekserji yıkımının azaltılmasına bağlı olarak genel sistem veriminde iyileşme sağlanabilir. Buharlaştırıcıdan sonra içsel ekserji yıkımında büyük paya sahip ikinci komponent yoğuşturucudur (52.15 kW-%14.06). Ardından sırasıyla türbin (33.81 kW) ve pompa 1 (5.884 kW) gelmektedir. Tablo 5.6-5.7'de sırasıyla 2.durumda R141b akışkanı için gerçek ve kaçınılmaz koşullarda ORÇ/CHP'nin farklı noktalarına ait termodinamik özellikler ve kütle akış hızları

görölmektedir.

Tablo 5.34: 2.durum için gerçek koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikler ve kütle akış hızları.

Nokta	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	$\dot{m}$ (kg/s)	e (kJ/kg)	$\dot{E}$ (kW)
1	156.7	1400	387.9	1.089	5	71.66	358.3
3	156.7	1400	387.9	1.089	5	71.66	358.3
5	119	500	365.9	1.099	3.5	46.76	163.7
6	84.07	150	340.8	1.112	1.5	17.55	26.32
7	86.89	500	144.2	0.4862	3.5	7.498	26.24
8	43.71	150	89.51	0.3255	1.5	0.7177	1.076
9	44.72	1400	90.74	0.3294	1.5	0.7965	1.195
10	87.62	1400	145.1	0.4888	3.5	7.671	26.85
11	75.13	1400	128.8	0.4431	5	4.967	24.84
12	24	101.3	100.7	0.3529	11.26	0.004923	0.05545
13	32	101.3	134.1	0.464	11.26	0.353	3.976
14	25	101.3	104.8	0.3669	3	0	0
15	86.82	101.3	363.6	1.155	3	23.74	71.22
16	398.9	150	683.7	7.582	5	170.3	851.3
17	150	150	424.7	7.101	5	54.45	272.2

Tablo 5.35: 2.durum için kaçınılamaz koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikler ve kütle akış hızları.

Nokta	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	$\dot{m}$ (kg/s)	e (kJ/kg)	$\dot{E}$ (kW)
1KAÇ	156.6	1414	387.5	1.087	5	71.72	358.6
3KAÇ	156.6	1414	387.5	1.087	5	71.72	358.6
5KAÇ	115.6	497.5	362.7	1.091	3.5	45.9	160.6
6KAÇ	76.87	149.2	334.7	1.095	1.5	16.48	24.71
7KAÇ	86.68	497.5	143.9	0.4854	3.5	7.449	26.07
8KAÇ	43.54	149.2	89.31	0.3249	1.5	0.7052	1.058
9KAÇ	44.46	1414	90.42	0.3284	1.5	0.7759	1.164
10KAÇ	87.34	1414	144.8	0.4878	3.5	7.606	26.62
11KAÇ	74.86	1414	128.5	0.4421	5	4.915	24.58
12KAÇ	24	101.3	100.7	0.3529	11	0.004923	0.05414
13KAÇ	32	101.3	134.1	0.464	11	0.353	3.882
14KAÇ	25	101.3	104.8	0.3669	3	0	0
15KAÇ	86	101.3	360.1	1.146	3	23.15	69.45
16KAÇ	398.9	150	683.7	7.582	5	170.3	851.3
17KAÇ	150	150	424.7	7.101	5	54.45	272.2

Tablo 5.8’de 2.durum için ORÇ/CHP sisteminin gerçek,ideal ve kaçınılamaz koşullardaki ısı, net güç, termal verimleri ile ekserji verimleri gösterilmiştir. İdeal koşullar altında çevrimden elde edilen net iş çıkışı gerçek ve kaçınılamaz koşullarla kıyaslandığında daha yüksektir. ORÇ, proses ve CHP termal verimleri, ideal durumda sırasıyla %13.27, %58.68 ve %71.95 değerinde iken kaçınılamaz durumda sırasıyla %12.46, %59.12 ve %71.59 değerindedir Gerçek koşullarda ise bu verimler sırasıyla %10.98, %59.92 ve %70.9

değerini almıştır. Sistemin 2.durumda ORÇ, proses ve CHP ekserji verimleri, ideal koşullarda sırasıyla %29.67, %11.83 ve %41.5 değerindedir. Kaçınılamaz durumda sırasıyla %27.88, %11.99 ve %39.87 değerinde iken gerçek koşullarda ise bu verimler sırasıyla %24.56, %12.3 ve %36.86 değerini almıştır. 1.durumda gerçek, ideal ve kaçınılamaz koşullarda elde edilen net iş çıktısı ve bununla bağlantılı olarak ORÇ termal ve ekserji verimleri buharlaştırıcıda üretilen tüm buharın türbinden geçirilmesine bağlı olarak 2. durumla kıyaslandığında daha yüksektir. Bunun yanı sıra 1.durumda komponentlerde ve sistemde meydana gelen ekserji yıkımları 2. duruma göre daha yüksektir. Gerçek şartlarda 2. durum için sistemde toplam ekserji yıkımı 361.7 kW olarak hesaplanmıştır.

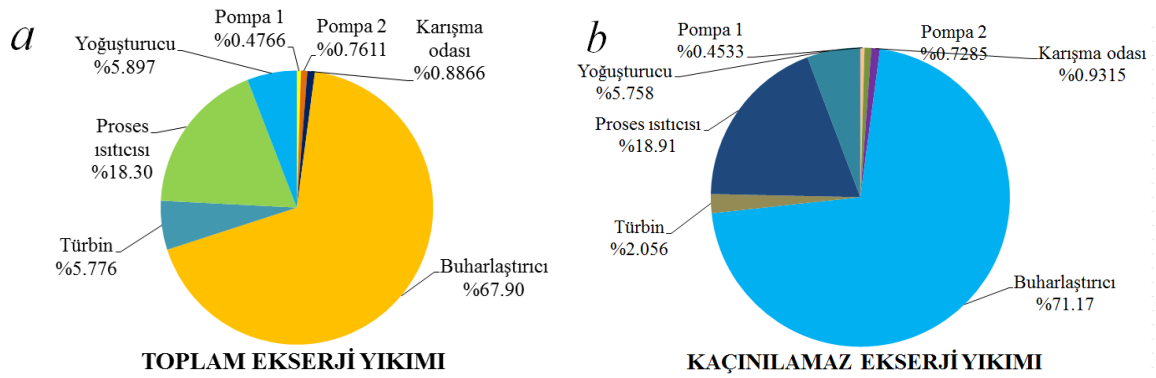
Tablo 5.36: 2.durum için ORÇ/CHP sisteminin gerçek, ideal ve kaçınılamaz koşullardaki güç ve verimleri.

	<b>Gerçek</b>	<b>İdeal</b>	<b>Kaçınılamaz</b>
$\dot{W}_{POMPA 1}$ (kW)	1.842	1.602	1.667
$\dot{W}_{POMPA 2}$ (kW)	3.358	2.956	3.058
$\dot{W}_{TÜRBİN}$ (kW)	147.4	176.4	166.2
$\dot{W}_{NET}$ (kW)	142.2	171.8	161.4
$\dot{Q}_{BUH}$ (kW)	1295	1295	1295
$\dot{Q}_{YOĞ}$ (kW)	376.9	363.3	368
$\dot{Q}_{proses}$ (kW)	776.2	760.2	765.9
$\dot{E}_{BUH}$ (kW)	579.1	579.1	579.1
$\eta_{I,ORÇ}$ (%)	10.98	13.27	12.46
$\eta_{I,proses}$ (%)	59.92	58.68	59.12
$\eta_{I,CHP}$ (%)	70.9	71.95	71.59
$\eta_{II,ORÇ}$ (%)	24.56	29.67	27.88
$\eta_{II,proses}$ (%)	12.3	11.83	11.99
$\eta_{II,CHP}$ (%)	36.86	41.5	39.87

Tablo 5.37: 2.durum için ORÇ/CHP sisteminin ileri ekserji analizi sonuçları (kW).

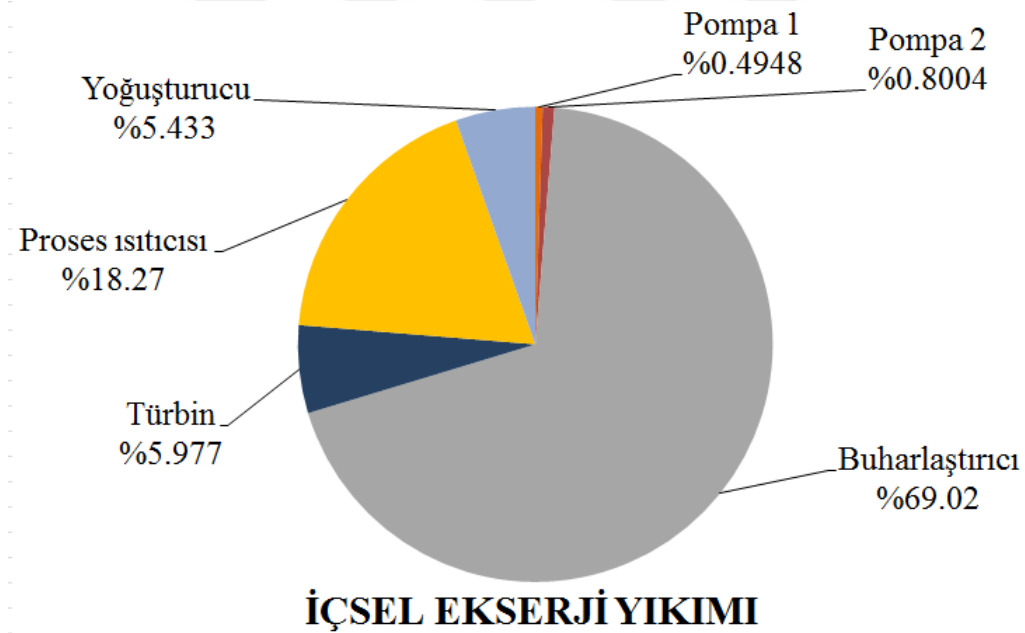
Komponent	R141b				
	$\dot{E}_D$ (kW)	$\dot{E}_D^{KAC}$ (kW)	$\dot{E}_D^{ON}$ (kW)	$\dot{E}_D^{IC}$ (kW)	$\dot{E}_D^{DIS}$ (kW)
Pompa 1	1.724	1.561	0.163	1.765	-0.041
Pompa 2	2.753	2.509	0.244	2.855	-0.102
Karışma odası	3.207	3.208	-0.001	-	-
Buharlaştırıcı	245.6	245.1	0.5	246.2	-0.6
Türbin	20.89	7.082	13.81	21.32	-0.43
Proses ısıtıcısı	66.19	65.12	1.07	65.16	1.03
Yoğuşturucu	21.33	19.83	1.5	19.38	1.95
Sistem	361.7	344.4	17.3	356.7	5

Tablo 5.9’da 2.durum için ORÇ/CHP sisteminin ileri ekserji analizi sonuçları gösterilmiştir. Geleneksel ekserji analizinden elde edilen sonuçlara göre sistemdeki toplam ekserji yıkımı 361.7 kW olarak hesaplanmıştır ve bunun %86.2’si buharlaştırıcı ve proses ısıtıcısında meydana gelmiştir. Ekserji yıkımının geri kalan kısmı pompa 1, pompa 2, karışma odası, türbin ve yoğuşturucuda gerçekleşmiştir. Komponentlerde meydana gelen ekserji yıkımları en yüksekten düşüğe doğru şu şekilde sıralanmaktadır: buharlaştırıcı (245.6 kW-%67.90), proses ısıtıcısı (66.19 kW-%18.30), yoğuşturucu (21.33 kW-%5.897), türbin (20.89 kW-%5.776), karışma odası (3.207 kW-%0.8866), pompa 2 (2.753 kW-%0.7611) ve pompa 1 (1.724 kW-%0.4766). Tüm sistemde büyük oranda kaçınılamaz (%95.22) ve içsel (%98.62) ekserji yıkımları meydana gelmektedir. Diğer komponentlerden farklı olarak türbindeki önlenebilir ekserji yıkımı (7.082 kW) kaçınılamaz kısımdan (13.81 kW) daha büyüktür. Bunun yanı sıra karışma odasındaki ekserji yıkımının kaçınılamaz kısmı gerçekten daha yüksek çıkmıştır. İçsel ekserji yıkımı tüm komponentler için dışsal kısımdan daha büyüktür. Buna bağlı olarak komponentlerde meydana gelen ekserji yıkımının büyük oranda her bir komponentin kendi içindeki tersinmezlikler nedeniyle oluştuğu sonucuna varılabilir. Yoğuşturucu en yüksek dışsal ekserji yıkımına (1.95 kW) sahip komponenttir. Bununla ilgili olarak diğer komponentlerin verimlerdeki artışın, bu komponentin ekserji yıkımını azaltması ile toplam sistem veriminde iyileşme sağlanabileceği sonucuna varılabilir. 2.durumda kojeneratif ORÇ sistemine bakıldığında pompa 1, pompa 2, buharlaştırıcı ve türbin için ekserji yıkımından daha büyük içsel ekserji değerlerine sahip olduğu görülmektedir (Tablo 5.9). Tablo 5.9 aynı zamanda toplam ekserji yıkımının 17.3 kW’lık kısmının azaltılabileceğini göstermektedir.



Şekil 5.72: 2.durumda bileşenlerin toplam (a), kaçınılamaz (b) ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b).

Şekil 5.44'te 2. durumda bileşenlerin toplam ve kaçınılmaz ekserji yıkımındaki yüzdeleri gösterilmiştir. Sistemde meydana gelen ekserji yıkımının çok büyük kısmı (%95.22) kaçınılmazdır. Kaçınılmaz kısımda en büyük pay 245.1 kW (%71.17) ile buharlaştırıcıya aittir. Buharlaştırıcıyı, 65.12 kW (%18.91) ile proses ısıtıcısı ve 19.83 kW (%5.758) ile yoğuşturucu takip etmektedir. Bu bileşenlerin ardından sırasıyla türbin (7.082 kW-%2.056), karışma odası (3.208 kW-%0.9315), pompa 2 (2.509 kW-%0.7285) ve pompa 1 (1.561 kW-%0.4533) gelmektedir. Önlenebilir ekserji yıkımında en yüksek orana sahip olması bakımından türbin (13.81 kW) sistem performansının iyileştirilmesinde odaklanılması gereken ilk komponenttir. Ardından 1.5 kW ile yoğuşturucu gelmektedir. Proses ısıtıcısında meydana gelen tersinmezlik, yoğuşturucuyla karşılaştırıldığında çok daha büyüktür fakat proses ısıtıcısındaki önlenebilir kısım yoğuşturucudan daha azdır. Benzer şekilde buharlaştırıcıdaki ekserji yıkımı proses ısıtıcısı ve yoğuşturucuya göre daha fazla olsada proses ısıtıcısındaki ve yoğuşturucudaki önlenebilir kısım buharlaştırıcıdan daha fazladır.



Şekil 5.73: 2.durumda bileşenlerin içsel ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b).

Şekil 5.45'te 2.durum için sistemdeki komponentlerin içsel ekserji yıkımındaki yüzdeleri verilmiştir. 2.durum için tüm sistemdeki ekserji yıkımının %98.62'sinin içsel kısmın oluşturduğu görülmektedir. Komponentler arasında buharlaştırıcı, türbin, pompa 1 ve pompa 2'de meydana gelen ekserji yıkımlarının içsel kısmı kendisinden daha büyüktür. İçsel ekserji yıkım değerlerine bakıldığında komponentlerde meydana gelen

tersinmezliklerin kaynağının büyük oranda komponentlerin kendisinin olduğu söylenebilir. Maksimum içsel ve dışsal ekserji yıkımı komponentler arasında, 246.2 kW (%69.02) ve 1.95 kW ile sırasıyla buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda görülmektedir. Buharlaştırıcının içsel ekserji yıkımında en yüksek paya sahip komponent olması bu komponentin veriminde yapılacak artış ile ekserji yıkımının azaltılmasına bağlı olarak ORÇ/CHP sisteminin toplam veriminde olumlu bir etki sağlanabilir. Buharlaştırıcıdan sonra içsel ekserji yıkımında büyük paya sahip ikinci komponent proses ısıtıcısıdır (65.16 kW-%18.27). Ardından sırasıyla, türbin (21.32 kW-%5.997) yoğuşturucu (19.38 kW-%5.433), pompa 2 (2.855 kW-%0.8004) ve pompa 1 (1.765 kW-%0.4948) gelmektedir.

Tablo 5.10-5.11’de sırasıyla 3.durumda R141b akışkanı için gerçek ve kaçınılamaz koşullarda ORÇ/CHP’nin farklı noktalarına ait termodinamik özellikler ve kütle akış hızları görülmektedir. İdeal, gerçek ve kaçınılamaz koşulların hesaplanmasında Tablo 5.1’de verilmiş olan değerlerden yararlanılmıştır.

Tablo 5.38: 3.durum için gerçek koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikler ve kütle akış hızları.

Nokta	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	ṁ (kg/s)	e (kJ/kg)	Ė (kW)
1	161.7	1400	393.3	1.101	5	73.35	366.7
2	161.7	1400	393.3	1.101	0.5	73.35	36.67
3	161.7	1400	393.3	1.101	4.5	73.35	330.1
4	147.7	500	393.3	1.166	0.5	54.06	27.03
5	124.3	500	370.9	1.111	3.5	47.98	167.9
6	89.35	150	345.4	1.125	1	18.33	18.33
7	86.89	500	144.2	0.4862	4	7.498	29.99
8	43.71	150	89.51	0.3255	1	0.7177	0.7177
9	44.72	1400	90.74	0.3294	1	0.7965	0.7965
10	87.62	1400	145.1	0.4888	4	7.671	30.68
11	79.32	1400	134.3	0.4585	5	5.812	29.06
12	24	101.3	100.7	0.3529	7.645	0.004923	0.03764
13	32	101.3	134.1	0.464	7.645	0.353	2.699
14	25	101.3	104.8	0.3669	3	0	0
15	98.07	101.3	410.9	1.285	3	32.49	97.47
16	398.9	150	683.7	7.582	5	170.3	851.3
17	150	150	424.7	7.101	5	54.45	272.2

Tablo 5.39: 3.durum için kaçınılmaz koşullar altında ORÇ/CHP sisteminin farklı durum noktalarında termodinamik özellikler ve kütle akış hızları.

Nokta	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	ṁ (kg/s)	e (kJ/kg)	Ė (kW)
1KAÇ	161.6	1414	393	1.1	5	73.41	367.1
2KAÇ	161.6	1414	393	1.1	0.5	73.41	36.71
3KAÇ	161.6	1414	393	1.1	4.5	73.41	330.3
4KAÇ	147.3	497.5	393	1.165	0.5	53.86	26.93
5KAÇ	120.8	497.5	367.6	1.103	3.5	47.07	164.8
6KAÇ	82.08	149.2	339.1	1.108	1	17.16	17.16
7KAÇ	86.68	497.5	143.9	0.4854	4	7.449	29.8
8KAÇ	43.54	149.2	89.31	0.3249	1	0.7052	0.7052
9KAÇ	44.46	1414	90.42	0.3284	1	0.7759	0.7759
10KAÇ	87.34	1414	144.8	0.4878	4	7.606	30.42
11KAÇ	79.05	1414	133.9	0.4576	5	5.756	28.78
12KAÇ	24	101.3	100.7	0.3529	7.465	0.004923	0.03675
13KAÇ	32	101.3	134.1	0.464	7.465	0.353	2.635
14KAÇ	25	101.3	104.8	0.3669	3	0	0
15KAÇ	97.23	101.3	407.4	1.275	3	31.8	95.39
16KAÇ	398.9	150	683.7	7.582	5	170.3	851.3
17KAÇ	150	150	424.7	7.101	5	54.45	272.2

3.durum için ORÇ/CHP sisteminin gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşullardaki ısı, net güç, termal verimi ile ekserji verimi Tablo 5.12’de gösterilmiştir. Gerçek koşullar altında çevrimden elde edilen net iş çıkışı ideal ve kaçınılmaz koşullarla kıyaslandığında daha düşüktür. Bununla birlikte 1. ve 2.durumla kıyaslandığında 3.durumda gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşullarda elde edilen net iş çıktısı ve bununla bağlantılı olarak ORÇ termal ve ekserji verimleri türbinden geçen organik akışkanın (R141b) kütleli debisinin daha fazla olması nedeniyle daha yüksektir. Sistemin ideal koşullarda ORÇ, proses ve CHP termal verimleri, sırasıyla %11.34, %68.58 ve %79.92 değerinde iken teknolojik engellere bağlı olarak kaçınılmaz durumda sırasıyla %10.65, %70.07 ve %80.72 değerindedir. Gerçek koşullarda ise bu verimler sırasıyla %9.361,%70.89 ve %80.25 değerini almıştır. Sistemin 3.durumda ORÇ, proses ve CHP ekserji verimleri sırasıyla %25.37, %15.83 ve %41.2 değerindedir. Kaçınılmaz durumda ise bu verimler sırasıyla %23.81, %16.47 ve %40.28 değerinde iken gerçek koşullarda sırasıyla %20.94, %16.83 ve %37.77 değerini almıştır.



Tablo 5.40: 3.durum için ORÇ/CHP sisteminin gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşullardaki güç ve verimleri.

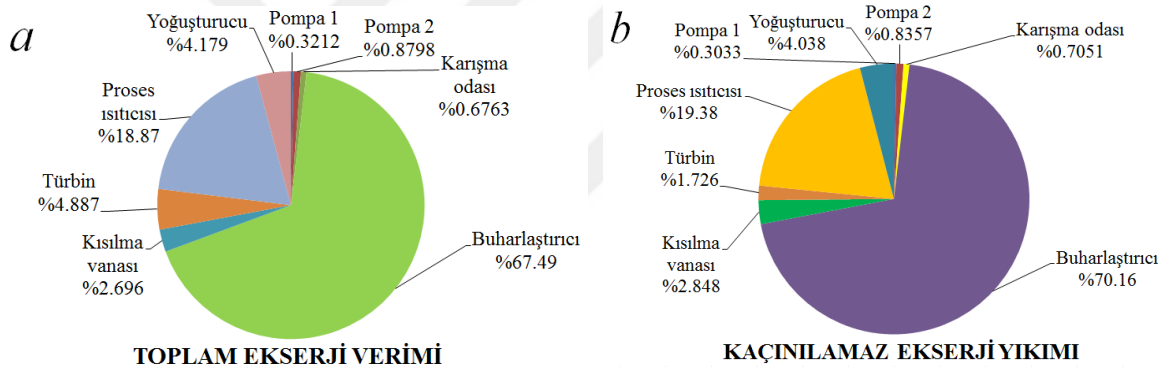
	<b>Gerçek</b>	<b>İdaal</b>	<b>Kaçınılmaz</b>
$\dot{W}_{POMPA\ 1}$ (kW)	1.228	1.068	1.111
$\dot{W}_{POMPA\ 2}$ (kW)	3.838	3.378	3.495
$\dot{W}_{TÜRBİN}$ (kW)	126.3	151.4	142.5
$\dot{W}_{NET}$ (kW)	121.3	146.9	137.9
$\dot{Q}_{BUH}$ (kW)	1295	1295	1295
$\dot{Q}_{YOĞ}$ (kW)	255.9	246.6	249.8
$\dot{Q}_{proses}$ (kW)	918.2	888.3	907.7
$\dot{E}_{BUH}$ (kW)	579.1	579.1	579.1
$\eta_{I,ORÇ}$ (%)	9.361	11.34	10.65
$\eta_{I,proses}$ (%)	70.89	68.58	70.07
$\eta_{I,CHP}$ (%)	80.25	79.92	80.72
$\eta_{II,ORÇ}$ (%)	20.94	25.37	23.81
$\eta_{II,proses}$ (%)	16.83	15.83	16.47
$\eta_{II,CHP}$ (%)	37.77	41.2	40.28

Tablo 5.41: 3.durum için ORÇ/CHP sisteminin ileri ekserji analizi sonuçları (kW).

Komponent	R141b				
	$\dot{E}_D$ (kW)	$\dot{E}_D^{KAÇ}$ (kW)	$\dot{E}_D^{\dot{O}N}$ (kW)	$\dot{E}_D^{IC}$ (kW)	$\dot{E}_D^{DIŞ}$ (kW)
Pompa 1	1.149	1.041	0.108	1.177	-0.028
Pompa 2	3.147	2.868	0.279	3.263	-0.116
Karışma odası	2.419	2.42	-0.001	-	-
Buharlaştırıcı	241.4	240.8	0.6	241.9	-0.5
Kısılma vanası	9.644	9.775	-0.131	9.906	-0.262
Türbin	17.48	5.925	11.56	17.86	-0.38
Proses ısıtıcısı	67.5	66.5	1	65.71	1.79
Yoğuşturucu	14.95	13.86	1.09	13.51	1.44
Sistem	357.7	343.2	14.5	353.3	4.4

Çevrimdeki her bir komponente geleneksel ekserji denklemleri uygulanmış ve Tablo 5.13'te 3.durum için ORÇ/CHP sisteminin ileri ekserji analizi sonuçları gösterilmiştir. Bunun yanı sıra 3.durumda sistemde meydana gelen ekserji yıkımları 1. ve 2. duruma göre daha düşüktür. Geleneksel ekserji denklemlerinden elde edilen sonuçlara göre gerçek şartlarda 3. durum için sistemde toplam ekserji yıkımı 357.7 kW olarak hesaplanmıştır. Ekserji yıkımı komponentler arasında en yüksek buharlaştırıcıda (241.4 kW-%67.49) görülmüş olup ardından sırasıyla proses ısıtıcısı (67.5 kW-%18.87), türbin (17.48 kW-%4.887), yoğuşturucu (14.95 kW-%4.179), kısılma vanası (9.644 kW-%2.696), pompa 2 (3.147 kW-%0.8798), karışma odası (2.419 kW-%0.6763) ve pompa 1 (1.149 kW-%0.3212) gelmektedir. Tüm sistemde büyük oranda kaçınılmaz (%95.95) ve içsel

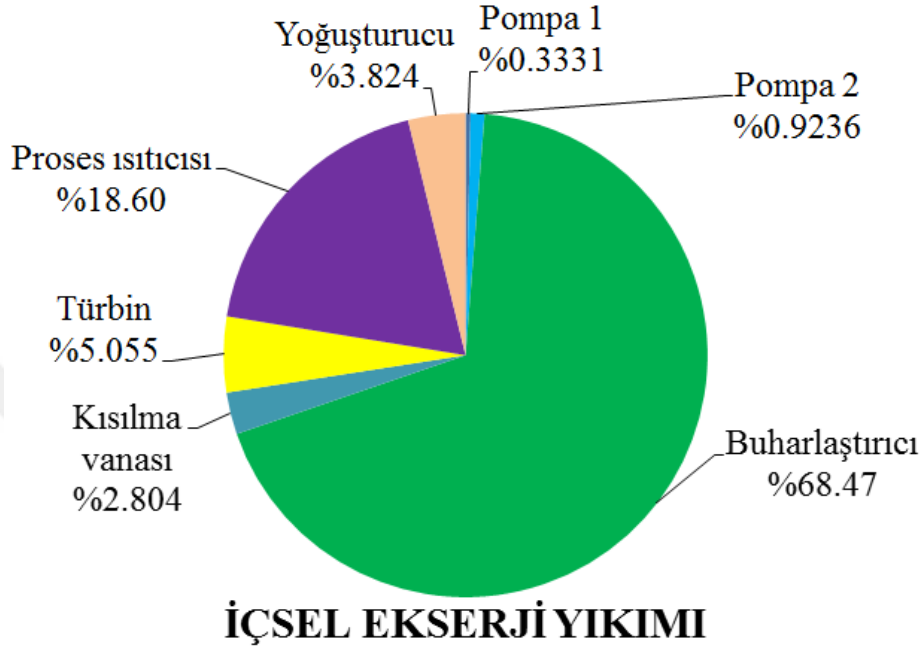
(%98.77) ekserji yıkımları meydana gelmektedir. Diğer komponentlerden farklı olarak türbindeki önlenebilir ekserji yıkımı (11.56 kW) kaçınılamaz kısımdan (5.925 kW) daha büyüktür. Buna ek olarak karışma odası ve kısılma vanasındaki ekserji yıkımının kaçınılamaz kısmı gerçekten daha yüksek çıkmıştır. Tüm komponentler için içsel ekserji yıkımı dışsal kısımdan daha büyük olması nedeniyle komponentlerde meydana gelen ekserji yıkımının büyük oranda her bir komponentin kendi içindeki tersinmezlikler nedeniyle oluştuğu sonucuna varılabilir. Proses ısıtıcısı en yüksek dışsal ekserji yıkımına (1.79 kW) sahip komponenttir. Bununla ilgili olarak diğer komponentlerin verimindeki artışın, bu komponentin ekserji yıkımını azaltması ile toplam sistem veriminde artış sağlanabileceği sonucuna varılabilir. 3.durum için kojeneratif ORÇ sisteminde pompa 1, pompa 2, buharlaştırıcı, kısılma vanası ve türbinde meydana gelen içsel ekserji yıkımı gerçekten büyük çıkmıştır (Tablo 5.13). Tablo 5.13'te aynı zamanda toplam ekserji yıkımının 14.5 kW'lık kısmının azaltılabileceğini görülmektedir.



Şekil 5.74: 3.durumda bileşenlerin toplam (a), kaçınılamaz (b) ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b).

Şekil 5.46'da 3. durumda bileşenlerin toplam ve kaçınılamaz ekserji yıkımındaki yüzdeleri gösterilmiştir. Sistemde meydana gelen ekserji yıkımının çok büyük kısmı (%95.95) kaçınılamazdır. Kaçınılamaz kısımda en büyük pay 240.8 kW (%70.16) ile buharlaştırıcıya aittir. Buharlaştırıcıyı, 66.5 kW (%19.38) ile proses ısıtıcısı ve 13.86 kW (%4.038) ile yoğuşturucu takip etmektedir. Bu bileşenlerin ardından sırasıyla kısılma vanası (9.775 kW-%2.848), türbin (5.925 kW-%1.726), pompa 2 (2.868 kW-%0.8357), karışma odası (2.42 kW-%0.7051) ve pompa 1 (1.041 kW-%0.3033) gelmektedir. Önlenebilir ekserji yıkımında en yüksek orana sahip olması bakımından türbin (11.56 kW) sistem performansının iyileştirilmesinde odaklanılması gereken ilk komponenttir. Ardından 1.09 kW ile yoğuşturucu gelmektedir. Proses ısıtıcısında meydana gelen tersinmezlik,

yoğuşturucuyla karşılaştırıldığında çok daha büyüktür fakat proses ısıtıcısındaki önlenebilir kısım yoğuşturucudan daha azdır. Benzer şekilde buharlaştırıcıdaki ekserji yıkımı proses ısıtıcısı ve yoğuşturucuya göre daha fazla olmasına rağmen proses ısıtıcısındaki ve yoğuşturucudaki önlenebilir kısım buharlaştırıcıdan daha fazladır.



Şekil 5.75: 3.durumda bileşenlerin içsel ekserji yıkımındaki yüzdeleri (R141b).

Şekil 5.47 3.durumda komponentlerin içsel ekserji yıkımındaki yüzdelerini göstermektedir. 3.durum için tüm sistemdeki ekserji yıkımının %98.77'sinin içsel kısmın oluşturduğu görülmektedir. Komponentler arasında buharlaştırıcı, kısılma vanası, türbin, pompa 1 ve pompa 2'de meydana gelen ekserji yıkımlarının içsel kısmı kendisinden daha büyüktür. İçsel ekserji yıkım değerlerine bakıldığında komponentlerde meydana gelen tersinmezliklerin kaynağının büyük oranda komponentlerin kendisinin olduğu söylenebilir. Maksimum içsel ve dışsal ekserji yıkımı komponentler arasında, 241.9 kW (%68.47) ve 1.79 kW ile sırasıyla buharlaştırıcı ve proses ısıtıcısında görülmektedir. İçsel ekserji yıkımında en yüksek paya sahip komponentin buharlaştırıcı olması bu komponentin veriminde yapılacak artış ile ekserji yıkımının azaltılmasına bağlı olarak ORÇ/CHP sisteminin toplam veriminde olumlu bir etki sağlanabileceğini göstermektedir. Buharlaştırıcıdan sonra içsel ekserji yıkımında büyük paya sahip ikinci komponent proses ısıtıcısıdır (65.71 kW-%18.60). Ardından sırasıyla, türbin (17.86 kW-%5.055) yoğuşturucu (13.51 kW-%3.824), kısılma vanası (9.906 kW-%2.804) pompa 2 (3.263 kW-%0.9236) ve pompa 1 (1.177 kW-%0.3331) gelmektedir.

## BÖLÜM 6

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, katı atık kaynaklı ORÇ/CHP sisteminin enerji, ekserji ve ileri ekserji analizleri yapılmıştır. Enerji verimliliği, ekserji verimliliği, net iş çıktısı, toplam ekserji yıkım oranı ve sistemdeki bileşenlerin ekserji yok etme oranı, buharlaştırıcı ile yoğuşturucu basınçlarının ve ara basıncın bir fonksiyonu olarak belirlenen koşullarda üç enerji üretim projeksiyonu göz önünde bulundurularak her bir akışkan için EES’de analiz edilmiş olup Origin programında grafiksel olarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak sistemde bulunan komponentlerin birbirleri ile etkileşiminin ve çevrimin geliştirilme potansiyelinin belirlenmesi amacıyla ileri ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. İleri ekserji analizinde komponentlerde ve sistemde meydana gelen ekserji yıkımları önlenemez/kaçınılamaz ve içsel/dışsal kısımlara ayrılmıştır. Çalışma akışkanı olarak İzopentan (R601a), R141b, R123, Metanol, n-pentan, n-oktan, n-heptan, R718 (H<sub>2</sub>O) kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- 1.durumda 2. ve 3. durumdan farklı olarak sistem ara basınçta çalıştırılmadığı için ara basınç değişiminin etkisine bakılmamıştır.
- Yoğuşturucu basıncı artışına bağlı olarak akışkanların ORÇ termal ve ekserji verimleri azalırken proses termal ve ekserji verimleri artmaktadır. Bununla birlikte CHP termal verimleri tüm akışkanlar için artarken CHP ekserji verim değerleri 2. ve 3. durum için değişiklik göstermektedir. Buharlaştırıcı basıncının artması sistemin ORÇ ile CHP termal ve ekserji verimleri üzerinde olumlu etkiye sahiptir. Bununla birlikte buharlaştırıcı basıncındaki artış proses termal ve ekserji verimlerini azalmaktadır.
- Sistem performansının iyileştirilmesindeki temel amaç, ortalama düşük sıcaklığı düşürmek için yoğuşturucu basıncını düşürmek ya da daha yüksek bir ortalama yüksek sıcaklığın elde edilmesi için buharlaştırıcı basıncını artırmak olmalıdır.

- R718 akışkanı haricinde 1.durumda buharlaştırıcı basıncının 600 kPa'dan 1400 kPa'a çıkarılmasıyla elde edilen net iş çıktıları 2. ve 3. durumla karşılaştırıldığında daha yüksektir. 1.durum için R718 akışkanının net iş değerleri yaklaşık 1229 kPa'dan itibaren 2.durumda elde edilen değerlerin altına düşmektedir. 1400 kPa'lık buharlaştırıcı basıncı için 195.8 kW ile en yüksek net iş çıkışı R141b akışkanı için elde edilmiştir.
- Buharlaştırıcı basıncı değişimiyle 2. durum için akışkanlardan elde edilen net iş değerleri 3.duruma göre daha yüksektir.1400 kPa'da tüm akışkanlar için sistemden maksimum net iş sağlanmaktadır. Net iş, R718 akışkanı için 78.85 kW ile minimum değerini alırken basınç artışıyla 1400 kPa'da R141b akışkanı için 142.2 kW olarak en yüksek değere ulaşmaktadır.
- Sistemden elde edilen net iş çıktısı buharlaştırıcı basıncının artırılmasıyla 3.durum için R718 akışkanı için 69.67 kW ile minimum değerde kalırken, 1400 kPa'da R141b akışkanı için 121.3 kW olarak maksimum değere ulaşmaktadır. 600 ile 1400 kPa basınç değerleri arasında net işteki en büyük artış, 45.63 kW'tan 121.3 kW'a çıkan R141b akışkanın kullanılmasıyla elde edilmektedir. Net işteki artış, R141b ve R123 haricindeki diğer akışkanlar arasında R718, n-heptan ve n-oktan akışkanları için yaklaşık 1100 kPa'lık buharlaştırıcı basıncına kadar, Metanol, Izopentan ve n-pentan akışkanları için yaklaşık 1300 kPa'a kadar önemli hale gelir.
- Buharlaştırıcı basıncının toplam ekserji yok oluşu üzerindeki etkisi tüm çalışma durumları için net işteki artışa bağlı olarak azalma şeklindedir. Aynı basınç değeri için, akışkanlardan elde edilen toplam ekserji yok oluş oranları en yüksek 1.durumda görülürken en düşük 3.durumda görülmüştür.
- 3.durumda ekserji yok etme oranının, R718 için buharlaştırıcı basıncı arttığında 445.8 kW'tan 418.8 kW'a düştüğü görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek yıkım oranını göstermektedir. Diğer taraftan, en düşük ekserji yok etme oranı R141b için meydana gelir ve yok etme oranı, 800 kPa'lık basınç artışı için yaklaşık 421.1 kW'tan 357.7 kW'a düşer. Basınç artışı ile ekserji yok etme oranındaki en büyük azalma, çalışma akışkanı R123'te görülmektedir.

- Buharlaştırıcıdaki organik akışkan ile ısı transfer akışkanı arasındaki ortalama sıcaklık farkı buharlaştırıcı basıncının artmasıyla azalır. Bu, sistemdeki buharlaştırıcı yoğuşturucu ve proses ısıtıcısı ekserji yıkım oranının azalmasına neden olur. Öte yandan, pompa 1, pompa 2, karışma odası, kısılma vanası ve türbinde ekserji yok etme oranı artar.
- 1.durumun en büyük farkı ise buharlaştırıcı, türbin, yoğuşturucu ve pompa 1 dışındaki diğer sistem bileşenlerinde ekserji yok oluşu meydana gelmemesidir. 3.durumdan farklı olarak 2.durumda buharın kısılma vanasından geçirilmemesi sonucunda bu komponentte ekserji yıkımı meydana gelmemektedir.
- 1.durum için bileşenlerdeki ekserji yok oluş oranları 2. ve 3.duruma göre daha yüksektir.2.durum için buharlaştırıcı, yoğuşturucu, türbin, karışma odası ve pompa 1 bileşenlerindeki ekserji yok oluş oranları 3.duruma göre daha yüksekken proses ısıtıcısı ile pompa 2’de meydana gelen ekserji yıkımı ise 3.duruma kıyasla daha düşüktür.
- Buharlaştırıcı basıncındaki artışla birlikte en büyük ekserji yıkımı her üç durum içinde buharlaştırıcıda meydana gelir. Bu nedenle, genel sistem performansını iyileştirmek amacıyla bu komponente odaklanmak önemlidir.
- 1.durumda buharlaştırıcı basıncı değişimiyle elde edilen ORÇ termal ve ekserji verim değerleri R718 akışkanı haricinde 2. ve 3. durumla karşılaştırıldığında sistemden edilen tüm buharın türbine gönderilmesine bağlı olarak daha yüksektir. 1.durum için R718 akışkanın ORÇ termal ve ekserji verim değerleri yaklaşık 1229 kPa’dan itibaren 2.durumda elde edilen değerlerin altına düşmektedir.
- 1.durumda R141b en yüksek termal ve ekserji verimliliklerine sahipken, R718 en düşük performansı gösterir. R141b'nin termal verimi %10.33'ten %15.12'ye, ekserji verimi ise 800 kPa'lık bir basınç artışıyla %23.1'den % 33.82'ye artar. R718'in termal ve ekserji verimleri, aynı basınç artışı için sırasıyla %5.784'ten %5.939'a ve %12.94'ten %13.28'e yükselir.

- 2.durumda elde edilen ORÇ termal ve ekserji verim değerleri 3.durumla karşılaştırıldığında türbinden geçen organik akışkan debisinin daha fazla olmasına bağlı daha yüksekken, proses ve CHP termal ve ekserji verim değerleri daha düşüktür.
- 3. durum için kojenerasyon sisteminde sadece elektrik üretiminden elde edilen ORÇ termal verim değerleri %2 ile %10 arasındayken ısı ve elektriğin birlikte üretimi sağlanan CHP termal verim değerleri %70 -80'lere çıkmaktadır.
- 2.durumda seçilen akışkanlar arasında n-oktan, n-heptan ve R718 akışkanlarının ORÇ termal verimin buharlaştırıcı basıncına göre değişim eğrileri azalarak artan bir eğilim gösterdikten sonra yaklaşık 1100 kPa'dan itibaren basınçtaki artışa rağmen çok az değişerek basınç çizgisine paralel bir doğrultuda ilerlemeye başlamaktadır. Izopentan, n-pentan ve Metanol akışkanlarında ise bu durum yaklaşık 1300 kPa'dan itibaren gerçekleşmektedir. R141b ve R123 akışkanlarının grafiksel eğrileri ise 1400 kPa'dan sonra artmaya devam eden bir eğilim göstermektedir. Basınç artışının, CHP termal verim üzerindeki etkisi en az R718'de görülmektedir. Buharlaştırıcı basıncının 600 kPa'dan 1400 kPa çıkarılmasıyla CHP termal verimin maksimum değeri %71.24 ile R123 akışkanından elde edilmektedir.
- Buharlaştırıcı basıncındaki artışla akışkanların proses ekserji verimlerindeki azalma en belirgin şekilde 600 ile 900 kPa basınç aralığında görülmektedir. 2.durumda proses ekserji veriminin, R123 için buharlaştırıcı basıncı arttığında %14.45'ten %12.73'e düştüğü görülmektedir. R123 en yüksek proses ekserji verim değerlerinin görüldüğü akışkandır. Buna ek olarak, en düşük proses ekserji verimi R718 için meydana gelir ve proses ekserji verimi, 800 kPa'lık basınç artışı için %10.57'den %9.972'ye düşer.
- Basınç artışının, CHP ekserji verim üzerindeki etkisi en az R718'de görülmektedir. 2.durumda CHP ekserji verimi, buharlaştırıcı basıncındaki 800 kPa'lık artış ile yaklaşık %2.43 yükselerek R123 akışkanı ile maksimum değerine ulaşır. Öte yandan bu basınç artışı sırasında sistemden elde edilen en yüksek CHP ekserji

verim değerleri belirlenen basınç aralığı için R141b'de görölmektedir. Buharlaştırıcı basıncının 600 kPa'dan 1400 kPa çıkarılmasıyla R141b akışkanının CHP ekserji verimi % 24.51'den %36.86'ya yükselir.

- 3. durum için ORÇ ekserji verim değerleri %6 ile %21 CHP ekserji verim değerleri %21 ile %38.5 arasında değişmektedir. ORÇ ekserji veriminin, R141b için buharlaştırıcı basıncı arttığında %7.88'den %20.94'e çıktığı görölmektedir. En düşük ORÇ ekserji verimi, R718 için meydana gelir ve 800 kPa'lık basınç artışı için % 6.529'dan % 12.03'e çıkar. CHP ekserji verimi, en yüksek CHP ekserji verim değerleri sağlayan R141b için buharlaştırıcı basıncı arttığında %26.79 'dan %37.77'ye yükselmektedir. Öte yandan, en düşük CHP ekserji verimi R718 akışkanından elde edilmekte ve 800 kPa'lık basınç artışı için %22.35 'ten %27.02'ye çıkar.
- Ara basınç değişimiyle 2.durumda elde edilen net iş değerleri tüm akışkanlar için 3.durumla kıyaslandığında daha yüksektir.3.durumda ara basıncın net iş üzerindeki toplam etkisi tüm akışkanlar için azalma şeklindedir. Net iş çıktısındaki en belirgin değişim %55.31 ve %52.78 oranlarında azalma ile sırasıyla R123 ve R141b akışkanlarında görölmektedir. 350 kPa'lık ara basınç için R141b kullanılarak 139.8 kW ile en yüksek net iş çıkışı sağlanmıştır.
- Ara basınçtaki artış 2.durumda diğer akışkanların net iş çıktısındaki toplam etkisi azalma şeklindeyken R718 akışkanında toplam etkisini artış olarak göstermektedir. Net iş çıktısındaki en belirgin değişim %46.62 ve %43.83 oranlarında azalma ile sırasıyla R123 ve R141b akışkanlarında görölmektedir. 350 kPa'lık ara basınç için R141b kullanılarak 160.2 kW ile en yüksek net iş çıkışı sağlanmıştır.
- 2.durumda ara basınca bağlı olarak çevrimdeki toplam ekserji yok etme oranı tüm akışkanlar için 3.durumla karşılaştırıldığında daha yüksektir. Belirlenen basınç aralığında 3.durumda R718,2.durumda ise R718 ve n-oktan haricindeki diğer tüm akışkanlardan, 350 kPa'lık ara basınç değerinde sistemden en yüksek net iş çıktısı sağlanırken en düşük ekserji yok oluş oranı elde edilmiştir.



- Ara basıncın 350 kPa'dan 1200 kPa'a çıkarılmasıyla çevrimdeki toplam ekserji yok oluş oranı 2.durum için 455.3 kW olarak R718 ile maksimum değere ulaşmaktadır. Ekserji yok oluş oranındaki artış akışkanlar için en düşük %5.54 ile en yüksek %19.89 değer aralığında değişmektedir. 3. durumda ise 850 kPa'lık basınç artışıyla çevrimdeki toplam ekserji yok oluş oranı 443.7 kW olarak R718 ile maksimum değere ulaşmaktadır. Net işteki azalmaya bağlı olarak ekserji yok oluş oranındaki artma akışkanlar için en düşük %7.48 ile en yüksek %20.11 değer aralığında değişmektedir.
- Ara basınçtaki artış, proses ısıtıcısı, yoğuşturucu ve karışma odasında meydana gelen ekserji yok oluşun artmasına sebep olurken; pompa 2, buharlaştırıcı, kısılma vanası ve türbin bileşenlerinin ekserji yok oluşunu ters orantılı şekilde azaltmaktadır Ara basınçtaki değişimin pompa 1 üzerinde hiçbir etkisi yoktur.
- 2.durumda ara basıncın diğer akışkanların ORÇ termal verimlerinde toplam etkisi azalma şeklindeyken R718'de ara basınç artış olarak kendini göstermiştir. Bunun yanı sıra ara basınçtaki değişim R141b ve R123 haricindeki diğer akışkanların proses termal verimlerinde azalmaya neden olmaktadır. Proses ile CHP termal ve ekserji verimlerinin ara basınca göre değişimi 3. durumla aynıdır. 2.durumda temel farklılık ORÇ termal verimde görülmektedir. Ara basınçtaki artış 3.durum için akışkanların ORÇ ve CHP termal ve ekserji verimlerindeki toplam etkisi azalma şeklinde görülmektedir. 2.durumda ara basınç değişimiyle akışkanlardan elde edilen ORÇ termal ve ekserji verimleri 3.duruma göre daha yüksekken, proses ve CHP termal ve ekserji verim değerleri 3.duruma göre daha düşüktür.
- Ara basınca bağlı olarak 2.durumda ORÇ termal verimi, 1200 kPa'da Metanol ile % 5.952'lik minimum değerini almaktadır. Proses termal veriminin, R123 için ara basınç arttığında %60.64'ten %61.77'ye yükseldiği görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek proses termal verimini göstermektedir. Diğer taraftan, en düşük proses termal verimi 1200 kPa'da R718 için meydana gelir ve 850 kPa'lık basınç artışı için %57.61'den %42.75'e düşer. Basınç artışı ile proses termal verimdeki en büyük değişim, çalışma akışkanı R718'de görülmektedir.

- 2.durumda CHP termal verimi, R123 için ara basınçtaki artışla birlikte %72.31'den %68'e düşmektedir. Bunun yanı sıra R123 akışkanı en yüksek CHP termal verimi göstermektedir. En düşük CHP ekserji verimi ise çalışma akışkanı R718 için meydana gelir ve ara basıncın 350 kPa'dan 1200 kPa'a çıkarılmasıyla %63.53'ten %48.87'ye düşer. Basınç artışı ile CHP ekserji verimindeki en büyük azalma, %65.44'ten %50.71'e düşen n-oktan için meydana gelmektedir.
- Ara basınç değişimine bağlı olarak 2.durumda ORÇ ekserji verimi 1200 kPa'da Metanol ile %13.31'lik minimum değerini almaktadır. Proses ekserji verimi ise 1200 kPa'da R718 ile %6.493'lük minimum değere ulaşır. CHP ekserji verimi, R141b için ara basınç arttığında %39.9'dan %27.95'e düşmektedir. R141b azalmaya rağmen en yüksek CHP ekserji verim değerleri göstermektedir. En düşük CHP ekserji verim değerleri ise R718 için meydana gelir ve ara basıncın 350 kPa'dan 1200 kPa'a çıkarılmasıyla %24.66'dan %20.18'e düşer. Basınç artışı ile CHP ekserji veriminde en büyük azalma, çalışma akışkanı R141b için meydana gelmektedir.
- 3.durumda ara basınç değişimiyle elde edilen ORÇ termal verimi, 1200 kPa'da Metanol ile %4.497'lik minimum değerini almaktadır. ORÇ termal verimdeki en belirgin değişim %10.79'dan %5.096'ya düşen R141b akışkanında görülmektedir. 350 kPa'da R141b için %10.79 ile en yüksek ORÇ termal verimi sağlanmıştır. Proses termal veriminin, R123 için ara basınç arttığında %71.19'dan %73.51'e yükseldiği görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek proses termal verimini göstermektedir. Diğer taraftan, en düşük proses termal verimi 1200 kPa'da R718 için meydana gelir ve 850 kPa'lık basınç artışı için %69.61'den %59.02'ye düşer. Basınç artışı ile proses termal verimdeki en büyük değişim, çalışma akışkanı R718'de görülmektedir.
- 3.durumda CHP termal verimi R123 için ara basınçtaki artışla birlikte %81.34'ten %78.05'e düşmektedir. Bunun yanı sıra R123 akışkanı en yüksek CHP termal verimi göstermektedir. En düşük CHP termal verimi ise çalışma akışkanı R718 için meydana gelir ve ara basıncın 350 kPa'dan 1200 kPa'a çıkarılmasıyla %74.91'den %63.75'e düşer. Basınç artışı ile CHP termal verimindeki en büyük azalma, n-oktan için meydana gelmektedir.

- 3.durumda ara basınca bağılı olarak elde edilen ORÇ ekserji veriminin minimum değeri, %10.06 olarak 1200 kPa'da Metanol akışkanından elde edilmiştir. ORÇ ekserji verimindeki en belirgin değişim %24.14'ten %11.4'e düşen R141b akışkanında görülmektedir. 350 kPa'da R141b için %24.14 ile en yüksek ORÇ ekserji verimi sağlanmıştır. Proses ekserji verimi 1200 kPa'da R718 ile %11.95'lik minimum değerini almaktadır. Bununla birlikte proses ekserji verimindeki en büyük değişim, 850 kPa'lık basınç artışı için %16.27'den %11.95'e düşen çalışma akışkanı R718'de görülmektedir.
- 3.durumda CHP ekserji veriminin, R141b için ara basınç arttığında %40.76'dan %28.85'e düştüğü görülmektedir. Basınç artışı ile CHP ekserji verimindeki en büyük azalma, çalışma akışkanı R141b için meydana gelmektedir. Azalmaya rağmen R141b'nin grafiksel eğrisi diğer akışkanlarının üstündedir. En düşük CHP ekserji verimi R718 için meydana gelir ve CHP ekserji verimi 850 kPa'lık basınç artışı için %28.13'ten %22.54'e düşer.
- Yoğuşturucu basıncı tüm durumlardan akışkanlardan elde edilen net iş çıktılarında azalmaya neden olur.Net iş çıktısındaki en yüksek değerler 1.durumda elde edilmiş olup en düşük 3.durumda görülmektedir. 1.durumda ise en yüksek çıktı R141b akışkanı için hesaplanırken en düşük çıktı R718 için elde edilir. Bununla birlikte, R123 için net iş çıktısındaki azalma, diğer akışkanlara kıyasla daha fazladır. Net iş çıktısı, R141b için 250 kPa'lık basınç artışı için yaklaşık 65.3 kW azalır. Aynı basınç farkı için R718'de, basınç değiştiğinde net iş çıkışı yaklaşık 7.53 kW azalır. 2.durum için basınçtaki artışın, %24.8 ve %12.31 oranlarında net iş çıktısını en çok ve en az etkilediği akışkanlar sırasıyla R141b ve R718'dir.150 kPa'lık yoğuşturucu basıncı için 142.2 kW ile en yüksek net iş çıkışı R141b akışkanı için elde edilmiştir. 3.durumda 150 kPa'lık yoğuşturucu basıncı için 121.3 kW ile en yüksek net iş çıkışı R141b akışkanı için elde edilmiştir.
- 1.durumda tüm akışkanların toplam ekserji yok oluş oranları yoğuşturucu basıncındaki artışla birlikte azalmaktadır. 150-400 kPa basınç aralığında en yüksek ekserji yok oluş değerleri R718 akışkanından elde edilmekte olup 1.durum için toplam ekserji yok oluşu 1400 kPa'da 497 kW olan maksimum değere

ulaşmaktadır. Öte yandan, en düşük ekserji yok etme oranı R141b için meydana gelir ve yok etme oranı, 250 kPa'lık basınç artışı için yaklaşık 371.8 kW'tan 436.5 kW'a çıkar. Basınç artışı ile ekserji yok etme oranındaki en büyük artma, çalışma akışkanı R123 için meydana geldiği görülebilmektedir.

- 2.durumda yoğuşturucu basıncındaki artışın n-pentan, Izopentan, R141b, R123, Metanol ve n-heptan akışkanlarının kullanıldığı sistemde ekserji yok oluş üzerindeki etkisi artış şeklinde iken, n-oktan ve R718'de azalma olarak görülmüştür. 2.durumda tüm akışkanlar için sistemdeki toplam ekserji yok oluş oranları 3.duruma göre daha yüksektir. 3.durumda yoğuşturucu basıncındaki artışın n-pentan, Izopentan, R141b ve R123 akışkanlarının kullanıldığı sistemde ekserji yok oluş üzerindeki etkisi artış şeklinde iken, n-oktan R718, Metanol ve n-heptan'da azalma olarak görülmüştür.
- Yoğuşturucu basıncının artmasıyla sistemdeki komponentler arasında, yoğuşturucunun, kısılma vanasının ve proses ısıtıcısının ekserji yok etme oranı artarken, türbinin, karışma odasının, pompa 1'in ve buharlaştırıcının ekserji yok etme hızı, azalmaktadır. Pompa 2'nin ekserji yok etme hızı ise yoğuşturucu basıncındaki artışa rağmen sabit kalmaktadır.
- Aynı basınç değeri için, 1.durumda elde edilen ORÇ termal ve ekserji verimleri R718 haricindeki diğer akışkanlar için 2. ve 3.duruma göre daha yüksektir. 1.durumda R718 akışkanından elde edilen termal ve ekserji verimleri yaklaşık 203.6 kPa'a kadar 2.durumda elde edilen verimlere göre daha düşükken bu basınçtan itibaren daha yüksek değerler sağlamaktadır. R141b en yüksek termal ve ekserji verimliliklerine sahipken, R718 en düşük performansı gösterir. R141b'nin termal verimi %15.2'den %10.08'e, ekserji verimi ise 250 kPa'lık bir basınç artışıyla % 33.82'den % 22.54'e azalır. R718'in termal ve ekserji verimleri, aynı basınç artışı için sırasıyla %5.939'dan %5.357'ye ve %13.28'den %11.98'e düşer. Yoğuşturucu basıncındaki artışla akışkanların ORÇ ekserji verimlerinde meydana gelen azalma en düşük değer %9.8 ile en yüksek değer %36.9 arasında değişmektedir.
- 2.durumda tüm akışkanlar için ORÇ termal ve ekserji verimi 3. duruma göre daha yüksek olmasına rağmen proses ile CHP termal ve ekserji verim değerleri daha

düşüktür. Yoğuşturucu basıncının 150 kPa'dan 400 kPa'a çıkarılmasıyla 2. durumda ORÇ termal veriminde meydana gelen maksimum ve minimum azalma %18.40 ve %15.60 oranlarında sırasıyla R123 ve R718 akışlarında görülmektedir.

- ORÇ termal veriminin, 3. durumda en yüksek ORÇ termal verimini gösteren R141b için yoğuşturucu basıncı arttığında % 9.361'den %8.022 'ye düştüğü görülmektedir. Öte yandan en düşük ekserji yok etme oranı R718 için meydana gelir ve 250 kPa'lık basınç artışı için yaklaşık %5.378'den %4.568'e düşer. Yoğuşturucuda 250 kPa'lık basınç artışı ile ORÇ termal verimde maksimum azalma R141b akışkanında meydana gelmiştir. ORÇ termal verimlerin aksine yoğuşturucu basıncındaki artışla birlikte proses termal verimleri artmaktadır.
- 2.durumda yoğuşturucu basıncına bağlı elde edilen proses termal verimi Metanol ile 400 kPa'da sistem için %64.16 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. Proses termal veriminin, 250 kPa'lık basınç artışında minimum değeri ise %62.94 ile Izopentan akışkanı için elde edilmiştir. 3.durumda ise proses termal verimi, R141b akışkanı için 250 kPa'lık basınç artışında %73.34 ile minimum değerde kalırken, 400 kPa'da Metanol akışkanı için %74.63 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. 150 ile 400 kPa basınç değerleri arasında proses termal verimdeki en büyük artış, %66.62'den %74.52'ye çıkan R718 akışkanının kullanılmasıyla elde edilmektedir.
- 2. ve 3. durumda CHP termal verimdeki artış R141b ve R123'e göre diğer akışkanlarda daha belirgindir. Diğer akışkanların basınç artışıyla birbirlerine yaklaşan grafiksel eğrileri 400 kPa'dan sonra da artmaya devam ederken, R141b ve R123 akışkanların grafiksel eğrileri yaklaşık 300 kPa'dan sonra basınç çizgisine paralel bir görünüm almaya başlamıştır.
- Yoğuşturucu basıncının bir fonksiyonu olarak ORÇ ekserji verim grafiklerinde en belirgin değişiklik 150 kPa ile 250 kPa basınç aralığında görülmektedir. Bu aralıktan sonra akışkanların grafiksel eğrileri basınç çizgisine paralel bir görünüm almaya başlamaktadır. Yoğuşturucu basıncındaki artışla 2. durumda R141b'nin ORÇ ekserji verimi %24.56'dan %20.27'ye düştüğü görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek ORÇ ekserji verim değerleri göstermektedir. En düşük ORÇ

ekserji verimi ise R718 için meydana gelmekte ve 250 kPa'lık basınç artışı için %13.62'den %11.49'a düşer.

- 3. durumda ORÇ ekserji veriminin, R141b için yoğuşturucu basıncı arttığında %20.94'ten %17.94'e düştüğü görülmektedir. Üstelik bu akışkan en yüksek ORÇ ekserji verimini göstermektedir. En düşük ekserji yok etme oranı R718 için meydana gelir ve ORÇ ekserji verimi, 250 kPa'lık basınç artışı için yaklaşık %12.03'ten %10.22'ye düşer.
- Yoğuşturucu basıncına bağlı olarak 2. durumda elde edilen proses ekserji verimi Metanol ile 400 kPa'da sistem için %13.98 olarak maksimum değere ulaşmaktadır. Buna ek olarak 250 kPa'lık basınç artışında proses ekserji verimi, İzopentan akışkanı için %13.48 ile minimum değerde kalmaktadır. 3. durumda ise proses ekserji verimi, R141b akışkanı için 250 kPa'lık basınç artışında %17.93 ile minimum değerde kalırken, 400 kPa'da Metanol akışkanı için %18.51 olarak maksimum değere ulaşmaktadır.
- 2. durumda yoğuşturucu basıncındaki artışın n-pentan, İzopentan, R141b, R123 ve Metanol akışkanlarının kullanıldığı sistemde CHP ekserji verimi üzerindeki etkisi azalma şeklinde iken, n-heptan, n-oktan ve R718'de artış olarak görülmüştür. 3. durumda ise n-pentan, İzopentan, R141b ve R123 akışkanlarının kullanıldığı sistemde CHP ekserji verimi üzerindeki etkisi azalma şeklinde iken, n-oktan R718, Metanol ve n-heptan'da artış olarak görülmüştür.
- Sistemin 1. durumda sistemin ORÇ termal ve ekserji verimleri ideal koşullarda sırasıyla %18.08 ve %40.45 değerindedir. Kaçınılamaz durumda teknolojik engeller dolayısıyla sırasıyla %17.07 ve %38.18 iken gerçek koşullarda ise bu verimler sırasıyla %15.12 ve %33.82 değerini almıştır. Bu, ısı transferini artırarak ve bileşen verimliliğini optimize ederek sistemin verimliliğinin daha da iyileştirilebileceği göstermektedir.
- Sistemin 2. durumda ORÇ, proses ve CHP termal verimleri, ideal durumda sırasıyla %13.27, %58.68 ve %71.95 değerinde iken kaçınılamaz durumda sırasıyla %12.46, %59.12 ve %71.59 değerindedir Gerçek koşullarda ise bu verimler sırasıyla

%10.98, %59.92 ve %70.9 değerini almıştır. Bununla birlikte 2.durumda ORÇ, proses ve CHP ekserji verimleri, ideal koşullarda sırasıyla %29.67, %11.83 ve %41.5 değerindedir. Kaçınılamaz durumda sırasıyla %27.88, %11.99 ve %39.87 değerinde iken gerçek koşullarda ise bu verimler sırasıyla %24.56, %12.3 ve %36.86 değerini almıştır.

- 3.durumda ideal koşullarda sistemin ORÇ, proses ve CHP termal verimleri, sırasıyla %11.34, %68.58 ve %79.92 değerinde iken kaçınılamaz durumda sırasıyla %10.65, %70.07 ve %80.72 değerindedir. Gerçek koşullarda ise bu verimler sırasıyla %9.361,%70.89 ve %80.25 değerini almıştır. Buna ek olarak ORÇ, proses ve CHP ekserji verimleri sırasıyla %25.37, %15.83 ve %41.2 değerindedir. Kaçınılamaz durumda ise bu verimler sırasıyla %23.81, %16.47 ve %40.28 değerinde iken gerçek koşullarda sırasıyla %20.94, %16.83 ve %37.77 değerini almıştır.
- Geleneksel ekserji denklemlerinden elde edilen sonuçlara göre 1. durum için sistemde toplam ekserji yıkımı 371.8 kW olarak hesaplanmıştır. Komponentlerde meydana gelen ekserji yıkımları en yüksekten düşüğe doğru; buharlaştırıcı (278.5 kW-%74.91), yoğuşturucu (54.05 kW-%14.54), türbin (33.48 kW-%9.005) ve pompa 1 (5.745 kW-%1.545) şeklinde sıralanmaktadır.
- 2. durum için sistemde toplam ekserji yıkımı 361.7 kW olarak hesaplanmıştır. Komponentlerde meydana gelen ekserji yıkımları en yüksekten düşüğe doğru şu şekilde sıralanmaktadır: buharlaştırıcı (245.6 kW-%67.90), proses ısıtıcısı (66.19 kW-%18.30), yoğuşturucu (21.33 kW-%5.897), türbin (20.89 kW-%5.776), karışma odası (3.207 kW-%0.8866), pompa 2 (2.753 kW-%0.7611) ve pompa 1 (1.724 kW-%0.4766).
- Gerçek şartlarda 3. durum için sistemde toplam ekserji yıkımı 357.7 kW olarak hesaplanmıştır. Ekserji yıkımı komponentler arasında en yüksek buharlaştırıcıda (241.4 kW-%67.49) görülmüş olup ardından sırasıyla proses ısıtıcısı (67.5 kW-%18.87), türbin (17.48 kW-%4.887), yoğuşturucu (14.95 kW-%4.179), kısılma vanası (9.644 kW-%2.696), pompa 2 (3.147 kW-%0.8798), karışma odası (2.419 kW-%0.6763) ve pompa 1 (1.149 kW-%0.3212) gelmektedir.

- Ekserji analizi, ısı sistemlerinin tasarlanmasında, simüle edilmesinde aynı zamanda bu sistemlerin daha gerçekçi şekilde değerlendirmek için kullanılması gereken önemli bir göstergedir.
- İleri ekserji analizi, sistemin iyileştirme potansiyelini ve komponentlerin birbirleriyle olan etkileşiminin belirlenmesini sağlamaktadır.
- Tüm sistem ve komponentleri için ileri ekserji analiziyle ilgili sonuçlar, geleneksel ekserji analiziyle ilgili olanlardan farklıdır. Bunun nedeni, ileri ekserji analizinin komponentler arasındaki etkileşimi dikkate almasıdır.
- Tüm durumlarda sistemde meydana gelen ekserji yıkımının çok büyük kısmı (1.durum-%93.28, 2.durum-%95.22, 3.durum-%95.95) kaçınılamazdır. Buna bağlı olarak sistem veriminin iyileştirilmesinde komponentlerin her birine ne kadar odaklanılması gerektiği önemli rol oynamaktadır.
- Tüm çalışma durumları için buharlaştırıcı komponentler arasında en yüksek tersinmezliğe sahipken, bu komponentte meydana gelen tersinmezliklerin neredeyse tamamı kaçınılamaz kısma aittir.
- Sistem performansının iyileştirilmesinde odaklanılması gereken ilk komponent toplam önlenebilir ekserji yıkımında en yüksek orana sahip türbindir. Ardından yoğunlaştırıcı gelmektedir. Bu komponentlerdeki tersinmezliklerin azaltılması ile tüm durumlar için sistem veriminde artış sağlanabilir.
- Tüm durumlar için sistemde meydana gelen ekserji yıkımı büyük oranda içsel kısımdan oluşmaktadır (1.durum-%99.76, 2.durum-%98.62, 3.durum-%98.77).
- İçsel ekserji yıkım değerlerine bakıldığında komponentlerde meydana gelen tersinmezliklerin kaynağının büyük oranda komponentlerin kendisinin olduğu söylenebilir.



- Tüm durumlar için toplam içsel ekserji yıkımında buharlaştırıcı en büyük paya sahip komponenttir (1.durum, 279.1 kW-%75.25; 2.durum, 246.2 kW-%69.02; 3.durum, 241.9 kW-%68.47). Bununla bağlantılı olarak buharlaştırıcı verimindeki artış ile toplam sistem veriminde artış sağlanabileceği sonucuna varılabilir. Komponentin modifikasyonu sistem veriminin geliştirilmesinde katkı sağlayabilir.
- Yoğuşturucu 1. ve 2.durum için en yüksek dışsal ekserji yıkımına sahip komponenttir (1.durum-1.9 kW; 2.durum- 1.95 kW). 3.durumda ise proses ısıtıcısı en yüksek dışsal ekserji yıkımına sahiptir (1.79 kW). Bununla ilgili olarak diğer komponentlerde yapılacak modifikasyonların bu komponentlerin ekserji yıkımını azaltması ile toplam sistem veriminde artış sağlanabilir.
- Özet olarak, geleneksel ekserji analizi sonuçları, farklı olsa da ileri ekserji analizi sonuçlarıyla güçlü bir şekilde desteklenmektedir. İleri ekserji analizinden elde edilen veriler yardımıyla, sistemlerini iyileştirmesi amacıyla daha gerçekçi yaklaşımlar elde edilebilir.
- Bununla birlikte, mevcut analiz, ekserji bakış açısından yalnızca sistemin optimum tasarımı için bileşen optimizasyonu hakkında bilgi vermektedir. Gelecekte, bu sistemin ekonomisi, uygulama fizibilitesi ve diğer yönlerinin daha fazla dikkate alınması gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- Acar, E. (2014). Bir Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Santrali İçin Organik Rankine Çevrimi Dizaynı ve Modellemesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul, 104 s.
- Adaçay, F.R. (2014). Türkiye için enerji ve kalkınmada perspektifler. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6 (2): 87-103.
- Adanç, A. (2019). Diyarbakır İli Bağlar İlçesi Kaynartepe Mahallesi Katı Atık Karakterizasyonu ve Geri Kazanım Oranları. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin, 80 s.
- Akdeniz, N. (2007). Doğal Gazlı Kojenerasyon Sisteminin Ekserjetik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 151 s.
- Akdoğan, A., Güleç, S. (2007). Sürdürülebilir katı atık yönetimi ve belediyelerde yöneticilerin katı atık yönetimiyle ilgili tutum ve düşüncelerinin analizine yönelik bir araştırma. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25 (1): 39-69.
- Akkaya, S. (2007). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Açısından Önemi ve Bir Rüzgar Enerjisi Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 85 s.
- Akkuş, H.B. (2009). Bazı Katıların Pirolizi ve Ortak Pirolizinden Elde Edilen Katı Ürünlerin Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 118 s.
- Akpınar, E. K., Hepbaslı, A. (2007). A comparative study on exergetic assessment of two ground-source (geothermal) heat pump systems for residential applications. *Building and Environment*, 42(5): 2004–2013.
- Akpınar, N. (2006). Kentsel Katı Atıklardan Enerji Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Enerji Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 122 s.
- Aksoğan Korkmaz, A., Bulut Deniz, M. (2019). Sürdürülebilir temiz enerji biyokütle: enerji üretimindeki payı ve ekonomiye katkıları. II. *Uluslararası Battalgazi Multidisipliner Çalışmalar Kongresi Tam Metin Kitabı*, s. 141-149.
- Akyol, E., Yaka, İ.F., Koçer, A., Güngör, A., Hacıhafizoğlu, O. (2016). Sabit yataklı gazlaştırıcı açısından Trakya Bölgesi biyokütle potansiyeli. *Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi*, 3 (2): 155-162.

- ANSI/ASHRAE Standard 34-2016, Designation and Safety Classification of Refrigerants, 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329-2305: ASHRAE. [https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Standards%20and%20Guidelines/Standards%20Addenda/34\\_2016\\_g\\_20180628.pdf](https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Standards%20and%20Guidelines/Standards%20Addenda/34_2016_g_20180628.pdf) (20.03.2019).
- Ar, F.F., Akdağ, F., Malkoç, Y., Çalışkan, M. (2003). Biyokütle enerjisi ve biyomotorin. *Türkiye IV. Enerji Sempozyumu*, s. 583-594, 10-12 Aralık 2003, Ankara.
- Arıkan, E. (2013). Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Katı Atık Bertaraf Etme Teknolojisi Seçimi ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, 201 s.
- Aslan, Ö., Özcan, B., (2008). Sürdürülebilir kalkınma ve hidrojen enerjisi. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 3 (2): 152-160.
- Atalay, H. (2011). Soğutucu Akışkan ve Çevrimlerin Termodinamik ve Termofiziksel Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi f Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 148 s.
- Avcı, F. (2016). Belediye Katı Atıklarının Termal Yöntemlerle Bertarafı Teknolojik ve Ekonomik İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul, 99 s.
- Aydoğan, Ö., Varank, G., Bilgili, M. S. (2011). Municipal solid waste management in Gaziantep. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 3: 268-275.
- Aynur, E. (2011). İstanbul'da Oluşan Kentsel Katı atıklar İçin Yakma ve Gazlaştırma Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 147 s.
- Aykol, K. (2008). Evsel Katı Atıkların Geoteknik Özelliklerinin Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 106 s.
- Başeğmez, A. (2019). Biyokütle Destekli Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjili Organik Rankine Çevrimi Analizi Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 156 s.
- Bay, M. (2018). Belediyelerde atık yönetimi ve politikaları: Karaman örneği. *Journal of International Social Research*, Cilt 11, Sayı 61.
- Bayrak, S. (2019). Kentsel Katı Atık Yönetiminde Panel Veri Yöntemiyle Maliyet Analizi: İzmir İlçe Belediyeleri Örneği. Doktora Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, İzmir, 164 s.
- Bayramoğlu, T. (2013). Biyokütle Enerjisi ve Yerel Ekonomik Kalkınma: RTA1 Bölgesi'nde (Erzurum-Erzincan-Bayburt) Biyokütle Potansiyeli ve Ekonomik

- Etkileri Üzerine Bir Saha Araştırması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, Erzurum, 210 s.
- Braimakis, K., Karellas, S. (2018). Energetic optimization of regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) configurations. *Energy Conversion and Management*, 159: 353-370.
- Behçet, R., Gül, H., Oral, H., Oral, F. (2014a). Rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından Malatya ilinin Doğu Anadolu Bölgesindeki Yeri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3 (1): 65-73.
- Behçet, R., İlkılıç C. Oral, F. (2014b). Malatya ilinde oluşan evsel katı atıklardaki enerji potansiyeli. *2nd International Symposium On Environment And Morality*, ISEM 2014, s. 426-436, 24-26 Ekim 2014, Adıyaman.
- Bozdoğan, H. (2018). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretim Maliyetlerinin Hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Burdur, 90 s.
- Bozkurt, A.U. (2008). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Enerji Verimliliği Açısından Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Üretim Yönetimi ve Pazarlama Anabilim Dalı, İzmir, 162 s.
- Calm, J.M. (1994). Refrigerant safety. *ASHRAE journal*, 36 (7): 17-27.
- Calm, J.M, Hourahan, G.C.(2011). Physical, safety, and environmental data for current and alternative refrigerants. *Refrigeration for Sustainable Development (proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Congresso of Refrigerationn (ICR 2011, Prague, Czech Republic,2011.08.21-26)*. International Institute of Refrigeration (IIR/IIF), Paris, France.
- Chen, H., Goswami, D.Y., Stefanakos, E.K. (2010). A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010): 3059–306.
- Chen, J., Zheng, X., Guo, G., Luo, X., Chen, Y.,Yang, Z. (2019). A flexible and multi-functional Organic Rankine cycle system: Preliminary experimental study and advanced exergy analysis. *Energy Conversion and Management*, 187, 339–355.
- Colonna,P., Casati, E., Trapp,C., Mathijssen,T., Larjola ,J., Saaresti Trunen,T., Uusitalo,A. (2015). Organic Rankine Cycle Power Systems: from the concept to current technology, applications, and an outlook to the future. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137 (10): 100801-1-19.
- Çakır, M.E. (2018). Katı Atık Verilerinin CBS ile Değerlendirilmesi: Suruç (Şanlıurfa) Örneği . Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Şanlıurfa, 117 s.
- Çakır, U., Çomaklı, K. (2011). Mevcut soğutucu akışkanlar ve alternatifleri. *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, s. 1079-1087, 13-16 Nisan 2011, İzmir.

- Çanka Kılıç, F., Keskin Kılıç, M. (2013). Jeotermal enerji ve Türkiye, *Mühendis ve Makina*, Cilt 54, Sayı 639, s. 45-56.
- Çanka Kılıç, F. (2015). Güneş enerjisi, Türkiye'deki son durumu ve üretim teknolojileri. *Mühendis ve Makina*, Cilt 56, Sayı 671, s. 28-40.
- Çallı, B., (2018). Solid Waste Engineering (Katı Atık Mühendisliği) ders notları, MÜ. Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Bölümü. <http://mimoza.marmara.edu.tr/~baris.calli/Enve330/Chapter4.pdf> (17.09.2019).
- Çeğil, Ü. (2018). Kojenerasyon ve Trijenerasyon Sistemlerinin Kullanılabilirliği ve Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, 93 s.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A. (2008). *Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla*, Beşinci Baskı, Çeviri Editörü: Ali Pınarbaşı, İzmir Güven Kitabevi, ISBN: 978-975-6240-26-7, İzmir, 946 s.
- Çevre ve Orman Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, (2007). Katı Atık Karakterizasyonu Analiz Metodu (Madde Grupları Analizi) Kitapçığı. 12 s, Ankara.
- Coşkun, E.E. (2019). Kahramanmaraş İli Dulkadiroğlu İlçesi Katı Atık Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Kahramanmaraş, 87 s.
- Dağlıoğlu Şanlı, İ., Armağan, R. (2017). Sürdürülebilir kalkınma perspektifinden yenilenebilir enerji: kamu politikalarının gerekliliği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 8 (19): 93-109.
- Dai, Y., Wang, J., Gao, L. (2009). Parametric optimization and comparative study of Organic Rankine Cycle (ORC) for low grade waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 50 (3): 576–582.
- Demirtaş, N. (2009). Çorlu İlçesi Eski ve Yeni Düzensiz (Vahşi) Çöp Depolama Alanlarının BOİ5/KOI Oranlarının Zamanla Değişiminin İncelenmesi ve Ağır Metal Salınımlarının Tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ, 90 s.
- Dong, L., Liu, H., Riffat, S. (2009). Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems – A literature review. *Applied Thermal Engineering*, 29 (11-12): 2119–2126.
- Donk, M. (2017). İlbank A.Ş. Üstyapı İşlerinde Kojenerasyon Sistemlerinin Uygulanması ve Maliyet Analizinin Araştırılması. Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü, Ankara, 100 s.
- Durukan, M. (1997). Yanma gaz analizleri ve doğalgaz uygulamalarındaki önemi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 18.

- Emer, D.E. (2018). Enerji Modellemesinde ve Tanımlarında Temel Konsept ve Kavramlar. European Union / Instrument For Pre Accession Assistance (IPA) Energy Sector Technical Assistance Project, Ankara. <https://scenarios2013.enerjiprojeleri.eu/Dosyalar/Etkinlikler/Training%201/Task%201%20-%20Training/tr/3.%20Gun%20-%20Temel%20Konseptler.pdf> (08.10.2019).
- Erdoğan, H., Yönetken, A. (2018). Katı ve biyolojik atıkların elektrik enerji üretimindeki yeri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 1 (1): 24-27.
- Ergün, A. (2014). Organik Rankine Çevrimi Prensibine Göre Çalışan Bir Jeotermal Elektrik Santralinin Termoeconomik Analizi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük, 109 s.
- Ergün, A., Özkaymak, M., Kılıçaslan, E. (2016). Organik Rankine Çevrimi prensibi ile düşük sıcaklıktaki kaynaklardan elektrik üretim uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4 (2): 686-696.
- Ergün, T., Çobanoğlu, N. (2017). Sürdürülebilir kalkınma ve çevre etiği. *Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 3 (1): 97-123.
- Erkul, H. (2012). Jeotermal enerjinin ekonomik katkıları ve çevresel etkileri: Denizli-Kızıldere jeotermal örneği. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 10 (19), 115-133.
- Erses Yay, A.S., (2011). Katı Atıklar ve Kontrolü ders notları, SAÜ. Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Bölümü. <https://docplayer.biz.tr/12548556-Kati-atiklar-ve-kontrolu.html> (12.11.2019).
- Galindo, J., Ruiz, S., Dolz, V., Royo-Pascual, L. (2016). Advanced exergy analysis for a bottoming Organic Rankine Cycle coupled to an internal combustion engine. *Energy Conversion and Management*, 126, 217–227.
- Garousi Farshi, L., Mosaffa, A. H., Infante Ferreira, C. A., Rosen, M. A. (2014). Thermodynamic analysis and comparison of combined ejector–absorption and single effect absorption refrigeration systems. *Applied Energy*, 133, 335–346.
- Gökpur, H., Zıba, C.A., Dolaz, M. (2019). Kahramanmaraş ili Dulkadiroğlu bölgesi katı atık bileşenlerinin araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7 (2): 345-351.
- Günay, A. (2019). Anaerobik Arıtma Sistemleri Proses Tasarımı ders notları, BAÜN. Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Bölümü. [http://cevre.balikesir.edu.tr/wp-content/uploads/2019/03/04\\_Prof-Dr-Ahmet-G%C3%9CNAY-CMS-4109-Anaerobik-Ar%C4%B1t%C4%B1m-S%C3%BCre%C3%A7leri-B%C4%B0YOGAZ.pdf](http://cevre.balikesir.edu.tr/wp-content/uploads/2019/03/04_Prof-Dr-Ahmet-G%C3%9CNAY-CMS-4109-Anaerobik-Ar%C4%B1t%C4%B1m-S%C3%BCre%C3%A7leri-B%C4%B0YOGAZ.pdf) (07.01.2020)
- Gündüzalp, A.A., Güven, S. (2016). Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya Belediyesi ve semt tüketicileri örneği. *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*, ISSN 1304-2823, s 1-19.

- Hasanoğlu, P. (2012). Düzce Evsel ve Endüstriyel Katı Atıklarından Geri Kazanılabılır Maddelerin Potansiyelinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 158 s.
- Haşimoğlu, C., Ciniviz, M., Uçar, G. (2000). Günümüzde içten yanmalı motorlarda hidrojen yakıtının kullanılması. *Selçuk Teknik Online Dergisi / ISSN 1302-6178* Volume 1, Number: 1-2000.
- Hayli, S. (2001). Rüzgâr enerjisinin önemi, dünya’da ve Türkiye’deki durumu. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11 (1), 1-26.
- Honça, H.L. (2018). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sürdürülebilir Kalkınmaya Etkileri: Türkiye Örneği. Yüksek Lisans Tezi, KTO Karatay Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Konya, 128 s.
- Hoornweg D., Bhada-Tata P., (2012). *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*, Urban Development Series, Knowledge Papers no. 15., World Bank, Washington DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388> (11.06.2019).
- Işıldar, A. (2018). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Katı Atık Bertaraf Yöntemi Seçimi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 106 s.
- Jang, Y., Lee, J. (2018). Optimizations of the Organic Rankine Cycle-based domestic CHP using biomass fuel. *Energy Conversion and Management*, 160: 31–47.
- Javanshir, A., Sarunac, N. (2017). Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle. *Energy*, 118: 85–96.
- Kaçtıoğlu, S., Şengül, Ü. (2010). Erzurum kenti ambalaj atıklarının geri dönüşümü için tersine lojistik ağı tasarımı ve bir karma tamsayıli programlama modeli. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 24 (1): 89-112.
- Kadioğlu, S., Telliöglu, Z. (1996). Enerji kaynaklarının kullanımı ve çevreye etkileri. *Türkiye I. Enerji Sempozyumu*, s. 55-67, 12-14 Kasım 1996, Ankara.
- Kapluhan, E. (2014a). Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: biyokütle enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye’deki kullanım durumu. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 30: 97-125.
- Kapluhan, E. (2014b). Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: dalga enerjisinin Dünyada’ki ve Türkiye’deki Kullanım Durumu. *Uluslararası Avrasya Sosyal Bilimler Dergisi*, Cilt: 5, Sayı: 17, s. 65- 86.
- Karakaya, H. (2017). Enerji verimliliği kapsamında Türkiye’nin enerji tüketimi ile ekonomik büyümesi arasındaki nedensellik ilişkisinin değerlendirilmesi. *Kastamonu University Journal of Economics & Administrative Sciences Faculty*, 16 (2): s. 26-39.

- Karaman, R. (2016). Kombine Organik Rankine ve Kompresörlü Soğutma Çevriminin Termodinamik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 98 s.
- 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.
- Kavasoğulları, B., Cihan, E. (2015). Organik Rankine Çevrimi (ORC) ile birlikte çalışan buhar sıkıştırırmalı bir soğutma çevriminin ekserji analizi. *Tesisat Mühendisliği*, (150): 74-85.
- Kaya, P. (2013). Yerel Yönetimlerde Katı Atık Yönetiminin Maliyet Analizi: Türkiye Geneli ve İstanbul İli Örneği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, İstanbul, 115 s.
- Kaya, T.O. (2018). Sürdürülebilirlik Kapsamında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı ve Önemi. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Aksaray, 106 s.
- Kayalak, T.Ç. (2007). Kırıkkale İlinin Evsel Katı Atıklarının Bertarafının Çevresel ve Ekonomik Boyutuyla İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri Anabilim Dalı, Ankara, 91 s.
- Kavcıoğlu, Ş. (2019). Yenilenebilir enerji ve Türkiye. *Finansal Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi*, 11 (21): 209-227.
- Kerme, E.D., Orfi, J.(2015). Exergy-based thermodynamic analysis of solar driven Organic Rankine Cycle. *Journal of Thermal Engineering*, 1(5): 192-202.
- Khan, A.A., de Jong, W., Jansens, P. J., Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 90 (1): 21–50.
- Kıcımın, İ. (2015). Katı Atıkların Bertarafı ve Yeniden Değerlendirilmesi. Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü, Ankara, 71 s.
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de enerji görünümünün genel değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makine*, Cilt 59, Sayı 692, s. 86-114.
- Koç, E., Şenel, M.C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu-genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 54 (639): 32-44.
- Kolukısa, Z.Ü. (2013). Belediyelerde Katı Atık Yönetimi: Malatya Belediyesi Örneği . Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kamu Yönetimi Anabilim Dalı, Malatya, 214 s.



- Kopuz, D. (2011). Kömür-Biyokütle Karışımlarının Yanma Davranımlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 115 s.
- Kumbur, H., Özer, Z., Özsoy, H.D., Avcı, E.D. (2005). Türkiye’de geleneksel ve yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli ve çevresel etkilerinin karşılaştırılması. *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, YEKSEM 2005, s. 32-38, 19-21 Ekim 2005, Mersin.
- Küleççi, Ö.C. (2009). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal enerjinin yeri ve Türkiye açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 1 (2): 83-91.
- Liu, B.T., Chien, K.H., Wang, C.C. (2004). Effect of working fluids on organic Rankine Cycle for waste heat recovery. *Energy*, 29 (8): 1207–1217.
- Liu, H., Shao, Y., Li, J. (2011). A biomass-fired micro-scale CHP system with organic Rankine cycle (ORC) – Thermodynamic modelling studies. *Biomass and Bioenergy*, 35 (9): 3985–3994.
- Madhawa Hettiarachchi, H.D., Golubovic, M., Worek, W.M., Ikegami, Y. (2007). Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources. *Energy*, 32 (9): 1698–1706.
- Maizza, V., Maizza, A. (2001). Unconventional working fluids in Organic Rankine-Cycles for waste energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering*, 21 (3): 381–390.
- MEB (2009). T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Çevre Koruma Katı Atık Toplama. [http://haliccevre.com/images/PDF/kati\\_atik\\_toplama.pdf](http://haliccevre.com/images/PDF/kati_atik_toplama.pdf) (20.02.2019).
- MEB (2011). T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Aile ve Tüketici Hizmetleri, Katı Atıklar. [http://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Kat%C4%B1%20At%C4%B1klar.pdf](http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Kat%C4%B1%20At%C4%B1klar.pdf) (25.06.2019).
- Mert, S. (2012). Dalga Enerjisi Dönüşüm Sistemi Tasarımı ve Deneysel Çalışması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 139 s.
- Mohamed, A.A.M. (2017). Evsel Atıklardan Elde Edilen Enerji Üretimi ve Isparta Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 129 s.
- Mohammed, M. (2018). Farklı Özellikteki Evsel Atıklardan Biyolojik Kurutma Yöntemi ile Yakıt Nitelikli Ürün Elde Edilmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, 97 s.
- Morosuk, T., Tsatsaronis, G., Zhang, C. (2012). Conventional thermodynamic and advanced exergetic analysis of a refrigeration machine using a Voorhees’ compression process. *Energy Conversion and Management*, 60, 143–151.

- Najjar, Y. S. H., Radhwan, A. M. (1988). Cogeneration by combining gas turbine engine with Organic Rankine Cycle. *Heat Recovery Systems and CHP*, 8 (3): 211–219.
- Nami, H., Nemati, A., Jabbari Fard, F. (2017). Conventional and advanced exergy analyses of a geothermal driven dual fluid organic Rankine cycle (ORC). *Applied Thermal Engineering*, 122, 59–70.
- Nayır, T. (2012). Kömür ve Biyokütle Karışımlarının Gazlaştırılması ve Aspen HYSYS Programı ile Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 103 s.
- Obernberger, I., Thonhofer, P., Reisenhofer E. (2002). Description and evaluation of the new 1,000 kWel Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz, Austria. *Euroheat & Power*, Volume 10/2002, pp.18-25.
- Onovwiona, H.I., Ugursal, V.I. (2006). Residential cogeneration systems: review of the current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10 (5): 389–431.
- Oral, F., Behçet, R., Aykut, K. (2014). Hidroelektrik santral rezervuar verilerinin enerji üretimi amaçlı değerlendirilmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (2): 29-38.
- Önal, A.S., Etemoğlu, A.B., Can, M. (2017). Düşük sıcaklıklı atık akışkan destekli Organik Rankine Çevrimlerinin optimizasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 22, Sayı 2.
- Özbay, E., Gençoğlu, M.T. (2009). Hidroelektrik santrallerin modellenmesi. V. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, YEKSEM'09, s. 108-115, 19-21 Haziran 2009, Diyarbakır.
- Özcan, H.K. (2009). Katı Atık Düzenli Depolama Gazlarının Genetik Algoritmalarla Modellenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 131 s.
- Özden, M., Çelik, B., Açikel, H.H. Genç, M. S. (2015). Rüzgar Türbini kanadında akış kaynaklı deformasyonlarının sayısal ve deneysel incelenmesi. 3. *İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi*, s. 113-125, 8-10 Ekim 2015, İzmir.
- Öztürk, İ. (2015a). *Katı Atık Yönetim ve AB Uyumlu Uygulamaları*. İSTAÇ A.Ş. Teknik Kitaplar Serisi 2, 3.baskı, ISBN: 978–605–63269–3–6, İstanbul 456 s.
- Öztürk, İ., Arıkan, O., Altınbaş, M., Alp, K., Güven, H. (2015b). *Katı Atık Geri Dönüşüm ve Arıtma Teknolojileri (El Kitabı)*. Türkiye Belediyeler Birliği, ISBN: 978-605-9186-00-1, Ankara, 298 s.
- Öztürk, H.H. (2017). Güneş enerjisinden fotovoltaik yöntemle elektrik üretiminde güç dönüşüm verimi ve etkili etmenler. V. *Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi*. 18-21 Ekim 2017, İzmir.

- Özyurtkan, M.H. (2006). Melez Kavağın Karbonizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, İstanbul, 86 s.
- Palabıyık, H. (2001). Belediyelerde Kentsel Katı Atık Yönetimi: İzmir Büyükşehir Belediyesi Örneği. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kamu Yönetimi Anabilim Dalı, İzmir, 484 s.
- Pektezel, O. (2019). Organik Rankine Çevrimi Destekli Soğutma Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sivas, 105 s.
- Pirotta, F.J.C., Ferreira, E.C., Bernardo, C.A. (2013). Energy recovery and impact on land use of Maltese municipal solid waste incineration. *Energy*, 49: 1–11.
- Pravadalıoğlu, S. (2011). Yerinde Enerji Üretimi - Kojenerasyon Sistemleri. EMO, İzmir.
- Prando, D., Renzi, M., Gasparella, A., Baratieri, M. (2015). Monitoring of the energy performance of a district heating CHP plant based on biomass boiler and ORC generator. *Applied Thermal Engineering*, 79: 98–107.
- REN21 (Renewable Energy Policy Network For The 21st Century), (2018). Renewables 2018 Global Status Report. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2018\\_Full-Report\\_English.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2018_Full-Report_English.pdf) (22.08.2019).
- RG: 14.3.1991 – 20814. T.C. Resmi Gazete, *Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği*, Çevre Bakanlığı.
- RG: 27.12.2007 – 30283. T.C. Resmi Gazete, *Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği*, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- RG: 05.07.2008 – 26927. T.C. Resmi Gazete, *Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik*, Çevre ve Orman Bakanlığı.
- Roy, J.P., Mishra, M.K., Misra, A. (2010). Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using Organic Rankine Cycle. *Energy*, 35 (12): 5049–5062.
- Sağlam, M., Uyar, T.S. (2005). Dalga enerjisi ve Türkiye'nin dalga enerjisi teknik potansiyeli. III. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, YEKSEM 2005, s. 275-279, 19-21 Ekim 2005, Mersin.
- Saltabaş, F., Soysal, Y., Yıldız, Ş., Balahorli, V. (2011). Municipal solid waste thermal disposal methods and its applicability in Istanbul. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 3: 109-116.
- Sayar, Ş. (2012). Sakarya İli Entegre Atık Yönetimi ve Ambalaj Atıklarının Geri Dönüşümü. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 99 s.

- Sedef, M. (2016). Katı Atık Yönetimi. Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü, Ankara, 114/117 s.
- Selici, T., Utlu, Z., İlten, N. (2005). Enerji kullanımının çevresel etkileri ve sürdürülebilir gelişme açısından değerlendirilmesi., *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, YEKSEM 2005, 19-21 Ekim 2005, Mersin.
- Seydioğulları, H.S. (2013). Sürdürülebilir kalkınma için yenilenebilir enerji. *Planlama Dergisi*, 23 (1): 19-25.
- Söğüt, M.Z., Karakoç, H. (2013). Klimalarda enerji verimliliği sınıflandırılmasında farklı bir yaklaşım: ekserjetik verimlilik oranı ve çevresel etki oranı. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 135: 50-60.
- Su, W., Zhao, L., Deng, S. (2017). Simultaneous working fluids design and cycle optimization for Organic Rankine Cycle using group contribution model. *Applied Energy*, 202: 618-627.
- Sufian, M. A., Bala, B. K. (2006). Modelling of electrical energy recovery from urban solid waste system: the case of Dhaka city. *Renewable Energy*, 31 (10): 1573–1580.
- Sun, J., Li, W. (2011). Operation optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) heat recovery power plant. *Applied Thermal Engineering*, 31 (11-12): 2032–2041.
- Soysal, Y. (2015). Yerel Yönetimler İçin Evsel Katı Atık Tarifelerinin Belirlenmesi Üzerine Geliştirilen Bir Hesap Yöntemi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 151 s.
- Şahin, B. (2016). Yenilenebilir Enerji Dönüşüm Sistemleri, Atatürk Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi, [https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2016/%C4%B0SG120/366467081\\_makine-ve-techizat-unite-10-www.isgbolumu.com\\_.pdf](https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2016/%C4%B0SG120/366467081_makine-ve-techizat-unite-10-www.isgbolumu.com_.pdf) (18.07.2018).
- Şahinkaya, S., (2014). Çevre Mühendisliğine Giriş ders notları, NEVÜ. Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Bölümü. <https://dosyalar.nevsehir.edu.tr/6824f0d123838d5cf74fcd6e046db127/cevre-muhendisligine-giris-ders-notlari.pdf> (23.02.2019).
- Şekkeli, M., Keçecioglu, Ö. F. (2011). Hidroelektrik santrallerin Türkiye'deki gelişimi ve Kahramanmaraş bölgesi örnek çalışması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (2): 19-26.
- Şendoğan, H. (2019). Türkiye İçin CO<sub>2</sub> Emisyonu, İktisadi Büyüme ve Enerji Talebi Arasındaki İlişkinin Analizi: Çevresel Kuznets Eğrisi Yaklaşımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ekonometri Anabilim Dalı, İstanbul, 82 s.

- Tabasaran, O. (2016). *Katı Atık Yönetimi ve Teknolojileri*. İSTAÇ Teknik Kitaplar Serisi 7, ISBN:978-605-63269-8-1, İstanbul, 776 s. .
- Taşar, Ş. (2011). Mobilya Fabrikası Atık Tozunun Pirolyzi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ, 120 s.
- Tchnache, B.F., Pétrissans, M., Papdakis, G. (2014). Heat resources and organic Rankine cycle machines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1185–1199.
- Tiftik, B.E. (2006). Çay Fabrikası Atığının Pirolyzi ve Pirolyz Ürünlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 136 s.
- Tıraş, H.H. (2012). Sürdürülebilir kalkınma ve çevre: Teorik bir İnceleme. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 2 (2): 57-73.
- Topal, M., Arslan, E.I. (2008). Biyokütle enerjisi ve Türkiye. VII. *Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, UTES'2008, s. 241-248, 17-19 Aralık 2008, İstanbul.
- Topal, M., Arslan Topal, E.I. (2012). Ürün bitkilerinden yenilenebilir enerji kaynağı biyokütle enerjisi potansiyelinin belirlenmesi: Afyonkarahisar ili Örneği (2006-2010). *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12 (2): 1-11.
- Torunoğlu Gedik, Ö. (2015). Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Çevresel Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 178 s.
- Tosun, C. (2013). Ara Soğutmalı İki Kademeli Transkritik CO<sub>2</sub> Soğutma Çevrimi İçin Optimum Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 98 s.
- Tutar, F., Eren, M.V., (2011). Geleceğin enerjisi: Hidrojen ekonomisi ve Türkiye. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (6).
- Uddin, M. N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., Ashrafur, S. M. (2018). An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies. *Energies*, 11 (11): 3115.
- Ustaoğlu, A., Alptekin, M. (2016). Energetic and exergetic approach to a geothermal energy powered Organic Rankine Cycles. *2th International Conference on Engineering and Natural Sciences*, ICENS 2016, s. 2243-2249, 24-28 May 2016, Sarajevo, Bosnia.
- Ustaoğlu, A., Alptekin, M., Akay, M.E. (2017). Thermal and exergetic approach to wet type rotary kiln process and evaluation of waste heat powered Organic Rankine Cycle (ORC). *Applied Thermal Engineering*, 112: 281-295.

- Ustaoğlu, A. (2020). Parametric study of absorption refrigeration with vapor compression refrigeration cycle using wet, isentropic and azeotropic working fluids: conventional and advanced exergy approach. *Energy*, 117491.
- Uygur Onbaşıoğlu, S. (2011). Enerji dönüşümlerinin kullanılabilirlik ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi. *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, TESKON 2011, s. 5-14, 13-16 Nisan 2011, İzmir.
- Üçgül, İ., Akgül, G. (2010). Biyokütle teknolojisi. *SDÜ Yekarum e-Dergi*, 1 (1): 3-11.
- Üçgül, İ., Elibüyük, U. (2016). Okyanus Termal Enerji Dönüşüm (OTEC) sistemi. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (1): 87-94.
- Verschoor, M.J.E., Brouwer, E.P. (1995). Description of the SMR Cycle, which combines fluid elements of steam and Organic Rankine Cycle. *Energy*, 4 (20): 295-304.
- Vijayaraghavan, S., Goswami, D. Y. (2005). Organic working fluids for a combined power and cooling cycle. *Journal of Energy Resources Technology*, 127 (2): 125.
- Wei, D., Lu, X., Lu, Z., Gu, J. (2007). Performance analysis and optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 48 (4): 1113–1119.
- Yağlı, H. (2014). Baca Gazı Atık Isısı İçin Organik Rankine Çevrimi Tasarımı ve Ekserji Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay, 82 s.
- Yağlı, H. (2018). Basit ve Rejeneratif Organik Rankine Çevrimi (ORC) Tasarımları Kullanılarak Biyogaz Yakıtlı Isı-Güç Kombine (CHP) Motorunun Atık Isısının Geri Dönüştürülebilirliği, Enerji ve Ekserji Analizi. Doktora Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay, 151 s.
- Yaşar, N. (2011). Kentsel Enerji Politikaları Bağlamında Konutlarda Enerji Verimliliği Algısı: Isparta Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kamu Yönetimi Anabilim Dalı, Isparta, 122 s.
- Yaydırgan, T. (2018). Mahalli İdareler İçin Evsel Katı Atık Tarife Belirleme Yöntemi. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ, 144 s.
- Yıldız, Ş., Ölmez, E., Kiriş, A. (2009). Kompost teknolojileri ve İstanbul'daki uygulamaları. *Kompostlaştırma Sistemleri ve Kompostun Kullanım Alanları Çalıştayı*, s. 1-12, 18- 19 Haziran 2009, İstanbul.
- Yılmaz, A. (2012). Türkiye'de Sektörel Enerji Tüketimini Etkileyen Faktörler ve Alternatif Enerji Politikaları. Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, Aydın, 178 s.

- Yılmaz, F. (2013). Güneş Çanaklı Organik Rankine Çevriminin Isparta Şartlarında İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 111 s.
- Yılmaz, F., Selbaş, R., Balta, M.T. (2015). Güneş enerjisi destekli Organik Rankine Çevriminin ekserji analizi. *Electronic Journal of Machine Technologies*, Vol: 12, No: 4, pp. 39-50.
- Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2): 33-54.
- Yılmaz, O. (2015). Yenilenebilir Enerjiye Yönelik Teşvikler ve Türkiye. Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Maliye Anabilim Dalı, Aydın, 189 s.
- Yöntem, M. A. (2011). Küçük ölçekli kojenerasyon sistemlerinin verimliliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Isparta, 120 s.
- Yüksel, F., Goza, M. (2014). Kojenerasyon sistemleri ve uygulamalı ekonomik analizi: hastane örneği, *Mühendis ve Makina*, Cilt 55, Sayı 651, s. 43-49.
- Yüksel, I., Kaygusuz, K. (2011). Renewable energy sources for clean and sustainable energy policies in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (8): 4132-4144.
- Yürümezoğlu, K., Ayaz, S., Çökelez, A. (2009). İlköğretim ikinci kademe öğrencilerinin enerji ve enerji ile ilgili kavramları algılamaları. *Necatibey Eğitim Fakültesi Elektronik Fen ve Matematik Eğitimi Dergisi*, 3 (2): 52-73.
- Zhang, Y., Liang, T., Yang, C., Zhang, X., Yang, K. (2020). Advanced exergy analysis of an integrated energy storage system based on transcritical CO<sub>2</sub> energy storage and Organic Rankine Cycle. *Energy Conversion and Management*, 216, 11293

